

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

Робототехника и Искусственный Интеллект

Материалы VII Всероссийской
научно-технической конференции

г. Железногорск, 11 декабря 2015 г.

Под научной редакцией В.А. Углева

Электронное издание

Железногорск
СФУ
2015

УДК 004.896
ББК 32.816
P584

P584 Робототехника и искусственный интеллект: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Железногорск, 11 декабря 2015 г.) [Электронный ресурс] / под науч. ред. В.А. Углева. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – 194 с.

Систем. требования: РС не ниже класса Pentium 1; 128 Мб RAM; Windows 98/XP/7; Adobe Reader V8.0 и выше. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7638-3411-6

Сборник включает тексты докладов участников конференции по различным вопросам робототехники и искусственного интеллекта.

Основными темами конференции стали мехатроника, системы искусственного интеллекта при управлении роботами, формирование баз знаний и интеллектуальных алгоритмов, экстремальная и образовательная робототехника, а также модели симуляции работы мозга.

Представляет интерес для научных работников, аспирантов, преподавателей вузов, магистрантов, студентов и школьников.

УДК 004.896
ББК 32.816

© Сибирский федеральный
университет, 2016

Электронное научное издание

Подготовлено к публикации издательством
Библиотечно-издательского комплекса

Подписано в свет 18.02.2016. Заказ № 146
Тиражируется на машиночитаемых носителях

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1

Робототехнические системы и комплексы, мехатроника 7

- Горбцов А.С., Андреев А.Е., Мохов А.С., Тарасов П.С. (Волгоград)*
Синтез локомоции шагания антропоморфного робота 8
- Губанков А.С., Горностаев И.В. (Владивосток)*
Разработка метода синтеза систем формирования скорости динамических объектов 13
- Данилов И.Ю., Афанасьев И.М., Магид Е.А. (Иннополис)*
Автоматизированные системы для увеличения длительности полета электрических мультикоптеров 19
- Кондратьев К.В., Сергеевич В.Н., Двирный В.В. (Железногорск)*
Использование пьезоактуаторов в основе подъемных механизмов 25
- Никулин И.Ю. (Железногорск)*
Оценка точности установки компонентов и нанесения покрытий при изготовлении печатных плат 29
- Паткин М.Л. (Самара)*
Построение коммуникационной системы роящихся автономных роботов со способностью к оценке расстояния 35
- Хусаинов Р.Р., Шимчик И.А., Афанасьев И.М., Магид Е.А. (Иннополис)*
Модель системы управления бипедального робота в Matlab/Simulink, основанная на методе базовых компонент ходьбы 41

Секция 2

Специальная робототехника..... 47

- Богданов А.А. (Москва), Кутлубаев И.М. (Магнитогорск),
Пермяков А.Ф., Попова Е.В., Сычков В.Б. (Москва)*
Основы построения специальных роботов для работы на космических аппаратах 48
- Двирная К.М., Каримова Е.Н. (Железногорск)*
Механическое устройство раскрытия главного зеркала системы инфракрасного телескопа «Миллиметрон» 54

<i>Емельянов С.Г., Курочкин А.Г., Гривачев А.В., Лоторев П.В., Шиленков Е.А., Шевченко М.А. (Курск)</i> Система интеллектуального передвижения гусеничной платформы	58
<i>Крючков Б.И. (Звездный городок), Толстель О.В. (Калининград), Усов В.М. (Звездный городок)</i> Модель внешнего мира антропоморфного робота для мониторинга его позиционирования на МКС.....	62
<i>Ярков И.С., Яркова Е.А. (Железногорск)</i> Использование контурных тепловых труб в системах охлаждения роботизированных комплексов	68

Секция 3

Системы искусственного интеллекта

в управлении роботами

и в промышленной автоматизации

<i>Добронец Б.С. (Красноярск)</i> Оценки погрешности численного моделирования в условиях стохастической неопределенности	73
<i>Егорова Д.В., Егоров Н.А. (Красноярск)</i> Решение обратной задачи кинематики для манипулятора методом Ньютона.....	74
<i>Картель Д.М., Углев В.А. (Железногорск)</i> Управление электромагнитным полем при литье металлических изделий повышенной прочности	83
<i>Лопатин П.К. (Красноярск)</i> Алгоритм формирования множества конфигураций манипуляционного робота около текущей	86
<i>Пичкалев А.В. (Железногорск)</i> Разработка программного обеспечения робототехнических комплексов с использованием графического языка ДРАКОН	90
<i>Туманян А.Г., Барцев С.И. (Красноярск)</i> Автоматическая выработка поведенческого паттерна при нахождении цели рукой-манипулятором робота	95
<i>Филаретов В.Ф., Жирибок А.Н., Зуев А.В., Проценко А.А. (Владивосток)</i> Подсистема аккомодации к дефектам системы счисления пути автономного подводного робота.....	101

Секция 4

Алгоритмы искусственного интеллекта и базы знаний 107

Давыдов О.И., Платонов А.К. (Москва)

Комплексная карта операционной среды робота 108

Сарин К.С., Ходашинский И.А., Горбунов И.В. (Томск)

О влиянии выбора метрики расстояния на адекватность кластеризации данных 115

Сониц О.К. (Томск)

Оптимизация параметров нечетких аппроксиматоров алгоритмами «Нелдера – Мидда» и «Великий потоп» 120

Субханкулова С.Р. (Томск)

Идентификация параметров нечетких классификаторов с помощью алгоритма «Минный взрыв» и метода Хука – Дживса 125

Тюгашев А.А. (Санкт-Петербург)

Визуальный конструктор правил базы знаний реального времени 131

Ходашинский И.А., Мех М.А. (Томск)

Алгоритм гармонического поиска для оптимизации параметров нечетких классификаторов 137

Яковлев К.С. (Москва)

Об одном методе декомпозиции в задаче планирования траектории 141

Секция 5

Программная и аппаратная симуляции работы мозга 147

Гаврилов А.В., Канглер В.М. (Новосибирск)

Нейроморфные технологии: состояние и перспективы развития 148

Романов Е.Л. (Новосибирск)

Программная модель импульсной нейронной сети 155

Секция 6

Образовательная робототехника 161

Бондарев В.Н., Сметанина Т.И. (Севастополь)

Гибридная экспертно-обучающая система производственного типа 162

Зорькин К.Ф., Богданович М.С. (Красноярск)

Дистанционное управление роботом в среде NXT-G 168

<i>Клинов А.А. (Железногорск)</i> Разработка многовариантного макета станка с ЧПУ для обучения специалистов	173
<i>Новицкая Ю.В., Гаврилов А.В. (Новосибирск)</i> Система мониторинга умной учебной лаборатории	177
<i>Филимонов В.А. (Омск)</i> Когнитивный иммунитет как проблема и когнитивная инфраструктура как ресурс	183
<i>Углев В.А. (Железногорск)</i> Методика формирования индивидуальных норм контроля в интеллектуальных автоматизированных обучающих системах	187

Секция 1

**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ,
МЕХАТРОНИКА**

А.С. Горобцов, д.т.н., профессор, vm@vstu.ru
А.Е. Андреев, д.т.н., доцент, andan2005@yandex.ru
А.С. Мохов, к.т.н., м.н.с., alexander.mokhov@gmail.com
П.С. Тарасов, студент, tarasradio@mail.ru
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

СИНТЕЗ ЛОКОМОЦИИ ШАГАНИЯ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА

Аннотация. Рассматривается синтез управляемого движения шагающих роботов на основе метода обратной задачи. Приводится описание применения метода к шагающим роботам различного вида. Представлены теоретические и экспериментальные результаты управления роботомандроидом AR-600E.

Ключевые слова: робототехника, шагающие роботы, управление

SYNTHESIS OF LOCOMOTION STEPPING AN ANTHROPOMORPHIC ROBOTIC SYSTEMS

A.S. Gorobtsov, Ph.D., professor, vm@vstu.ru
A.E. Andreev, Ph.D., andan2005@yandex.ru
A.S. Mokhov, Ph.D., alexander.mokhov@gmail.com
P.S. Tarasov, student, tarasradio@mail.ru
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Abstract. The synthesis of control motion of walking robots, based on the inverse dynamics method. A description of the method for walking robots of various kinds is investigated. Presented theoretical and experimental results for robotandroid AR-600E.

Keywords: robotics, CLAWAR, control

Основным методом синтеза управляемого движения многозвенных механических систем является метод обратной задачи [1–3], позволяющий получать параметры управления для реализации требуемого закона движения в общем случае. Стандартная процедура метода обратной задачи сводится к определению кинематических параметров движения пространственной механической системы, которые можно получить из следующей системы дифференциально-алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} M\ddot{x} - D^T p - D_w^T p_w = f(\dot{x}, x, t), \\ D\ddot{x} = h(\dot{x}, x), \\ D_w \ddot{x} = \ddot{w}(t). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь x – вектор обобщенных координат всей системы размерностью n , M – матрица инерции, $f(\dot{x}, x, t)$ – вектор внешних сил, D – матрица переменных коэффициентов уравнений связей от кинематических пар размерностью $k \times n$, $h(\dot{x}, x)$ – вектор правых частей уравнений связей, p – вектор множителей Лагранжа соответствующих кинематическим парам. Управление системой сводится к перемещению ее точек по траекториям $w(t)$, найденным, например, методами оптимального управления. D_w – матрица переменных коэффициентов уравнений связей для точек, движение которых задано функциями $w(t)$, p_w – вектор множителей Лагранжа, соответствующих программным траекториям $w(t)$.

Из уравнения (1) получаются программные значения обобщенных координат, через которые можно определить программные движения приводов. Программные движения приводов позволяют организовать управление по отклонению

$$u_i(t) = p_{0i}(t) + c_i \dot{\delta}_i(t) + k_i \delta_i(t). \quad (2)$$

Здесь $u_i(t)$ – сила в приводе, p_{0i} , c_i , k_i – программные силы в приводах и коэффициенты ПД регулятора, $\delta_i(t)$ – разница между программным и измеренным значениями.

В (2) включены программные силы приводов, которые значительно улучшают качество управления, их можно определить из уравнения

$$\begin{cases} M\ddot{x} - D_0^T p_0 = f(\dot{x}^*, x^*, t) - M\ddot{x}^* + D^T p, \\ D\ddot{x} = h(\dot{x}^*, x^*), \\ D_0 \ddot{x} = h_0(\dot{x}^*, x^*). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь x^* , \dot{x}^* , \ddot{x}^* – перемещения, скорости и ускорения в текущий момент времени, полученные из (1), D_0 – матрица коэффициентов связей, соответствующих замороженным степеням свободы кинематических пар, $h(\dot{x}^*, x^*)$ – вектор правых частей этих уравнений связей, рассчитанный по значениям перемещений и скоростей из (1), p_0 – вектор множителей Лагранжа для замороженных кинематических пар, p – значения множителей Лагранжа соответствующие (1).

Прямое решение уравнения типа (1) широко используется в анимационных модулях графических программ, однако дает достаточно сильно искаженное, нереалистичное движение. Использование управления с учетом программных сил дает более реалистичное изображение, однако на практике не используется из-за сложности программирования. На рис. 1 показано сравнительное движение шагающих машин, анимация которых построена с помощью уравнений (1) и (3).

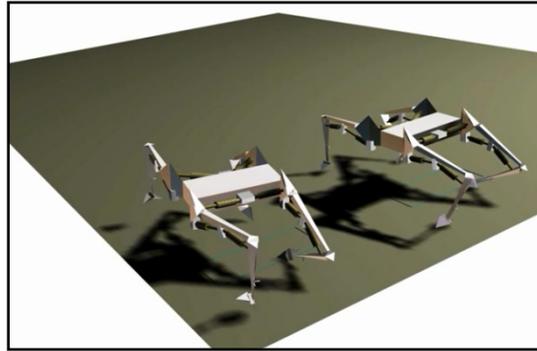


Рис. 1. Сравнительное движение шагающих машин
(<https://cloud.mail.ru/public/97Rn/6f4amG8yd>)

Для реализации управления шагающим роботом на основе системы (1) и уравнения (2) в последнем уравнении связей системы (1) должно содержаться три типа уравнений — уравнения, определяющие движение корпуса шагающего робота, уравнения, задающие движение точек стоп шагающих движителей и уравнения, обеспечивающие устойчивость положения робота:

$$\begin{cases} D_{wb} = w_b \\ D_{wf} = w_f \\ D_{ws} = w_s. \end{cases} \quad (4)$$

Функция w_b задает программное перемещение точек корпуса робота, w_f — перемещение точек стоп шагающих движителей, w_s — перемещение некоторых вспомогательных точек.

Общее требование к уравнениям связи (4) — матрица D_w должна быть матрицей полного ранга, т. е. в системе не должно быть избыточных связей. Избыточные связи, как правило, не удается исключить соответствующим выбором уравнений связей. Общепринятый прием, который используется в технике — увеличение числа степеней свободы системы, например, дифференциалы в трансмиссиях автомобилей. Отметим, что увеличение числа степеней свободы ведет к значительному усложнению конструкции машин, что, тем не менее, необходимо для обеспечения их работоспособности. Можно предположить, что у животных дополнительные степени свободы обеспечиваются за счет многосвязности позвоночника.

Решение уравнений вида (1) реализовано в программном комплексе моделирования динамики связанных систем тел ФРУНД. Для синтеза управляемого движения разработаны специальные программные модули, реализующие вычисление функций w_b , w_f , w_s . Функция w_b содержит шесть компонент и определяет пространственное перемещение корпуса. Параметры этой функции могут быть непосредственно использованы для управления роботом через их задание с помощью его органов управления. Функция w_f задает движение точек шагового движителя с учетом кинематических параметров характерных точек корпуса робота, в частности, точек крепления ша-

гающего движителя к корпусу. Функция неявно зависит от , что необходимо для планирования параметров шага. В качестве параметров содержит максимальную длину шага, минимальный период шага, фазу относительно опорной стопы (количество стоп не ограничено). Направление и текущая длина шага вычисляются в зависимости от параметров движения корпуса. На рис. 2 приведен типичный график вертикальной компоненты функции . Разработанные программные модули вычисления позволяют генерировать программное движение для различных шагающих роботов — (рис. 1, 3).

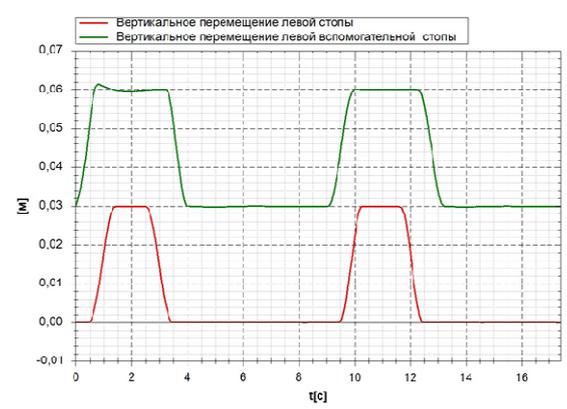


Рис. 2. Типичный вид вертикальной компоненты функции .

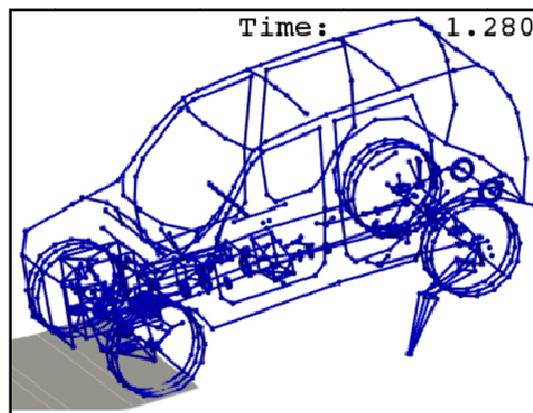


Рис. 3. Использование шагающего движителя для колесного транспортного средства(<https://cloud.mail.ru/public/N1kp/5AM8W1kwW>)

Разработанное программное обеспечение было использовано для синтеза движения робота андроида AP600 (рис. 4). Генерация программного движения осуществлялась на компьютерной многотельной модели (рис. 5).

Для стабилизации движения робота использовались уравнения связей, обеспечивающие поперечное перемещение ц. м. тела в зависимости от положения опорной ноги. Такой принцип в литературе носит название метода нулевого момента [2] и сводится к выполнению условия расположения точки приложения главного вектора сил реакции в стопе внутри ее периметра. Для

формирования такого уравнения связей в модель введены вспомогательные тела, движение которых заданным образом синхронизировалось с вертикальным движением стоп (рис. 2). Построенное таким образом программное движение позволило реализовать шагание робота с постоянной скоростью (см. рис. 4).

Таким образом, рассмотренные метод и программные средства позволяют синтезировать управление движением шагающих машин различной структуры в статически устойчивом и неустойчивом режимах.

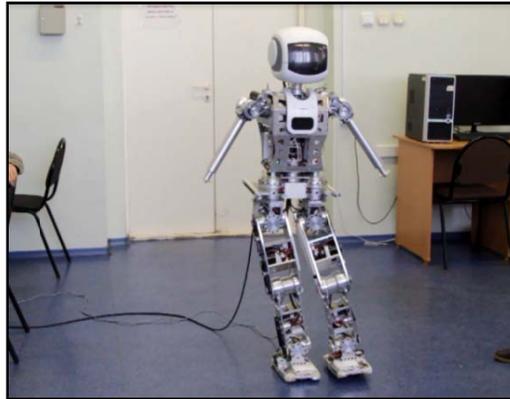


Рис. 4. Устойчивое перемещение антропоморфного робота (<https://cloud.mail.ru/public/NoWi/choJoqWBS>)

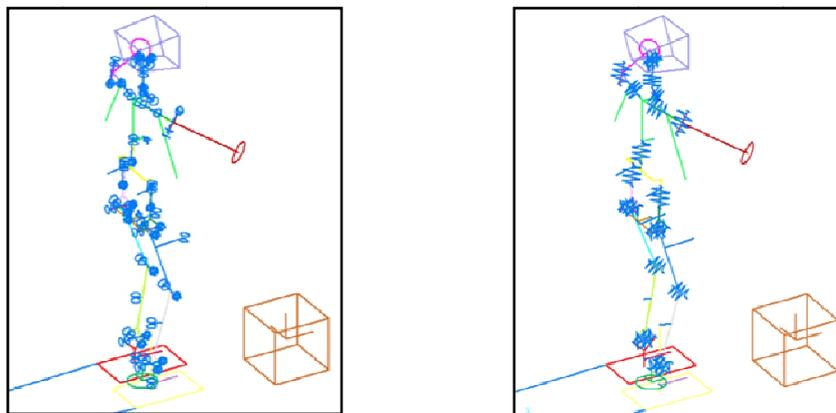


Рис. 5. Схема компьютерной модели андроида, использованной для генерации программного движения: слева — кинематическая схема, справа — схема приводов

Список литературы

1. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели/ П.Д Крутько. – М.: Наука, 1988.
2. Vukobratovic M., Borovac B. / Biped locomotion dynamics, stability, in: Control and Application, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
3. Горобцов А.С., Климов С.Ю., Гетманский В.В. //Parallel Inverse Dynamics Method for Synthesis of Control Movement of Multidimensional Walking Robot. - 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (IEEE ICMA 2009), Changchun, Jilin, China, August 9-12, 2009.

А.С. Губанков, к.т.н., gubankov@iacp.dvo.ru
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия
И.В. Горностаев, магистрант, dartet@inbox.ru
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА СИСТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. В докладе представлены результаты разработки метода синтеза систем формирования скорости динамических объектов вдоль заданных параметрическими сплайнами третьего порядка пространственных траекторий. В работе получены аналитические выражения, описывающие зависимость скорости изменения параметра (параметрического времени) от закона изменения желаемой скорости с учетом информации о виде траектории. Указанные выражения позволяют перемещать программную точку вдоль траектории точно с требуемой скоростью. Описанный подход не требует выполнения итерационных расчетов и позволяет выполнять все необходимые вычисления в реальном масштабе времени даже на маломощных бортовых компьютерах различных роботов и робототехнических комплексов.

Ключевые слова: динамический объект, формирование траектории, программная скорость, параметрический сплайн, мехатроника, робототехника

DEVELOPING OF SYNTHESIS METHOD OF SYSTEMS OF FORMING SPEED FOR DYNAMIC OBJECTS

A.S. Gubankov, Ph.D., gubankov@iacp.dvo.ru
Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Russia
I.V. Gornostaev, master student, dartet@inbox.ru
Far Eastern Federal university, Vladivostok, Russia

Abstract. This report presents the results of the development of method of synthesis of systems of speed formation for dynamic objects along trajectories described by third order parametric splines with the desired speed. Analytical expressions describing the dependence of the rate of change of the parameter (parametrical time) from the laws of change of given speed and information about the parametric form of a trajectories are obtained. They allow moving the program point along the trajectory accurately at a given speed. The described approach does not require iterative calcula-

tions and allows to perform all necessary calculations in real-time even on various low-power onboard computers of robots and robotic complexes.

Key words: dynamic object, trajectory forming, set speed, parametric spline, mechatronics, robotics

Введение

В процессе управления различными мехатронными объектами (МО) (автономными подводными аппаратами, многостепенными манипуляторами и т. д.) [1-3] требуется формировать программные траектории их движений. В работе [4] предложен способ, позволяющий формировать траектории перемещения программной точки с заданной скоростью. Эти траектории описываются аналитическими выражениями вида $y = f_y(x)$ и $z = f_z(x)$, где x , y и z – элементы трехмерной системы координат, которые часто бывают достаточно сложными. Особенно при задании замкнутых траекторий.

В связи с этим на практике удобно использовать параметрические сплайны Безье третьего порядка, которые представляют собой полиномы третьей степени [5–7], зависящие от параметра τ , где $\tau \in [0,1]$ – нормированное время. Для траекторий, задаваемых в виде параметрических полиномов (сплайнов), разработан алгоритм [8], применение которого позволяет за несколько итераций рассчитывать положение каждой следующей программной точки. В результате удается перемещать эту точку вдоль траектории со скоростью, близкой к задаваемому значению. Но, ввиду сложности, использование этого алгоритма возможно только при управлении инерционными объектами, имеющими большую постоянную времени.

В целом проведенный анализ показал, что разработка метода перемещения программной точки вдоль произвольных пространственных траекторий, формируемых с помощью параметрических сплайнов с заданной скоростью, до сих пор является важной и актуальной задачей.

Целью данной работы является создание метода, позволяющего синтезировать легко реализуемые системы управления, обеспечивающие перемещения программной точки вдоль пространственных траекторий движения различных МО, задаваемых в виде параметрических сплайнов третьей степени, точно с заданной скоростью. Этот метод не должен требовать выполнения итерационных расчетов, позволяя формировать необходимые управляющие сигналы в реальном масштабе времени даже на маломощных бортовых компьютерах этих объектов.

Формирование желаемой траектории и закона изменения скорости движения мехатронного объекта

Траекторию движения программной точки, состоящую из K сплайнов Безье, можно описать параметрическими полиномами третьей степени [9]:

$$\begin{aligned} x^*(\tau) &= A_{k,x} \cdot \tau^3 + B_{k,x} \cdot \tau^2 + C_{k,x} \cdot \tau + D_{k,x}, \\ y^*(\tau) &= A_{k,y} \cdot \tau^3 + B_{k,y} \cdot \tau^2 + C_{k,y} \cdot \tau + D_{k,y}, \quad k = \overline{1, K}, \\ z^*(\tau) &= A_{k,z} \cdot \tau^3 + B_{k,z} \cdot \tau^2 + C_{k,z} \cdot \tau + D_{k,z}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x^*(\tau)$, $y^*(\tau)$, $z^*(\tau)$ – координаты программной точки (ПТ) в абсолютной системе координат (СК); $A_{k,x}$, $A_{k,y}$, $A_{k,z}$, $B_{k,x}$, $B_{k,y}$, $B_{k,z}$, $C_{k,x}$, $C_{k,y}$, $C_{k,z}$, $D_{k,x}$, $D_{k,y}$, $D_{k,z}$ – коэффициенты k -го сплайна при соответствующих степенях параметра $\tau \in [0,1]$, изменяющегося во времени t и определяющего положение ПТ на сплайне, перемещающейся от начала (при $\tau = 0$) до конца (при $\tau = 1$) сплайна. Скорость движения ПТ определяется только скоростью изменения параметра τ .

Обычно положением ПТ на каждом отдельном сплайне управляют, равномерно изменяя параметр τ от 0 до 1. При этом скорость перемещения указанной точки явно не определяется, что недопустимо при выполнении ряда технологических операций.

Для перемещения ПТ вдоль траектории (1) с желаемой скоростью v_d необходимо определить ее зависимость от $\dot{\tau}$, которую можно получить, продифференцировав уравнение (1) по времени

$$\begin{aligned} \dot{x}^*(\tau) &= F_x(\tau) \cdot \dot{\tau}, \\ \dot{y}^*(\tau) &= F_y(\tau) \cdot \dot{\tau}, \\ \dot{z}^*(\tau) &= F_z(\tau) \cdot \dot{\tau}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } F_x(\tau) = \frac{dx^*(\tau)}{d\tau} = (3 \cdot A_{k,x} \cdot \tau^2 + 2 \cdot B_{k,x} \cdot \tau + C_{k,x}),$$

$$F_y(\tau) = \frac{dy^*(\tau)}{d\tau} = (3 \cdot A_{k,y} \cdot \tau^2 + 2 \cdot B_{k,y} \cdot \tau + C_{k,y}),$$

$$F_z(\tau) = \frac{dz^*(\tau)}{d\tau} = (3 \cdot A_{k,z} \cdot \tau^2 + 2 \cdot B_{k,z} \cdot \tau + C_{k,z}).$$

Учитывая, что $\dot{x}^{*2}(\tau) + \dot{y}^{*2}(\tau) + \dot{z}^{*2}(\tau) = v_d^2$, вместо (2) можно записать

$$v_d^2 = (F_x^2(\tau) + F_y^2(\tau) + F_z^2(\tau)) \cdot \dot{\tau}^2$$

и в итоге получить закон формирования $\dot{\tau}$ с учетом желаемой скорости v_d

$$\dot{\tau} = \frac{\pm v_d}{\sqrt{F_x^2(\tau) + F_y^2(\tau) + F_z^2(\tau)}}, \quad (3)$$

где знак «+» определяет перемещение ПТ от начала сплайна $P_{k,0}$ к его концу $P_{k,3}$, а «-» – движение в обратную сторону.

Структурная схема устройства, формирующего сигналы $x^*(t)$, $y^*(t)$, $z^*(t)$ с учетом v_d , показана на рис. 1, где RB – блок расчета $(x^*, y^*, z^*)^T$ согласно соотношениям (1). При выполнении равенства $\tau = 1$ интегратор обнуляется.

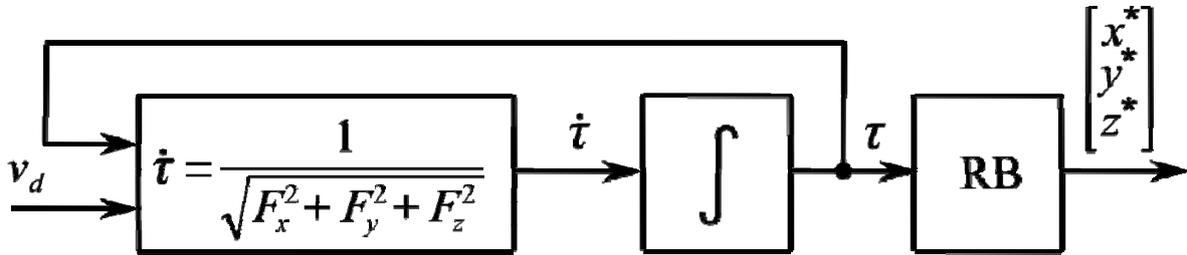


Рис.1. Структурная схема определения текущего положения ПТ

Использование полученных выражений позволяет перемещать программную точку вдоль параметрической кривой с требуемой скоростью v_d .

Необходимо отметить, что указанный закон настройки (3) не приведет к искажению желаемой траектории, а только скорректирует скорость при движении по этой траектории.

Результаты численного моделирования разработанной системы

Для оценки эффективности разработанного метода формирования скорости и траектории движения МО или его РИ по произвольно задаваемой гладкой пространственной траектории было проведено моделирование в среде MATLAB на примере нескольких траекторий (рис. 2).

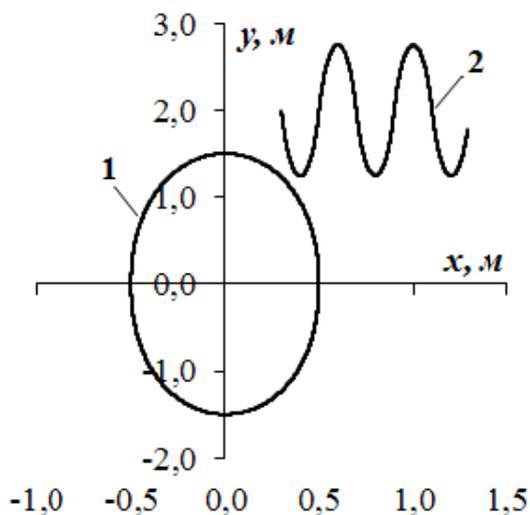


Рис. 2. Траектории движения МО

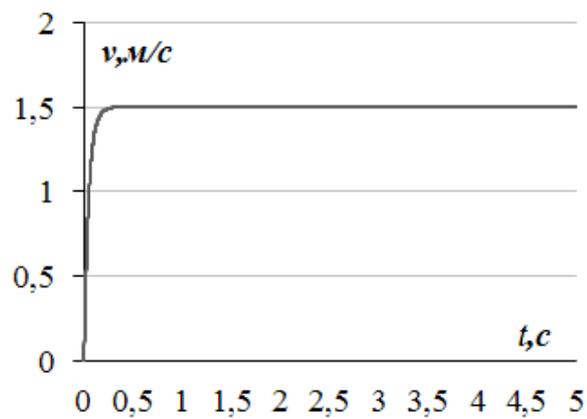


Рис. 3. Желаемая и реальная скорости

Желаемая скорость v_d была принята равной 1,5 м/с. На рис. 3 представлены законы изменения заданной v_d и реальной скорости. Из рис. 3 следует, что эти графики совпадают. На рис. 4, а и 4, б представлены зависимости изменения сигналов $x^*(t)$, $y^*(t)$, $z^*(t)$ от времени вдоль траекторий 1 и 2 (рис. 2) соответственно.

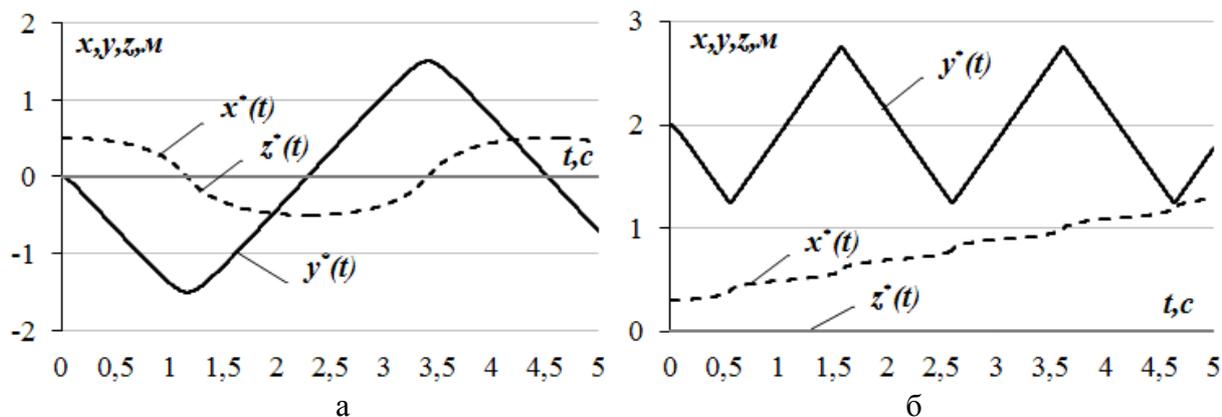


Рис. 4. Законы изменения $x^*(t)$, $y^*(t)$, $z^*(t)$ при движении вдоль траекторий 1 и 2

Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанного метода. Из приведенных графиков следует, что реальная скорость движения ПТ по траекториям, заданным с помощью параметрических сплайнов, соответствовала желаемому закону изменения v_d . При этом траектории движения ПТ оставались неизменными.

З а к л ю ч е н и е

В работе предложен метод, позволяющий перемещать ПТ вдоль траекторий, задаваемых в виде параметрических полиномов третьего порядка с заданной скоростью. Если необходимо, описанный метод может быть расширен для учета ограничений, накладываемых на максимальное значение ускорения. Применение описанного метода позволит широко использовать удобный при построении траекторий движения мехатронных объектов аппарат сплайнов Безье.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Научного фонда ДВФУ в рамках научного проекта № 13-06-0112-м_а.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Fossen T.I. Guidance and control of oceanic vehicles. – John Willei and Sons, 1994. – 494 p.
2. Antonelly G. Underwater Robots. – Springer-Verlag, 2006. – 261 p.

3. Фу. К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
4. Lebedev A.V. Synthesis of Desirable Trajectories of Dynamic Objects Spatial Movement // Proc. of The 6th IASTED International Conf. Intelligent Systems and Control. Honolulu, Hawaii, USA. – 2004. – pp. 36-39.
5. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А. Способ формирования программного управления скоростным режимом движения подводных аппаратов по произвольным пространственным траекториям с заданной динамической точностью // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – №4. – С. 167-176.
6. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез адаптивных систем управления, настраиваемых по амплитудным частотным характеристикам объектов с переменными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – № 1. – 2010. – С. 15-21.
7. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Система формирования предельно высокой скорости движения рабочего органа многостепенного манипулятора по произвольной траектории // Информационно-измерительные и управляющие системы. – №4. – Т. 11. – 2013. – С. 19-25.
8. Filaretov V., Yukhimets D., Mursalimov E. The Universal Onboard Information-Control System for Mobile Robots // Procedia Engineering. – Vol.100. – 2015. – pp. 737–745.
9. Rogers D.F., Adams J.A. Mathematical elements for computer graphics. – McGraw-Hill, 1976. – 239 p.

И.Ю. Данилов, аспирант, i.danilov@innopolis.ru
И.М. Афанасьев, к.т.н., доцент, i.afanasyev@innopolis.ru
Е.А. Магид, д.т.н., профессор, e.magid@innopolis.ru
Университет Иннополиса, г. Иннополис, Россия

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МУЛЬТИКОПТЕРОВ

Аннотация. В работе обзорно представлены существующие решения по автоматизированным системам для увеличения длительности полета электрических мультикоптеров на основе как беспроводного заряда аккумуляторов, так и автоматизированной замены батарей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), мультикоптер, беспроводная зарядка, замена аккумулятора

AUTOMATED SYSTEMS FOR INCREASING FLIGHT DURATION OF ELECTRIC MULTICOPTER

© Igor Danilov, PhD student, i.danilov@innopolis.ru
Ilya Afanasyev, PhD, assistant professor, i.afanasyev@innopolis.ru
Evgeni Magid, PhD, professor, e.magid@innopolis.ru
Innopolis University, Innopolis, Russia

Abstract. The paper presents an overview of existing automated systems for electric multicopter flight duration increase based on both wireless battery charging and automated battery replacement.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), multicopter, wireless battery charging, battery replacement

Введение

В настоящее время благодаря совершенствованию технологий разработки электрических источников питания и появлению аккумуляторных батарей с большой удельной энергией и высоким разрядным током в мире происходит значительный рост числа проектов, связанных с использованием

беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) типа «электрические мультироторные коптеры» (мультикоптеры). Этот тип летательных аппаратов активно используется в различных целях, в том числе: для мониторинга состояний объектов гражданской и промышленной инфраструктуры – например, плотин гидроэлектростанций, буровых платформ, газо- и нефтепроводов, ветряных электростанций, (качества) дорожного покрытия, фюзеляжей самолетов; обслуживания сельскохозяйственных угодий; регистрации дорожно-транспортных происшествий; построения трехмерных моделей зданий и памятников; инспекции правопорядка; в целях военной разведки; доставки малогабаритных грузов, и т. п.

Однако одной из основных проблем, сдерживающих развитие подобных проектов, является быстрый разряд аккумуляторных батарей мультикоптера, приводящих к ограниченному пребыванию БПЛА в воздухе [1]; на сегодняшний день это время составляет в среднем от десяти до тридцати минут. Как результат, мультикоптер должен периодически приостанавливать выполнение задач для замены или перезарядки аккумуляторной батареи. Почти всегда этот процесс происходит с участием человека-оператора БПЛА. Если удастся автоматизировать перезарядку и/или замену источника питания, то можно значительно увеличить время и дальность полета аккумуляторных БПЛА.

Данная статья посвящена существующим автоматизированным системам для увеличения длительности полета мультикоптеров и представляет обзор технических решений как для беспроводного заряда аккумуляторов (с помощью явления электромагнитной индукции), так и для автоматизированной замены батарей.

Посадочные платформы с беспроводным зарядом аккумуляторов

Посадочные платформы с беспроводным зарядом батарей основываются на принципе передачи энергии с помощью явления электромагнитной индукции. С учетом всех потерь КПД подобных систем в зависимости от передаваемой мощности и частоты колеблется от 30 до 60%.

Изначально подобные системы разрабатывались и использовались для подзарядки сотовых телефонов, в результате чего сложился стандарт Qi, регламентирующий общие электротехнические особенности устройств беспроводной зарядки [2]. Новая редакция этого протокола регламентирует работу с высокими передаваемыми мощностями (от 5 Вт и выше), что делает возможным использование данного стандарта в зарядных посадочных платформах для мультикоптерных батарей.

Так, используя новые возможности, группа исследователей из Университета Линкольна (США) продемонстрировала беспроводную передачу энер-

гии с мультикоптера на наземный приемный контур [3]. Японские исследователи пошли дальше и решили обратную задачу – они передавали энергию с земли на БПЛА вертолетного типа с помощью двух магнитно-связанных контуров: наземного – размером 110 мм и бортового – 50 мм (рис. 1), добившись непрерывного парения БПЛА над передающим контуром на высоте 590 мм [4].

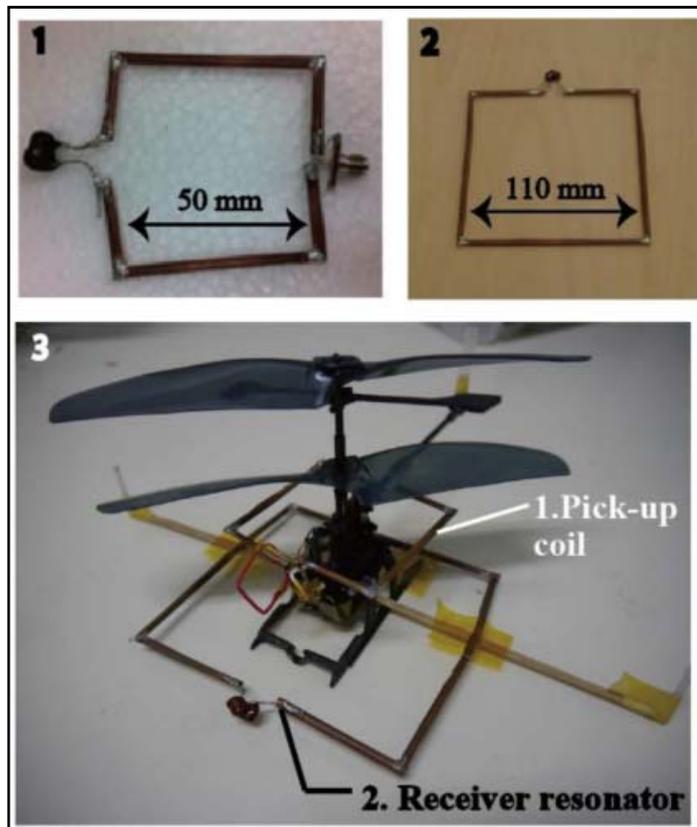


Рис. 1. Способ беспроводной зарядки БПЛА вертолетного типа [4] с помощью двух магнитно-связанных контуров (фото 1 и 2 сверху) и вся система в сборе (фото 3 снизу)

Зачастую беспроводной тип зарядки необходимо комбинировать с традиционным контактным способом, поскольку в реальных условиях проводному способу заряда может воспрепятствовать высокая влажность воздуха, дождь, иней или грязь на посадочной платформе. Наличие резервного способа передачи энергии аккумулятору БПЛА увеличивает общую надежность работы автоматического зарядного терминала.

Системы автоматизированной замены аккумулятора

Автоматизированная замена аккумулятора обладает существенным преимуществом: она выполняется гораздо быстрее, чем зарядка. Характерное время замены батареи составляет около 1 минуты [5, 6], в то время как самые быстрые способы зарядки, реализованные в лабораторных условиях, составляют несколько десятков минут. Разработка автоматизированной системы для замены

батареи мультикоптера подразумевает решение ряда технических задач: обеспечение точного позиционирования дрона при посадке, надежной фиксации на борту БПЛА аккумулятора, который вместе с тем должен быть легко извлекаемым с помощью манипулятора, разработки самого манипулятора для смены батареи и системы хранения заряженных и заряжающихся батарей. Рассмотрим два способа решений, опубликованных авторами в [5] и [6].

Японские исследователи Фудзии, Хигучи и Рекимото из Токийского Университета разработали систему «Endless Flyer» («Бесконечный летательный аппарат»), обеспечивающую «бесперывный» полет квадрокоптера Parrot AR Drone [5]. В основе решения лежит использование маркерной системы захвата движения (СЗД) «OptiTrack», с высокой точностью детектирующей местоположение мультикоптера, а также компьютера, управляющего движением БПЛА на основе показаний СЗД, и автоматизированной посадочной платформы, которая осуществляет замену элемента питания (рис. 2).



Рис. 2. Автоматизированная посадочная платформа Endless Flyer для замены батареи квадрокоптера Parrot AR Drone [5]

Серия тестов японской команды показала, что их система в 90% случаев обеспечивает «удачную посадку» БПЛА на посадочную платформу. Под «удачной посадкой» понимается состоявшаяся замена батареи, при которой механизм платформы сумел захватить приземляющийся мультикоптер и сдвинуть его к центру платформы для замены батареи. При этом в случае «удачной посадки» успешная замена батареи осуществлялась в 100% случаев. Более того, разработчики предложили решения по увеличению надежности и расширения сферы применения разработанной системы путем масштабируемости для выполнения инспекции с БПЛА в реальных условиях.

Ли, Жоу и Лин из Сингапурского Политеха предлагают решение, обеспечивающее так называемую «горячую» смену батареи [6]. Это означает, что во время замены не происходит отключения бортовой авионики от сети пи-

тания. Такое решение достигается за счет того, что две опоры БПЛА подключаются к двум питающим контактам, размещенным на посадочной площадке. Благодаря этому не происходит потери данных из оперативной памяти микроконтроллера. В работе [6] тщательно описана конструкция механической части системы и приведен подробный алгоритм работы узлов роботизированной посадочной платформы. В общих чертах описана функциональная электрическая схема блока, отвечающего за заряд использованной батареи.

Отличительной особенностью работы является то, что разработчики отказались от внешней СЗД и решили задачу точной посадки за счет использования набора бортовых сенсоров БПЛА (блока GPS, лидара, сонара, видеокамеры и гироскопа), а также использования бортовой электроники для обработки информации, поступающей с сенсоров (рис. 3). Для вычислений БПЛА задействовал три микропроцессора, размещенных на мультикоптере: Pixhawk, Ardupilot Mega и Beaglebone Black [6]. Интересно заметить, что создателям системы удалось добиться 85% случаев «удачной посадки», что существенно уступает показателям при использовании маркерной СЗД [5].



Рис. 3. Вид БПЛА с бортовыми сенсорами и электроникой для автономной посадки на заряжающую посадочную площадку [6]

Заключение

В данной работе рассмотрены существующие автоматизированные системы для увеличения длительности полета мультикоптеров с описанием технических решений как для беспроводного подзаряда аккумуляторов на борту БПЛА, так и замены батарей. Выбор способа зарядки или смены батареи зависит от условий эксплуатации БПЛА для каждого конкретного проекта и определяет вид и функциональность автоматизированной системы для увеличения длительности полета мультикоптеров. Для одних приложений время зарядки несущественно, а для других (например, для задач разведки или доставки грузов) – наоборот, критично. Беспроводная зарядка обладает тем пре-

имуществом, что может выполняться при эксплуатации БПЛА на открытом воздухе в реальных условиях, где на эффективность функционирования системы могут влиять влажность воздуха, дождь, иней и загрязненность посадочного зарядного терминала.

Анализ технических решений представленного обзора будет использован при разработке собственной системы автоматической посадки мультироторного коптера на платформу беспроводной зарядки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонда содействия инновациям) в рамках научного проекта № 0010930 по теме «Разработка системы автоматической посадки беспилотных коптеров на платформу беспроводной подзарядки».

Список литературы

1. Фетисов В.С., Тагиров М.И., Мухаметзянова А.И. Подзарядка электрических беспилотных летательных аппаратов: обзор существующих разработок и перспективных решений. // Авиакосмическое приборостроение. – № 11. – 2013. – С. 7–26.
2. Johns B. An introduction to the Wireless Power Consortium standard and TI's compliant solutions, Analog Applications Journal Q 1 (2011), 2011. – pp. 10–12.
3. Griffin B., Detweiler C. Resonant wireless power transfer to ground sensors from a UAV. // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Saint Paul (USA), May 2012. – pp. 2660–2665.
4. Yamakawa M., Shimamura K., Komurasaki K. and Koizumi H. Demonstration of Automatic Impedance-Matching and Constant Power Feeding to and Electric Helicopter via Magnetic Resonance Coupling. // Wireless Engineering and Technology. – Vol.5., No.3, 2014. – pp. 45–53.
5. Fujii K., Higuchi K., Rekimoto J. Endless Flyer: A Continuous Flying Drone with Automatic Battery Replacement. // Proceedings of IEEE 10th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing and 10th International Conference on Autonomic and Trusted Computing (UIC/ATC), Vietri sul Mare (Italy), Dec. 2013. – pp. 216–223.
6. Lee D., Zhou J., Lin W.T. Autonomous battery swapping system for quadcopter. // Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Denver (USA), June 2015. – pp. 118–124.

К.В. Кондратьев, инженер-конструктор, kkv@samy.ru

В.Н. Сергеевич, к.т.н. директор, svn@samy.ru

ООО НПП САМИ, г. Железнодорожск, Россия

В.В. Двирный, д.т.н. профессор, dvirnyi@mail.ru

АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева»,
г. Железнодорожск, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЬЕЗОАКТУАТОРА В ОСНОВЕ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Аннотация. Рассмотрена задача изменения взаимного расположения элементов автоматизированных и роботизированных систем посредством использования пьезоактуатора. Приведен принцип преобразования колебательной энергии пьезоэлемента в крутящий момент дискового колеса. Вал крутящего элемента оснащен кулчком, что позволяет создавать переменное направление вертикальной тяги подъемной лапки. Существует возможность использования предложенного принципа при решении различного рода задач мехатроники, в частности функционирование малогабаритных манипуляторов промышленных роботов, конвейерных установок и пр.

Ключевые слова: пьезодвигатель, пьезоактуатор, преобразование энергии, колебания, крутящий момент

USING PIEZOACTUATOR IN BASED LIFTING MECHANISM

K. V. Kondratyev, design-engineer kkv@samy.ru

LTD SPE "SAMY", Zheleznogorsk, Russia

V. N. Sergeevic, Ph.D. director svn@samy.ru

LTD SPE "SAMY", Zheleznogorsk, Russia

V. V. Dvirnyi, Ph.D. professor dvirnyi@mail.ru

JSC "ISS" ac. M. F. Reshetnev", Zheleznogorsk, Russia

Abstract. The task of changing the mutual arrangement of the elements of automated and robotic systems, through the use of piezoactuator. The principles of conversion of vibrational energy-gies in the piezoelectric element torque wheels. Shaft torque El kulchkom ment features that allows you to create an alternating direction of vertical thrust lift legs. There is an option used-tion of the proposed principle

in solving various kinds of problems hatroniki me-in the above privacy functioning of small manipulators of industrial robots, conveyor systems and so forth.

Keywords: piezoengine, pezoaktyuator, energy conversion, oscillations, fluctuations in torque

В автоматизированных и робототизированных системах, используемых в различных областях деятельности человека, нередко встречается задача обеспечения контролируемой, дозируемой тяги в вертикальном и горизонтальном направлениях. Перемещение грузов, деталей и других мелкогабаритных объектов в означенных направлениях является важной, актуальной задачей в мехатронике. В частных случаях, когда в роботах, автоматах, конвейерных машин не допускается использование подъемных узлов, основанных на электромагнитных устройствах, предлагается подъемный механизм на основе пьезоактуатора.

В основе функционирования пьезоэлектрических двигателей вращения лежит принцип, согласно которому все точки пьезоэлемента, входящие в контакт с ротором, должны двигаться по траектории, описывающей эллипс. Для этого в пьезоэлементе одновременно возбуждают два типа взаимно ортогональных колебаний (рис. 1). В простейшей кинематической схеме в пьезоэлементе электрически возбуждены продольные по длине волны, а поперечные волны — изгибные возбуждаются при движении конца пьезоэлемента по поверхности ротора. Тогда коэффициент полезного действия может превышать 80 %. При подобном подходе используется свойство наклоненной и прижатой к гладкой поверхности пластины изменять усилие прижима при движении в одну и противоположную сторону [1].

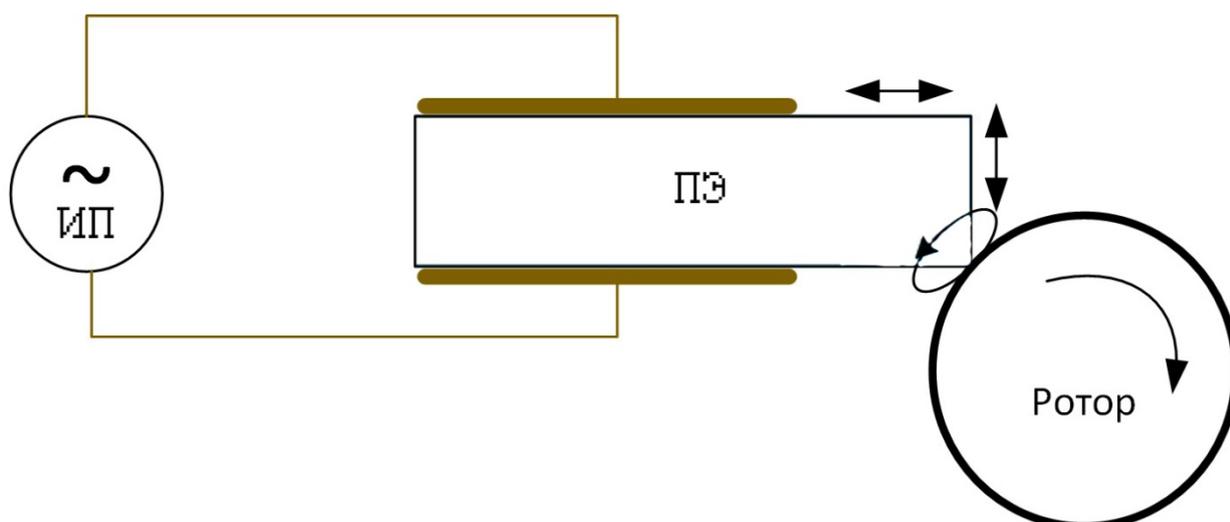


Рис. 1. Кинематическая схема классического пьезодвигателя, где ИП – источник питания (переменное напряжение), а ПЭ – пьезоэлемент

Предлагается взглянуть на возможности пьезоактуатора через призму обеспечения вертикальной тяги для перемещения с переменным направлением каких-либо объектов в механике. Преобразование энергии колебаний в крутящий момент, подробно описанное в [2] посредством взаимодействия пьезокерамического биморфа и дискового колеса (рис. 2), предлагается использовать как подъемный механизм.

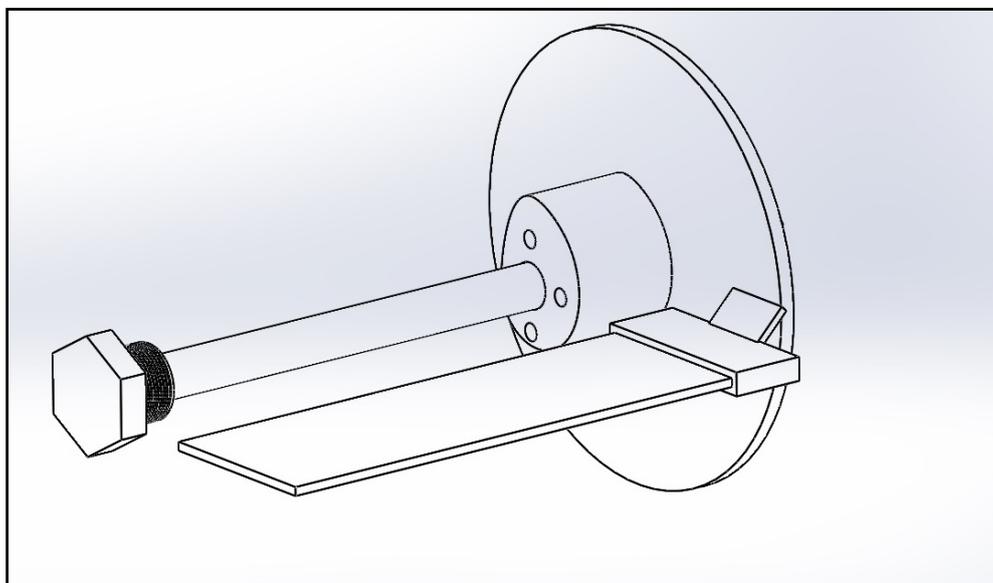


Рис. 2. Пьезокерамический биморф и дисковое колесо

В качестве пьезоэлемента в рамках решения поставленной задачи обеспечения механического привода предлагается использовать пьезокерамический биморф, основная функция которого под воздействием переменного напряжения выгибаться то в одну, то в другую сторону. Диапазон входного напряжения от -80 В до $+80$ В, в соответствие и пропорционально номиналу поданного напряжения пьезокерамический биморф выгибается относительно зафиксированного конца. Подведение управляющего напряжения производится через пружинные контакты в области заделки или монтажными проводами путем пайки к выведенным электродам.

Самой простой и надежной конструкцией преобразователя линейного перемещения во вращательное является двигатель Барта, момент вращения которого образуется за счет трения между пьезоактуатором и ротором двигателя [3]. Существует возможность оснастить данную конструкцию подъемной лапкой, которая посредством взаимодействия с кулачковым механизмом будет поднимать и/или опускать груз. Две проекции на описанное выше устройство изображены на рис. 3 и 4 соответственно.

В конечном итоге подъемная лапка выполняет колебательные движения, схожие с пьезоэлементом. В этом случае частота, амплитуда и усилия регулируемые, также относительная свобода имеется в плане выбора длины рычага.

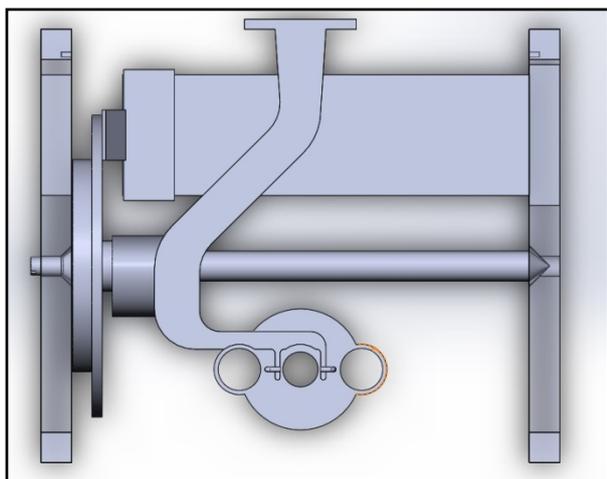


Рис. 3 Взаимное расположение элементов конструкции преобразователя (вид сверху)

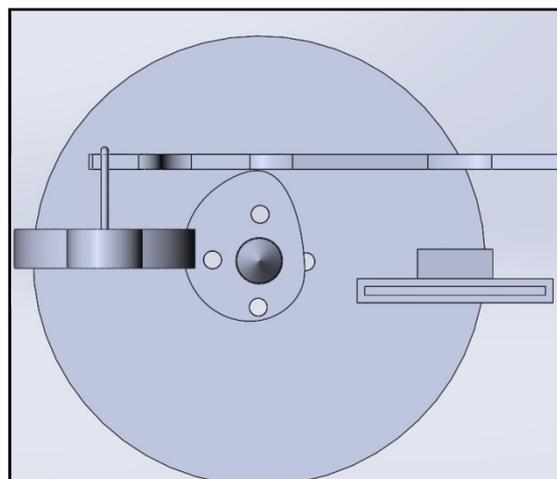


Рис. 4. Взаимное расположение элементов конструкции преобразователя (вид сверху, вид с боку)

Работоспособность представленной схемы устройства подъемного механизма посредством преобразования электрической энергии в механическую на основе использования пьезокерамического биморфа подтверждена положительными результатами проведенных экспериментов.

Точкой применения таких устройств могут быть подъемные узлы и механизмы, входящие в состав малогабаритных автоматизированных и роботизированных систем. Перед аналогами, основанными на магнитах и электродвигателях, можно выделить следующие преимущества:

- не создает электромагнитных полей;
- электрическое поле замыкается внутри пластины;
- мгновенная остановка, без остаточной инерции;
- требует подвода тонкого кабеля;
- меньший вес и занимаемое пространство.

Список литературы

1. Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневикий В.С. Пьезоэлектрические двигатели. – М: Энергия, 1980. – 112 с.
2. Кондратьев К.В., Сергеевич В. Н., Двирный В.В. Особенности пьезодвигателей в условиях вакуума // Решетневские чтения: Материалы XIX Междунар. науч. конф. Ч. 1. – Красноярск: СибГАУ, 2015. – С. 330–331.
3. Азин А.В., Пономарев С.В., Рикконен С.В., Храпцов А.М. Исследование микролинейных пьезопроводов для космических аппаратов // Решетневские чтения: Материалы XIX Междунар. науч. конф. Ч. 1. – Красноярск: СибГАУ, 2015. – С. 58–59.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ УСТАНОВКИ КОМПОНЕНТОВ И НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Аннотация. В настоящее время на производстве особое внимание уделяется точности сборки и установки компонентов. В статье рассматривается актуальность применения жидких полимеров при нанесении на дорожки печатных плат на примере полуавтоматической установки сеткографической печати.

Ключевые слова: печатная плата, жидкие полимеры, позиционирование, точность

ACCURACY ASSESSMENT & PLATING OF PRINTED CIRCUIT BOARD COMPONENT INSERTION DEVELOPMENT

I. Yu. Nikulin, undergraduate, DeLengeR@yandex.ru
Siberian federal university, Zheleznogorsk, Russia

Abstract. Presently in the industry much attention is paid to assembling accuracy as well as to component insertion. This paper reviews the relevance of liquid polymers application plating on plains of circuit board as exemplified by semi-automatic screen printing machine.

Key words: printed circuit board, liquid polymers, positioning, accuracy

Повышение производительности в промышленности является сложной и многогранной проблемой, которую необходимо решать совместными усилиями государства, предприятий и рабочих. Перспективные средства телекоммуникаций в России имеют некоторое отставание от западных разработок в области элементной базы и микроэлектроники [1].

Печатные платы — физическая и неотъемлемая основа электрических межсоединений в электронной технике. Микроэлектронные системы на печатных платах постоянно развиваются: происходит рост интеграции, произ-

водительности и функциональности. Процесс развития состоит в увеличении плотности размещения активных элементов на кристалле примерно на 75% в год; это, в свою очередь, вызывает увеличение плотности выводов на корпусе на 40% в год, а вслед за тем возникает необходимость в увеличении плотности межсоединений в монтажных подложках [2].

Плотность монтажа электронных компонентов растет примерно на 8% в год, и за счет этого физические размеры электронной аппаратуры уменьшаются на 20% в год. Эта тенденция поддерживается непрерывным развитием технологий печатных плат и микросборок.

Существует множество методов создания печатных плат. У каждого метода имеются как плюсы, так и минусы. Основными критериями выбора способа создания печатной платы являются простота, т. е. способность реализации с помощью того, что есть дома либо на работе, и точность – насколько можно уменьшить расстояние между дорожками без ущерба для схемы.

Развитие технологий печатных плат применительно к высокоразвитым функциональным системам идет в направлении многослойности, введения трехмерных структур межсоединений, уменьшения размеров элементов межсоединений в многослойных структурах, обеспечения требований электромагнитной совместимости, введения элементов кондуктивного теплостока, обеспечения скорости передачи сигналов для увеличения производительности цифровых систем и реализации СВЧ-структур [3].

Качество конечного изделия во многом зависит от правильного выполнения операции установки компонентов на печатную плату в ручном или автоматизированном вариантах (рис. 1) [4].

Компоненты, монтируемые на поверхность печатных плат, при оплавлении паяльной пасты под действием сил поверхностного натяжения стремятся занять правильное положение, что явилось одним из аргументов в пользу технологии поверхностного монтажа для серийного и массового производства, где требуется высокая степень автоматизации. Однако при монтаже аппаратуры повышенной надежности, такой как, например, военная, медицинская, космическая электроника, такой, трудно контролируемый процесс, как самовыравнивание компонентов, не должен быть определяющим в достижении заданного уровня качества изготавливаемой аппаратуры. Кроме того, с переходом на бессвинцовую технологию стали применяться припои, которые обладают свойством выравнивания компонентов в значительно меньшей степени, чем традиционные оловянно-свинцовые сплавы. И, наконец, продолжающаяся микроминиатюризация изделий приводит к необходимости применения компонентов настолько малых размеров и с таким частым расположением выводов, что смещение компонента на десяток микрометров может приводить к браку [5].



Рис. 1. Полуавтоматическая установка сеткографического нанесения жидких фоторезистов и паяльной маски на печатные платы АТМА АТ-80/120/160 Р/В

Применение качественно новых технологий с жидкими полимерами для нанесения на печатные платы позволяет повысить функциональность изделия. Жидкие полимеры используются для повышения термоустойчивости синтетических каучуков, в качестве добавок, улучшающих прочность, гибкость и адгезию к непористым поверхностям [6].

Правильный выбор материалов, а именно жидких полимеров, технологических процессов и элементной базы при разработке современных печатных плат во многом определяет уровень работоспособности и надежности электронного устройства в целом. При этом необходимо учитывать следующие аспекты:

1) назначение электронной системы: технические условия на изделие, ожидаемый рабочий ресурс, элементная база с характеристиками по быстродействию, выходному сопротивлению, уровню рабочих сигналов, напряжению питания и т. п;

2) эксплуатационные требования: возможность профилактики и ремонта;

3) условия окружающей среды в процессе хранения и эксплуатации;

4) технология изготовления: совместимость с действующим производством, степень и характер механизации и автоматизации при заданном объеме производства;

5) базовые и вспомогательные материалы: объем возможных поставок, необходимость отбора материалов по специальным требованиям.

Все методы производства печатных плат можно расположить в следующей последовательности (по возрастанию плотности печатного монтажа) [7]:

- 1) односторонние печатные платы (ОПП);
- 2) двусторонние печатные платы (ДПП) комбинированным позитивным методом;
- 3) ДПП полуаддитивным методом;
- 4) ДПП полуаддитивным методом с дифференциальным травлением;
- 5) многослойные печатные платы (МПП) методом попарного прессования;
- 6) МПП методом металлизации сквозных отверстий;
- 7) МПП методом послойного наращивания;
- 8) МПП комбинацией методов металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания.

Точность сборочной операции характеризуется отклонением положения установленных изделий от заданных (номинальных) положений, называемым погрешностью установки. Диапазон, образованный максимальными отклонениями, не приводящими к браку конечного изделия, – допуск.

Под точностью оборудования (в частности, автоматов установки компонентов) понимают практическую способность этого оборудования обеспечить заданную точность выполнения операции в определенных производственных условиях и при достаточно малом влиянии факторов, не определяющихся этим оборудованием.

Реальное положение любого компонента всегда несколько отличается от номинального. Смещение компонента может приводить к браку (если например, это вызывает короткое замыкание с соседним компонентом или отсутствие контакта с площадкой на плате), а может не сказываться на качестве изделия. Оборудование должно обеспечивать установку всех компонентов со смещением в пределах поля допуска, т. е. отклонение положения компонента от номинального не должно превышать некоторого максимального значения.

Поскольку обычно электронные устройства содержат достаточно большое число компонентов, а автоматическая установка применяется преимущественно в серийном и массовом производстве, то вероятность установки компонента вне поля допуска должна быть достаточно малой. С другой стороны, слишком жесткие требования к вероятности попадания в поле допуска приводят к необоснованному удорожанию оборудования и неадекватным мерам по обеспечению качества.

Поэтому при разработке системы качества производства в зависимости от требований к конечному изделию и планируемых мер по контролю и устранению возникающего брака всегда принимают в расчет вероятностный до-

пуск, который задается при определенной вероятности установки компонента со смещением не более заданного.

Если на некоторый процесс оказывает влияние большое число независимых равноправных случайных факторов, распределенных равномерно, то сам процесс подчиняется закону распределения Гаусса, или нормальному закону распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

В данном случае x – смещение компонента по каждой отдельно взятой оси X или Y , либо отклонение по углу поворота θ вокруг оси Z . Вероятность попадания случайной величины x в заданный диапазон $(-\delta x, +\delta x)$ равна интегралу $f(x)$ по данному диапазону (рис. 2):

$$P(\sigma x^- < x < \sigma x^+) = \int_{\sigma x^-}^{\sigma x^+} f(x) dx$$

Эта вероятность определена двумя величинами: математическим ожиданием μ и среднеквадратичным отклонением σ .

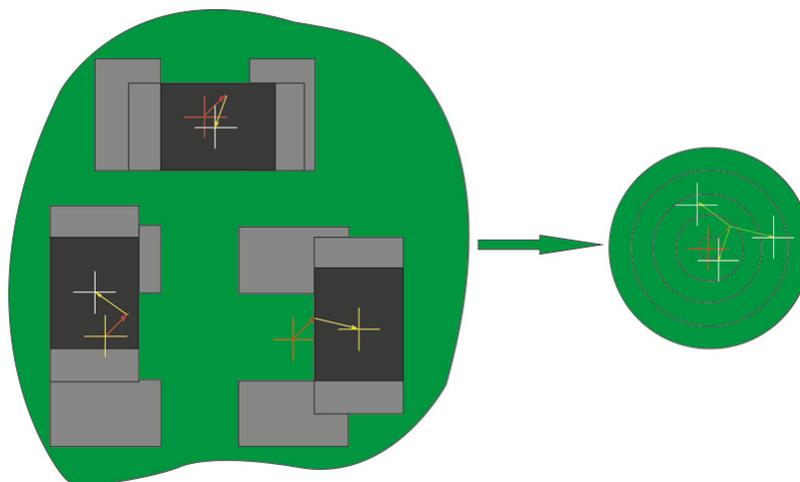


Рис. 2. Случайная и систематическая погрешности.

Красными стрелками показана систематическая составляющая погрешности, желтыми – случайная. Если совместить номинальные точки установки всех компонентов, то красные стрелки совпадут

Поскольку вероятность смещения компонента однозначно определяется двумя параметрами μ и σ , вместо вероятности установки компонента в заданное поле допуска можно указать эти два параметра. Например, параметры $\mu = 0$ и $\sigma = 0,05$ мм означают, что вероятность попадания величины в область с отклонением не более $\pm 0,05$ мм составляет примерно 0,683, т. е. 683 компонента из тысячи будут установлены со смещением не более 0,05 мм в обе стороны по одной из осей.

Подводя итоги, следует отметить, что как точность нанесения покрытий, так и точность последующего позиционирования элементной базы дан печатной платы в значительной степени зависит от конкретной выбранной технологии. Если применять технологию печати жидкими полимерами, то требуется не только исследовать пригодность различных марок полимеров, но и выработать методику оценки точности их нанесения.

Список литературы

1. А. Медведев, Г. Мылов. Печатные платы. Требования для поверхностного монтажа [Электронный ресурс]: режим доступа – http://www.kite.ru/articles/circuitbrd/2007_10_164.php.
2. Медведев А. Концепция развития российского производства печатных плат. Почему печатные платы [Электронный ресурс]: режим доступа – http://www.pk-altonika.ru/articles_type_1_12.htm.
3. Борисенков С. Критерии выбора автоматов установки компонентов/Технологии в электронной промышленности. – №1. – 2005. – С. 56 – 58.
4. Материалы сайта компании AbsolutElectronics [Электронный ресурс]: режим доступа- www.absolutelectronics-pcb.ru.
5. Гаврилов А.Н. Основы технологии приборостроения. – М.: Высш. Школа, 1976. – 328 с.
6. Sammy G. Shina. Six Sigma for Electronics Design and Manufacturing. – McGraw-Hill, USA, 2002 – 363 p.
7. Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.

ПОСТРОЕНИЕ КОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РОЯЩИХСЯ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ СО СПОСОБНОСТЬЮ К ОЦЕНКЕ РАССТОЯНИЯ

Аннотация. Рассматривается способ построения системы коммуникации между роем автономных роботов на основе сети с ячеистой топологией, способной оценивать взаимное расположение. Система основывается на технологии Wi-Fi на базе широко распространенного модуля ESP8266. Предлагаемый способ предполагает построение распределенной системы связи, при которой возможно «горячее» подключение-отключение узлов с возможностью оценки взаимного расположения узлов (автономных роботов) на основе информации RSSI – индикации уровня принимаемого сигнала. Выполнена разработка и тестирование системы на реальных мобильных роботах.

Ключевые слова: Wi-Fi, коммуникация мобильных роботов, ячеистая топология, роящиеся роботы

DEVELOPING A COMMUNICATION SYSTEM FOR SWARM ROBOTS CAPABLE OF EVALUATING A POSITIONAL RELATIONSHIP

M.L. Patkin, postgraduate, patkinm@gmail.com
Samara State Technical University, Samara, Russia

Abstract. The paper considers a method to develop a communication system within a swarm of autonomous robots on the basis of a mesh network topology capable of evaluating a positional relationship. The system is powered by the Wi-Fi technology on the basis of the widely used ESP8266 module. The offered method proposes developing the distributed communication system, which makes a "hot" connection-disconnection of the subsystems possible and enables to evaluate a positional relationship of the latter relying on the information from RSSI – the indication of the received signal level. The system is developed and tested on real mobile robots.

Keywords: Wi-Fi, mobile robots communication, mesh topology, swarm robots

Применение системы из некоторого числа достаточно простых мобильных роботов (роя роботов) в ряде задач может обеспечить лучшие результаты нежели использование одного более совершенного робота. В качестве примера можно привести систему из большого числа квадрокоптеров, которые с помощью камер следят за происходящим на определенной территории. В такой системе выход из строя одного юнита не приведет к фатальным последствиям, так как вышедшего из строя квадрокоптера заменит другой [1]. Для взаимодействия юнитов внутри роя наилучшим решением становится децентрализованная ячеистая сеть, которая обеспечит живучесть и простоту построения.

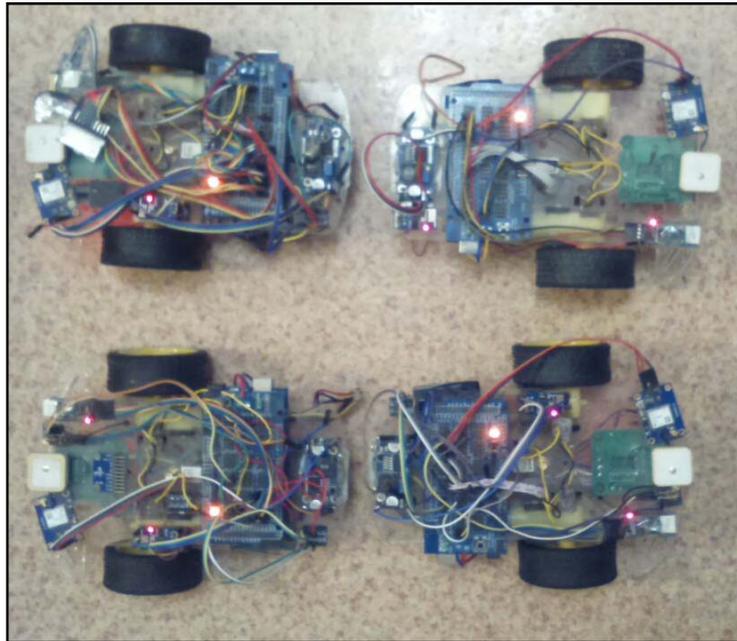


Рис. 1. Четыре трехколесных робота, каждый с приводом на 2 колеса

Задача коммуникации роя роботов не является нерешенной (работы об архитектуре mesh сетей [2, 3]). Так, существуют различные подходы, например, в [4] предлагается построение системы, базирующейся на инфракрасных транзистерах, но такая система работает в пределах видимости. Существуют радиопротоколы, поддерживающие построение сетей с ячеистой топологией, например, ZigBee [5] (вариант системы, построенной на ZigBee [6]), но стоимость такого чипа высока и составляет порядка \$25, в то время как стоимость используемого в работе Wi-Fi чипа ESP8266 не превышает \$3. Также протокол Wi-Fi гораздо более распространен, чем ZigBee, что является несомненным преимуществом, а также позволяет не использовать дополнительное оборудование для приема информации от роботов на хосте. Наконец, немаловажным аспектом в пользу выбора чипа ESP8266 стал тот факт, что он содержит на борту дискретные порты ввода-вывода, аналого-цифровой преобразователь, драйверы протоколов SPI, UART, а это в дальнейшем может стать основанием к разработке робота, который управляется только этим чи-

пом без дополнительных микроконтроллеров [7]. Недостатком этого чипа по отношению к ZigBee является достаточно большое энергопотребление.

В данной работе ставилась задача построения сети с ячеистой топологией на основе технологии Wi-Fi, способной возвращать оценочные значения расстояний между узлами базируясь на информации об уровне принимаемого сигнала. Тестирование выполнялось на совокупности из 4-х роботов (рис. 1), которые обменивались информацией о своем состоянии и оценкой расстояний до соседей. Целью данной работы является в том числе построение такой системы, которая была бы применима для разных типов автономных роботов: летающих, едущих – обладающих UART интерфейсом.

Алгоритм работы сети

Функционирование сети базируется на работе протокола TCP, который гарантирует доставку сообщения до принимающей стороны. Модуль ESP8266 обладает способностью находиться в двух состояниях одновременно: как точка доступа и как клиент, поэтому нет необходимости переключаться между этими двумя состояниями. Также особенностью данного алгоритма является то, что сообщения рассылаются широковещательно и сам узел решает, что ему делать с полученной информацией. За основу был взят код библиотеки ESP8266WiFiMesh, написанный Julian Fellx [8].



Рис. 2. Блок-схема работы алгоритма

Блок-схема на рисунке 2 показывает общую схему функционирования алгоритма ячеистой сети:

1. Блок 1 алгоритма отвечает за инициализацию узла, присвоение ему имени в соответствии с шаблоном: «Robot»+N (где N – это уникальный номер узла). Префикс «Robot» необходим при поиске сетей, и только точки доступа с таким префиксом являются участниками сети. Также на этом этапе создается Wi-Fi точка доступа с аналогичным именем и фиксированным IP адресом (192.168.4.1) и запускается TCP сокет на порту 4011.

2. Блок 2 отвечает за прием информации от робота и формирование пакета. Информация, содержащая RSSI подключения, будет добавлена в блоках 3 и 4.

3. Блок 3 отвечает за обработку подключений к данному узлу. Если в течение определенного времени произошло подключение стороннего узла к сокету и был получен пакет информации, то в ответ отсылается заранее подготовленная информация от данного юнита. Если такого подключения нет, то происходит переход к следующему блоку.

4. Блок 4 начинает сканирование Wi-Fi сетей и отбрасывает все сети, которые не начинаются с префикса «Robot». Ко всем оставшимся сетям текущий узел пытается подключиться и обмениваться сообщениями. Все повторяется, начиная с блока 2.

Конечно, в данном алгоритме присутствует некая избыточность: широковещательные передачи, обмен сообщениями, но это несколько не мешает ему адекватно работать.

Структура передаваемых данных

Передаваемая информация включает в себя телеметрические данные о работе систем автономного робота, информацию о силе принимаемого сигнала между двумя подключенными друг к другу узлами.

Структура данных, представленная в табл. 1, содержит информацию, которую можно использовать для мониторинга работы роя роботов, а также для построения карты их относительного положения. Данная структура несколько избыточна для роботов, участвовавших в этой работе, но она разрабатывалась на будущее.

В данной работе был предложен вариант построения сети с ячеистой топологией на основе Wi-Fi с использованием модуля ESP8266 с возможностью оценивания взаимного расположения узлов на основе информации о силе принимаемого сигнала. В ходе работы была протестирована сеть, состоящая из четырех узлов и результат тестирования можно считать успешным. Тестирование производилось на базе четырех мобильных роботов (рис. 1), которые обменивались информацией о своем состоянии.

Таблица. Структура данных

Описание	Тип
Уникальный идентификатор узла	integer
Структура данных, содержащая информацию о значении RSSI, а также идентификаторы узлов, между которыми велась передача	Особый
Уровень заряда батареи в процентах	float
Прогнозируемое время работы в минутах	integer
Данные GPS о геолокации	string
Время, полученное от GPS спутников	string
Время от часов реального времени, установленных на роботе	string
Значение таймера в мс, запущенного с начала работы узла	longinteger
Температура окружающего воздуха в С°	float
Скорость движения в м/с	float
Структура данных, содержащая углы Эйлера (крен, тангаж, рысканье) в градусах	Особый
Показания Барометра в мм рт. столба	float

Такого рода системы могут найти свое применение в коммуникации разного типа роботов, наземных или воздушных, в условиях, когда не всегда удастся обеспечить связь каждого робота с центральным узлом.

В дальнейшем планируется усовершенствовать алгоритмы маршрутизации, чтобы оптимизировать избыточность системы, добавить возможность пересылки сообщений в случае, когда один робот имеет возможность подключения только к одному соседу, а также поработать над энергопотреблением модулей. Также предполагается провести эксперименты с навигацией роботов и построением карты взаимного расположения по информации RSSI.

Научный руководитель работы: профессор А.А. Юдашкин

Список литературы

1. Morgenthaler S. UAVNet: Prototype of a Highly Adaptive and Mobile Wireless Mesh Network using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // Global Communication Conference 2012(GLOBECOM2012), USA, Anahem, 2012. – pp. 1603–1608.
2. Ming Li, Kejie Lu, Hua Zhu, Min Chen, Shiwen Mao, Prabhakaran B. Robot swarm communication networks: Architectures, protocols, and applications // Communications and Networking in China, 2008. ChinaCom 2008, China, Hangzhou, 2008. – pp. 162–166.

3. Wang Z., Liu L., Zhou M. Protocols and Applications of Ad-hoc RobotWireless Communication Networks: An Overview // International journal of intelligent control and systems Vol. 10, No. 4, December 2005. – pp. 296–303.

4. Gianni A. Di Caro, Frederick Ducatelle, Luca M. Gambardella Wireless Communications for Distributed Navigation in Robot Swarms// Volume 5484 of the series Lecture Notes in Computer Science. – pp 21–30.

5. Официальный сайт альянса ZigBee [Электронный ресурс]: режим доступа-<http://www.zigbee.org>.

6. Agaskar V. A., Jain S., Tailor M, Gosalia P. Swarm Robotics: Information sharing by mutlirobot system using distributed control and cooperative manipulation // International journal of engineering research and applications, March 2012. – pp 403–408.

7. Официальный сайт производителя ESP8266Espressif [Электронный ресурс]: режим доступа-<http://espressif.com/en/products/esp8266/>.

8. Откртый репозиторий GitHub [Электронный ресурс]: режим доступа-<https://github.com/jtfell/WiFiMesh-ESP8266/tree/master>.

Р.Р. Хусаинов, м.н.с., аспирант, r.khusainov@innopolis.ru
И.А. Шимчик, научный сотрудник, i.shimchik@innopolis.ru
И.М. Афанасьев, к.т.н., доцент, i.afanasyev@innopolis.ru
Е.А. Магид, д.т.н., профессор, e.magid@innopolis.ru
Университет Иннополис, г. Иннополис, Россия

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИПЕДАЛЬНОГО РОБОТА В MATLAB/SIMULINK, ОСНОВАННАЯ НА МЕТОДЕ БАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ ХОДЬБЫ

Аннотация. Статья описывает математическое моделирование системы управления (СУ) и симуляцию прямохождения робота AR601-M с использованием данной СУ. Моделирование и симуляции были осуществлены в среде MATLAB/Simulink с использованием пакета SimMechanics. Созданный алгоритм СУ прямохождения основан на методе базовых компонент ходьбы. Был проведен анализ походки робота, оценена скорость движения и максимальные моменты сил на осях.

Ключевые слова: антропоморфный робот, двуногий шагающий робот, прямохождение, математическое моделирование, AR601-M, Matlab, Simulink

MATLAB/SIMULINK MODEL OF BIPED ROBOT LOCOMOTION CONTROL SYSTEM BASED ON WALKING PRIMITIVES APPROACH

Ramil Khusainov, research assistant, PhD student, i.danilov@innopolis.ru
Ilya Shimchik, research associate, i.afanasyev@innopolis.ru
Ilya Afanasyev, PhD, assistant professor, i.afanasyev@innopolis.ru
Evgeni Magid, PhD, professor, e.magid@innopolis.ru
Innopolis University, Innopolis, Russia

Abstract. The paper presents mathematical modelling of the control system (CS) and bipedal locomotion simulation of AR601-M robot using this CS. Modelling and simulation were carried out in MATLAB/Simulink environment with SimMechanics package. The suggested bipedal locomotion algorithm is based on the walking primitives approach. We analyzed robot gait and estimated speed and maximum torques on the axles.

Keywords: humanoid robot, bipedal locomotion, modelling, AR601-M, Matlab, Simulink

Введение

Моделирование является важнейшим инструментом в исследовательской области робототехники, который способствует созданию передовых проектов, позволяет проверять новые алгоритмы управления и исследовать различные решения для сложных задач. Значительным преимуществом моделирования является отсутствие необходимости конструирования и модификации реального робота. Условия эксперимента и модель робота создает сам исследователь.

За последнее время создано большое количество программных решений для моделирования многомодульных динамических систем. Некоторые из них специализируются на моделировании роботов, например, Gazebo [1] и V-Rep [2]. Однако эти программы требуют хороших навыков программирования. Такое программное решение как MATLAB/SimMechanics [3] экономит время и ресурсы при моделировании систем управления механическими объектами. В нем используются стандартная Ньютоновская динамика и имитируются поступательные и вращательные движения в трех измерениях. Решая систему дифференциальных уравнений для текущего состояния системы, MATLAB находит следующее состояние системы.

Моделирование робота AR-601M и контакта ноги с поверхностью

В нашей работе мы использовали SimMechanics для симуляции двуногого шагающего робота. Для того, чтобы сконструировать и запустить модель робота, необходимо выполнить следующие шаги:

1. Определить геометрию составных частей робота и их инерционные характеристики.
2. Осуществить моделирование силы реакции опоры.
3. Задать входные сигналы для позиций суставов в каждый момент времени.
4. Осуществить моделирование с использованием алгоритмов решения обыкновенных дифференциальных уравнений.
5. Осуществить наглядное изображение модели.

Моделирование двуногого шагающего робота (ДШР) начинается с определения геометрии робота, количества сочленений и их характеристик. Наша модель робота состоит из 12 частей, которые связаны вращающимися сочленениями в коленях, лодыжках, бедрах и фиксированными (не вращающимися) суставами в шее, локтях и плечах. Туловище и стопы имеют форму

параллелепипеда, голова – форму шара, остальные части тела имеют форму цилиндра; параметры модели ДШР AR-601М приведены в табл. 1. В глобальной неподвижной системе координат туловище имеет 3 степени свободы в сагиттальной плоскости: одна степень вращения и две поступательные степени в вертикальном и горизонтальном направлении. Рис. 2 демонстрирует общий вид модели.

Таблица 1. Моделирование: Параметры частей тела

Параметры туловища		Параметры головы	
a, метры	0,3	R, метры	0,01
b, метры	0,2	L, метры	0,3
c, метры	0,5	Масса, кг	0,75
Масса, кг	30	Параметры стоп	
Параметры голени и бедра		Ширина, метры	0,1
R, метры	0,05	Длина, метры	0,3
h, метры	0,4	Высота, метры	0,05
Масса, кг	3,14	Масса, кг	1,5

Таблица 2. Моделирование: Параметры взаимодействия стопы с землей

$k_n(N/m)$	1e5	$b_t(N*s/m)$	1e7
$b_n(N*s/m)$	1e7	μ	0,5

Определение контакта ноги с поверхностью является важной задачей в моделировании робота. Когда стопа касается поверхности, возникает вертикальная и касательная силы. Существует несколько подходов для расчета этих сил [4, 5]. В нашей работе взаимодействие стопы и поверхности моделируется с помощью линейной системы с затуханием. Уравнение (1) представляет вертикальную силу, где y – координата концевой точки ноги ($y = 0$ соответствует поверхности, по которой перемещается робот), k_n и b_n – постоянная упругости и коэффициент затухания соответственно.

$$F_n = -k_n y - b_n \dot{y}, \quad (1)$$

Вертикальная сила применяется при $y < 0$ для того, чтобы избежать прилипания ноги, второе слагаемое становится нулевым при $y > 0$. Уравнение (2) задает касательную силу, где b_t – коэффициент касательного затухания.

$$F_t = -b_t \dot{x}, \quad (2)$$

Касательная сила также применяется только при $y \leq 0$. Коэффициенты поверхности k_n , b_n , b_t должны быть достаточно большими (см. табл. 2). Это приводит к малому проникновению стопы в землю (k_n) и быстрому затуханию скорости контакта (b_n , b_t). Уравнение (2) хорошо работает при приземлении ноги, в то время как при поднятии ноги возникает так называемый «эффект прилипания»: мы не можем обеспечить точное вертикальное движение

ние, и при этом присутствует горизонтальная составляющая скорости, что приводит к большой касательной силе. Чтобы избежать этого эффекта, абсолютное значение касательной силы должно быть ограничено μF_n , где μ – коэффициент трения. F_n имеет достаточно большое значение при приземлении ноги, то есть касательная сила будет достаточно большой, чтобы предотвратить скольжение робота. Поскольку робот движется в сагиттальной плоскости, в направлении оси Z контактных сил нет. Параметры модели поверхности, по которой передвигается робот, приведены в табл. (2).

Моделирование передвижения робота

Для моделирования динамически стабильного передвижения мы использовали метод базовых компонентов ходьбы [6]: движение робота состоит из последовательности базовых компонент ходьбы, начальным и конечным условием для каждого компонента является нулевые значения скорости и ускорения каждого из сочленений робота. Схема движения ноги, например, для шага, начинающегося с левой ноги, может быть поделена на четыре этапа: (1) поднятие левой ноги; (2) приведение в движение тела робота, которое представлено в виде модели перевернутого маятника до тех пор, пока левая нога не коснется земли; (3) перемещение правой ноги вперед для того, чтобы углы в коленном и тазобедренном суставах были равны нулю; (4) затухание движения с помощью прикладывания момента сил в лодыжках. Далее эти этапы повторяются, начиная шаг с правой ноги. Входные сигналы для положения коленных и бедренных суставов правой ноги приведены на рис. 1.

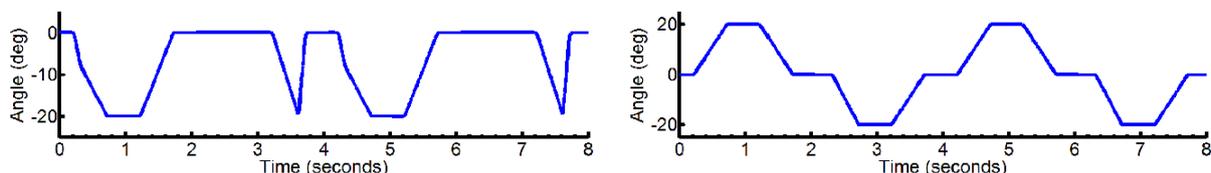


Рис. 1. Входные значения углов для правого колена (слева) и бедра (справа)

Движение робота вперед в конце шага компенсируется с помощью прикладывания момента сил в лодыжках, при том что углы в тазобедренных и коленных суставах равны нулю. Значение момента силы вычисляется согласно уравнению (3), где φ – угол голеностопного сустава, $c = 10$ – жесткость, $d = 4$ – коэффициент затухания. Уравнение (3) – это стандартное представление затухающих колебаний. Поскольку колебания не могут затухать моментально, время Δt необходимо до начала нового движения другой ногой.

$$T = -c - d\dot{\varphi} . \quad (3)$$

Для решения описанных выше дифференциальных уравнений использовался решатель “ODE 23t” из пакета Simulink. На рис. 2 показана последовательность движений робота при выполнении одного шага.

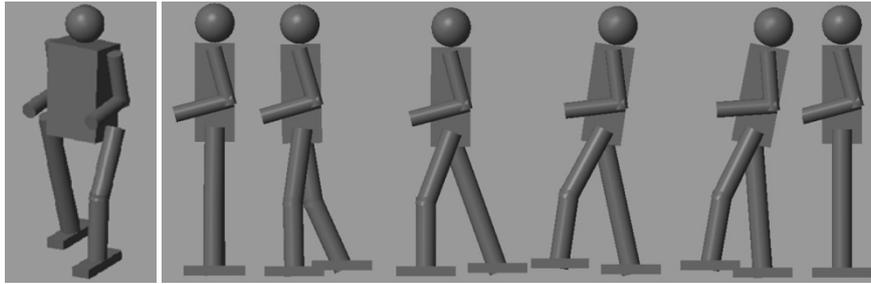


Рис. 2. Модель робота в Simulink и шаг робота. Робот движется справа налево

Плавность походки и ее устойчивость говорит о правильном выборе параметров симуляции, корректно составленной модели робота и верно реализованном алгоритме локомоции робота. Данный алгоритм локомоции позволяет роботу передвигаться со скоростью 0,3-0,4м/с, график скорости робота показан на рис. 3.

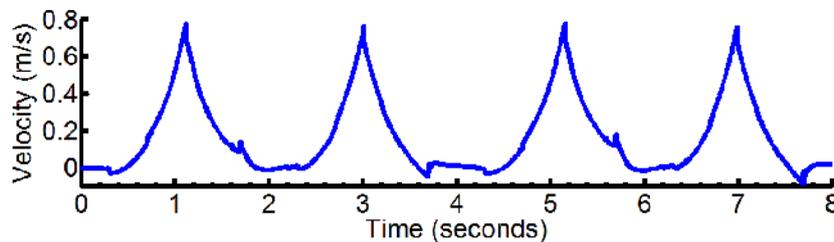


Рис. 3. Поступательная скорость торса робота

В начале каждого шага скорость тела равна нулю. Значения крутящих моментов, подаваемых на тазобедренный и коленный суставы правой ноги показаны на рис. 4.

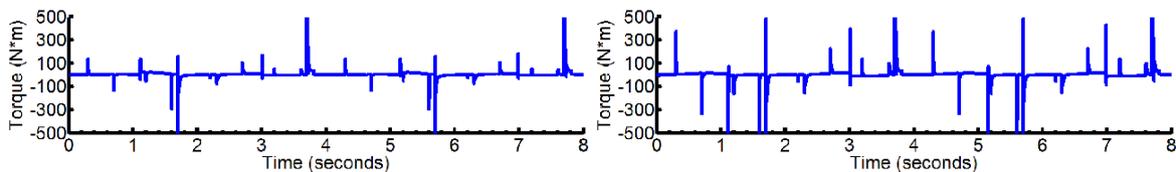


Рис. 4. Момент сил в правом коленном (слева) и тазобедренном суставе (справа)

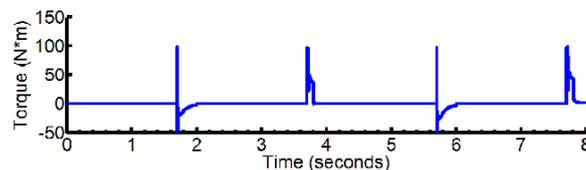


Рис. 5. Момент сил в правой стопе

Симуляция показывает, что максимальный крутящий момент, достигаемый в двигателях, равен примерно 500 Н·м в тазобедренном суставе и 300 Н·м в коленном суставе. В то же время видны скачки значений крутящего момента, вызванные скачками силы реакции опоры. Значение крутящего момента в стопе приведено на рис. 5. Как и ожидалось, крутящий момент по-

дается в последней фазе движения ноги робота, для того чтобы компенсировать поступательное движение робота вперед. В данной симуляции длительность одного шага равна 2 секундам и между шагами есть пауза в 0,5 секунды, необходимая для полной остановки робота.

Заключение

Статья описывает математическое моделирование системы управления (СУ) и симуляцию прямохождения робота AR601-М с использованием данной СУ. Моделирование и симуляции были осуществлены в среде MATLAB/Simulink с использованием пакета SimMechanics. Созданный алгоритм СУ прямохождения основан на методе базовых компонент ходьбы. Был проведен анализ походки робота, оценена скорость движения и максимальные моменты сил на осях. Плавность походки и ее устойчивость говорят о правильном выборе параметров моделирования и симуляции прямохождения, корректно составленной модели робота и верно реализованном алгоритме передвижения робота. Представленная модель является отправной точкой для последующего улучшения как модели симуляции, так и алгоритмов прямохождения и подходов управления роботом.

Исследование было поддержано Министерством образования и науки Российской Федерации по федеральной целевой программе "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" (Соглашение 14.609.21.0004, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60914X0004), а также индустриальным партнером проекта ПАО НПО «Андроидная Техника».

Список литературы

1. Официальный сайт Gazebo [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.gazebosim.org/>.
2. Официальный сайт V-REP [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.coppeliarobotics.com/>.
3. Официальный сайт Matlab/Simmechanics [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.mathworks.com/products/simmechanics/>.
4. Goldsmith W. Impact: the theory and physical behavior of colliding solids. Courier Dover Publications, 2001.
5. Hunt K.H., Crossley F.R.E., Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact. ASME J. of Applied Mechanics, 42(2), 1975. – pp. 440–445.
6. Denk J., Schmidt G., Synthesis of walking primitive databases for biped robots in 3-D environments. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 2003, Vol. 1. – pp. 1343–1349.

Секция 2

**СПЕЦИАЛЬНАЯ
РОБОТОТЕХНИКА**

А.А. Богданов, главный конструктор, bogdanov@npo-at.com
НПО «Андроидная техника», г. Москва, Россия
И.М. Кутлубаев, д.т.н., профессор, ptmr74@mail.ru
МГТУ им. Г.И.Носова, г. Магнитогорск, Россия
А.Ф. Пермяков, генеральный директор, director@rusandroid.com
Е.В. Попова, и.о. руководителя НПО, evpopova@npo-at.com
В.Б. Сычков, исполнительный директор, sychkov@npo-at.com
НПО «Андроидная техника», г. Москва, Россия

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ РАБОТЫ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Аннотация. Рассмотрены вопросы построения специальных роботов, способных выполнять действия, аналогичные выполняемым космонавтами. Определена структура построения специальных роботов, базовые требования к составляющим блокам. Представлены технические характеристики реализованных блоков: выполнения технологических операций, контроля и управления, управления блоком выполнения технологических операций.

Ключевые слова: космический аппарат, специальный робот, манипулятор, блок управления, копирующий режим управления.

BASIS OF CONSTRUCTION OF SPECIAL ROBOTS FOR OPERATION ON SPACECRAFTS

A.A. Bogdanov, chief designer, bogdanov@npo-at.com
OJSC SPA «Android Technics», Moscow, Russia
I.M. Kutlubayev, Ph.D., professor, ptmr74@mail.ru
Nosov Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk, Russia
A.F. Permyakov, chief executive officer, director@rusandroid.com
E.V. Popova, deputy director of education and research department, evpopova@npo-at.com
V.B. Sychkov, executive director, sychkov@npo-at.com
OJSC SPA «Android Technics», Moscow, Russia

Abstract. Questions of design of special robots capable to carry out actions similar carried out by astronauts are considered. The structure of development of special robots, basic requirements to the making blocks are defined. Technical characteristics

of the realized blocks are presented: performance of technological operations, control and management, control of the block of performance of technological operations.

Key words: spacecraft, special robot, manipulator, control block, copying mode of control.

Возрастающий объем исследований, выполняемых на космических станциях, определил настоятельную необходимость в создании нового класса оборудования – специальных роботов (СР) [1].

Существующие и активно эксплуатируемые на космических аппаратах манипуляторы обеспечивают захват, перемещение, ориентацию габаритных объектов. То есть являются, по существу, транспортирующими механизмами. Работы, связанные с более сложными действиями – технологическими операциями, выполняются космонавтами. При этом ряд операций является относительно простым, например, установка и съём контейнеров «Биориск». Нагрузка на космонавта может быть существенно снижена за счет выполнения ряда технологических операций СР.

Все технологические операции характеризуются наличием движений, присущих манипуляторам (транспортные), и специфичных:

- захват и удержание объектов с развитой геометрией;
- перемещение рабочего органа по сложным пространственным поверхностям с контролируемым усилием;
- создание силовых воздействий, изменяющихся по величине и направлению.

В значительном ряде случаев технологические операции выполняются в практически недетерминированных условиях. Успешная их реализация сопряжена с необходимостью оперативной оценки ситуации, принятием решений о характере и последовательности выполняемых действий.

Следует учитывать, что весь штатный инструмент, оборудование и интерьер рассчитаны на взаимодействие с космонавтом. Данное обстоятельство является одним из ключевых факторов, определяющих требования к СР.

С учетом изложенного сформулированы базовые требования к СР:

- кинематика, присущая человеку (антропоморфный вариант построения) [2];
- внешние габариты не более аналогичных параметров скафандра космонавта;
- автономное движение с использованием штатных устройств фиксации космического аппарата;
- возможность оперативной оценки текущей ситуации и принятия адекватных решений о движении звеньев;
- выполнение согласованных действий в качестве ассистента космонавта.

С целью удовлетворения перечисленным требованиям определена схема построения и состав СР. В состав СР должны входить функциональные блоки: выполнения технологических операций, автономного передвижения и фиксации на поверхности станции (АПС), управления блоками: передвижения, функциональным, внешних коммуникаций.

НПО «Андроидная техника» выполнила ряд работ по заданию ЦНИИ-Маш, направленных на проработку решения проблем, связанных с созданием специальных роботов [3–5].

Блок выполнения технологических операций (результат работы по договору № 12/ВЗ/2011 от 21.11.2011 г. на выполнение НИР «Разработка предложений по составу и техническим характеристикам робототехнической системы антропоморфного типа для поддержания деятельности членов экипажа РС МКС» при участии ЦПК им. Ю.А. Гагарина) представляет собой торсовый вариант антропоморфного робота SAR – 400 (рис.1).

Общая масса SAR – 400 составляет 30 кг. Каждый манипулятор имеет шесть степеней подвижности и оснащен антропоморфным захватом с пятью исполнительными группами звеньев. Геометрические и кинематические параметры манипулятора соответствуют аналогичным параметрам руки человека: длина звена 3–294 мм, звена 4–224 мм, звена 1–64 мм. Углы поворота в кинематических парах $\varphi_A = 0^\circ \dots +110^\circ$, $\varphi_B = 0^\circ \dots +130^\circ$, $\varphi_C = 0^\circ \dots +110^\circ$, $\varphi_{Ж} = -120^\circ \dots +45^\circ$, $\varphi_E = 0^\circ \dots +160^\circ$, $\varphi_K = -45^\circ \dots +45^\circ$.

Моменты, создаваемые на выходных звеньях кинематических пар, находятся в пределах от 0,1 Н м до 4 Н м.

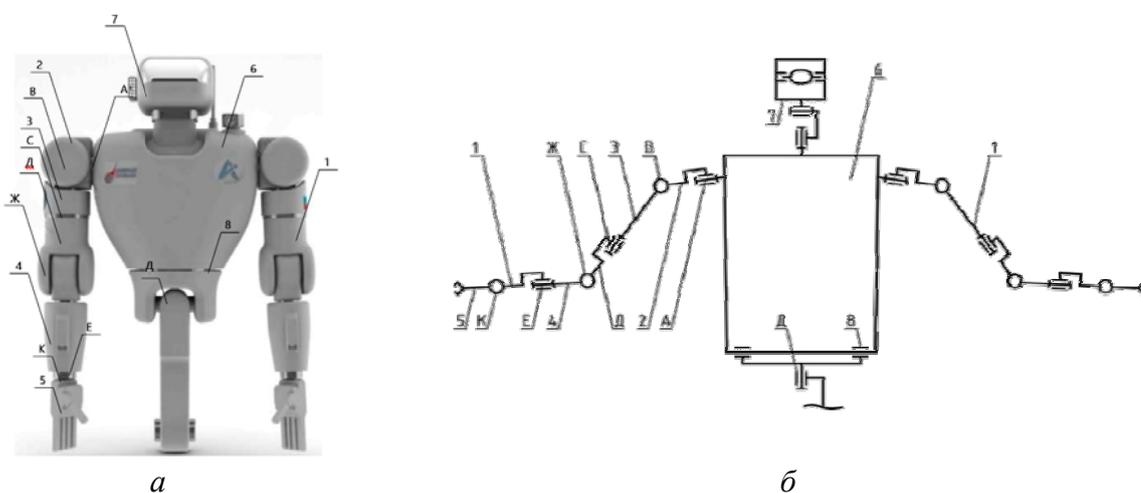


Рис. 1. SAR – 400: вид спереди (а) и кинематическая схема (б): манипулятор – 1; «предплечье» – 2; «плечо» – 3; «локоть» – 4; «кисть» – 5; корпус – 6; блок контроля – 7; подвижность корпуса типа «качание» – 8; подвижность соединения корпус – устройство фиксации (условно не показан) – Д

Принятая структурная схема робота SAR – 400 включает модули: корпус, манипуляторы, антропоморфные захваты, блок контроля и управления

(БКУ). Каждый модуль представляет собой законченную функциональную составляющую, которая может использоваться в составе иных конструкций.

Корпус является основой для компоновки остальных модулей робота, размещения плат управления, связи, обеспечивающих систем. Корпус должен обладать тремя степенями подвижности (в SAR – 400 реализован одна).

Манипулятор обеспечивает глобальные перемещения захвата и его пространственную ориентацию. Обладает шестью степенями подвижности.

БКУ предназначен для регистрации обстановки в рабочей зоне робота и окружающем пространстве. Представляет собой звено, оснащенное видеокамерами, сканерами, лидарами. Звено связано с корпусом через вращательную пару с двумя степенями подвижности.

БКУ является самостоятельным модулем или входит в состав системы визуализации.

SAR – 400 способен выполнять действия, в том числе представленные на рис. 2.



а



б



в

Рис. 2. Действия, выполняемые SAR – 400: работа с Биориском – а; открытие межмодульного люка – б; нажатие кнопок на панели управления – в

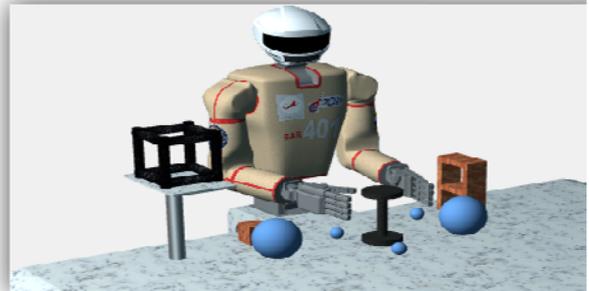
Следует отметить, что SAR – 400 может использоваться как самостоятельная изделие, так и входить в состав СР.

Принципиальным моментом является выбор типа управления. Для управления блоком выполнения технологических операций был принят ко-

пирующий тип. В основе данного типа управления лежит формирование программы движений звеньев непосредственно оператором через задающее устройство (ЗУКТ). ЗУКТ представляет собой специальную, надеваемую на оператора рычажную систему (рис. 3). За счет совпадения кинематических схем руки человека и манипуляторов обеспечивается одновременное управление всеми степенями подвижности двух манипуляторов. Имеющиеся рас-согласования в движениях руки человека и ЗУКТ компенсируются специаль-ной программой. Основным преимуществом данного типа управления явля-ется одновременная задача движения всем звеньям манипуляторов в естественном режиме движений оператора. При этом движения звеньев ро-бота соответствуют профессиональным навыкам оператора. Исследования, выполненные в рамках СЧ НИР [5], показали высокую эффективность ЗУКТ данного типа управления. Среднее время адаптации и полноценного выпол-нения роботом формируемых оператором заданий составила 15–30 мин. Тес-тировалось 34 человека в возрасте от 25 до 50 лет, в том числе 7 космонавтов.



а



б

Рис. 3. Использование ЗУКТ для управления роботом: управление SAR – 400 – а; управление виртуальной моделью SAR – 400 – б

Следует отметить, что данный тип управления совмещается с создани-ем эффекта присутствия оператора в рабочей зоне через специальный шлем виртуальной реальности, надеваемый на голову оператора (рис. 3, а). На спе-циальный экран транслируется видеоинформация с камер, установленных на БКУ.

Эффект присутствия обеспечивает качественное повышение эффектив-ности работы СР. В совокупности с виртуальной моделью SAR – 400 ЗУКТ позволяет проводить предварительную оценку: возможности выполнения по-летных заданий, используемого и создаваемого оборудования и интерьера станций. Данный программный продукт может использоваться самостоя-тельно для подготовки космонавтов и оценки проектов размещения оборудо-вания на станции.

Работы по созданию АПС находятся в активной фазе. При этом рас-сматриваются два базовых варианта. В соответствии с первым из них АПС непосредственно соединяется с торцевой моделью робота типа SAR – 400.

Второй подход основан на создании независимой платформы, на которой может быть установлено до двух роботов SAR – 400.

Выполненные работы этапа НИР по созданию и апробации экспериментальных образцов антропоморфного робота и ЗУКТ убедительно показывают правильность выбранных подходов к построению СР. Имеется готовность проведения космических экспериментов внутрикорабельной деятельности на космической станции.

Разработка варианта СР для внекорабельной деятельности требует дополнительных исследований, связанных преимущественно с разработкой систем передачи движения звеньям в условиях открытого космоса.

Список литературы

1. Богданов А.А., Кутлубаев И.М., Сычков В.Б. Перспективы создания антропоморфных робототехнических систем для работы в космосе // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 1 (3). – С. 78–84.

2. Жиденко И.Г., Кутлубаев И.М. Методика определения сигналов управления антропоморфным манипулятором // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 5. – С. 41–46.

3. Отчет о НИР «Экспериментальные исследования возможности выполнения бортовых полетных операций с использованием разработанного программно-аппаратного интерфейса, 3D-модели и физического прототипа АРТС». – Москва. – 74 с.

4. Отчет о СЧ НИР «Разработка и экспериментальные исследования макетного образца подсистемы визуализации антропоморфной робототехнической системы (АРТС), передающей оператору управления видеоинформацию из рабочей зоны АРТС. Разработка инфраструктуры рабочего места оператора АРТС». – Москва. – 57 с.

5. Отчет о СЧ НИР «Разработка и экспериментальные исследования программно-аппаратного комплекса автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора для управления мобильной антропоморфной робототехнической системой (АРТС) и эмуляции сценариев ее функционирования с использованием 3D-моделей АРТС и окружающей обстановки». – Москва. – 54 с.

К.М. Двирная, магистрант, dg1802@mail.ru
Е.Н. Каримова, магистрант, karimova.elena.74@mail.ru
Сибирский федеральный университет, г. Железногорск, Россия

МЕХАНИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО РАСКРЫТИЯ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА СИСТЕМЫ ИНФРАКРАСНОГО ТЕЛЕСКОПА «МИЛЛИМЕТРОН»

Аннотация. В работе описана конструкция зеркальной системы телескопа «Миллиметрон», описаны параметры конструктивного решения трансформирования главного зеркала, представлен прецизионный механизм раскрытия главного зеркала.

Ключевые слова: обсерватория, главное зеркало, шарнирное соединение, манипулятор, жесткостные и прочностные характеристики.

A MECHANICAL DEVICE OF THE DISCLOSURE MAIN MIRROR OF THE INFRARED TELESCOPE "MILLIMETRON"

K. M. Dvirnaya, undergraduate, dg1802@mail.ru
E. N. Karimova, undergraduate, karimova.elena.74@mail.ru
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

Abstract. This paper describes the design of a mirror system of the telescope "Millimetron", describes the parameters of a constructive solution transformation of the primary mirror, precision presents the opening mechanism of the main mirror.

Keywords: Observatory, the main mirror, swivel, rocker, stiffness and strength characteristics.

Космическая обсерватория «Миллиметрон» благодаря примененным новым технологиям имеет возросший диаметр своего центрального зеркала, что обеспечит новые важнейшие астрономические открытия. На сегодняшний день космический телескоп «Хаббл» (Hubble Space Telescope – HST) является самым крупным из действующих астрономических космических телескопов, что уже позволило продемонстрировать широту фундаментальной

астрофизики космического базирования в ультрафиолетовом, оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра и выполнять пионерские открытия в областях, о которых самим разработчикам было даже трудно себе представить. С дальнейшим развитием космических обсерваторий, таких как «Миллиметрон», с их оснащением более совершенными научными приборами и оборудованием в ближайшее время станут возможными открытия, которые будут способны поменять научные парадигмы, хотя для их реализации потребуются значительные инвестиции. Уже существуют базовые технологии для формирования соответствующих научных программ, а также общепризнанное понимание путей их продвижения, включая планирование, оценки затрат и основные этапы их реализации [1].

Космическая обсерватория «Миллиметрон» предназначена для исследования объектов Вселенной в миллиметровом, субмиллиметровом и дальнем инфракрасном диапазонах спектра электромагнитного излучения как в режиме одиночного телескопа с ультравысокой чувствительностью, так и в режиме интерферометра со сверхвысоким угловым разрешением. Этот диапазон мало изучен, но очень перспективен, поскольку содержит важнейшую информацию для космологии и внегалактической астрономии, физики звезд и планетных систем, объектов Солнечной системы. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне находятся основные излучения объектов с температурами от минимальной реликтового фона (2,73К) до температуры Земли (300К), что дает возможность наблюдения большого количества звезд и галактик. Возможно получение изображений ультракомпактных объектов, их координат и движений со сверхвысоким разрешением. Открывается уникальная возможность создания космического телескопа в диапазоне 0,25–20 мм, который с зеркалом порядка 12 м будет эквивалентен по предельно обнаружимому потоку наземному радиотелескопу со сплошной апертурой диаметром 3 км на волне 2 см [2].

Главное зеркало параболической формы формируется из стационарного центрального зеркала и подвижных лепестков (рис.). Центральное зеркало – это оболочка, подкрепленная с тыльной стороны ребрами жесткости. Диаметр центрального зеркала выбирается исходя из конструкции главного зеркала. Фиксация сложного трансформируемого рефлектора телескопа в условиях транспортировки осуществляется специальной поддерживающей конструкцией, обеспечивающей допустимые уровни его колебаний и деформаций [3].

На опорной ферме закреплены лепестки с узлами поворота и система раскрытия главного зеркала с приводами. Особенностью данного сегментного рефлектора является наклоненная в пространстве ось вращения элементов силовой конструкции. Шарнирное соединение лепестков с опорной фермой происходит посредством подвески с шестью степенями свободы, выполненными в виде манипулятора, который построен на основе параллельно соединенных приводных кинематических цепей с возможностью образования про-

странственной фермы. Это позволяет в процессе складывания главного зеркала менять свое линейное и угловое положения относительно центрального зеркала, в результате чего рефлектор трансформируется в компактную конструкцию транспортного положения, где они располагаются над центральным зеркалом вокруг вторичной системы, обеспечивая размещение рефлектора под обтекателем носителя во время выведения. После раскрытия на орбите солнцезащитных экранов производится раскрытие главного зеркала, элементы которого (лепестки и центральное зеркало) после фиксации между собой образуют его отражающую поверхность. Механизм раскрытия рефлектора состоит из четырех элементов и сегмента силовой конструкции, связанных между собой шарнирными узлами и конической парой для каждого из сегментов рефлектора [4].

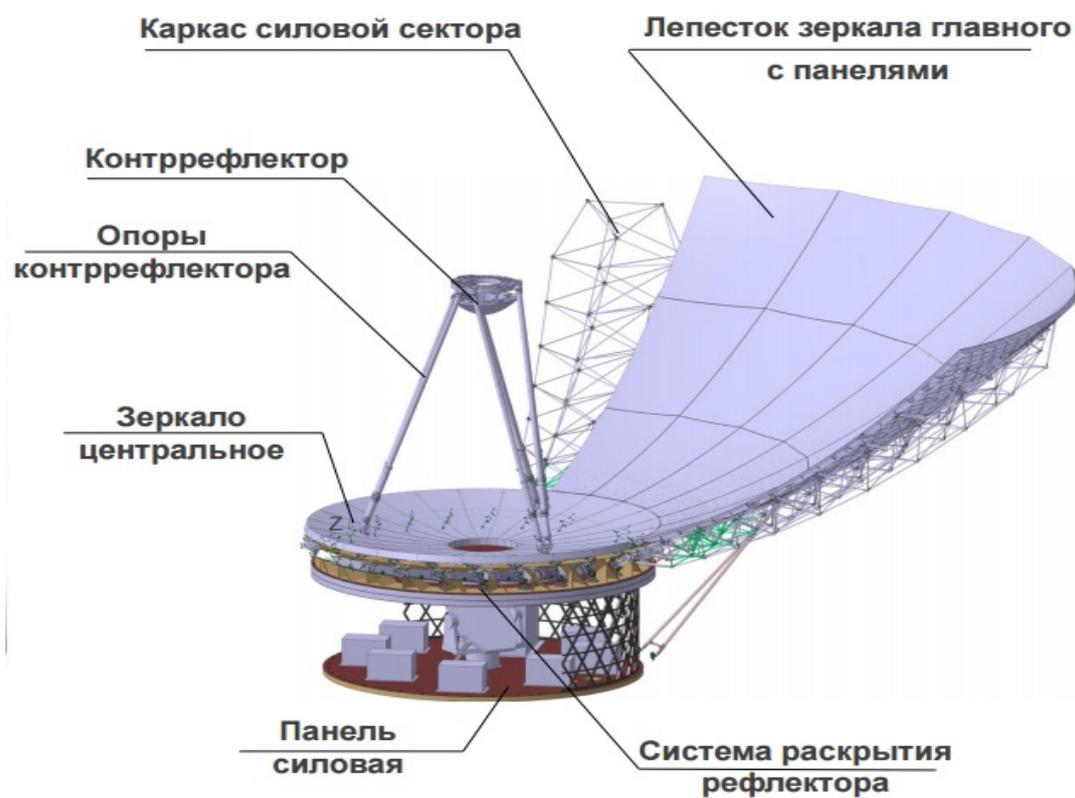


Рис. Конструкция зеркальной системы телескопа «Миллиметрон»

В процессе разработки главного зеркала необходимо решать задачу создания прецизионной конструкции, в которой из лепестков центрального зеркала формируется отражающая поверхность заданной точности и выбор конструкционных материалов для работы в экстремальных условиях дальнего космоса (температура 4К, глубокий вакуум, другие факторы внешних воздействий).

Основным параметром мехатронного трансформируемого конструктивного решения главного зеркала является точность формы его отражающей

поверхности в эксплуатационном состоянии телескопа, которая определяется точностями изготовления и сборки составляющих элементов, точностью фиксации прецизионных оболочек на каркасах лепестков, температурными деформациями, возможностями системы адаптации.

Сложенное главное зеркало в различных вариантных исполнениях имеет различные габариты укладки рефлектора. В связи с этим после размещения сложенного рефлектора в зоне полезной нагрузки под обтекателем носителя остаются различные по величине свободные объемы для размещения солнцезащитных экранов, научной аппаратуры и криогенной техники. Этот фактор наряду с точностью отражающей поверхности входит в состав определяющих параметров при выборе оптимального варианта конструктивного решения главного зеркала. При проработке укладки главного зеркала также анализировались схемы фиксации лепестков в транспортной конфигурации рефлектора для обеспечения требуемых жесткостных и прочностных характеристик сложенного зеркала на этапе выведения телескопа на орбиту.

Важными аспектами при выборе варианта конструктивного главного зеркала являются технологичность, реализуемость при современном уровне производства, возможность проведения отработки его конструкции в наземных условиях, например, испытаний в термовакуумных условиях.

Перемещения лепестков из сложенного положения в рабочее на орбите при раскрытии рефлектора осуществляется одним движением (поворотом) и после трансформации соединяются специальным фиксатором. Данный механизм раскрытия выполняет требования, предъявляемые к механизму раскрытия главного зеркала космической обсерватории «Миллиметрон», а также такой механизм раскрытия удовлетворяет жестким требованиям по размещению в зону полезного груза ракеты-носителя [4].

Список литературы

1. Официальный сайт АиФ [Электронный ресурс]: режим доступа - http://www.krsk.aif.ru/society_antenna_i_infrakrasnyy_teleskop.
2. Кардашев Н.С., Андреев В.В., Буякас В.И. и др. Проект «Миллиметрон» // Труды Физического института им. П.Н. Лебедева. – 2000. – том 228. – С. 112–128.
3. Официальный сайт Совет по космосу [Электронный ресурс]: режим доступа - http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/prez_2-2.
4. Краевский П.А., Шевцов Е.А., Давлетбаев Э.А. Механизм раскрытия главного зеркала космической обсерватории «Миллиметрон» // Решетневские чтения: Материалы XIV Международной научной конференции. – Том 1. – Красноярск: СибГАУ, 2010. – С. 63.

С.Г. Емельянов, д.т.н., ректор, rector@swsu.ru
А.Г. Курочкин, аспирант, ak.kursk@gmail.com
А.В. Гривачев, аспирант, Garpun_22@mail.ru
П.В. Лоторев, аспирант, pashik_email@mail.ru
Е.А. Шиленков, м.н.с., инженер, devildj@ya.ru
М.А. Шевченко, аспирант, shevamaxx@mail.ru
Юго-Западный государственный университет, г.Курск, Россия

СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Аннотация. Интеллектуальное движение и автоматическое планирование маршрута позволяет осуществить цифровой анализ и отображение телеметрических данных с последующей реализацией автономного движения объекта вдоль рассчитанного маршрута.

Ключевые слова: гусеничная платформа, интеллектуальное движение, пространственная ориентация, модель движения

THE INTELLIGENT MOVEMENT OF TRACKED PLATFORM

S.G. Emelianov, Ph.D., Rector, rector@swsu.ru
A.G. Kurochkin, a graduate student, ak.kursk@gmail.com
A.V. Grivach, a graduate student, Garpun_22@mail.ru
P.V. Lotorev, a graduate student, pashik_email@mail.ru
E.A. Shilenkov, J.R.D., Engineer, devildj@ya.ru
M.A. Schevchenko, a graduate student, shevamaxx@mail.ru
South-West State University, Kursk, Russia

Abstract. The intelligent movement and automatic route planning allows to make digital analysis of mapping and telemetry data with the subsequent realization of the autonomous motion of the object along the calculated route.

Keywords: crawler platform, intellectual movement, spatial orientation, model of displacement

Современные исследования транспортных робототехнических систем – гусеничных платформ (машин) – ставят на передовой рубеж вопросы авто-

номного управления машинами с минимальным участием оператора [1]. Участие машин в боевых операциях, их функционировании в агрессивных средах (радиоактивное, химическое заражение, космическое и околокосмическое пространства, глубоководные исследования, техногенные катастрофы и катастрофы природного характера и др.) обуславливает необходимость разработки математического и программного обеспечения для управления передвижениями и действиями. При важно исследовать задающих различные режимы и характеристики движения машины на местности с учетом картографических особенностей и препятствий. Особенно необходимы практические результаты таких исследований в тех условиях, где возникает опасность выполнения работ непосредственно человеком, а также при большой удаленности объектов местности.

Основной целью исследования является разработка элементов математического обеспечения для реализации автоматического движения гусеничной техники.

Для построения аппаратно-ориентированной модели передвижения принимается, что машина движется в двумерном пространстве, т. е. не будем учитывать рельеф местности и соответственно третья координата расположения машины в пространстве.

Система управления машинами в области робототехники [1] из-за малых размеров бортовых устройств управления имеет ограниченный аппаратно-программный ресурс. Транспортные машины в первую очередь должны максимизировать объем/вес полезной нагрузки, в том числе боевого или функциональной снаряжения, боекомплекта. В силу этого использование вычислительно трудоемких методов и алгоритмов представляется попросту невозможным и определяет актуальную область исследования – создание аппаратно-ориентированных моделей, использующих их методов и алгоритмов вычисления координатно-привязанных данных о положении и движении машины и управляющих воздействий на выполнение элементарных работ, в том числе на основе методов искусственного интеллекта

Рассмотрим соотношения, имеющие место между основными величинами, описывающими движение гусеничной машины. В отсутствие проскальзывания гусениц движение гусеничной машины описывается следующими формулами [2]:

$$v = \frac{1}{2}(v_{\text{лев.}} + v_{\text{прав.}}), \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{2b}(v_{\text{лев.}} - v_{\text{прав.}}), \quad (2)$$

где v — скорость движения машины вдоль траектории; ω — угловая скорость машины ($\omega > 0$ означает движение по часовой стрелке, а $\omega < 0$ — движение против часовой стрелки); $v_{\text{лев.}}$ и $v_{\text{прав.}}$ — скорости движения левой и правой гусениц машины соответственно; b — ширина колеи.

Отсюда скорости гусениц можно найти по следующим формулам:

$$v_{\text{лев.}} = v + b\omega \quad , \quad (3)$$

$$v_{\text{прав.}} = v - b\omega. \quad (4)$$

Помимо угловой скорости движение машины при выполнении поворота характеризуется радиусом поворота [3]:

$$r = \frac{v_{\text{лев.}} + v_{\text{прав.}}}{v_{\text{лев.}} - v_{\text{прав.}}} b \quad , \quad (5)$$

где r — радиус поворота.

В случае прямолинейного движения значение радиуса не определено, так как $v_{\text{лев.}} - v_{\text{прав.}} = 0$. Отметим, что эта ситуация не может быть улучшена заменой радиуса на кривизну:

$$\kappa = r^{-1} = \frac{v_{\text{лев.}} - v_{\text{прав.}}}{v_{\text{лев.}} + v_{\text{прав.}}} b^{-1} \quad . \quad (6)$$

Математически ситуацию можно исправить, дополнив множество действительных чисел \mathbb{R} специальным значением «в бесконечности», делающим полученное множество гомеоморфным одномерной сфере S_1 [4, 5, 6]. С использованием радиуса поворота скорости гусениц можно найти по формулам:

$$v_{\text{лев.}} = v \left(1 + \frac{b}{r} \right), \quad (7)$$

$$v_{\text{прав.}} = v \left(1 - \frac{b}{r} \right). \quad (8)$$

Наконец, еще одной важной характеристикой движения машины является центростремительное ускорение. Его можно найти по формуле [7]:

$$a_{\mathbf{n}} = \frac{1}{4b} (v_{\text{лев.}}^2 - v_{\text{прав.}}^2) \quad , \quad (9)$$

где $a_{\mathbf{n}}$ — центростремительное ускорение.

Пусть в настоящий момент электромотор, приводящий в движение гусеницу характеризуется оборотами, в то время как на основе вычисленной скорости гусеницы заданными являются обороты. Предлагается задавать функцию f следующим образом:

$$f(n, \tilde{n}) = a \operatorname{th}(ba^{-1}(\tilde{n} - n)), \quad (10)$$

где a — параметр, задающий максимально допустимое абсолютное значение изменения оборотов в единицу времени. Известно, что для $u \in (-\infty, +\infty)$ выполняется $-1 < \operatorname{th} u < 1$, значит для любых n и \tilde{n} выполняется и $-a < f(n, \tilde{n}) < a$. Параметр a оказывает наибольшее влияние на значение функции $f(n, \tilde{n})$ при больших значениях $|n - \tilde{n}|$. Единица измерения параметра a определяется как об./с²; b — параметр, задающий коэффициент пропорциональности между изменением оборотов в единицу времени \dot{n} и разницей текущих и заданных оборотов $\tilde{n} - n$. Чем выше значение параметра b , тем быстрее реакция на изменения заданного числа оборотов:

$$f_n(n, \tilde{n}) = \frac{b}{\operatorname{ch}^2(ba^{-1}(n - \tilde{n}))}. \quad (11)$$

Параметр b оказывает наибольшее влияние на значение функции $f(n, \tilde{n})$ при малых значениях $|n - \tilde{n}|$.

В итоге положение машины в географической системе координат определяется по формулам [8, 9]:

$$\phi = \phi_{\text{нач.}} + \frac{y}{\Delta y(\phi_{\text{нач.}})} \quad \text{и} \quad \lambda = \lambda_{\text{нач.}} + \frac{x}{\Delta x(\phi_{\text{нач.}})},$$

где ϕ и λ — положение машины в географической системе координат; $\phi_{\text{нач.}}$ и $\lambda_{\text{нач.}}$ — положение некоторой начальной точки, находящейся в зоне действия машины (предполагается, что расстояние от этой точки до машины всегда достаточно мало в сравнении с размерами Земли; x и y — положение машины относительно начальной точки (считается, что ось ОХ направлена на восток, а ось ОУ — на север); Δy и Δx — длины дуг широты и долготы, размером в один градус, выраженные в метрах.

Длины дуг будут находиться по формулам:

$$\Delta y(\phi) = \frac{2\pi}{360^\circ} \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \phi)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{и} \quad \Delta x(\phi) = \frac{2\pi}{360^\circ} \frac{a \cos \phi}{(1-e^2 \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}}},$$

где a — большая полуось земного эллипсоида; e — эксцентриситет земного эллипсоида.

Таким образом, в исследовании выполнено уточнение математической модели и получены дополнительные величины отношений текущих оборотов гусениц, что позволило увеличить оперативность при управлении платформой.

Список литературы

1. Курочкин А. и др. Аппаратная модель автомобильного // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы. Мат. докл. II регион. науч.-тех. конф. «ИИС-2014» – Курск: 2014. – С. 36–39.
2. Гонсалес Р., Родригес Ф., Гусман Дж. Л. Автономный гусеничный Robotsin Planar в условиях бездорожья: Моделирование, локализация и контроль движения - Springer, 2014. – 36 с.
3. Титенко Е.А. и др. Продукционная машина-генератор для обработки символьных данных дискретных объектов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. Ч.1. – 2012. – №2. – С.111–115.
4. Курочкин А., Емельянов С. Анализ алгоритмов поиска по образцу для управления группой роботов // Информационно-измерительные и управляющие системы. Т.15. – 2014. – №12. – С. 4–9.
5. Курочкин А. Метод и алгоритмическая схема модели ситуации «боевые интеллектуальные роботы – внешняя среда» // Оптико-электронные приборы и устройства в системе распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: Материалы XII междунар. научн.-тех. конф. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2015. – С. 203–205.

Б.И. Крючков, д.т.н., bik43@mail.ru
Научно-исследовательский испытательный центр имени Ю.А.Гагарина,
Звездный городок, Россия,
О.В. Толстель, к.т.н., avtor@yandex.ru
Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, г. Калининград, Россия
В.М. Усов, д.м.н., проф., khoper.1946@gmail.com
Научно-исследовательский испытательный центр имени Ю.А.Гагарина,
Звездный городок, Россия

МОДЕЛЬ ВНЕШНЕГО МИРА АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЕГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА МКС

Аннотация. Дистанционное управление антропоморфными роботами (АМР) в пилотируемом космическом полете выдвигает повышенные требования к безопасности при перемещениях АМР во внутреннем пространстве космической станции. Снижение рисков столкновений АМР с объектами рабочей среды в значительной степени зависит от построения человеко-машинного интерфейса при контроле позиционирования и навигации АМР.

В работе предложено: 1) построение модели внешнего мира АМР на основе теории нечетких множеств посредством задания пространственных отношений АМР с объектами рабочей среды; 2) применение заранее сформированного набора сценариев и прототипирование типовых ситуаций активности АМР в рабочей среде; 3) построение 3D визуального образа окружения АМР на основе многосенсорного измерения; 4) предварительная визуализация для человека-оператора (ЧО) динамического образа планируемого действия АМР.

Ключевые слова: безопасность космического полета, космонавт, антропоморфный робот, человеко-машинный интерфейс, человек-оператор (ЧО), модель внешнего мира робота, динамическое моделирование виртуальной среды, 3D-визуализация

THE USE OF THE WORLD MODEL OF THE ANTHROPOMORPHIC ROBOT FOR MONITORING ROBOT POSITIONING ON THE ISS

B. I. Kryuchkov, Ph.D., bik43@mail.ru
Yu.A. Gagarin Research & Test Cosmonaut Center, Star city, Moscow region, Russia,
O. V. Tolstel, Ph. D., avtor@yandex.ru
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia
V. M. Usov, MD, Professor, khoper.1946@gmail.com
Yu.A. Gagarin Research & Test Cosmonaut Center, Star city, Moscow region, Russia

Abstract. Remote control of an anthropomorphic robot (AMR) in manned spaceflight puts high demands on security when AMR moving in doors of Space Station. Reducing the risks of collisions AMR with objects in working environment largely depends on the HMI under monitoring of indoor-positioning and indoor-navigation of mobile robots. In this paper we suggested: (1) the construction of world model of AMR on the basis of the theory of fuzzy sets by specifying spatial relationships of AMR with objects in working environment; (2) the use of pre-formed set of scenarios and prototyping typical situations AMR activity in the work environment in doors of Space Station; (3) the construction of a dynamic visual image of the work environment on the basis of multi-measurement; (4) the preliminary visualization for the human-operator the 3D dynamic image of the planned actions.

Key words: safety of space flight, cosmonaut, anthropomorphic robot, human-operator (HO), human-machine interface (HMI), world model of the robot, dynamic simulation of the virtual environment, 3D-visualization

Современные тенденции построения человеко-машинных интерфейсов (ЧМИ) свидетельствуют в пользу применения синтезированных искусственных сред для информационной поддержки специалистов при моделировании систем «ЧО – АМР – рабочая среда» и изучения вопросов обеспечения безопасности их функционирования. Информационные технологии для этих целей могут быть построены на 3D-представлении виртуальной среды и имитационных моделях функционирования ее активных агентов. На программно-аппаратном уровне реалистичная визуализация достигается применением в различных сочетаниях технологий наложения визуальных сцен, формируемых и/или полученных из разных источников, для получения интегрированного представления на системе отображения информации ЧО, контролирующего активность АМР.

Необходимо отметить, что эти технологии имеют большой потенциал внедрения не только на этапах эргономического проектирования систем «человек – техника», но и в процессе информационного обеспечения реальной деятельности, в частности, при обеспечении взаимодействия космонавта с мобильным антропоморфным роботом на орбитальной станции.

В настоящее время известен разнообразный арсенал инструментальных средств, который может применяться для исследования безопасности перемещения АМР в замкнутом пространстве гермообъекта для уточнения сценариев взаимодействия активных агентов.

Для 3D-визуализации считается необходимым применять инструментарий, включающий различные онтологии виртуальной среды, состоящие из объектов виртуального мира и действий, которые можно производить с объектами этой среды.

Особое место в разработке виртуальной среды должно отводиться описаниям сценариев возможных действий ЧО, направленным на получение ре-

зультата, определяемого целевым заданием для АМР. Для того чтобы декларативные описания ситуаций применения роботов от экспертов предметной области могли найти представление на уровне знаний презентационного уровня, которые должен предусмотреть разработчик виртуальной среды, необходимо включить в разработку построение некоторой «декларативной модели и разработать метод интерпретации декларативной модели виртуальной среды, заключающийся в определении способа построения виртуальной сцены» [1, 2]. Эта методология имеет потенциал внедрения при анализе вопросов безопасности применения АМР.

Инструментарий интерпретации конкретного проекта для генерации по нему виртуального мира дает исследователям тот конструктивный механизм отбора вариантов взаимодействия ЧО и робота, который позволяет:

- 1) проверить гипотезы достижимости целей такими средствами;
- 2) выявить риски для человека и его окружения в плане обеспечения безопасности проводимых работ.

Визуализация виртуальной сцены по результатам моделирования активных агентов должна позволить динамично изменять объемные сцены виртуального пространства, предлагать к разработке и реализации новые механизмы манипулирования объектами, менять состав показателей состояния виртуальной среды для контроля процессов, протекающих в ней, предлагать разные способы получения обратной связи для ЧО [12].

Создание виртуальной среды для целей проверки безопасности перемещения мобильного робота в рабочей среде включает ряд этапов:

- разрабатываются 3D-модели объектов виртуального мира;
- описываются сценарии поведения и возможного изменения отображения моделей объектов в виртуальной среде;
- формируется виртуальное окружение объектов для контролируемой ЧО среды, определяется положение объектов относительно друг друга, их размер, повороты и другие необходимые атрибуты;
- составляется описание условий трансформации среды, характер взаимного воздействия и взаимовлияния объектов друг на друга;
- создается описание возможных изменений объектов виртуального мира при воздействии на них активных агентов (членов экипажа и/или АМР) согласно сценариям применения.

Все перечисленные этапы необходимы для достижения свойства интерактивности при предварительной визуализации планируемых действий АМР в масштабе реального времени, когда заранее формализованы сценарии применения, выполнено прототипирование типовых ситуаций активности АРМ с учетом знаний о способах воздействия АМР на объекты среды и ожидаемых последствий, в том числе, негативных с точки зрения обеспечения безопасности полета. Применение виртуальной среды в интересах повыше-

ния безопасности пилотируемого космического полета дает возможность расширить контроль взаимодействия ЧО и АМР для того, чтобы:

1) проверить рабочие гипотезы достижимости целей в контексте сложившейся оперативной обстановки;

2) выявить риски в плане обеспечения безопасности текущих работ.

Построение виртуальной сцены в реальном масштабе времени должно позволять ЧО визуально воспринимать динамично изменяющиеся сцены виртуального пространства, выявлять ошибки управления АМР и возможные коллизии объектов для определения риска столкновения между ними.

Эта методология призвана дополнять априорно применяемые формализованные методы анализа исполнительной и «поведенческой активности» АМР в сложно конфигурированной рабочей среде.

От выбора инструментария для моделирования и визуализации виртуальных сред зависит уровень контроля и объем мониторинга при планировании условий применения АМР на МКС. Одной из инструментальных систем, пригодной для моделирования и визуализации исполнительной активности АМР, является среда Robot Operation System (ROS), содержащая компоненты симуляции и отладочные компоненты. В этой среде содержатся физический симулятор Gazebo и инструмент визуализации rviz. Инструмент трехмерной визуализации rviz позволяет отображать трехмерную модель робота и управлять этой моделью с помощью других пакетов среды ROS. Rviz подходит для отображения состояния АМР, данных с датчиков и тех действий, которые он совершает.

С помощью этой программной среды специалистами Балтийского университета имени И. Канта выполнены исследования по построению виртуальной среды на основе выше изложенного методического подхода применительно к внутрикорабельной деятельности космонавтов и исследованию вопросов безопасности перемещений мобильного АМР [3].

Разработанный в Балтийском государственном университете им. И. Канта программный комплекс включает:

- 1) трехмерную полигональную модель АМР;
- 2) описание кинематики модели АМР;
- 3) модели работы сенсоров АМР;
- 4) интерфейс асинхронного взаимодействия модели с высокоуровневым прикладным программным обеспечением;
- 5) набор полигональных сред окружения модели, предназначенных для разработки и отладки прикладного обеспечения.

Предусмотрено выполнение требований:

- совместимости данного программного комплекса с архитектурой высокоуровневой системы управления АМР;
- обеспечения точности симуляции, достаточной для разработки и отладки алгоритмов системы динамического равновесия и навигации.

Ниже приведены примеры построения виртуальной модели АМР и 3D-визуализации отсеков рабочей среды на МКС в интересах моделирования внутрикорабельной деятельности космонавтов, дистанционно управляющих АМР (рис. 1, 2).

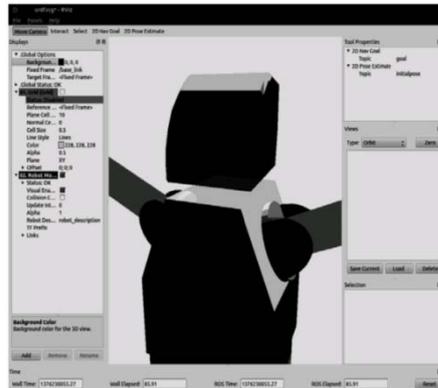


Рис. 1. Виртуальная модель АМРТ в rviz

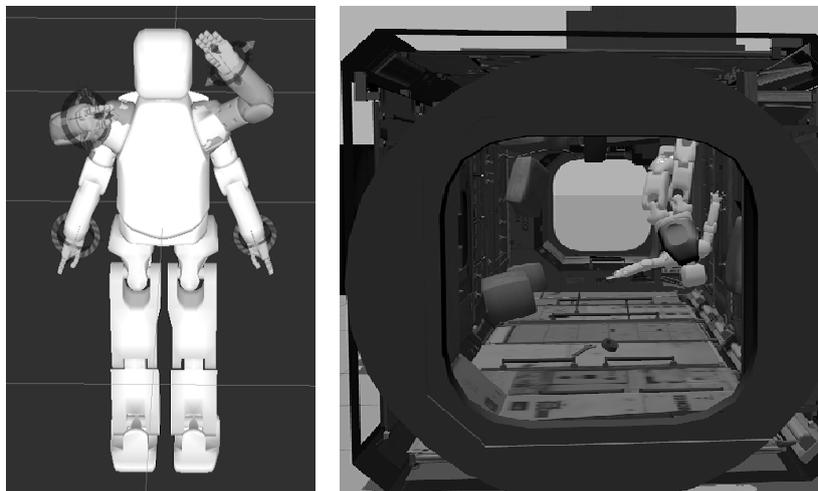


Рис. 2. Виртуальная модель АМAMP в rviz (слева) и в Gazebo (справа)

Внедрением указанных информационных технологий достигается реализация способов контроля активности АМР в форме предварительной визуализация для ЧО динамического образа планируемого действия АМР в рамках заранее сформированного набора сценариев и прототипирования типовых ситуаций активности АМР в рабочей среде. Это требует отображения для ЧО 3D-визуального образа окружения АМР на основе многосенсорного измерения параметров окружающей обстановки сенсорами АМР для характеристики взаимного расположения стационарных объектов и мобильных агентов. Кроме того, для рационального взаимодействия космонавта с АМР необходимо добиваться такого уровня интеллектуализации АМР, чтобы внутреннее представление модели внешнего мира у мобильного робота соответствовало привычным представлениям человека об ориентировке в рабочей среде, категориям оценки удаленности АМР от объектов среды по критериям «антропометрических данных» манипуляторов АМР и вытекающим из этих оценок выводам о безопасности планируемых форм активности АМР для человека и критичных по режимам

функционирования бортовых систем. Такие решения на основе методов нечеткой логики предлагаются в ряде публикаций [4, 5]. В данной работе предлагается построение модели внешнего мира на основе методов теории нечетких множеств посредством задания пространственных отношений АМР с объектами рабочей среды и отображение для ЧО на средствах СОИ различных зон «достижимости» по критерию безопасности.

Из литературы по эргономике, посвященной вопросам организации рабочего места ЧО, известны принципы формирования моторного поля и требования по безопасности организации труда [7]. Эти данные могут служить для определения зон безопасности вблизи мобильного робота и характеристик моторного поля манипуляционного робота применительно к объектам рабочего окружения. Это позволяет с помощью лингвистических переменных задать уровень безопасности при различных удалениях человека и объектов среды от АМР, задать наиболее удобную зону позиционирования АМР для выполнения манипуляций по заранее сформированному сценарию, а также построить с помощью технологий дополненной реальности другие необходимые для принятия решений элементы визуализации, соответствующие принципу «внешнего наблюдателя» [8].

Таким образом, предложены новые решения в области построения человеко-машинного интерфейса при контроле позиционирования и навигации АМР для обеспечения безопасности пилотируемых космических полетов.

Список литературы

1. Грибова, В.В. Обучающие виртуальные системы и средства их создания / Грибова В.В., Федорищев Л.А. // Вестник информационных и компьютерных технологий. 2012. №3. – С.48–51.
2. Грибова, В.В. Инструментальный сервис для создания виртуальных интерактивных облачных сред / Грибова В.В., Федорищев Л.А. // Information Technologies & Knowledge. 2013. Vol.7. №3. – pp. 277–281.
3. Орешков, С.С. Создание программного комплекса симуляции работы АМР AR-600 / С.С.Орешков, О.В. Толстель // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2013. Вып. 10. – С. 77–80.
4. Ющенко, А.С. Методы нечеткой логики в управлении мобильными манипуляционными роботами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2012. – С. 29–43.
5. Станкевич, Л.А. Искусственные когнитивные системы. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. XII Всесоюзная НТК «Нейроинформатика-2010». Лекции по нейроинформатике. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 106–161.
6. Корягин, Е.В. Разработка высокоуровневой системы управления антропоморфным роботом // Нейроинформатика, 2013, том 7, № 1. – С. 1–17.
7. Мунипов, В. М. Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды: Учебник. / В. М. Мунипов, В. П. Зинченко. – М.: Логос, 2001. – 356 с.
8. Тимофеев, А.В. Интеллектуальное и мультиагентное управление робототехническими системами. / А.В.Тимофеев // Экстремальная робототехника: мат. XI науч.-техн. конф. СПб: СПбГТУ, 2001. С. 9–16.

И.С. Ярков, инженер, yarkov@mail.ru
Е.А. Яркова, диспетчер, hedgehogus@rambler.ru
АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева»,
г. Железногорск, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТУРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. На сегодняшний день одним из основных критериев эффективности роботизированного комплекса и его компонентов является высокий коэффициент его надежности и безаварийности. Необходимость соответствия таким задачам вынуждает разработчиков увеличивать число контролируемых параметров и, как следствие, применять множество датчиков. Данный подход ведет к увеличению опасности роста температуры компонентов и окружающей среды в системах электроники. Для решения этой проблемы в статье предлагается использовать современные технологии в виде контурных тепловых труб с капиллярным насосом.

Ключевые слова: система терморегулирования, контурная тепловая труба, капиллярный насос

USING THE LOOP HEAT PUPES IN THE COOLING SYSTEMS OF ROBOTIC SYSTEMS

I.S. Yarkov, engineer, yarkov@mail.ru
E.A. Yarkova, dispatcher, hedgehogus@rambler.ru
JSC ISS, Zheleznogorsk, Russia

Abstract. Today, one of the main criteria of efficiency of robotic systems and their components, it is a high rate of reliability and safety. Need to comply with such problems is forcing developers to increase the number of monitored parameters and, as a consequence, to use a plurality of sensors. This approach increases yhe danger of temperature rise of components and ambient electronics systems.To solve this problem, the article proposed the use of modern technology in the form of a loop heat pipe with capillary pump.

Key words: termal control system, loop heat pupes, capillary pump

Каждый роботизированный комплекс проектируется в зависимости от поставленных задач: подбираются допустимые материалы, габариты изделия, компоновка систем жизнеобеспечения, целевая аппаратура. Необходимость поддержания высокой надежности и безаварийности сложных роботизированных систем вынуждает разработчиков увеличивать число контролируемых параметров и, как следствие, применять множество разнообразных датчиков физических величин.

В устройствах комбинированного типа, таких как аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, погрешности, вызванные тепловыми шумами, накладываясь друг на друга, в конце концов становятся одной из основных причин, ограничивающих их точность. Общая проблема — механические напряжения в конструктивных элементах печатной платы, деформация платы, отслаивание и разрыв проводников, микротрещины и ускоренное окисление металлических поверхностей [1]. Но наибольшую опасность рост температуры внутри систем и отдельных ее компонентов представляет в системах электроники.

Система охлаждения, предназначенная для отвода тепла от силовых узлов, является одним из главных элементов всего роботизированного комплекса, во многом определяющим его надежность и долговечность. В качестве средства повышения эффективности теплопередачи в состав систем терморегулирования могут применяться тепловые трубы.

Тепловая труба выполняется из материалов с высокой теплопроводностью и внешне не сильно отличается от обычных медных трубок. Внутри она полая, а ее стенки покрыты пористым материалом, по которому жидкий теплоноситель стекает от радиатора к горячему концу. Нагреваясь, жидкость испаряется, поглощая тем самым тепло охлаждаемого компонента. Горячий пар по внутренней полости трубки свободно поднимается вверх, к радиатору, где, остывая, вновь превращается в жидкость, впитывается пористым материалом стенок и стекает к горячему концу. Покрывая стенки пористым материалом с капиллярной структурой, удается достичь подъема жидкости даже против действия сил притяжения [2] (рис.1).

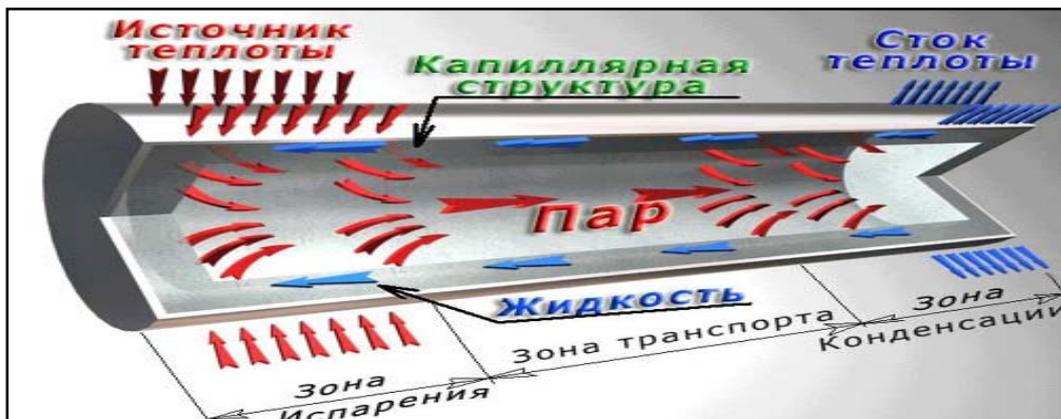


Рис. 1. Принципиальная схема тепловой трубы

Тепловые трубы – в первую очередь это возможность передачи сотен ватт и даже киловатт – скрытая теплота испарения характеризуется очень солидными величинами (тысячами джоулей на грамм вещества). И если испарять массу жидкости порядка нескольких граммов в секунду, то с паром будет переноситься тепловой поток, оцениваемый киловаттами или десятком киловатт. Другая интересная особенность – это возможность концентрации тепловой энергии (системы тепловых труб могут работать в комплексе с большим количеством тепловых источников и гибко встраиваться под разработанные системы). С помощью тепловых труб можно решать следующие важные для роботизированных комплексов задачи:

1) Обеспечение пространственного разделения источника и стока теплоты. Высокая эффективная теплопроводность тепловой трубы позволяет передавать с ее помощью теплоту на значительные расстояния при малом температурном напоре. Во многих случаях, когда требуется охлаждение отдельных элементов, может оказаться неудобным или нежелательным отвод теплоты с помощью стока или радиатора, расположенных непосредственно у охлаждаемого элемента.

2) Снижение градиентов температуры между неодинаково нагретыми участками тела, исходя из особенностей спроектированной конструкции, а именно, стремление к работе в условиях равномерной температуры.

На сегодняшний день самой перспективной является работа в направлении активного использования контурных тепловых труб (КТТ), которые по многим характеристикам превосходят обычные тепловые. В основе КТТ лежит испаритель (капиллярный насос) с высокопористой структурой из спеченного порошка металла с диаметром пор около 2 мкм. При подводе тепловой нагрузки к активной зоне капиллярного насоса-испарителя, находящегося в составе теплопередающего устройства, жидкая фаза теплоносителя поступает в центральный канал 3 и через его поверхность впитывается в капиллярно-пористую насадку 2. За счет капиллярных сил жидкость движется преимущественно в радиальном направлении навстречу тепловому потоку, создаваемому тепловой нагрузкой от какого-либо источника тепла. Под воздействием тепла жидкость испаряется в азимутальные пароотводные канавки 5 и проточки 4. Образовавшийся пар отводится в паровой коллектор 6 или в дополнительные паровые коллекторы 8, которые связаны с паропроводом теплопередающего устройства. Кроме того, благодаря высокому напору нет существенных ограничений по положению контурной тепловой трубы относительно горизонта в условиях наземных испытаний [3] (рис. 2).

Еще одно важное преимущество контурных тепловых труб – это возможность отвода тепла на радиационные панели двустороннего излучения при использовании гибких участков магистралей и механизма раскрытия. Это особенно важно при создании роботизированных комплексов, где тре-

буются большие площади радиационных поверхностей, для которых становится недостаточно места на самом аппарате.

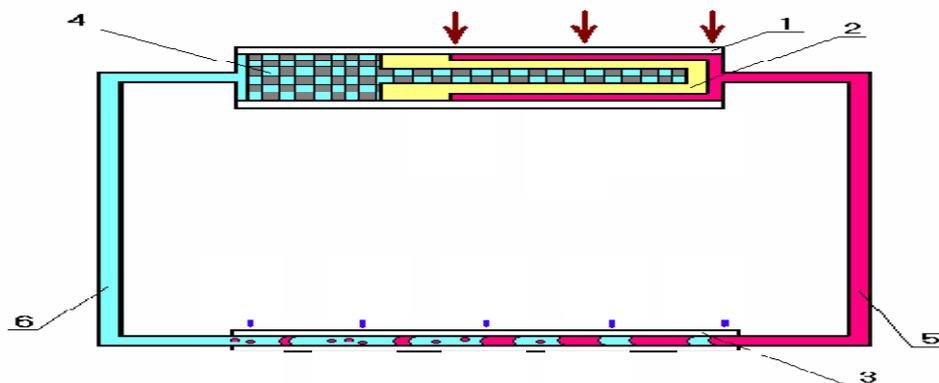


Рис. 2. Контурная тепловая труба, принципиальная схема:
1 — испаритель; 2 — капиллярный насос (КН); 3 — конденсатор;
4 — компенсационная полость (КП); 5 — паровой канал;
6 — жидкостный канал

В настоящее время трудно найти более эффективное устройство для передачи тепловой энергии, чем контурная тепловая труба, в которой за счет сил поверхностного натяжения создается капиллярный напор до 0,4 атм. при использовании аммиака, что обеспечивает циркуляцию пара и жидкости по контуру на десятки метров при очень малых, в несколько миллиметров, размерах магистралей. Данные контурные тепловые трубы успешно применяются при наземной отработке космических аппаратов.

Наряду с достоинствами у КТТ имеется и довольно существенный недостаток: предел практического действия ограничен длиной ее активной зоны, что является поводом для дальнейших научных исследований и разработок, особенно в области использования роботизированных комплексов в космическом пространстве.

Список литературы

1. Антонов Е.И., Ильин В.Е., Коленко Е.А., Петровский Ю.В., Смирнов А.И.. Устройства для охлаждения приемников излучения. – Ленинград: Машиностроение, 1969. – 248 с.
2. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика/ пер. с англ. В.Я.Сидорова. – М.: Машиностроение, 1981. – 207 с.
3. Чеботарев В.Е., Косенко В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие. – Красноярск: СибГАУ, 2011. – 488 с.

Секция 3

**СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО
ИНТЕЛЛЕКТА В УПРАВЛЕНИИ
РОБОТАМИ
И В ПРОМЫШЛЕННОЙ
АВТОМАТИЗАЦИИ**

ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СТОХАСТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Аннотация. В работе рассмотрены подходы, позволяющие строить оценки погрешности численного моделирования в условиях стохастической неопределенности.

Ключевые слова: численный вероятностный анализ, оценки погрешности, численное моделирование, гистограммный подход

ERROR ESTIMATE FOR NUMERICAL MODELING UNDER STOCHASTIC UNCERTAINTY

B.S. Dobronets, professor, BДobronetsr@yandex.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The paper discusses the approach allows to construct estimates of the error in a numerical simulation under stochastic uncertainty

Key words: Numerical probabilistic ananalysis, error estimation, numerical simulation, histogram approach

Робототехника является передовой частью научного и технического прогресса. Она объединяет многие наукоемкие технологии. Развитие робототехники важно для обеспечения безопасности страны, экономики и нашей социальной сферы.

Такое направление в робототехнике как искусственный интеллект новых роботов во многом основывается эффективными алгоритмами решения различных математических моделей. Робототехника будущего будет определяться не только конструкциями механических приводов и платформ, но и конструкцией математических моделей.

При численном решении математических моделей важное значение имеет надежность вычислительных алгоритмов. Надежные вычисления (reliable computing) достигаются учетом многих факторов, прежде всего оценками погрешности вычислительных алгоритмов и учетом неопределенностей входных данных.

Неопределенность входных данных может быть представлена как элиторная и эпистимическая. Первая носит случайный характер и позволяет использовать повторные выборки для оценки плотностей вероятности случайных величин. Для второго типа подобной информации не существует. К последнему типу можно отнести интервальную неопределенность.

В середине 50-х годов прошлого века именно для интервальной неопределенности, представленной интервальными числами, был разработан интервальный анализ. В настоящее время интервальный анализ занимает важное направление вычислительной математики. При всей его развитости и широте применения интервальные оценки дают порой неоправданно широкие интервалы.

В последнее время успешно развивается подход, основанный на численных операциях над плотностями вероятности случайных величин — Численный Вероятностный Анализ (ЧВА). Одним из ключевых направлений в ЧВА является гистограммный подход [1, 2].

Гистограммой называется случайная величина, плотность распределения которой представлена кусочно-постоянной функцией. Гистограмма $\hat{f}(x)$ определяется сеткой $\{x_0, x_1, \dots, x_n\}$, на каждом отрезке $[x_i, x_{i+1})$ гистограмма принимает постоянное значение f_i .

В символическом анализе данных и Data Mining гистограммы используются для исследования множества различных процессов и применяются для описания изменчивости количественных признаков. Использование гистограмм обусловлено прежде всего тем, что позволяет достаточно точно представлять произвольные распределения. Важно отметить, что, несмотря на свою простоту, гистограммы охватывают все возможные интервалы оценки плотности вероятности. Наиболее популярными из них являются гистограммы с фиксированной шириной столбцов, которые широко используются на практике, а так же полиграммы и полигоны.

Численный вероятностный анализ с успехом работает в задачах численного моделирования в условиях элиторной и эпистимической неопределенности. В тех случаях, когда известны плотности вероятности случайных величин ЧВА использует такие понятия как вероятностные расширения [2, 3]. В случае эпистемической неопределенности для численного моделирования в рамках ЧВА используются *гистограммы второго порядка, гистограммные функции распределения* [3].

Численный вероятностный анализ нашел применение в таких задачах представления и обработки данных космического и наземного мониторинга, к представлению и прогнозированию временных рядов, агрегации, регрессионного моделирования и анализа данных [4–7].

Важное значение для практики имеют решаемые с использованием ЧВА задачи оценки надежности технических систем в условиях неполной и недостаточной информации [8, 9].

Таким образом, при численном моделировании с использованием гистограммного подхода возникает проблема оценки точности гистограмм.

Далее рассмотрим среднеквадратичные оценки погрешности гистограмм. Будем рассматривать гистограммы с постоянной шириной столбцов h . Пусть известна выборка $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, непрерывной случайной величины Ξ с функцией плотности вероятности $f(x)$ и n — размерность выборки. Определим

$$\hat{f}(x) = \frac{v_k}{nh}, x \in [x_{k-1}, x_k],$$

где v_k — число элементов выборки ξ_i попавших в отрезок $\xi_i \in [x_{k-1}, x_k]$.

Анализ гистограмм основывается на том факте, что случайная переменная v_k распределена по биномиальному закону [10]:

$$v_k \sim B(n, p_k), \text{ где } p_k = \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx.$$

Рассмотрим среднеквадратичные оценки погрешности $\hat{f}(x)$, $x \in B_k = [x_{k-1}, x_k]$. Математическое ожидание $E[v_k] = np_k$ и дисперсия $\text{Var}[v_k] = np_k(1-p_k)$. Следовательно,

$$\text{Var}\hat{f}(x) = \frac{\text{Var} v_k}{(nh)^2} = \frac{p_k(1-p_k)}{nh^2}, x \in [x_{k-1}, x_k]$$

и

$$\text{Bias}\hat{f}(x) = E\hat{f}(x) - f(x) = \frac{1}{nh} E v_k - f(x) = \frac{p_k}{h} - f(x).$$

Далее будем предполагать, что f — Липшиц-непрерывна на $[x_{k-1}, x_k]$ с константой γ_k .

Тогда по теореме о среднем

$$p_k = \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx = hf(\xi_k), \xi_k \in [x_{k-1}, x_k].$$

$$\text{Var}\hat{f}(x) = \frac{p_k(1-p_k)}{nh^2} \leq \frac{p_k}{nh^2} = \frac{f(\xi_k)}{nh}.$$

В силу Липшиц-непрерывности

$$|f(\xi_k) - f(x)| \leq \gamma_k h.$$

Среднеквадратичная оценка погрешности

$$E[\hat{f}(x) - f(x)]^2 = \text{Var}\hat{f}(x) + (E[\hat{f}(x)] - f(x))^2 \leq \frac{f(\xi_k)}{nh} + (\gamma_k h)^2.$$

Рассмотрим апостериорные оценки погрешности для гистограмм. Пусть известны $\Xi^l = \{\xi_1^l, \xi_2^l, \dots, \xi_N^l\}$, $l = 1, 2, \dots$ — повторные выборки случайной величины X с функцией плотности вероятности $p(x)$, $[a, b]$ — носитель. Построим на $[a, b]$ сетку $\omega = \{a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b\}$ и определим число элементов m_k^l выборки Ξ^l , попавших в интервал $(x_{k-1}, x_k]$, $k = 1, 2, \dots, n$. Заметим, что

$$z_k^l = \frac{m_k^l}{N} \rightarrow p_k = \int_{x_{k-1}}^{x_k} p(x) dx. \quad (1)$$

Таким образом, значения

$$\frac{z_k^l}{x_k - x_{k-1}}, k = 1, 2, \dots, n$$

определяют на сетке ω гистограммы h^l , аппроксимирующие плотность вероятности $p(x)$. $z_k^l, l = 1, 2$, можно интерпретировать как повторную выборку случайной величины z_k с математическим ожиданием в силу (1), равным p_k и некоторой дисперсией σ_k .

Сравним случайные величины $z_k^1 - z_k^2$ и $p_k - z_k^1$. Случайная величина $z_k^1 - z_k^2$ имеет математическое ожидание равное нулю и дисперсию $2\sigma_k$, случайная величина $p_k - z_k^1$ имеет математическое ожидание равное нулю и дисперсию σ_k . Вычислим величины

$$s_1 = \sqrt{\sum_{k=1}^n (z_k^1 - z_k^2)^2}, s_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^n (p_k - z_k^1)^2}, s_3 = \sqrt{\sum_{k=1}^n (p_k - z_k^2)^2},$$

$$s = \sqrt{\sum_{k=1}^n (p_k - ((z_k^1 + z_k^2) / 2))^2},$$

при этом $s_1 \approx 2s$, но s можно интерпретировать как оценку точности построенной гистограмм h .

Правило апостериорной оценки погрешности для гистограмм можно сформулировать следующим образом.

Пусть известна повторная выборка $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{2N}\}$, на сетке $\omega = \{a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b\}$ построим гистограмму h . Оценкой погрешности построенной гистограммы можно считать норму l_2

$$s = \|p - z\|_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^n (p_k - z_k)^2}.$$

Разобьем выборку Ξ на две равные по мощности выборки Ξ^1, Ξ^2 и построим гистограммы h^1, h^2 . Вычислим оценку

$$s_1 = \sqrt{\sum_{k=1}^n (z_k^1 - z_k^2)^2},$$

при этом $s \approx s_1/2$.

Численные эксперименты при размерностях выборок больше 1000 показали хорошее согласование с теорией. Для поднятия точности в условиях выборок небольших размерностей в дальнейшем предлагается использовать технологию бутстрепа. Статистический бутстрэп (бутстреп, бутстрэппинг, англ. bootstrap, bootstrapping) — практический метод исследования распределения статистик вероятностных распределений, основанный на многократной генерации выборок методом Монте-Карло на базе имеющейся выборки. Суть

метода состоит в том, чтобы по имеющейся выборке построить псевдовыборки. На множестве псевдовыборок можно оценить не только анализируемые статистические характеристики, но и изучить их вероятностные распределения.

Список литературы

1. Добронек Б.С., Попова О.А. Элементы численного вероятностного анализа // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – № 2 (42). – С. 19–23.
2. Добронек Б.С., Попова О.А. Численный вероятностный анализ неопределенных данных: монография. – Красноярск: СФУ, 2014. – 167 с.
3. Добронек Б.С., Попова О.А. Представление и обработка неопределенности на основе гистограммных функций распределения и P-Boxes // Информатизация и связь. 2014. – № 2. – С. 23–26.
4. Добронек Б.С., Попова О.А. Гистограммный подход к представлению и обработке данных космического и наземного мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 6 (155). – С. 14–22.
5. Попова О.А. Гистограммный информационно–аналитический подход к представлению и прогнозированию временных рядов // Информатизация и связь. – 2014. – № 2. – С. 43–47.
6. Попова О.А. Численный вероятностный анализ для агрегации, регрессионного моделирования и анализа данных // Информатизация и связь. – 2015. – № 1. – С. 15–21.
7. Dobronets B.S., Krantsevich A.M., Krantsevich N.M. Software implementation of numerical operations on random variables // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Математика и физика. – 2013. – Т. 6. – № 2. – С. 168–173.
8. Dobronets B., Popova O. Numerical probabilistic approach for data nonparametric analysis // Applied methods of statistical analysis. Nonparametric approach. Proceedings of the international workshop, 2015. – С. 376–384.
9. Uglev V.A., Popova O.A., Dobronets B.S. The accuracy calculation control of reliability indices for equipment responsible appointment // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Omsk: OmGTU, 2015. (DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147248).
10. Scott R.W. Multivariate density estimation: theory, practice, and visualization. John Wiley & Sons. 2015. – 381 p.

Д.В. Егорова, студентка, dasha.eg@mail.ru
Н.А. Егоров, студент, ka3esh1n1@gmail.com
Сибирский государственный аэрокосмический университет, г. Красноярск, Россия

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРА МЕТОДОМ НЬЮТОНА

Аннотация. В работе рассмотрены подходы, позволяющие строить траекторию перемещения и ориентацию манипулятора в рабочем пространстве. Кроме того, был разобран пример числового решения обратной задачи кинематики манипулятора через линейные уравнения методом Ньютона.

Ключевые слова: робот-манипулятор, обратная задача кинематики, метод Ньютона, обобщенные координаты, конфигурации схвата

SOLUTION OF INVERSE KINEMATIC PROBLEM FOR THE MANIPULATOR BY THE METHOD OF NEWTON

D.V. Egorova, student, dasha.eg@mail.ru
N.A. Egorov, student, ka3esh1n1@gmail.com
Siberian state aerospace university, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. the paper discusses the approaches, allowing to build the trajectory of the movement and orientation of the manipulator in the workspace. In addition was demolished a numerical example of solving the inverse kinematic problem of the manipulator using linear equations with Newton's method.

Key words: robot manipulator, the inverse problem of kinematics, Newton's method, generalized coordinates, configuration of the end effector

Стремительное развитие робототехники за последние полвека позволило человечеству широко применять такие средства автоматизации, как промышленных роботов. Их базовым элементом является манипулятор – механизм, предназначенный для перемещения и ориентации объектов в рабочем пространстве и обладающий несколькими степенями подвижности [1]. Многозвенная система манипулятора завершается сменным схватом (иногда называют захватом) – инструментом, предназначенным для захвата объектов конкретной формы. За место схвата на конце данной системы имеет возможность быть закреплен сменный инструмент [2]. В данном случае с помощью

манипулятора могут быть выполнены всевозможные технологические операции, к примеру, зачистка болванок, погрузка и разгрузка автомобиля, нарезание резьбы, сверление отверстий, а также для выполнения операций на орбите с многотонными грузами. Одна из типовых конструкций манипуляторов показана на рис. 1.



Рис. 1. Конструкция промышленного манипулятора

Исследование таких манипуляторов является актуальной задачей кинематического анализа и синтеза в современной науке о механизмах. Одной из таких основных задач является обратная задача кинематики. Управление манипуляционными роботами, как правило, осуществляется в пространстве обобщенных координат, а координаты объектов манипулирования задаются в некоторой базовой системе. Таким образом, обратная задача кинематики формулируется так: требуется определить значения обобщенных координат, обеспечивающее заданное положение схвата, если известна кинематическая схема манипулятора и нахождение схвата в системе координат стойки.

Существует два типа решений: аналитическое и численное. Также существует геометрический способ.

Сложность обратной задачи кинематики в общем случае состоит в том, что для выбранной конфигурации схвата может совсем не быть решений, или будет иметься только одно решение, или их может быть сразу несколько, поэтому способ описания позиции схвата с помощью координат центра и углов Эйлера имеет явный недостаток по сравнению с описанием в обобщенных координатах, так как не определяет однозначно конфигурацию манипулятора и допускает появление нескольких конфигураций позиции, (см. рис. 2).

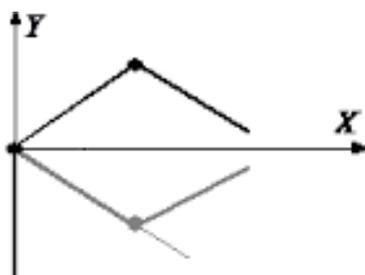


Рис. 2. Появление нескольких возможных позиций при решении одной задачи

Преимущество численного метода в том, что его относительно просто реализовать; недостатком же считается то, что он выдает только одно решение даже в том случае, когда их несколько. Кроме того, если решения отсутствуют – численный метод просто не будет сходиться. К достоинствам аналитического метода решения обратной задачи кинематики относят получение произвольной точности решения. Однако нахождение точного решения в виде аналитических зависимостей для обобщенных координат от конструктивных параметров и заданного вектора положения манипулятора представляется возможным не для всех манипуляторов [3].

На сегодняшний день существует много аналитических методов и все они опираются на особенности определенных манипуляторов. Численный метод носит более универсальный характер и применяет одинаковую процедуру вычисления для любого реального робота.

В свою очередь, его известные недостатки не играют роли в данном случае, т. к. при условии появления нескольких решений выбирается только одно, а также по причине того, что он применяется не в режиме реального времени, а заранее (вычислительная ресурсоемкость алгоритма не является проблемой).

Численный метод решения обратной задачи кинематики основан на методе Ньютона, который является эффективным методом решения нелинейных задач.

Метод Ньютона можно рассматривать как итерационный метод, использующий специальную линеаризацию задачи и позволяющий свести решение исходного нелинейного уравнения к решению последовательности линейных [4].

При использовании метода Ньютона необходимо найти набор из шести обобщенных координат $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6$. Заданными считаем шесть наддиагональных элементов матрицы T_6 . Матрица T_6 выглядит следующим образом:

$$T_6 = \prod_{i=1}^6 \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & \alpha_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & \alpha_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Значения θ_i определим путем последовательных приближений. Особенность данного решения состоит в том, что метод Ньютона применяется к функции от шести неизвестных:

$$\begin{aligned} f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) &= a_1 \\ f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) &= a_2 \\ f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) &= a_3 \\ f_4(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) &= a_4 \\ f_5(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) &= a_5 \\ f_6(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) &= a_6. \end{aligned} \quad (2)$$

В нулевом приближении дадим обобщенным координатам произвольные начальные значения $\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, \dots, \theta_6^{(0)}$. Опишем один шаг получения уточненных значений обобщенных координат по известным приближенным значениям.

Пусть k — номер шага. Приближенное значение обобщенной координаты θ_i обозначим $\theta_i^{(k-1)}$, а уточненное — $\theta_i^{(k)}$ (для первого шага приближенное значение — $\theta_i^{(0)}$, уточненное — $\theta_i^{(1)}$). Представим зависимость матрицы T_6 от обобщенных координат в виде отрезка степенного ряда Тейлора, ограниченного линейными членами, с центром разложения в точке $\theta_i^{(k-1)}$:

$$T_6 = T_6^{(k-1)} + \sum_{i=1}^6 \frac{dT_6^{(k-1)}}{d\theta_i} (\theta_i^{(k)} - \theta_i^{(k-1)}). \quad (3)$$

Здесь $T_6^{(k-1)}$ — матрица T_6 , элементы которой выражены через приближенные значения обобщенных координат.

Одному этому матричному равенству соответствуют 16 скалярных равенств (по числу элементов матрицы T_6). Так как шесть над диагональных элементов матрицы T_6 заданы, то соответствующие им равенства образуют систему линейных уравнений для шести обобщенных координат:

$$\begin{aligned} (t_6)_{12} &= (t_6)_{12}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 \left(\frac{dT_6}{d\theta_j} \right)_{12}^{(k-1)} (\theta_j^{(k)} - \theta_j^{(k-1)}) \\ (t_6)_{13} &= (t_6)_{13}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 \left(\frac{dT_6}{d\theta_j} \right)_{13}^{(k-1)} (\theta_j^{(k)} - \theta_j^{(k-1)}) \\ (t_6)_{14} &= (t_6)_{14}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 \left(\frac{dT_6}{d\theta_j} \right)_{14}^{(k-1)} (\theta_j^{(k)} - \theta_j^{(k-1)}) \\ (t_6)_{23} &= (t_6)_{23}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 \left(\frac{dT_6}{d\theta_j} \right)_{23}^{(k-1)} (\theta_j^{(k)} - \theta_j^{(k-1)}) \\ (t_6)_{24} &= (t_6)_{24}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 \left(\frac{dT_6}{d\theta_j} \right)_{24}^{(k-1)} (\theta_j^{(k)} - \theta_j^{(k-1)}) \\ (t_6)_{34} &= (t_6)_{34}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 \left(\frac{dT_6}{d\theta_j} \right)_{34}^{(k-1)} (\theta_j^{(k)} - \theta_j^{(k-1)}). \end{aligned} \quad (4)$$

Так как приближенные значения $\theta_i^{(k-1)}$ известны, то эта система позволяет определить уточненные значения $\theta_i^{(k)}$. На этом заканчивается k -й шаг метода последовательных приближений. Далее уточненные значения $\theta_i^{(k)}$ обозначаются $\theta_i^{(k-1)}$, с их помощью вычисляются матрицы $T_6^{(k-1)}$ и $\frac{dT_6^{(k-1)}}{d\theta_i}$.

Процедура нахождения $\theta_i^{(k)}$ из системы повторяется.

Чем ближе $\theta_i^{(k-1)}$ к $\theta_i^{(k)}$, тем ближе $T_6^{(k-1)}$ к T_6 и тем меньше разность $(\theta_i^{(k)} - \theta_i^{(k-1)})$. Поэтому уточнения оканчивают, когда разность становится меньше наперед заданной малой величины.

Желательно, чтобы начальное приближение было близко к искомому решению. На практике обычно вычисляется ряд последовательных обратных задач, где каждая предыдущая точка является начальным приближением для вычисления следующей, поэтому на способ формирования траектории в данном случае влияет кроме всего прочего еще и выбор метода Ньютона как способа решения обратной задачи кинематики [5].

С учетом того, что $\frac{dT_6}{d\theta_i}$ является столбцом Якобиана, то формулу метода Ньютона можно в матричном виде переписать следующим образом:

$$T_6 = T_6^{(k-1)} + J(\Theta^{(k)} - \Theta^{(k-1)}), \quad (5)$$

$$\Theta^{(k)} = \Theta^{(k-1)} + J^{-1}(T_6 - T_6^{(k-1)}), \quad (6)$$

где $\Theta = [\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5, \Delta\theta_6]^T$.

Таким образом, выходит, что существуют две трактовки формулы, в соответствии с этим есть два способа вычисления методом Ньютона: первый при помощи решения системы линейных уравнений, и второй – при помощи вычисления обратной матрицы Якоби (jacobian inverse). В первом случае столбцы Якобиана на любой итерации принимают участие в формировании системы линейных уравнений, а во втором Якобиан вычисляется целиком для дальнейшего подсчета обратной ему матрицы. Эти две точки зрения по сути являются одной, так как процесс решения системы линейных уравнений в данном случае как раз и заключается в отыскании обратного Якобиана.

Список литературы

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. – М.: Мир. 1989. – С. 624.
2. Накано Э. Введение в робототехнику. – М.: Мир. 1988. – С. 334.
3. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. – М.: Наука. 1980. – С. 400.
4. Амосов А.А, Дубинский Ю. А, Копченова Н. В. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. Пособие. – М.: Высш. Шк. 1994. – С. 544.
5. MATHSOLUTION.RU [Электронный ресурс]: режим доступа – <http://www.mathsolution.ru>.

Д.М. Картель, магистрант, kartel.denis@mail.ru
В.А. Углев, к.т.н., доцент, uglev-v@yandex.ru
Сибирский федеральный университет, г. Железногорск, Россия

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ПРИ ЛИТЬЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

Аннотация. На прочностные характеристики металлических пластин, полученных методом литья, значительное влияние имеет электромагнитное поле. Автоматизированное управление его параметрами позволяет поставить задачу комплексного исследования прочностных характеристик металлических пластин в нелинейном электрическом поле.

Ключевые слова: нелинейное электромагнитное поле, отлив металла, автоматизация.

MANAGEMENT ELECTROMAGNETIC FIELD DURING CASTING METAL OF HIGH STRENGTH

D.M. Kartel, undergraduate, kartel.denis@mail.ru
V.A. Uglev, Ph.D.Candidate, assistant professor, uglev-v@yandex.ru
Siberian federal university, Zheleznogorsk, Russia

Abstract. On the strength characteristics of the metallic plates obtained by molding, it has a significant impact electromagnetic field. Automated control of its parameters allows you to set the task a comprehensive study of the strength characteristics of the metal plates in the nonlinear electric field.

Key words: nonlinear electromagnetic field, the tide of metal, automation.

Изготовление прочных корпусов и защитных оболочек для машин и оборудования ответственного назначения, действующих в условиях агрессивной внешней среды, является актуальной задачей. Например, повышение прочности отдельных защитных пластин на корпусе космического аппарата позволяет снизить риски от столкновения с метеоритным веществом и, как следствие, повысить его надежность. В данной работе рассматривается один

из технологических факторов процесса литья – электромагнитное поле, а также обсуждаются возможности автоматизации управления им.

В работах, связанных с отливом металла в электромагнитном поле, исследуется, как правило, только однородное линейное электромагнитное поле. Исследование проводится в двух направлениях. Первое – это отлив металла для однонаправленной линейности ячеек металла, второе направление – это поиск дефектов металла путем наблюдения за искажением однородного линейного электромагнитного поля [1]. Идея данного исследования заключается в смене подхода при отливке металла: использовать не линейное электромагнитное поле, а заранее обусловленную нелинейную конфигурацию поля, используя принципы симметрии для простых и непростых функций. К простым отнесем функции синуса, параболы, гиперболы и линейные (направленные под различным углом к объекту). К сложным функциям отнесем такие функции, как степенные порядка N , экспоненциальные и логарифмические функции [2]. Так же интересны для исследования такие поля, которые позволяют создать мозаично-паркетные структуры для покрытия прямоугольника по принципу полного использования пространства.

Способ отливки осуществляется следующим образом:

- заливка расплава струей в литейную форму (прямоугольная кювета) под воздействием на расплав внешним (заданной конфигурации) электромагнитным полем;
- затвердевание отливки;
- извлечение отливки из формы.

Конфигурация поля создается набором электромагнитов с регулируемыми параметрами. Таким образом, регулируя внутренние направления решеток металла, изменяются его прочностные свойства [3]. На рис. 1 приведен пример конфигурации магнитного поля внутри отливаемого образца. При остывании металла направление кристаллических решеток сохраняет конфигурацию поля [4], тем самым создавая новый вид структуры заданной формы [5], в данном примере вид синусоиды.

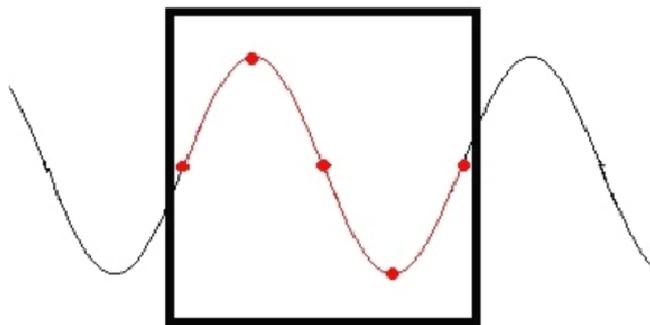


Рис. 1. Синусоидальная форма конфигурации магнитного поля внутри отливаемого образца

При механическом воздействии на образец, полученный описанным способом литья, его кристаллическая решетка обладает различными свойствами упругости и текучести в различных направлениях [6]. Таким образом, задавая различные виды конфигурации электромагнитных полей, возможно получение металла с повышенными прочностными характеристиками как при напряжении в одном, так и при напряжении в нескольких направлениях [7]. Например, брусок, отлитый в линейном электромагнитном поле, может получать отличие пределов прочности вдоль и поперек электромагнитных линий до 30%.

На сегодняшний день элементы автоматизации процесса управления отработаны для всех широко применяемых способов литья [8]. Он включает программную и аппаратную части, интегрированные с литейным оборудованием. Поэтому использование программного управления параметрами работы каждым электромагнитом и «синхронизация» их воздействия позволяет осуществить постановку комплексного исследовательского эксперимента. Программный интерфейс управляющей системы предполагает настройку конфигурации результирующего поля, а также корректировку данных о положении электромагнитов.

Результатом комплексного эксперимента должно стать теоретическое обоснование характера воздействия нелинейного электромагнитного поля на прочностные характеристики металлических пластин, а также комплекс рекомендаций по организации и автоматизации соответствующего технологического процесса.

Список литературы

1. Хохштрассер Р. Молекулярные аспекты симметрии, пер. с англ. Розенберг Е. Л. – М.: Мир, 1968. – 384 с.
2. Трофимов В. Введение в геометрическое многообразие с симметриями. – М.: МГУ 1989. – 353 с.
3. Шубников А. В. Симметрия. (Законы симметрии и их применение в науке, технике и прикладном искусстве). – АН СССР, 1940. – 175 с.
4. Медведев Б.В. Начала теоретической физики. Механика. Теория поля. Элементы квантовой механики: Учебн. пособие для вузов. – М.: Наука, 1977. – 496 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. Электродинамика: Краткий курс теоретической физики. Кн. 1. – М.: Наука, 1969 – 271 с.
6. Шубников А.В. Избранные труды по кристаллографии. – М.: Наука, 1975. – 556 с.
7. Рымкевич П.А. Курс физики. Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1975. – 464 с.
8. Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Специальные технологии литья. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 367 с.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ МНОЖЕСТВА КОНФИГУРАЦИЙ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА ОКОЛО ТЕКУЩЕЙ

Аннотация. Представлен алгоритм вычисления координат всех конфигураций манипуляционного робота около текущей.

Ключевые слова: манипуляционный робот, конфигурация

ALGORITHM FOR FORMING A SET OF A MANIPULATING ROBOT CONFIGURATIONS NEAR CURRENT ONE

P.K. Lopatin, Ph.D., docent, efa14@yandex.ru
Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. An algorithm for forming a set of a manipulating robot configurations near current one is presented.

Key words: manipulating robot, configuration

В [1] сформулирован наш алгоритм двунаправленных графов (АДГ) для планирования пути манипуляционного робота (МР) в среде с известными запрещенными состояниями. В Шаге 3 АДГ для произвольной конфигурации \mathbf{q}^i (точки в конфигурационном пространстве) требуется рассчитать координаты точек-соседей, отстоящих от \mathbf{q}^i не более, чем на один дискрет. В настоящей статье приводим алгоритм для расчета координат таких точек-соседей.

Пусть робот занимает конфигурацию $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$. Такую конфигурацию назовем текущей. Множество конфигураций около текущей образуется следующим образом. К каждой компоненте q_i вектора \mathbf{q} прибавляется $(\Delta q_i) \cdot c$, где c может быть равно -1 , 0 или 1 .

Задача может быть разбита на следующие этапы:

а) составляем таблицу, в строках которой будут комбинации чисел -1 , 0 и 1 . Число столбцов j в этой таблице будет равно числу компонент вектора \mathbf{q} , а число строк i будет равно числу конфигураций, образованных около текущей. В результате получаем табл. 1;

Таблица 1. Строки для формирования соседних конфигураций

$i \setminus j$	1	2	3	...	n
1	-1	-1	-1	...	-1
2	0	-1	-1	...	-1
3	1	-1	-1	...	-1
4	-1	0	-1	...	-1
...
m	1	1	1	...	1

б) для каждой строки табл. 1 выполняем следующую операцию: число, стоящее в j -том столбце ($j=1, \dots, n$), умножаем на Δq_j ;

в) каждую строку таблицы складываем с вектором \mathbf{q} .

Определим, чему должно быть равно число строк в Таблице 1. Если в векторе \mathbf{q} имеется 1 компонента q_1 , то может быть образовано 3 вариации:

$$q_1 + (-1) * \Delta q_1, q_1 + 0 * \Delta q_1, q_1 + 1 * \Delta q_1.$$

Вторая вариация совпадает с q_1 и, следовательно, с самим вектором \mathbf{q} . Итак, около вектора с одной компонентой может быть образовано $3-1=2$ вариации, отличающихся от самого вектора. Если в векторе \mathbf{q} имеется 2 компоненты, то при некотором значении q_1 будет 3 разных значения q_2 и само q_1 может принять 3 разных значения. Когда множителями перед Δq_1 и Δq_2 являются нули, то такая вариация совпадает с вектором \mathbf{q} . Получаем $3^2-1=8$ конфигураций, отличающихся от самого вектора \mathbf{q} . По индукции получаем, что если вектор \mathbf{q} имеет n компонент, то может быть образовано 3^n-1 конфигураций, отличающихся от самого вектора \mathbf{q} . Итак, число строк в Таблице 1 будет равно 3^n-1 , где n -размерность конфигурационного пространства.

Таблицу 1 можно представлять как двумерный массив $TT[i][j]$, где i -номер строки, j -номер столбца. В элемент $TT[i][j]$ надо вписать либо -1 , либо 0 , либо 1 . Введем в рассмотрение массив mul , у которого

$$mul[0] = -1, mul[1] = 0, mul[2] = 1.$$

Заполнение элементов массива TT будет производиться операцией присваивания:

$$TT[i][j] = mul[k], \quad (1)$$

где $j = 0, \dots, (n-1)$, $i = 0, \dots, 3^{n-1}-1$, $k = 0, \dots, 2$.

Выведем формулу $k = f(i, j)$, по которой, исходя из заданных i и j , будем вычислять k , а затем будем осуществлять операцию присваивания (1).

Распишем табл. 1 так, как показано в табл. 2. В ней x_j – номер блока, в котором k пробегает все свои значения.

Установим зависимость i от x_0 и k для случая $j = 0$:

$$i = 3 * x_0 + k.$$

Когда $j = 0$, то x_0 – это целая часть от деления i на 3. Рассмотрим, например, блок, где $x_0 = 4$ и $i = 14$. Тогда целая часть от деления i на 3 равна 4:

$$14/3 = 4 + 2/3.$$

Таблица 2. Компоненты для формирования соседних конфигураций

\ j i \	0			1				2					
	x0	k	mul[k]	x1	y	k	mul[k]	x2	z	k	mul[k]		
0		0	-1	0		0	-1	0		0	-1		
1	0	1	0			0	0		-1		0	-1	
2		2	1				0		-1		0	-1	
3		0	-1			1	1		0		0	-1	
4	1	1	0				1		1	0	0	0	-1
5		2	1						1	0		0	-1
6		0	-1			2	2		1		0	-1	
7	2	1	0				2		2	1		0	-1
8		2	1						2	1		0	-1
9		0	-1	1		0	-1	0		1	0		
10	3	1	0			0	0		-1		1	0	
11			2		1				0	-1		1	0
12			0		-1		1		1	0		1	0
13	4	1	0			1			1	0	1	1	0
14		2	1						1	0		1	0
15		0	-1			2	2		1		1	0	
16	5	1	0				2		2	1		1	0
17		2	1						2	1		1	0
18		0	-1	2		0	-1	0		2	1		
19	6	1	0			0	0		-1		2	1	
20			2		1				0	-1		2	1
21			0		-1		1		1	0		2	1
22	7	1	0			1			1	0	2	2	1
23		2	1						1	0		2	1
24		0	-1			2	2		1		2	1	
25	8	1	0				2		2	1		2	1
26		2	1						2	1		2	1
27		0	-1	3		0	-1			0	-1		
28	9	1	0		0	0	-1			0	-1		

Таким образом, x_0 можно обозначить так: $x_0 = \lfloor i/3 \rfloor$.

Тогда для случая $j = 0$

$$i = 3 * \lfloor i/3 \rfloor + k.$$

Отсюда

$$k = i - \lfloor i/3 \rfloor * 3. \tag{2}$$

Рассмотрим случай $j=1$. Введем колонку y . Можно установить зависимость:

$$x_0 = 3 * x_1 + y,$$

но $y = k$, поэтому $x_0 = 3 * x_1 + k. \tag{3}$

Как уже установлено, $x_0 = \lfloor i/3 \rfloor$. Можно видеть, что $x_1 = \lfloor i/9 \rfloor = \lfloor i/3^2 \rfloor$.

Тогда из (3)

$$\begin{aligned} k &= x_0 - x_1 * 3, \\ k &= \lfloor i/3 \rfloor - \lfloor \lfloor i/3^2 \rfloor * 3 \rfloor. \end{aligned} \quad (4)$$

Проведем аналогичные рассуждения для $i=2$

$$x_1 = 3 * x_2 + z \quad \text{или} \quad x_1 = 3 * x_2 + k.$$

Тогда $k = x_1 - 3 * x_2$.

Так как $x_1 = \lfloor i/3^2 \rfloor$, а $x_2 = \lfloor i/3^3 \rfloor$, то

$$k = \lfloor i/3^2 \rfloor - \lfloor \lfloor i/3^3 \rfloor * 3 \rfloor. \quad (5)$$

Выпишем вместе формулы (2), (4), (5):

$$j = 0: \quad k = i - \lfloor \lfloor i/3 \rfloor * 3 \rfloor, \quad (6)$$

$$j = 1: \quad k = \lfloor i/3 \rfloor - \lfloor \lfloor i/3^2 \rfloor * 3 \rfloor, \quad (7)$$

$$j = 2: \quad k = \lfloor i/3^2 \rfloor - \lfloor \lfloor i/3^3 \rfloor * 3 \rfloor. \quad (8)$$

Формулы (6)–(8) приводят к универсальной формуле:

$$k = \lfloor i/3^j \rfloor - \lfloor \lfloor i/3^{j+1} \rfloor * 3 \rfloor. \quad (9)$$

Итак, мы получили возможность, зная i и j , вычислять k , а по k определять, какое число следует подставить в $TT[i][j]$. Затем каждый элемент в столбце j следует умножить на δ_j .

Заполнив табл. 1, из нее следует вычеркнуть строку, в которой стоят только нули.

После этого к каждой строке табл. 1 прибавляем текущую конфигурацию $\mathbf{q} = (q^1, q^2, \dots, q^n)$. Если в текущей строке i хотя бы для одного j не выполняется неравенство

$$qL_i \leq TT[i][j] \leq qH_i, \quad (10)$$

где $TT[i][j]$ – элемент, стоящий на пересечении i -той строки и j -того столбца; qL_i – нижнее допустимое значение обобщенной координаты, qH_i – верхнее допустимое значение обобщенной координаты, то такая строка исключается из табл. 1.

В итоге мы получим таблицу, содержащую конфигурации около текущей.

Список литературы

1. Лопатин П.К. Алгоритм двунаправленных графов в задаче управления манипуляционными роботами в среде с препятствиями // Робототехника и искусственный интеллект: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: СФУ, 2013. – С. 75–77.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАФИЧЕСКОГО ЯЗЫКА ДРАКОН

Аннотация. Статья описывает проблемы разработки управляющего программного обеспечения роботов. Предлагается решение проблем, основанное на внедрении в процесс разработки программного обеспечения гибридных языков программирования типа графического языка ДРАКОН.

Ключевые слова: графическое программирование, робототехнический комплекс, гибридный язык программирования, ДРАКОН

WORKING OUT OF THE SOFTWARE OF ONBOARD EQUIPMENT WITH USE GRAPHIC PROGRAMMING LANGUAGES

A.V. Pichkalev, head of sector, al-mail@iss-reshetnev.ru
JSC "ISS" ac. M. F. Reshetnev", Zheleznogorsk, Russia

Abstract. Article describes problems of working out of the operating software of robots. Graphic programming gives the chance essentially other working out of the software. The decision of problems based on introduction in process of working out of the software of hybrid programming languages of type graphic language DRAKON is offered.

Key words: graphic programming, robots complex, a hybrid programming language, DRAKON

На сегодняшний момент робототехнические комплексы (РК) нашли применение только в производствах с высокой нормой прибыли и очень высокими капитальными затратами. Связано это в первую очередь с их высокой стоимостью и большим временем разработки и отладки. Перенастройка существующего РК под новые задачи вообще малоцелесообразна, т. к. дешевле разработать новый комплекс, чем разобратся в особенностях функциониро-

вания и возможностях применения прежнего. Основным компонентом высокой себестоимости РК является его управляющее программное обеспечение (ПО).

Процесс разработки ПО РК специфическими особенностями, отличными от разработки чисто программного продукта. Высокие требования к функциональным возможностям современных РК обуславливают высокую функциональную сложность применяемого ПО. В свою очередь, высокая функциональная насыщенность ПО требует значительных трудовых и временных затрат на разработку алгоритмов. В итоге себестоимость ПО начинает превышать стоимость аппаратных средств, а общая стоимость робототехнического комплекса промышленного применения делает его окупаемым только при массовом производстве (или при высокой конечной стоимости продукта, как, например, в атомной или космической промышленности). Таким образом, необходимо резко снизить стоимость и время разработки и отладки ПО робототехнических комплексов, чтобы сделать их применение массовым и относительно дешевым.

Традиционный подход при создании управляющего ПО заключается в описании исходных данных (алгоритмов функционирования и директив управления) в виде текстовых описаний, схем, таблиц и графиков и передачи этих материалов программистам. Программист должен учитывать особенности функционирования и конструкции РК, в которых он не является специалистом. Для облегчения задачи разработки ПО разрабатываются специальные исходные данные (ИД), где все это подробно описывается. Такой подход таит в себе значительный недостаток – возможность неверного толкования ИД программистом. Вероятность ошибки неверного толкования растет вместе с объемом ИД.

Возникает дополнительный участник разработки РК – алгоритмист – который должен обеспечивать взаимодействие между потребителями РК, разработчиками его конструкции и программистами, сводя воедино их разнородные требования и решая создаваемые этим проблемы (при этом он еще и должен решать собственную проблему корректной интерпретации требований к РК в ИД на разработку ПО). Зачастую разработчики алгоритмов функционирования РК не являются программистами по образованию, что также вносит лепту в качество ИД.

Для уменьшения вероятности возникновения ошибки применяются различные административные механизмы контроля над ошибками, которые в общем случае представляют собой некий фильтр, который, как любой фильтр, приводит к фазовому запаздыванию. Очевидно, внедрение дополнительных административных механизмов между разработчиком ИД и программистом приводит к задержке результатов разработки, притом на каждой итерации коррекции исходных данных. Снижается производительность, растут издержки.

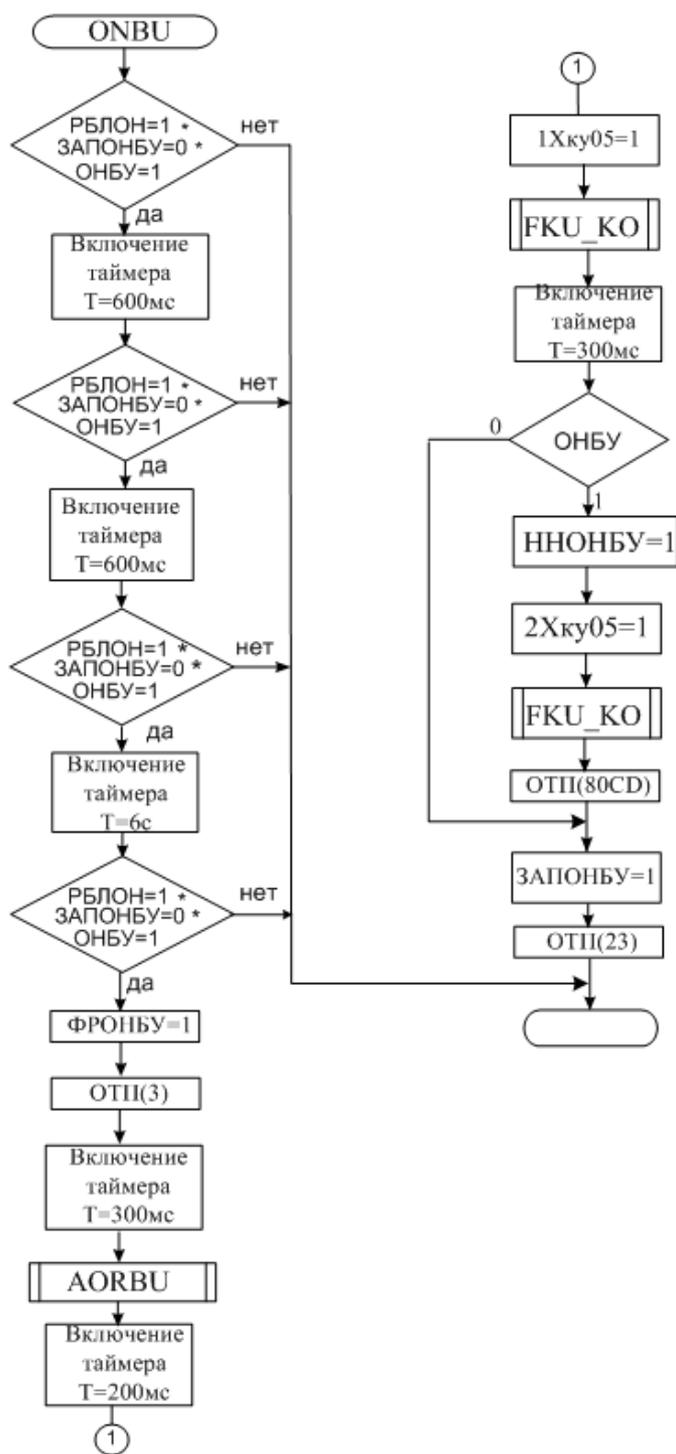


Рис. 1. Пример блок-схемы алгоритма управляющего ПО РК

Решить проблему можно было бы, если бы алгоритмист сразу создавал ПО РК. Но для этого он должен уметь одновременно программировать вычислитель РК и разбираться в его конструкции и особенностях функционирования, что требует от инженера незаурядной квалификации. Необходимо обеспечить алгоритмисту возможность создавать ПО РК, не вникая в тонкости программирования его вычислителя.

Это возможно, если графическую блок-схему алгоритма (которая обязательно приводится в ИД на ПО) сразу преобразовывать в исходный файл программы, исполняемой вычислителем ПК. Такой способ разработки ПО называется графическим программированием и используется в соответствующих приложениях. Таких как LabVIEW, Simulink/MATLAB, Xcos/Scilab и других.

Решение проблемы выразилось еще в ходе реализации программы «Буран» в разработке специального графического языка программирования и моделирования ДРАКОН [1].

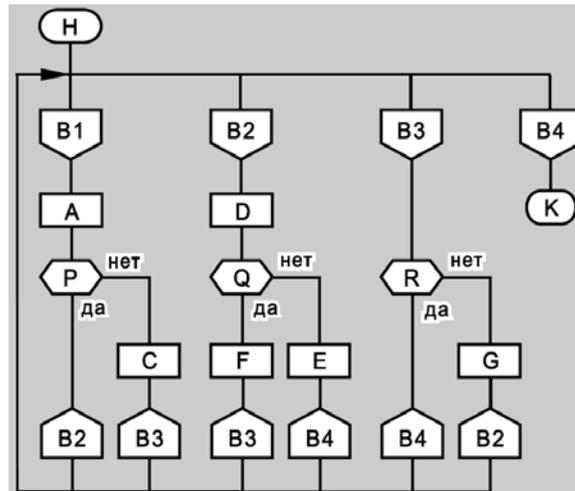


Рис. 2. Пример блок-диаграммы на языке ДРАКОН

Язык ДРАКОН основан на применении графических лексем, размещаемых по определенным правилам и соединяемых линиями связи [2]. Алгоритм, описанный на языке ДРАКОН, называют дракон-схемой. Лексемы организуются по так называемому «шампур-методу» вертикально в виде наборов, называемых ветками или «шампур-блоками». Ветки позволяют разделить алгоритм на смысловые части. То есть, дракон-схема является своего рода блок-схемой алгоритма ПО, реализованной в графическом дракон-редакторе (рис. 3).

В настоящее время для языка ДРАКОН разработаны графические редакторы (среды разработки), основанные на идее гибридных языков программирования и позволяющие синтезировать исходный код программных модулей на языках программирования высокого уровня. Реализация задаваемых в техническом задании команд управления бортовой аппаратурой в виде таких программных модулей позволит дальнейшую разработку ПО вести в среде графического программирования самому алгоритмисту без участия программиста.

Таким образом, использование языка ДРАКОН и гибридных языков может позволить полностью отказаться от традиционного подхода к разработке ПО ПК, снижая интеллектуальную нагрузку на разработчика алгорит-

ма, исключая ошибки толкования исходных данных программистом. Использование гибридного языка программирования на основе языка ДРАКОН позволяет перейти к прямой компиляции программного кода из алгоритма. Это качество значительно повысит скорость разработки, позволит отказаться от административных механизмов контроля над ошибками. Но, самое главное – это позволит резко сократить затраты на разработку ПО РК, что сделает роботов более доступными для потребителей самого разного уровня.

	Макроикона	Название макроиконы		Макроикона	Название макроиконы
1		Заголовок с параметрами	10		Развилка по таймеру
2		Развилка	11		Переключатель по таймеру
3		Переключатель (число вариантов N>2)	12		Обычный цикл по таймеру
4		Обычный цикл	13		Переключающий цикл по таймеру
5		Переключающий цикл	14		Цикл ДЛЯ по таймеру
6		Цикл ДЛЯ	15		Цикл ЖДАТЬ по таймеру
7		Цикл ЖДАТЬ	16		Вставка по таймеру
8		Действие по таймеру	17		Вывод по таймеру
9		Полка по таймеру	18		Ввод по таймеру
			19		Пуск таймера по таймеру
			20		Параллельный процесс по таймеру

Рис. 3. Пример лексем языка ДРАКОН

Список литературы

1. Паронджанов В.Д. Дружелюбные алгоритмы, понятные каждому. – М.:ДМК Пресс, 2010. – 463 с.
2. Паронджанов В.Д. Как улучшить работу ума. Алгоритмы без программистов – это очень просто! – М.: Дело, 2001. – 360 с.

А.Г. Туманян, аспирант, microdevicer@gmail.com
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия
С.И. Барцев, д.ф.-м.н. профессор, bartcev@yandex.ru
Сибирский Федеральный университет, г. Красноярск, Россия
Институт биофизики СО РАН, г. Красноярск, Россия

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ВЫРАБОТКА ПОВЕДЕНЧЕСКОГО ПАТТЕРНА ПРИ НАХОЖДЕНИИ ЦЕЛИ РУКОЙ-МАНИПУЛЯТОРОМ РОБОТА

Аннотация. Разработан биологически реалистичный алгоритм выработки поведенческого паттерна, который автономно способен находить соответствие между информацией от зрительной системы робота (анимата) и устройством модельной среды в которой анимат функционирует. Особенностью алгоритма являются нераздельные процессы обучения и функционирования.

Ключевые слова: анимат, нейросеть, рука робота, паттерн поведения

AUTOMATICALLY GENERATING OF A BEHAVIOR PATTERN IN FINDING OBJECTIVES WITH ROBOT MANIPULATOR

A.G. Tumanyan, microdevicer@gmail.com
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
S.I. Bartcev, bartcev@yandex.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
Institute of Biophysics, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The algorithm to generate a biologically realistic behavior pattern that is able to autonomously finding the correspondence between information from the visual system of the robot (animat), and a model environment in which the animat live is was developed. A special feature of the algorithm are inseparable processes of learning and functioning.

Key words: animat, neuro-network, robot arm, behavior pattern

Организмы, существуя в природе, руководствуются разного рода поведенческими навыками или паттернами для выживания: если организм голодает, значит нужно искать пищу, если рядом хищник, значит нужно убегать и

др. Большинство паттернов – приобретенные в процессе жизни организма. Способность к формированию новых поведенческих паттернов помогает приспособиться к меняющейся среде и позволяет выживать в новых условиях. Как устроены механизмы такого формирования, как они взаимодействуют друг с другом – являются важными и актуальными вопросами когнитивной биологии и искусственного интеллекта.

В настоящее время существует ряд биологически реалистичных методов обучения аниматов, т. е. роботов или их компьютерных моделей, предназначенных для изучения поведения живых организмов. Среди таких методов наибольшее распространение получили генетические алгоритмы, нейронные сети, спайковые нейронные сети и обучение с подкреплением [1, 2]. Эти методы хорошо показывают себя в ситуациях с небольшими размерностями входных данных, особенно, метод обучения с подкреплением (RL), но при больших размерностях входных данных теряют практическую актуальность.

В работе [3] была разработана модель импринта, благодаря которой анимат был способен в результате однократного предъявления образца ситуации запечатлеть последовательность действий, которые приводили к успеху. Дополнительно был обнаружен эффект сглаживания по длине траектории, благодаря чему анимат «экономил» время и энергию для достижения своей цели. Особенностью модели является способность запечатлеть удачную последовательность действий в ответ на единственное критическое событие, что характерно для достаточно высокоорганизованных организмов, так, животное, которое смогло пережить атаку хищника, в будущем при очередной встрече с хищником будет выполнять именно эту последовательность действий, которая помогла ему избежать смерти.

В данной работе главной целью ставится разработка алгоритма выработки поведенческого паттерна, который автономно способен находить соответствие между информацией от зрительной системы анимата и устройством модельной среды, в которой «живет» анимат.

Материалы и методы

Для разработки алгоритма поиска автоматического критерия использовался как уже существующий вычислительный стенд [3], в котором моделируется функционирование анимата, имеющий 2 искусственных глаза, на одномерные сетчатки которых происходит отображение цели и кисти руки, и сама рука-манипулятор (рис. 1), которой анимат может управлять посредством двух шарнирных соединений, так и разработанный новый. В режиме случайного поиска такого положения "руки", при котором "кисть" совмещена с объектом, происходит потактовая запись положения "кисти" и объекта (входов) и команд поворота шарниров (выходов, см. табл. 1).

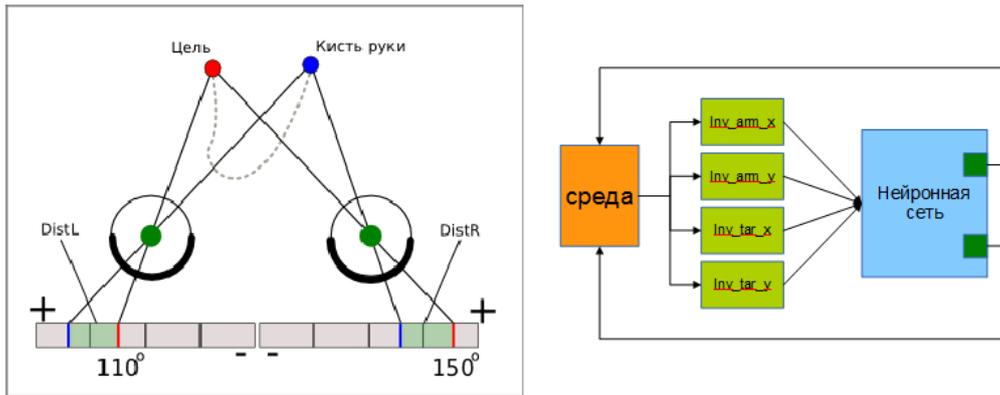


Рис. 1. Модель анимата

Таблица 1. Задачник для нейросети анимата

№	L	R	tL	tR	Команда для α	Команда для β
1	0,79	0,42	0,49	0,28	0,32	0,51
2	0,79	0,43	0,49	0,28	0,33	0,51
3	0,80	0,44	0,49	0,28	0,33	0,51

"Рука" движется по тактам, в каждый такт каждый из шарниров может повернуться на $(-1, 0, 1)$ градуса.

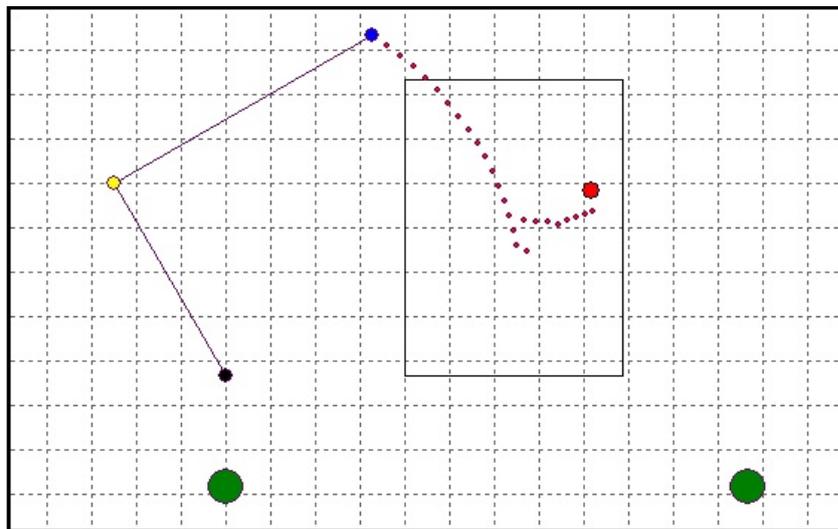


Рис. 2. Рабочая область с фрагментом траектории, процесс поиска точек

Модель анимата, показанного на рис. 2, содержит виртуальное двумерное поле, руку-манипулятор, которым анимат достигает цели, а также 2 двумерных сетчатки глаз, на которые идет проецирование и цели и «кисти» руки. Важной отличительной особенностью этого анимата от описанного ранее является одновременный процесс обучения и взаимодействия со средой, т. е. здесь мы наблюдаем одновременное существование так называемого им-

принттивного обучения (обучение за одно предъявление), обычного итеративного обучения двигательной функции и случайного поискового поведения.

Диаграмма работы алгоритма представлена на рис. 3. Основных источников «принятия решения» здесь два: нейросеть (НС) и генератор случайного движения. Конкурируя друг с другом за право осуществить шаг (анимат выполняет либо команду поступающую от нейросети, либо от генератора случайных движений), анимат функционирует и самообучается. Влияние каждого из источников регулируется при помощи фактора уверенности (r) распознавания ситуации нейросетью, который изменяется от 0 до 1.

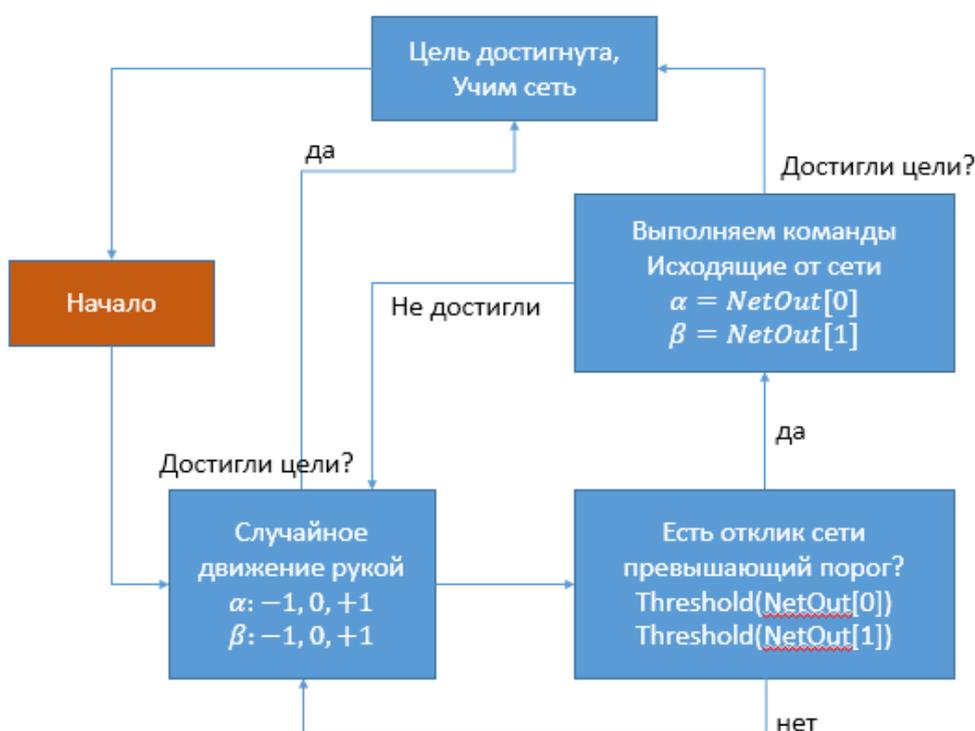


Рис. 3. Блок-диаграмма работы алгоритма

Уравнение, которое определяет движение руки выглядит следующим образом: $RANDOM_STEP$ – случайное перемещение сустава руки по/против часовой стрелки, $NetOut$ – отклик на выходе сети

$$Move_{\alpha} = RANDOM_STEP[\alpha] * r + NetOut[\alpha] * (1 - r)$$

$$Move_{\beta} = RANDOM_STEP[\beta] * r + NetOut[\beta] * (1 - r).$$

При значении $r = 1$ вклад сети в решение о следующем шаге равен 0, т. е. анимат вообще не обращает внимание на отклик сети, хотя он по-прежнему вычисляется на каждой итерации. По мере того, как анимат начинает попадать в цель, сеть обучается, r уменьшается и отклик от сети уже на-

чинает влиять на следующий шаг. При $r = 0$ сеть полностью перехватывает управление, и генератор случайных шагов не используется.

Развивая мысль о комбинировании случайного ненаправленного поискового поведения и одновременной возможности обучения нейросети, был создан новый стенд (Python + PyGame графическая библиотека), в котором этот функционал был реализован (рис. 4).

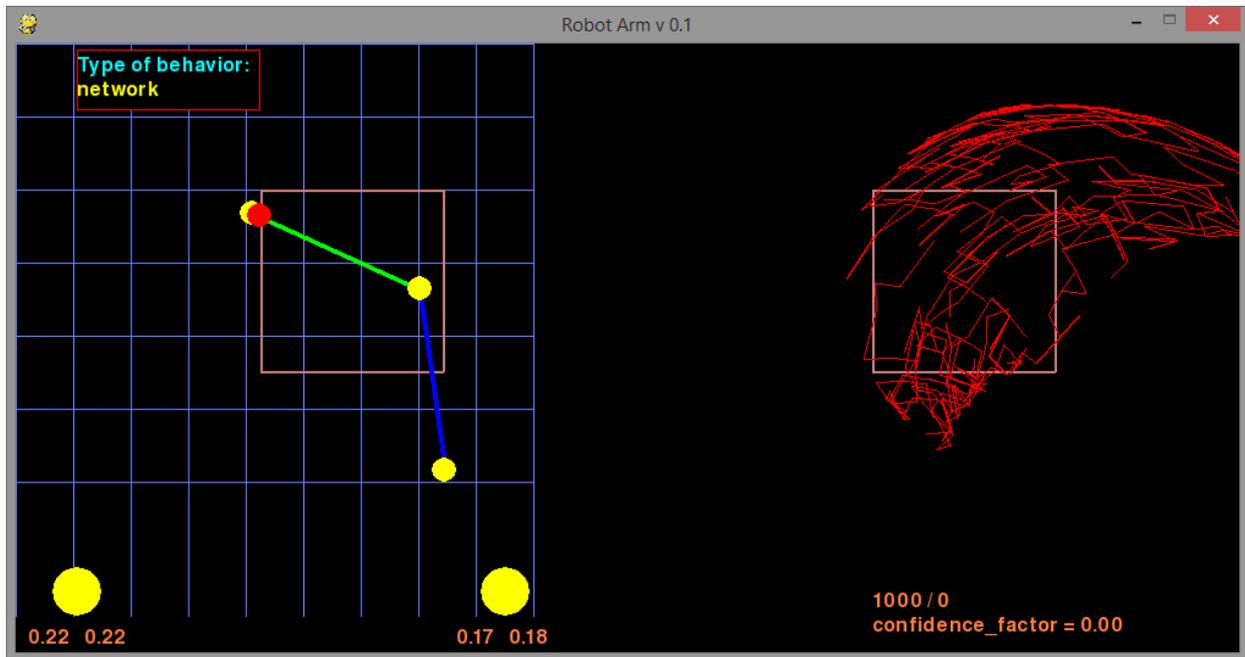


Рис. 4. Демонстрация работы стенда, который комбинирует случайное поведение и работу по определению местоположения цели нейросетью

При достижении цели рукой происходит обучение сети, т. е. обучение на основе новой полученной траектории, которое увеличивает количество распознаваемых ситуаций и тем самым увеличивает конкурентные свойства сети (фактор r становится меньше, мы уменьшаем его, рис. 5) по сравнению с генератором случайного поведения, увеличивается время, когда анимат находится под управлением «знающей» нейросети, а не генератора случайного движения. Важной особенностью здесь является то, что траектория используется не полностью, а только последний фрагмент, состоящий из $N = 5$ шагов, которые привели анимата к цели, таким образом мы отсекаем бесполезные блуждания руки и сеть не использует их в своем задачнике.

З а к л ю ч е н и е

В результате работы был создан алгоритм, который способен эффективно использовать случайное поведение в ситуациях, когда нет информации о среде с внутренним опытом приобретенным в процессе функционирования-

обучения. В начале анимат совершает исключительно случайные действия (при $\gamma = 1$), а затем по мере накопления траекторий в его задачнике, обучения сети и уменьшения фактора γ начинает пользоваться «опытом» нейросети. Когда γ близок к 0, анимат практически перестает пользоваться случайным поведением и большую часть времени находится под управлением «знающей» нейросети. В данном случае процесс обучения происходит непрерывно с процессом функционирования, что является важной характеристикой для автономных роботов, которым необходимо максимально быстро приспосабливаться к среде.

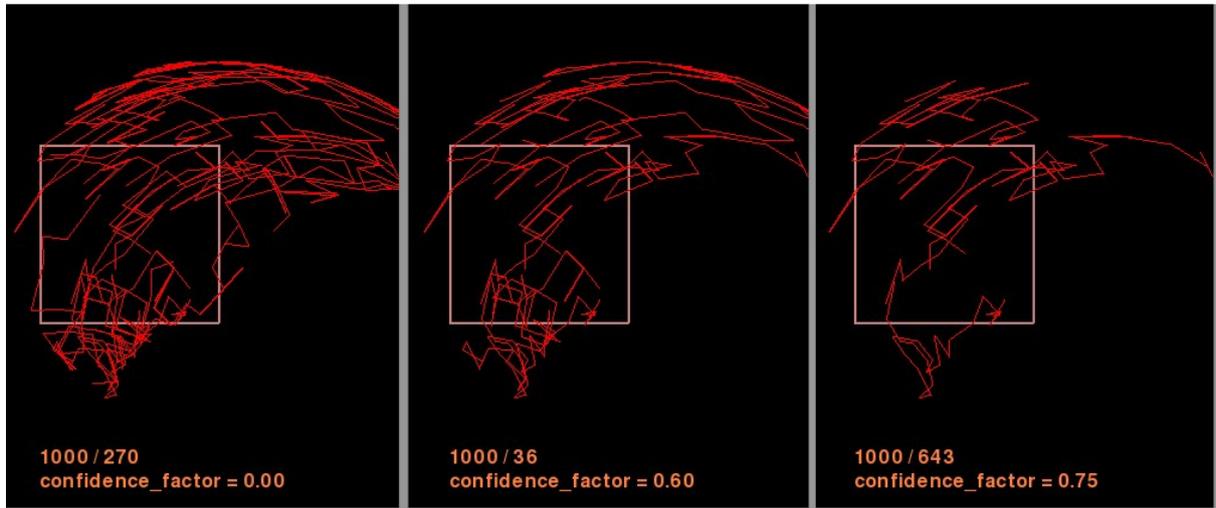


Рис. 5. Процесс обучения анимата, при разной факторе достоверности $\gamma = 0$ (сеть полностью обучена), $\gamma = 0,6$ (вклад сети в следующий шаг 40 %), $\gamma = 0,75$ (вклад сети 25 %)

Список литературы

1. Рассел С., Норвиг П., Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.
2. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement learning: An introduction. // Cambridge, MA: MIT Press – 1998. – P. 323 p.
3. Туманян А.Г., Барцев С.И. Простейшая поведенческая модель формирования импринта // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6. – № 5. – С. 793–802.

В.Ф. Филаретов, д.т.н., профессор, filaretov@dvo.ru

А. Н. Жирабок, д.т.н., профессор, zhirabok@mail.ru

А. В. Зуев, к.т.н., доцент, zuev@dvo.ru

А. А. Проценко, аспирант, pro293133@gmail.com

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

ПОДСИСТЕМА АККОМОДАЦИИ К ДЕФЕКТАМ ДЛЯ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА

Аннотация. В докладе рассмотрен подход к построению подсистемы аккомодации к некорректным показаниям датчиков для системы счисления пути автономного подводного робота. Этот подход основан на использовании кинематической модели робота и специального комплексирования навигационной информации. Его достоинством является относительная простота реализации и достаточно высокая точность компенсации ошибок, выявляемых в показаниях навигационных датчиков. Приведены результаты математического моделирования, полностью подтверждающие эффективность и работоспособность предложенного метода.

Ключевые слова: аккомодация, дефекты, АПР, навигационные датчики.

THE SUBSYSTEM OF ACCOMMODATION TO FAULTS FOR DEAD RECKONING SYSTEM OF AUV

V. Filaretov, Doctor of Science, Professor, filaretov@dvo.ru

A. Zhirabok, Doctor of Science, Professor, zhirabok@mail.ru

A. Zuev, Ph.D., zuev@dvo.ru

A. Protchenko, pro293133@gmail.com

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. This paper is dedicated to developing of new synthesis method of subsystem of accommodation to continuous faults for dead reckoning system (DRS) of autonomous underwater vehicles (AUV). Proposed method is based on the use of kinematic model of AUV and special data fusion from its navigation sensors. The advantage of proposed method is simplicity of realization and high precision of compensation of the revealed. The results of mathematical simulation is fully confirmed the efficiency and high performance of the proposed method.

Key words: accommodation, faults, AUV, navigation sensors.

В настоящее время автономные подводные роботы (АПР) являются одним из наиболее эффективных инструментов для исследования и освоения Мирового океана. Важными компонентами АПР являются навигационно-пилотажные датчики, показания которых используются для формирования траекторий движения АПР. Основу навигационной системы АПР обычно составляет система счисления пути (ССП), которая включает в себя доплеровский лаг для измерения линейных скоростей относительно дна по двум осям жестко связанной с АПР системы координат (ССК) и датчик ориентации АПР, измеряющий углы крена, дифферента и курса.

Поскольку отказ или сбой в работе любого датчика может привести к ошибкам в выполнении поставленной задачи или к потере дорогостоящего робота, то задача своевременного выявления дефектов в этих датчиках является актуальной. При этом важной задачей, приводящей к повышению работоспособности АПР при появлении незначительных дефектов, при которых еще возможно выполнение (завершение) операций (миссий), является формирование специальных управляющих воздействий, которые позволяют автоматически сохранять (стабилизировать) важнейшие характеристики АПР в течение всего времени их эксплуатации. Решение указанной задачи принято называть аккомодацией к дефектам [1].

В настоящее время известно несколько подходов к решению задач диагностирования и аккомодации для датчиков АПР [2–5]. Как показал проведенный анализ, большинство известных подходов и методов обеспечивает качественное решение задач диагностирования и аккомодации только при движениях АПР в плоскости с относительно невысокой скоростью. Это обусловлено использованием при синтезе диагностических наблюдателей нелинейных динамических моделей АПР, имеющих неопределенные и существенно переменные параметры, что приводит к появлению отличных от нуля невязок даже при отсутствии дефектов [6].

Таким образом, задача разработки легкорезализуемых подсистем диагностирования и аккомодации к дефектам в навигационно-пилотажных датчиках ССП АПР без использования нелинейных уравнений динамики все еще является важной и актуальной.

Описание метода аккомодации

Рассматриваемый метод синтеза подсистем аккомодации содержит три этапа. На первом, с использованием уравнений кинематики АПР, строится расширенный банк диагностических наблюдателей (H_1-H_5), которые описываются следующими моделями [7, 8]:

$$\begin{aligned}
H_1 : \dot{\bar{x}} &= J_{11}(\tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_x + J_{12}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_y + J_{13}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_z, \\
H_2 : \dot{\bar{y}} &= J_{21}(\tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_x + J_{22}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_y + J_{23}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_z, \\
H_3 : \dot{\bar{\varphi}} &= \tilde{\omega}_x + J_{45}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_y + J_{46}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_z, \\
H_4 : \dot{\bar{\theta}} &= J_{55}(\tilde{\varphi})\tilde{\omega}_y + J_{56}(\tilde{\varphi})\tilde{\omega}_z, \\
H_5 : \dot{\bar{\psi}} &= J_{65}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_y + J_{66}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta})\tilde{\omega}_z,
\end{aligned} \tag{1}$$

где $[\bar{x}, \bar{y}, \bar{\varphi}, \bar{\theta}, \bar{\psi}]^T$ – вектор состояния введенного банка наблюдателей; символом « \sim » обозначены сигналы, получаемые от датчиков ССП АПР, которые могут содержать искаженные показания (ошибки);

$\tilde{v}_z = \frac{\dot{\bar{z}} - J_{31}(\tilde{\theta})\tilde{v}_x - J_{32}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})\tilde{v}_y}{J_{33}(\tilde{\varphi}, \tilde{\theta}, \tilde{\psi})}$ – линейная скорость АПР по оси Z ССК;

$[\tilde{\omega}_x, \tilde{\omega}_y, \tilde{\omega}_z]^T$ – вектор угловых скоростей АПР, измеряемых датчиком угловых скоростей (ДУС); J_{ij} – элементы блочной матрицы перевода соответствующих величин из ССК в АСК ($i, j = \overline{1,6}$), имеющей вид:

$$J(\eta) = \left[\begin{array}{c|c} J_1(\eta) & 0 \\ \hline 0 & J_2(\eta) \end{array} \right],$$

$$\text{где } J_1(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \varphi + & \sin \psi \sin \varphi + \\ \sin \psi \cos \theta & + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & + \cos \psi \cos \varphi \sin \theta \\ -\sin \theta & + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi & + \sin \theta \sin \psi \cos \varphi \\ & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix},$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} & \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} \end{bmatrix}.$$

С использованием банка наблюдателей (1) и специальной матрицы ошибок D [8], задающей связь между величинами полученных невязок и ошибками, возникающими в сигналах (в показаниях), поступающих от конкретных датчиков, осуществляется обнаружение факта появления некорректных показаний у конкретных датчиков.

В данном случае матрица ошибок будет иметь следующий вид:

$$D = \begin{matrix} & d\theta & d\psi & dv_x & dv_y & d\omega_x & d\omega_y & d\omega_z \\ \begin{matrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} .$$

С целью дальнейшей локализации (определение конкретного датчика) обнаруженных ошибок используется вектор I :

$$I = [I_1 \quad I_2 \quad \dots \quad I_5]^T, \quad I_k = \begin{cases} 1, & \text{если } |r_k| > r_{k0} \\ 0, & \text{если } |r_k| \leq r_{k0} \end{cases},$$

где r_{k0} – величина, определяющая порог чувствительности k -го наблюдателя ($k = 1, 5$). Сравнивая вектор I со столбцами матрицы ошибок, можно получить вектор $L = [L_1 \quad L_2 \quad L_3 \quad L_4]^T$:

$$L_1 = 1, \text{ если } I = D_1; \quad L_2 = 1, \text{ если } I = D_2; \quad L_3 = 1, \text{ если } I = D_3 \text{ или } I = D_4; \\ L_4 = 1, \text{ если } I = D_5 \text{ или } I = D_6 \text{ или } I = D_7;$$

где D_l – l -й столбец матрицы ошибок D ($l = 1, 7$).

При отсутствии ошибок все элементы вектора L равны нулю. При возникновении ошибки определения угла дифферента 1-й элемент вектора L становится равным 1, а остальные остаются нулевыми. Ошибкам в определении курса, а также в показаниях доплеровского лага и датчика угловых скоростей соответствуют 2-й, 3-й и 4-й элементы вектора L соответственно.

После обнаружения и локализации в датчиках возникающих ошибок на втором этапе для реализации подсистемы аккомодации необходимо в реальном масштабе времени оценить величины этих ошибок.

На третьем этапе синтеза систем аккомодации величины возникающих ошибок используются для формирования дополнительных сигналов в системе управления АПР, устраняющих влияние этих ошибок. Для решения этой задачи используется вектор величин вычисленных ошибок R в виде

$$R = [L_1 d\theta \quad L_2 d\psi \quad L_3 dv_x \quad L_3 dv_y \quad L_4 d\omega_x \quad L_4 d\omega_y \quad L_4 d\omega_z]^T. \quad (2)$$

Если обнаружена ошибка d_k , то на выходе системы аккомодации формируется вектор R , k -й элемент которого равен величине ошибки, а остальные равны нулю. При отсутствии ошибок в датчиках все элементы этого вектора будут нулевыми. Далее, используя уравнения невязок и выражение (2), отнимая полученные величины ошибок от реальных сигналов датчиков ССП, можно получить корректные значения измеряемых величин, необходимые для правильного определения местоположения АПР:

$$[\theta, \psi] = [\tilde{\theta} - R_1, \tilde{\psi} - R_2], \quad [v_x, v_y] = [\tilde{v}_x - R_3, \tilde{v}_y - R_4],$$

$$[\omega_x, \omega_y, \omega_z] = [\tilde{\omega}_x - R_5, \tilde{\omega}_y - R_6, \tilde{\omega}_z - R_7]. \quad (3)$$

Исследование работы системы аккомодации

Для проверки работоспособности и эффективности синтезированной подсистемы аккомодации было проведено численное моделирование, в процессе которого использовалась модель реального АПР с адаптивной системой управления [9]. Моделирование проводилось при нулевых начальных состояниях АПР и наблюдателей. Возникновение дефекта имитировалось изменением величины по закону $dv_y = 0,5\sin(0,5t)$, начиная с момента времени $t = 10$ с.

На рис. 1, *а* представлена траектория движения АПР в горизонтальной плоскости при наличии и отсутствии дефектов, а также при компенсации дефектов системой аккомодации. На рис. 1, *б* кривая 1 обозначает величину заданного дефекта, а кривая 2 – величину этого дефекта, полученную с помощью алгоритма диагностирования, рассмотренного в докладе.

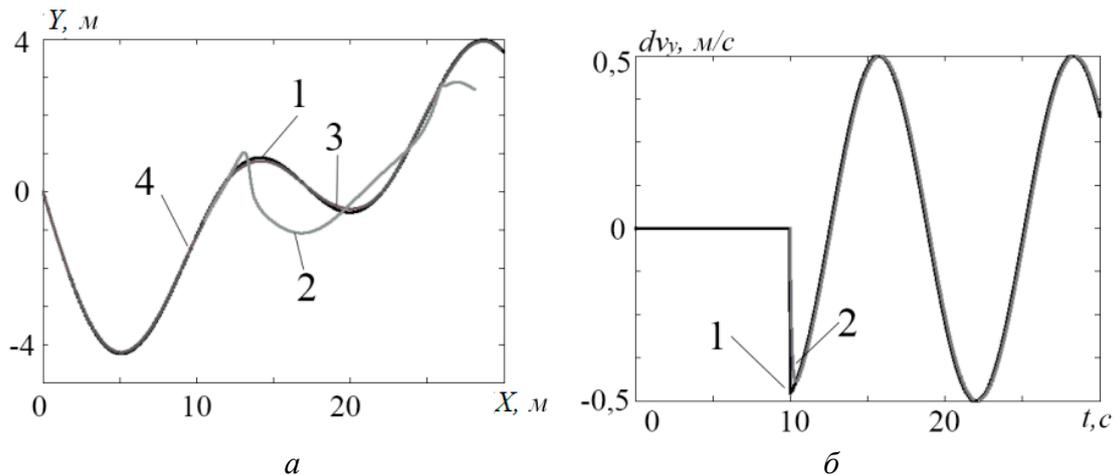


Рис.1. Результаты проведенного математического моделирования.

а – траектория движения АПР в плоскости XY , 1 – заданная траектория движения АПР, 2-траектория движения АПР при наличии дефекта, 3 – траектория движения АПР при работе предложенной системы аккомодации, 4 – момент появления дефекта.

б – значение дефекта dv_y , определенного алгоритмом диагностирования.

Из рис. 1 видно, что синтезированная подсистема аккомодации к дефектам в ССП позволила точно оценить появившийся дефект в датчике скорости, а также значительно повысить качество работы АПР в случае возникновения этого дефекта. Аналогичные результаты были получены в случае возникновения дефектов в других датчиках ССП.

Таким образом, результаты проведенного математического моделирования полностью подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного метода синтеза подсистемы аккомодации к

типовым дефектам, появляющимся в навигационно-пилотажных датчиках ССП АПР.

Заключение

В работе предложен метод синтеза подсистемы непрерывной аккомодации к дефектам, возникающим в навигационно-пилотажных датчиках для ССП АПР, созданный при использовании только кинематической модели робота. Достоинством этого метода является простота реализации и точность компенсации выявляемых дефектов. Однако разработанный метод справедлив при появлении любого, но только одного дефекта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-58-45067), а также в рамках ГЗ Минобрнауки РФ (проект 1141).

Список литературы

1. M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki, Diagnosis and Fault Tolerant Control. Springer-Verlag, (2003).
2. A. Pisarets, A. Zhirabok, Navigation-piloting sensor fault diagnosis in autonomous under-water vehicles, Proc. Int. Conf. ISOP PACOMS, Korea, Daejeon, 2002. – pp. 70–74.
3. G. Antonelli, F. Caccavale, C. Sansone, L. Villani, Fault diagnosis for AUVs using support vector machines, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004, vol.5. – pp. 4486–4491.
4. A. Alessandri, M. Caccia, G. Verruggio, A Model-Based Approach to Fault Diagnosis in Unmanned Underwater Vehicles, Proceedings of Oceans, Nice, France, 1998. – pp. 825–829.
5. G. Antonelli, A Survey of Fault Detection/Tolerance Strategies for AUVs and ROVs, Springer Tracts in Advanced Robotics, 2003, vol.1. – pp. 109–127.
6. Fossen, T.I. Guidance and control of ocean vehicles. John Wiley & Sons Ltd., (1994).
7. V.Filaretov, A.Zhirabok, A.Zuev, A.Protcenko, The new approach for synthesis of diagnostic system for navigation sensors of underwater vehicles, Procedia Engineering, 69 (2014). – pp. 822–829.
8. V.Filaretov, A.Zhirabok, A.Zuev, A.Protcenko, The Development of System of Accommodation To Faults of Navigation Sensors of Underwater Vehicles with Resistance to Disturbance, Proc. of 2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014), Oct. 22-25, 2014 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea. – pp. 1548–1553.
9. Filaretov V., D. Yukhimets, Synthesis Method of Control System for Spatial Motion of Autonomous Underwater Vehicle, International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM), 2012, vol. 3, no 3. – pp. 133–141.

Секция 4

**АЛГОРИТМЫ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
И БАЗЫ ЗНАНИЙ**

КОМПЛЕКСНАЯ КАРТА ОПЕРАЦИОННОЙ СРЕДЫ РОБОТА

Аннотация. В работе вводится понятие Ортофрейма как ключевого элемента модели, описываются его основные параметры, благодаря которым модель представляет собой комбинацию метрической, топологической и семантической моделей. В работе также рассматривается структура объекта модели операционной среды как комбинация Ортофреймов, описываются отношения между объектами модели, геометрические и топологические связи между ними. Приводятся примеры построения семантических описаний объектов и семантических отношений между объектами.

Ключевые слова: мобильный сервисный робот, Ортофрейм, модель операционной среды, 2,5D Карта.

COMBINED MAP OF AN OPERATING ENVIRONMENT FOR A ROBOT

O.I. Davydov, Ph.D., tatexcorp@yahoo.com
A.K. Platonov, Ph.D., professor, akp31mail@gmail.com
Keldysh Institute of Applied Mathematic RAS, Moscow, Russia

Abstract. This paper introduces the concept of Ortoframe as a key model element, describes its basic parameters, by which the model exists as a combination of metric, topological and semantic models. The paper also examines the structure of the object model of the operating environment as a combination of Ortoframes, describes the relationship between the model objects, geometric and topological relationships between them. Examples of construction of object semantic descriptions and semantic relationships between objects are presented.

Key words: mobile service robot, Ortoframe, environment model, 2.5D map.

Работа является развитием проекта полуавтономного мобильного робота РБ-2, описанного в [1]. Проект направлен на получение опыта разработки недорогих, но эффективных систем управления автономными и полуавтономными сервисными мобильными роботами. Сервисный робот – это робот,

который выполняет услуги для людей (исключая производство), действуя полу- или полностью автономно, обладая определенными способностями «понимания» окружающей обстановки и взаимодействия с людьми. Сервисные роботы такого типа уже разрабатываются во всем мире [2].

Для планирования поведения и для безопасного движения робот должен располагать моделью операционной среды. Проблеме построения моделей операционной среды робота в современной научно-технической литературе посвящено большое число работ [3–5]. В них представлены три основных типа таких моделей: метрическая, топологическая, семантическая.

Метрические модели обычно в том или ином виде используют координаты размеров и положения объектов в среде, окружающей робота. Это описание среды является наиболее привычным, и поэтому в робототехнике оно используется повсеместно.

Топологические модели, как правило, описывают операционную среду в виде сети, узлами которой обозначаются объекты в операционной среде, а дуги определяют свойства взаимного положения этих объектов. Такие модели широко применяются в алгоритмах организации двигательного поведения робота среди объектов среды.

Семантические модели описывают среду в виде набора предикатных выражений, логических отношений между объектами и свойствами отдельными объектами в операционной среде. В сервисном роботе эта составляющая особенно важна для функционального обеспечения диалога с человеком.

Мозг человека всегда располагает всеми тремя моделями, которые комбинационно объединены в единое целое, что и составляет знание среды обитания. Целью данной работы является построение структуры данных и создание программного обеспечения для формирования единой комплексной модели операционной среды робота, включающей все три типа описаний: и геометрическое, и топологическое, и логическое.

Мы живем и работаем в структурированном горизонтально-вертикальном мире наших жилых и общественных помещений. Свойства помещений обитания людей позволяют предположить, что вертикальная составляющая пространства операционной среды не имеет такого же значения, какое обычно имеют контуры плоскостей основания объектов в этой среде. Это обстоятельство дает возможность построить упрощенную метрическую модель с хорошей точностью описания 2D свойств плоскостей основания объектов среды и с определением только общей операционной высоты однородных объектов. В этом смысле определим метрическую модель как 2,5D модель операционной среды.

Комплексную модель операционной среды, которая объединяет метрическую, топологическую и семантическую составляющие, мы называем Картой среды. Карта используется системой управления робота в трех взаимосвязанных процессах:

- ее семантическая составляющая используется для общения с людьми;

- ее семантическая и топологическая составляющие используются для формирования двигательного поведения робота с манипулятором;

- ее топологическая и метрическая составляющие используются для управления движением платформы и звеньев манипулятора.

Реализованная таким образом Карта состоит из специально организованных структур данных, описывающих свойства помещений и неподвижных объектов в этих помещениях. Карта создается человеком в ходе специальной процедуры и хранится в Базе данных робота РБ-2 [6].

Все объекты и помещения Карты формируются из однотипных структурных элементов, названных Ортофреймами. Ортофрейм является векторным Mesh-объектом, приспособленным к описанию пространства, окружающего человека в помещениях. Наличие ссылок для списков топологических связей и семантических меток, встроенных как в структуру Ортофрейма, так и в структуру Объектов, формируемых из Ортофреймов, является отличительной чертой этой модели.

Геометрически Ортофрейм это многогранник, который состоит из Базы – плоского основания в виде замкнутого многоугольника на горизонтальной плоскости и набора вертикальных плоскостей – граней, ограничивающих объем Ортофрейма. Сверху этот объем завершается Потолком Ортофрейма – многоугольником, который является точной копией Базы Ортофрейма.

Каждая грань Ортофрейма, включая Базу и Потолок, содержит маркер типа грани и семантическое имя грани, а также группу параметров, которая определяет топологические связи данного Ортофрейма с гранями других Ортофреймов. База, Потолок и боковые грани Ортофрейма могут быть проницаемы, непроницаемы или условно проницаемы. Признак проницаемости является одним из основных параметров каждой поверхности Ортофрейма. С каждым Ортофреймом связывается также и метрический параметр, определяющий высоту его граней от плоскости Базы до Потолка.

На рис. 1, *a* приведен Ортофрейм, который представляет собой модель комнаты. Две из трех граней Ортофрейма на переднем плане являются непроницаемыми поверхностями. Между ними расположена проницаемая грань, моделирующая свободный проход в комнату. Если вместо свободного прохода имеется дверь, то эта грань определяется как условно проницаемая, так как она является проницаемой только тогда, когда дверь открыта.

Двери обладают особыми геометрическими и топологическими свойствами. Общее, что объединяет все типы дверей, – это их меняющаяся геометрия, которая изменяет топологию Карты среды. Все свойства дверей определяются параметрами полупроницаемых граней Ортофрейма.

В структуре данных каждого Ортофрейма имеются параметры, определяющие тип самого Ортофрейма, его идентификатор и семантическое имя. Ортофрейм на рис. 1, *a* по типу – образ комнаты. Идентификатором его мо-

жет являться любая уникальная комбинация символов, а семантическое имя – название комнаты, например, Столовая.

В структуре каждого Ортофрейма имеется также группа параметров, определяющая его топологические связи с другими Ортофреймами. Пара соседних Ортофреймов содержит ссылки друг на друга, если их грани соприкасаются друг с другом. Благодаря этим ссылкам Ортофреймы могут образовывать программно доступные сети, узлами которых являются сами Ортофреймы, а дугами – взаимные ссылки граней Ортофреймов друг на друга. Все метрические и семантические параметры, все ссылки граней Ортофреймов друг на друга хранятся в общей Базе Данных Карты, откуда они извлекаются системой управления робота по мере необходимости.

Карта операционной среды состоит из Объектов (мебель, оборудование) и Помещений (комната, коридор, офис). Каждый из них представляет собой или один Ортофрейм, или совокупность Ортофреймов, объединенных/связанных между собой по вертикалям и горизонталям смыслами и пространственными ссылками. Ортофреймы, составляющие Объект или Помещение, считаются жестко скрепленными друг с другом. Разные Объекты или Помещения вместе с Ортофреймами, из которых они составлены, можно двигать друг относительно друга.

Связывание Ортофреймов может проводиться по их Бадам, Потолкам и по боковым граням. Размеры связываемых проницаемых и условно проницаемых граней должны совпадать. Связи по непроницаемым граням просто позиционирует грани рядом друг рядом с другом в соответствии с их координатами. На рис. 1, б изображены Базы четырех Ортофреймов – Помещений, связанных по условно проницаемым граням, т. е. по дверям между ними.

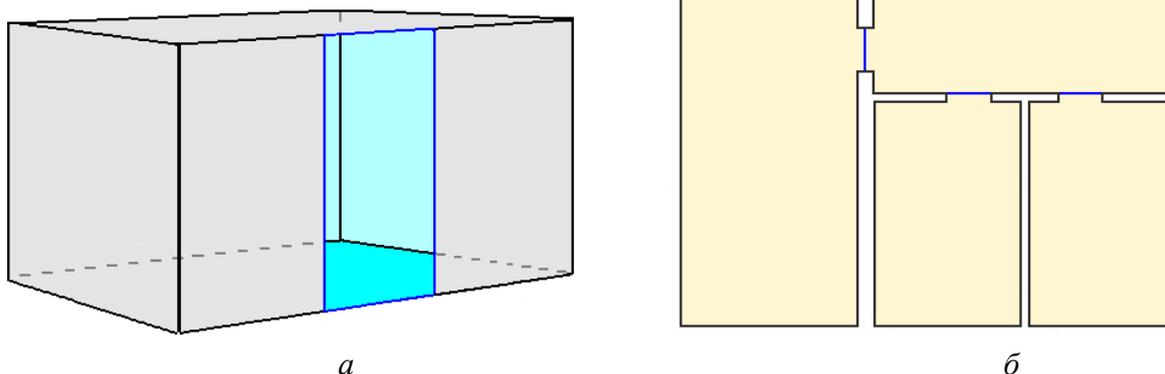


Рис. 1. Модели Помещений, построенных из Ортофреймов

Полная Модель операционной среды робота, как правило, содержит в себе несколько Карт, объединенных в один доменный объект – Домейн. Домейн – это группа Карт, моделирующих помещения, расположенные например, в одном здании. Каждый этаж этого здания имеет свою Карту, каждая

Карта состоит из группы Помещений, которые наполнены мебелью и оборудованием – Объектами. Все Объекты и Помещения состоят из Ортофреймов.

Домейн является самым крупным элементом в иерархической структуре Модели операционной среды. Домейн имеет собственный идентификатор, который является ключом для поиска в Базе Данных всех Карт, Помещений и Объектов, относящихся к Домейну.

На рис. 2 представлена структура иерархии элементов Модели среды. Образ реальной комнаты на Карте вместе со всеми Объектами в этой комнате является Фрагментом Карты. Фрагменты Карты имеют свои идентификаторы, которые служат ключами для их поиска в Базе Данных Объектов, относящихся к данному Фрагменту.

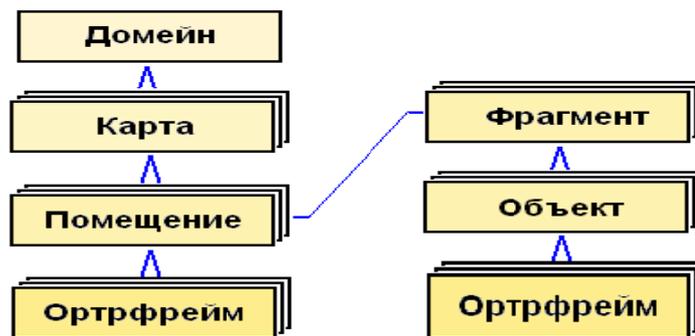


Рис. 2. Иерархия элементов Модели операционной среды

Параметры граней Ортофреймов, из которых сформирован каждый Объект, определяют переднюю, заднюю и боковые стороны Объекта. Эти свойства используются для описания взаимного расположения Объектов и их ракурса, видимого зрительной системой робота. Отношения взаимного положения или принадлежности между Объектами Карты являются наиболее значимыми для системы управления робота. Эти отношения автоматически выделяются в виде предикатов из параметров Объектов и Помещений, хранятся в отдельных структурах Базы данных и используются в процедурах планирования поведения робота. При построении Карты формируются следующие семантические Отношения взаимного положения Объектов и Помещений, которые представлены в табл. 1.

В табл. 2 представлены Отношения принадлежности (часть-целое), которые также автоматически формируются для всех элементов Карты.

Существует также возможность задавать вручную и хранить дополнительные характеристики элементов Карты в виде отношений типа: Элемент X ИМЕЕТ СВОЙСТВО = Y. В Базу данных можно занести свойства следующих типов: ОРИЕНТАЦИЯ (например: Горизонтальный, Вертикальный, Наклонный), СОСТОЯНИЕ (например: Закрыто, Открыто, Выдвинуто), ЦВЕТ (например: Черный, Белый, Коричневый), ОТРАЖАТЕЛЬ (например: Мато-

вый, Зеркальный), ПОВЕРХНОСТЬ (например: Твердый, Мягкий, Хрупкий) и МАТЕРИАЛ (например: Дерево, Стекло, Кожа).

Таблица 1. **Отношения взаимного положения Объектов и Помещений**

Объект X НАХОДИТСЯ_СВЕРХУ_НА Объекте Y Объект X НАХОДИТСЯ_СВЕРХУ_НАД Объектом Y Объект X НАХОДИТСЯ_СНИЗУ_ПОД Объектом Y	Объект X НАХОДИТСЯ_РЯДОМ_С Объектом Y Объект X НАХОДИТСЯ_СБОКУ_ОТ Объекта Y Объект X НАХОДИТСЯ_СПРАВА_ОТ Объекта Y Объект X НАХОДИТСЯ_СЛЕВА_ОТ Объекта Y
Объект X НАХОДИТСЯ_ЗА Объектом Y Объект X НАХОДИТСЯ_ПЕРЕД Объектом Y	Объект X НАХОДИТСЯ_БЛИЗКО_К Объекту Y Объект X ПРИСЛОНЕН_К Объекту Y
Объект X НАХОДИТСЯ_ВНУТРИ Помещения Y Объект X НАХОДИТСЯ_ВНЕ Помещения Y	Помещение X СОДЕРЖИТ Объект Y Помещение X ИМЕЕТ_ПРОХОД_В Помещение Y Помещение X ИМЕЕТ_ДВЕРЬ_В Помещение Y

Таблица 2. **Отношения принадлежности**

Ортофрейм X ЕСТЬ_ЧАСТЬ Объекта Y Ортофрейм X ЕСТЬ_НИЖНЯЯ_ЧАСТЬ Объекта Y Ортофрейм X ЕСТЬ_ВЕРХНЯЯ_ЧАСТЬ Объекта Y Ортофрейм X ЕСТЬ_ПЕРЕДНЯЯ_ЧАСТЬ Объекта Y Ортофрейм X ЕСТЬ_ЗАДНЯЯ_ЧАСТЬ Объекта Y Ортофрейм X ЕСТЬ_БОКОВАЯ_ЧАСТЬ Объекта Y	Объект X СОСТОИТ_ИЗ Ортофреймов (Y,Z, ...) Ортофрейм X ЕСТЬ_ЧАСТЬ Помещения Y Ортофрейм X ЕСТЬ_НИЖНЯЯ_ЧАСТЬ Помещения Y Ортофрейм X ЕСТЬ_ВЕРХНЯЯ_ЧАСТЬ Помещения Y Помещение X СОСТОИТ_ИЗ Ортофреймов (Y,Z, ...)
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Все приведенные выше отношения позволяют автоматически преобразовывать данные Карты в факты, необходимые для формирования поведения робота и для диалога робота с пользователем.

Для формирования Карты создано программное обеспечение, с помощью которого в Базу Данных системы управления робота заносятся элементы Карты операционной среды. Весь этот процесс выполняется вручную и состоит из следующих действий: создание Ортофреймов; построение Объектов из Ортофреймов; формирование Помещения; распределение Объектов по Фрагментам Карты.

Объекты хранятся в Базе Данных робота, их проекции «фасад-профиль-план» могут быть автоматически построены и нарисованы на экране пользо-

вателя сервисного робота. Если известны текущее положение и ориентация робота в Помещении, то также могут быть построены и видимые его датчиками ракурсы окружающих его Объектов. Подчеркнем, что Ортофреймы, Объекты, Помещения, Фрагменты, Карта – все эти понятия в программно-информационном комплексе системы управления робота РБ-2 структурно реализованы в виде соответствующих классов и алгоритмов их методов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-06431.

Список литературы

1. Давыдов О.И., Платонов А.К. Сеть Пассфреймов – комбинированная Модель операционной среды мобильного робота. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, №15. – 2015. – 28 с.
2. Официальный сайт: Institute for Manufacturing Engineering and Automation в Германии [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://www.care-o-bot-4.de>
3. Евсеев А.А., Носков В.П., Платонов А.К. Формирование электронной карты при автономном движении в индустриальной среде // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – №2. – С. 41–45.
4. Huang W. H., Beevers K. R. Topological Mapping with Sensing-limited Robots. // In Proc. of the 6th International Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR 2004), Utrecht, 2004. – pp. 367–382.
5. Nuchter A., Hertzberg J. Towards Semantic Maps for Mobile Robots. // Robotics and Auto-nomous Systems, vol. 56, no. 11, Nov. 2008. – pp. 915–926.
6. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.

К.С. Сарин, ассистент, sks@security.tomsk.ru
И.А. Ходашинский, д.т.н., профессор, hia@keva.tusur.ru
И.В. Горбунов, к.т.н., м.н.с, giv@keva.tusur.ru
Томский университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

О ВЛИЯНИИ ВЫБОРА МЕТРИКИ РАССТОЯНИЯ НА АДЕКВАТНОСТЬ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ

Аннотация. В работе показано влияние выбора метрики расстояния на адекватность работы алгоритма кластеризации c-means. Адекватность кластеризации оценивалась индексом Xie-Beni. Проведены эксперименты на данных с разными формами кластеров.

Ключевые слова: Кластеризация, искусственный интеллект

INFLUENCE OF THE DISTANCE METRIC TO ADEQUACY DATA CLUSTERING

K.S. Sarin, assistant, sks@security.tomsk.ru
I.A. Hodashinsky, Ph.D., professor, hia@keva.tusur.ru
I.V. Gorbunov, Ph.D., junior researcher, giv@keva.tusur.ru
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract. The work shows the influence of the choice of metric distance to the adequacy of the algorithm clustering c-means. Assessing the adequacy of the clustering index was estimated Xie-Beni. Experiments were performed on data with different forms clusters.

Key words: Clustering, artificial intelligence

Введение

Кластеризация данных широко применяется в задачах классификации и алгоритмах системного моделирования [1]. Основной целью кластеризации является извлечение естественно-образованных групп данных из некоторого набора, производя тем самым краткое представление поведения системы, которая их организовала. Извлеченные группы называют кластерами. На практике широко используется алгоритм нечеткой кластеризации c-

means [2]. Это итеративный оптимизационный алгоритм, который минимизирует следующую целевую функцию:

$$J = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik}^2 \cdot d(x_k, v_i)^2, \quad (1)$$

где n – количество данных; c – количество кластеров; x_k – k -й экземпляр данных; v_i – центр i -го кластера; μ_{ik} – степень принадлежности i -го экземпляра данных k -му кластеру; $d(x_k, v_i)$ – расстояние между x_k и v_i , представленное любой из метрик.

Естественным вопросом, относящимся к работе алгоритма, является вопрос адекватности полученных кластеров. В качестве критерия адекватности могут использоваться так называемые индексы кластеризации [3], дающие количественную оценку результату работы алгоритма.

Цель настоящей работы – показать зависимость между выбором метрики расстояния и степенью адекватности кластеризации алгоритмом *c*-means.

Постановка задачи

Результатом работы алгоритма кластеризации являются степени принадлежности каждого из экземпляров данных кластеру μ_{ik} и центры кластеров v_i (смотрите формулу (1)). Чтобы оценить адекватность полученных результатов воспользуемся индексом Хие-Вени [4], минимальное значение которого соответствует лучшему разбиению на кластеры:

$$XB = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik}^2 \cdot d(x_k, v_i)^2}{n \left(\min_{i \neq j} \{d(x_j, v_i)\} \right)}. \quad (2)$$

Используемые метрики расстояния приведены ниже [5].

Манхэттенское расстояние:

$$d(X, Y) = \sum_{i=1}^p |X_i - Y_i|, \quad (3)$$

где p – размерность пространства, а X и Y векторы экземпляров данных.

Евклидово расстояние:

$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^p (X_i - Y_i)^2}. \quad (4)$$

Расстояние Чебышева:

$$d(X, Y) = \max_{i=1, \dots, p} \{|X_i - Y_i|\}. \quad (5)$$

Расстояние Махаланобиса:

$$d(X, Y) = \sqrt{(X - Y)^T \cdot A^{-1} \cdot (X - Y)}, \quad (6)$$

где A – ковариационная матрица, рассчитанная на всем наборе данных.

Задача исследования состоит в оценке качества кластеризации по значению индекса Xie-Beni для кластеров на различных наборах данных, используя при этом вышеуказанные метрики.

Алгоритм нечеткой кластеризации c-means

Алгоритм нечеткой кластеризации представляет итеративный процесс, состоящий из двух шагов.

1) определение степеней принадлежности данных кластеру:

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d(x_k - v_i)}{d(x_k - v_j)} \right)^2}; \quad (7)$$

2) вычисление на основании степеней принадлежности центров кластеров:

$$v_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^2 \cdot x_{kj}}{\sum_{k=1}^n \mu_{ik}^2}, \quad (8)$$

где v_{ij} – центр j -й координаты i -го кластера, x_{kj} – значение j -й координаты k -го экземпляра данных. Процесс продолжается до тех пор, пока значение центров кластеров станет неизменным. Количество кластеров c задается фиксировано. Начальные значения центров кластеров задаются случайным образом.

Эксперимент

Для оценки адекватности работы алгоритма были сгенерированы четыре набора данных с разными формами кластеров в ограниченной двумерной области (0:15) по каждой из осей (см. рис. 1).

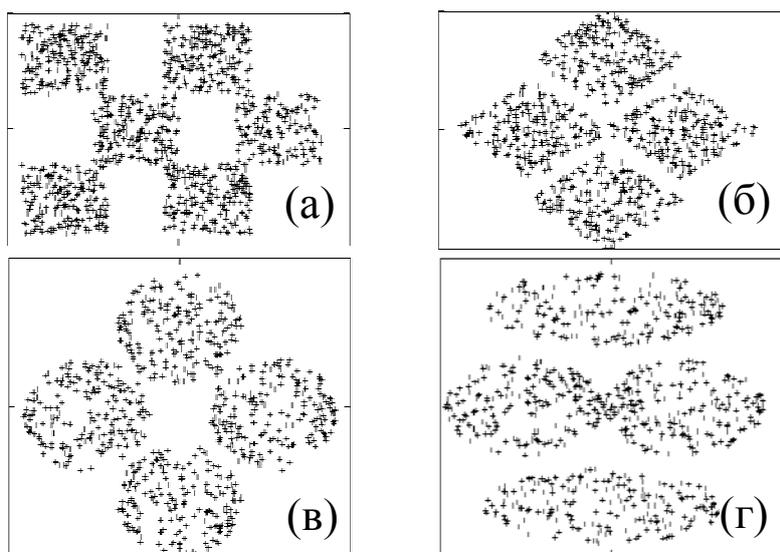


Рис. 1. Сгенерированные наборы данных с разными формами кластеров: а) кубическая; б) ромбовидная; в) круглая; г) эллипсоидная

На сгенерированных наборах данных были выявлены кластеры с помощью алгоритма *c-means*, причем использовались метрики расстояния (3)–(5). Адекватность кластеризации оценивалась с помощью индекса Хие-Вени (2). Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения индекса Хие-Вени при различных метриках

Форма кластеров	Индекс Хие-Вени			
	Манхэттенское	Евклидово	Чебышева	Махаланобиса
кубическая ($c=5$)	0,1885	0,1809	0,1995	0,1766
ромбовидная ($c=4$)	0,1836	0,2048	0,2438	0,2028
круглая ($c=4$)	0,2119	0,1909	0,2645	0,2113
эллипсоидная ($c=4$)	0,2055	0,2246	0,3119	0,1901

На рис. 2 представлены найденные центры кластеров на разных метриках расстояния для кластеров эллипсоидной формы.

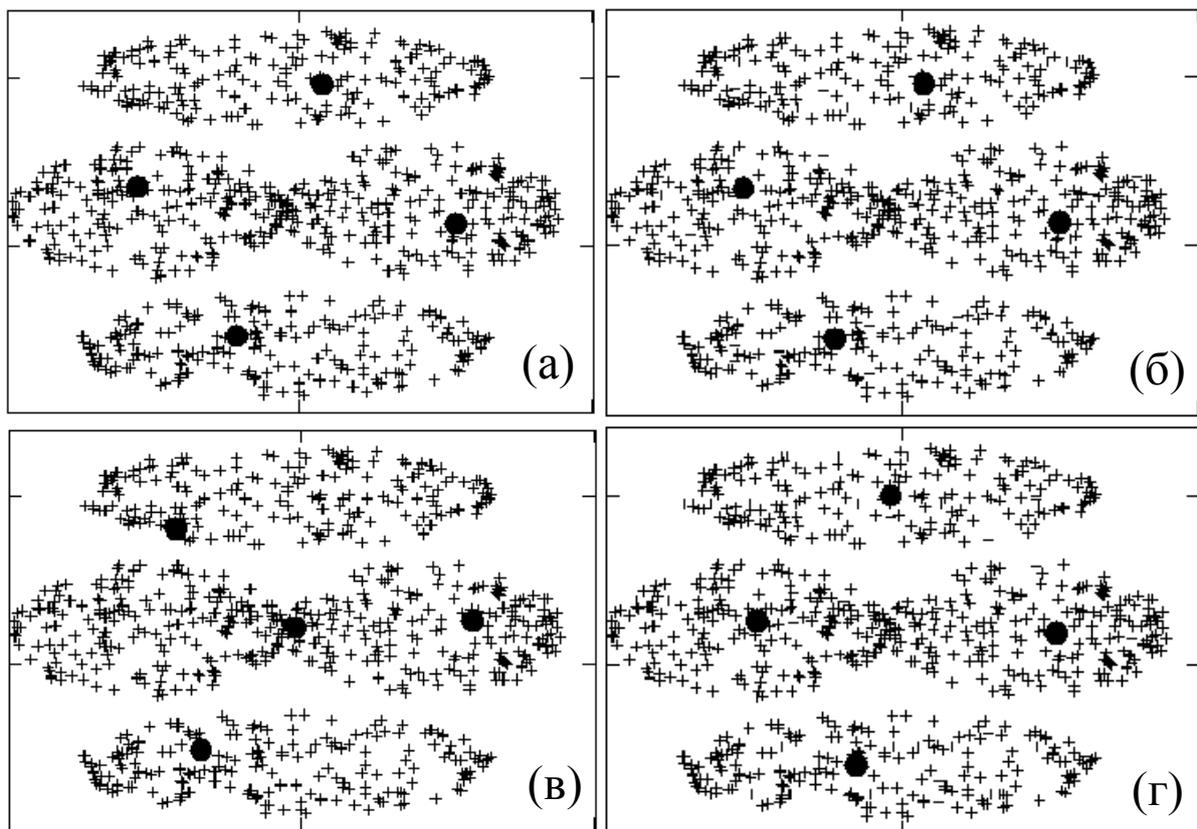


Рис. 2. Центры кластеров, найденные алгоритмом *c-means* с помощью следующих расстояний: а) Манхэттенского; б) Евклидова; в) Чебышева; г) Махаланобиса

В табл. 1 выделены минимальные значения индекса для каждой формы кластера, здесь нужно учесть, лучшее разбиение на кластеры соответствует меньшему значению индекса. На рис. 2 жирными точками обозначены центры кластеров, полученные с помощью алгоритма кластеризации.

Обсуждение результатов

Таблица 1 показывает, что значения индекса Xie-Beni, а значит и адекватности кластеризации, зависит от правильного выбора метрики расстояния. На рис. 2 показано, что лучшее положение центров кластеров соответствует меньшему значению индекса. Расстояние Махаланобиса оказалось лучшим для кубических и эллипсоидных форм кластеров. Манхэттенское расстояние лучшим образом проявило себя на ромбовидных кластерах, а Евклидово на круглых.

Правильный подбор метрики, соответствующей форме кластера, весьма важен для достижения адекватности построенной модели. Данная задача является нетривиальной при обработке данных большой размерности. Одним из критериев для подбора метрики может служить индекс Xie-Beni.

Список литературы

1. Ходашинский И.А., Горбунов И.В., Синьков Д.С. Алгоритмы генерации структур двухкритериальных Парето-оптимальных нечетких аппроксиматоров. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 1 (27). – С. 135–142.
2. Bezdek J. C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. – Plenum, New York, 1981. – 272 p.
3. Плотников О.О., Ходашинский И.А. Особенности применения алгоритмов нечеткого кластерного анализа для решения задачи классификации данных. // Современная техника и технологии: Материалы XVI международной научно-практической конференции студентов аспирантов и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2010. – С. 376–378.
4. Xie X. L., Beni G. A validity measure for fuzzy clustering // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – vol.13. – 1991. – pp. 841–847.
5. Cha S.-H. Comprehensive Survey on Distance/Similarity Measures between Probability Density Functions. // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Science. – Issue 4, vol. 1. – 2007. – pp. 300–307.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЧЕТКИХ АППРОКСИМАТОРОВ АЛГОРИТМАМИ «НЕЛДЕРА – МИДА» И «ВЕЛИКИЙ ПОТОП»

Аннотация. В работе представлено описание нечеткого аппроксиматора, оптимизация его параметров с помощью алгоритма «Великий потоп» и метода «Нелдера – Мида». Приведены результаты экспериментов для оценки работы алгоритмов.

Ключевые слова: нечеткие системы, нечеткий аппроксиматор, оптимизация, алгоритм «великой потоп», метод «Нелдера – Мида».

OPTIMIZATION OF FUZZY APPROXIMATOR PARAMETERS BASED ON THE «NELDER – MEAD» METHOD AND «GREAT DELUGE» ALGORITHM

O. K. Sonich, student, zlasjasok@gmail.com
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract. The paper considers basic phases of fuzzy systems construction. For solving the problem optimization of fuzzy systems parameters applied the Great Deluge algorithm and Nelder–Mead method. Experiments for analyzing the performance of the algorithms for optimization and fuzzy system are described

Key words: fuzzy systems, fuzzy approximator, optimization, great deluge algorithm, Nelder–Mead method.

Введение

В данной работе решается проблема аппроксимации функции с помощью нечеткого моделирования. Выбор такого варианта решения проблемы был связан с возможностью работы нечетких аппроксиматоров с неопределенными данными и возможностью их интерпретации [1, 2].

В нашей работе настройка параметров нечеткого аппроксиматора ведется с помощью алгоритма «Великий потоп» и метода «Нелдера – Мида».

Нечеткий аппроксиматор

Рассмотрим построение нечетких аппроксиматоров. Нечеткая модель может быть построена либо на основе знаний эксперта, либо на основе таблицы наблюдений. В данном случае мы будем рассматривать построение нечеткой модели типа синглтон на основе таблицы наблюдений [2].

Нечеткая система может быть представлена как

$$y = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{r}),$$

где \mathbf{x} – входной вектор, $\boldsymbol{\theta} = \|\theta_1, \dots, \theta_M\|$ — вектор параметров антецедентов, $N = n \cdot$ (число параметров, описывающих одну функцию принадлежности) \cdot (число термов, описывающих одну входную переменную), y — скалярный выход системы, $\mathbf{r} = \|r_1, \dots, r_R\|$ — вектор параметров консеквентов.

В нечеткой системе типа синглтон i -ое правило имеет следующий вид:

$$\text{IF } x_1=A_{1i}\text{AND } x_2=A_{2i}\text{AND } \dots \text{AND } x_n=A_{ni} \text{ THEN } y = r_i,$$

где A_{ij} — лингвистический терм, которым оценивается переменная x_i ; r_i — значение консеквента i -го правила [1].

После формирования базы правил, производится формирования вектора нечеткой системы и расчет ошибки. Пусть дано множество обучающих данных (таблица наблюдений) $\{(\mathbf{x}_p; t_p), p = 1, \dots, m\}$, тогда среднеквадратическая функция ошибки, являющаяся численным критерием адекватности модели, вычисляется по следующей формуле [1]:

$$E(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{r}) = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^m (t_p - f(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{r}))^2}{m}}.$$

Алгоритм «Великий потоп»

Введем основные обозначения, использующиеся в алгоритме «Великий потоп» (GDA): x_i^o – текущее решение, x_i^c – новое решение, h^o – текущее значение целевой функции, h^c – новое значение целевой функции, UP – параметр увеличивает критерий приемлемости, u – равномернослучайное число, сгенерированное в интервале $[0,1]$, p – заранее оговоренное нечетное целое, $LEVEL$ – уровень воды, параметр, используемый в решении или критерий приемлемости.

Первым шагом случайно генерируем точку x_i^o в пределах диапазона данных, далее вычисляем значение целевой функции h^o с учетом сгенерированной точки и присваиваем это значение как начальное значение переменной $LEVEL$. Далее мы осуществляем поиск точки – кандидата (точки в которую мы можем переместиться) по следующей формуле:

$$x_i^c = x_i^o + (10 * u - 5)^p ; i = 1, 2, \dots, n.$$

Вычисляем значение целевой функции с учетом точки–кандидата h^c и сравниваем ее значение с текущим h^o , если значение h^o больше значения h^c , то присваиваем значение $h^o = h^c$ и изменяем уровень воды по следующей формуле:

$$LEVEL = LEVEL - UP * (LEVEL - h^c).$$

Если же значение текущей функции меньше значения новой целевой функции, то ищем новую точку-кандидата. К сожалению, алгоритм может и не найти подходящие число за допустимое количество итераций, тогда сообщаем текущее значение x_i^o как оптимальное. Условием выхода из алгоритма являются достижение наперед заданного количества итераций, или же выполнение условия $((x_i^o - x_i^c)/x_i^c) < 0,000001$. После выполнения какого-либо из условий, мы сообщаем текущее решение как оптимальное [3–5].

Метод «Нелдера – Мида»

Метод «Нелдера – Мида» (NM) характеризуется как метод безусловной оптимизации функции от нескольких переменных, не использующий градиентов функции. Суть метода заключается в последовательной деформации и перемещения симплекса вокруг точки экстремума функции. Параметрами метода являются коэффициент отражения α , коэффициент сжатия β , коэффициент растяжения γ . Метод «Нелдера – Мида» использует следующие операции над симплексами: отражение, редукция, сжатие, растяжение [6].

Эксперимент

Для оценки эффективности нечеткого аппроксиматора, настроенного приведенным алгоритмом, были проведены тесты на наборах данных из репозитория KEEL (<http://www.keel.es>). Для аппроксиматоров тесты были проведены на реальных данных – diabetes, Ele-2, Ele-1, DEE.

В табл. 1–4 для каждого из алгоритмов указаны усредненные значения точности аппроксимации на пяти наборах данных для обучающей и тестовой выборок, а также #R – количество правил нечеткого аппроксиматора.

Таблица 1. Результаты аппроксимации для Diabetes

Алгоритм	Обуч	СКО	Тест	СКО	#R
Wang–Mendel	0,2283	0,0425	1,4024	0,689	18,6
COR-BWAS	0,1749	0,025	1,4586	0,7091	18,6
Thrift	0,0744	0,0098	0,8782	0,3575	46,2
Pittsburgh	0,1039	0,0182	0,9508	0,7881	15
Fuzzy-GAP	0,1429	0,0376	0,5014	0,3014	10
Pitts-DNF min	0,4162	0,1231	0,5392	0,1288	1,6
Pitts-DNF med	0,1295	0,0136	0,3213	0,1922	5,4
Pitts-DNF max	0,1065	0,015	0,6339	0,5276	9,6
GDA	0,1522	0,0230	2,5228	0,9661	9
NM	0,157	0,04	0,4767	0,9661	9
GDA + NM	0,1522	0,0230	0,25	0,1474	9

Таблица 2. Результаты аппроксимации для DEE

Алгоритм	Обуч	СКО	Тест	СКО	#R
Wang–Mendel	0,1411	0,0074	0,2206	0,0264	178
COR-BWAS	0,1246	0,0052	0,2051	0,0231	178
Thrift	0,3877	0,0357	0,4583	0,0804	13020
Pittsburgh	0,4211	0,0784	0,7210	0,3263	982
Fuzzy-GAP	0,1775	0,013	0,2063	0,0172	89
Pitts-DNF min	0,2207	0,0219	0,3063	0,0884	34
Pitts-DNF med	0,1382	0,006	0,2746	0,1366	57
Pitts-DNF max	0,1126	0,0035	0,2169	0,0359	98
GDA	0,1578	0,0051	0,7439	0,0949	64
NM	0,1978	0,0047	0,2439	0,08147	128
GDA + NM	0,1578	0,0051	0,2439	0,08147	64

Таблица 3. Результаты аппроксимации для ele-1

Алгоритм	Обуч	СКО	Тест	СКО	#R
Wang–Mendel	423466	8069	455262	19943	22
COR-BWAS	354304	7065	417142	9823	22
Thrift	335086	5285	435373	57252	46,4
Pittsburgh	343464	19209	738691	543165	17,2
Fuzzy-GAP	481603	58989	548122	70968	11
Pitts-DNF min	767922	55787	760271	56310	2
Pitts-DNF med	344636	8999	415266	71200	8,2
Pitts-DNF max	330496	4815	440692	40370	14
GDA	340845	10898,75	1883144	184817	128
NM	423929	10898	573834	247817	128
GDA + NM	340845	18301	486153	217478	128

Таблица 4. Результаты аппроксимации для ele-2

Алгоритм	Обуч	СКО	Тест	СКО	#R
Wang–Mendel	112270	1498	112718	4685	65
COR-BWAS	102664	1080	102740	4321	65
Thrift	146305	12991	168472	20135	524,6
Pittsburgh	210717	32027	265130	30161	240
Fuzzy-GAP	279166	90017	290062	89155	33
Pitts-DNF min	202943	43684	212018	44616	12,2
Pitts-DNF med	86930	3955	99310	12996	18,6
Pitts-DNF max	70207	1658	88017	8968	32,4
GDA	17549,5	702,1	80301,4	7192,7	81
NM	232121	702	244896	7121	81
GDA + NM	17549,5	702,1	67624	7150	81

Результаты экспериментов показывают, что точность аппроксимации нечетких аппроксиматоров, настраиваемых алгоритмом «Великий потоп» и методом «Нелдера – Мида», сопоставима с точностью аппроксиматоров, построенных известными лучшими алгоритмами.

Заключение

В работе представлена процедура построения нечетких систем на основе алгоритма «Великий потоп» и метода «Нелдера – Мида». Работоспособность нечетких аппроксиматоров, настроенных приведенными алгоритмами, проверена на наборах, данных из репозитория KEEL. Приведенные сравнения с аналогами показали достаточно высокую точность алгоритмов «Великий потоп» и метода «Нелдера – Мида» при решении задачи оптимизации параметров нечетких систем. Таким образом, алгоритм «Великий потоп» и метод «Нелдера – Мида» могут быть рекомендованы для практического применения при решении задач оптимизации параметров нечетких аппроксиматоров.

Список литературы

1. Ходашинский И.А., Горбунов И.В., Синьков Д.С. Алгоритмы генерации структур двухкритериальных парето-оптимальных нечетких аппроксиматоров // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. –2013. – № 1 (27). – С. 135–142.
2. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы// Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.:Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
3. V. Ravi: Modified Great Deluge Algorithm versus Other Metaheuristics in Reliability Optimization// Computational Intelligence in Reliability Engineering (SCI) 40, 2007. – С. 21–36.
4. Soft Computing Applications in Optimization, Control, and Recognition. P. Melin and O. Castillo (Eds.) Studies in Fuzziness and Soft Computing.// V. 294. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. – 341 p.
5. Dueck G. New optimization heuristics. The great deluge algorithm and the record-to-record travel // Journal of Computational Physics. – 1993. – V. 104. – pp. 86–92.
6. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация // Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. – 509 с.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЧЕТКИХ КЛАССИФИКАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА «МИННЫЙ ВЗРЫВ» И МЕТОДА ХУКА – ДЖИВСА

Аннотация. В работе приведена адаптация метода Хука – Дживса для идентификации параметров нечетких классификаторов. Кроме того, приведены результаты работы нечетких классификаторов, настроенных метаэвристическим алгоритмом «Минный взрыв» совместно с методом Хука – Дживса.

Ключевые слова: идентификация, нечеткий классификатор, оптимизация, «Минный взрыв», метод Хука – Дживса

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF FUZZY CLASSIFIER BY «MINE BLAST» ALGORITHM AND METHOD OF HOOKE AND JEEVES

S.R. Subkhankulova, student, sophi1059@gmail.com
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract. The paper shows the adaptation of the method of Hooke-Jeeves to identify parameters fuzzy classifiers. In addition, given the results of the work of fuzzy classifiers configured metaheuristic Mine blast algorithm together method of Hooke-Jeeves.

Key words: identification, fuzzy classifier, optimization, Mine blast algorithm, method of Hooke and Jeeves

Постановка задачи

Пусть имеется объект исследования, заданный своей таблицей наблюдений. Проблема исследования обусловлена невозможностью построения аналитической модели изучаемого объекта, либо слишком большой сложностью такой модели, либо отсутствием достаточного опыта для построения экспертных систем, либо недостаточностью экспериментальных данных для статистического моделирования. Решением проблемы может быть переход от аналитических или статистических моделей к нечетким системам [1].

Нечеткий классификатор может быть представлен функцией $c = f(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})$, где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ – вектор признаков классифицируемого объекта; $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N)$ – вектор параметров нечеткого классификатора (рис. 1).

Выводом нечеткого классификатора является метка класса. i -ое правило нечеткого классификатора имеет вид [2]:

R_{ij} : ЕСЛИ $x_1 = A_{1i}$ И $x_2 = A_{2i}$ И $x_3 = A_{3i}$ И ... И $x_n = A_{ni}$ ТО $class = c_j$,

где A_{ki} – нечеткий терм, характеризующий k -ый признак в i -том правиле ($i \in [1, R]$), R – число правил; c_j – идентификатор j -того класса, $j \in [1, m]$.

Определим на множестве обучающих данных (таблице наблюдений) $\{(\mathbf{x}_p; c_p), p = 1, \dots, z\}$ функцию [1]:

$$\text{delta}(p, \boldsymbol{\theta}) = \begin{cases} 1, & \text{если } c_p = f(\mathbf{x}_p; \boldsymbol{\theta}), \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, p = 1, 2, \dots, z,$$

тогда численный критерий качества классификации выражается формулой:

$$E(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\sum_{p=1}^z \text{delta}(p, \boldsymbol{\theta})}{z}. \quad (1)$$

Задача заключается в повышении точности вывода нечеткого классификатора. Для ее решения необходимо найти максимальное значение процента правильной классификации в многомерном пространстве, координатами которого являются параметры нечеткого классификатора. Для оптимизации параметров нечеткого классификатора предлагается использовать алгоритм «Минный взрыв» (МВА) вкупе с методом Хука-Дживса (НЖ), хорошо зарекомендовавшего себя при оптимизации математических функций.

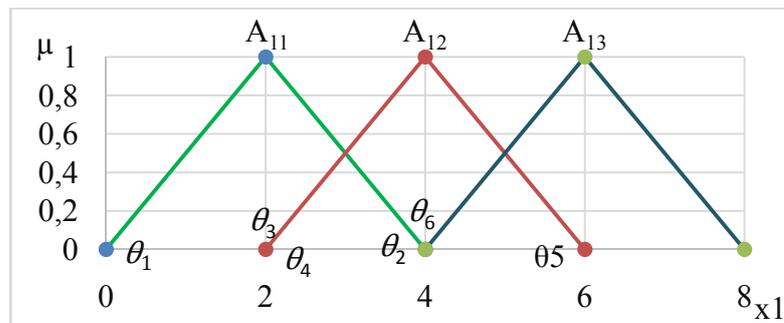


Рис. 1. Параметры нечеткого классификатора

Алгоритм «Минный взрыв»

На вход алгоритма подается: N_s – число осколков для каждой мины; максимальное число итераций.

На выходе получается $\boldsymbol{\theta}^*$ – вектор оптимальных параметров нечеткого классификатора, максимизирующий выражение (1).

1. Инициализируется начальная точка взрыва $\boldsymbol{\theta}_0$, координатами которой являются параметры нечеткого классификатора, и вычисляется угол разброса осколков [3]:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{N_s}.$$

Вычисляется расстояние полета осколков: по $\mathbf{d}_0 = \mathbf{UB} - \mathbf{LB}$, где \mathbf{LB} – вектор, сформированный из соответствующих минимальных значений параметров $\boldsymbol{\theta}_0$, \mathbf{UB} – вектор, сформированный из соответствующих максимальных значений параметров $\boldsymbol{\theta}_0$.

2. Вычисляются текущие расстояния с помощью формулы [3]:

$$\mathbf{d}_n = \mathbf{d}_{n-1} \text{randn}, n = 1, 2, \dots, N_s,$$

где randn – нормально распределенное число.

Вычисляются координаты взорвавшейся мины:

$$\boldsymbol{\theta}_{e(n)} = \mathbf{d}_n \cos(\varphi), n = 1, 2, \dots, N_s.$$

3. Создается осколок, т. е. формируется новый вектор:

$$\boldsymbol{\theta}_n = \boldsymbol{\theta}_{e(n)} + \boldsymbol{\theta}_{n-1}, n = 1, 2, \dots, N_s.$$

4. Проверяются ограничения для функций принадлежности. Если ограничения не выполняются, то перейти на шаг 2.

5. Вычислить значения процента правильной классификации для $\boldsymbol{\theta}_n$.

6. Сохраняется промежуточное решение с наибольшим значением процента правильной классификации.

7. Если максимальное число итераций не достигнуто, то перейти к шагу 2, иначе выход из алгоритма.

Метод Хука – Дживса (НЖ)

Данный метод состоит из последовательности шагов исследующего поиска вокруг базисной точки, за которой в случае успеха следует поиск по образцу.

Шаг 1. Выбирается начальная базисная точка $\boldsymbol{\theta}^b$ (рис. 2, а). В данном случае начальной точкой будет вектор параметров нечеткого классификатора, полученный после завершения первой итерации алгоритма «минный взрыв». Также задается ε – точность.

Шаг 2. Определяется качество решения как процент правильной классификации.

Шаг 3. Циклически изменяется каждая координата $\boldsymbol{\theta}^b$ [4]:

$$\boldsymbol{\theta}[k] = \boldsymbol{\theta}^b + \mathbf{h},$$

где $\mathbf{h} = (h_1, h_2, h_3, \dots, h_N)$ – вектор шагов спуска, k – номер точки, $\boldsymbol{\theta}^b$ – первая точка ($\boldsymbol{\theta}[1]$).

Далее определяется качество решения. Если оно лучше базисного, то значение базисной координаты заменяется на текущее, иначе – вычисляется значение:

$$\boldsymbol{\theta}[k] = \boldsymbol{\theta}^b - \mathbf{h}.$$

И так же определяется качество решения и сохраняется лучшее.

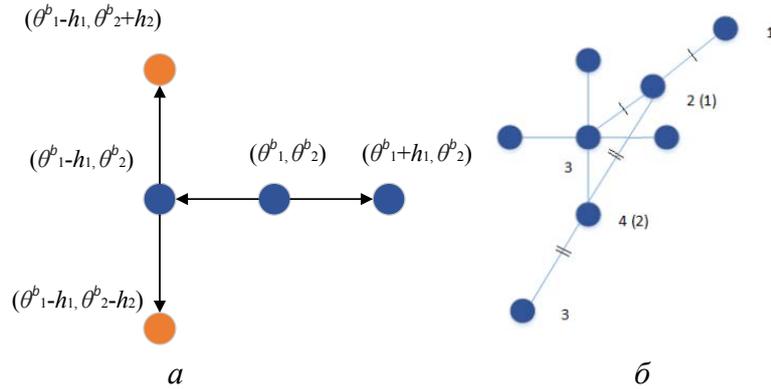


Рис. 2. Исследующий поиск вокруг базисной точки

Шаг 4. Если $\theta^b = \theta[2]$, то длина шага уменьшается на порядок, переход на шаг 3, иначе производится поиск по образцу (рис. 2, б).

Шаг 5. Если $h_i < \varepsilon$, $i = 1..N$, то работа алгоритма завершается, иначе — переход на шаг 3.

Шаг 6. На этапе поиска по образцу откладывается точка $\theta[3]$ в направлении от $\theta[1]$ к $\theta[2]$ на том же расстоянии. Ее координаты получаются по формуле:

$$\theta[3] = \theta[1] + \lambda(\theta[2] - \theta[1]),$$

где λ — параметр алгоритма, обычно выбирающийся равным 2.

Затем в новой точке 3 проводится исследующий поиск, как на 1 фазе алгоритма, за исключением того, что шаг на этой фазе не уменьшается. Если на этой фазе в результате исследующего поиска удалось получить точку 4, отличную от точки 3, то точку 2 переобозначим на 1, а 4 на 2 и повторим поиск по образцу. В случае если не удастся найти точку 4, отличную от точки 3, то точку 2 переобозначим на точку 1 и повторим 1-ю фазу алгоритма — исследующий поиск.

Эксперимент

Работоспособность нечетких классификаторов, настроенных метаэвристическим алгоритмом «Минный взрыв» и методом Хука – Дживса проверялась на наборе данных из репозитория KEEL(<http://www.keel.es>):balance, iris, wine, new-thyroid, Wisconsin. Выборка делилась на 5 нарезок для обучения и 5 тестовых нарезок, при этом 80% данных отводилось для обучающих нарезок и 20 % — для тестовых. На каждой нарезке проводилось по 5 тестов.

Структура нечеткой системы генерировалась по экстремумам классов [5, 6]. В качестве функций принадлежности использовались гауссоиды.

Изначально запускался алгоритм «Минный взрыв» (1 итерация), затем использовался метод Хука – Дживса для тонкой подстройки параметров нечеткого классификатора. Далее повторялась итерация «Минного взрыва» и т. д.

В качестве параметров алгоритма «Минный взрыв» было выставлено число итераций, равное 100, количество осколков, равное 15. Параметр метода Хука – Дживса λ задавался равным 2, $\varepsilon = 0,001$.

Результаты тестов и сравнение с аналогами [7] приведены в табл. В табл. Обуч. – значение процента правильной классификации на обучающей выборке, Тест – значение процента правильной классификации на тестовой выборке, СКО – среднеквадратичное отклонение, #R–количество правил.

Таблица. Тесты на наборах данных balance, iris, new-thyroid, Wisconsin

Алгоритм	Набор данных									
	balance (признаки: 4, объем выборки: 625, класса: 3)					iris (признаки: 4, объем выборки: 150, класса: 3)				
	Обуч.	СКО	Тест	СКО	#R	Обуч.	СКО	Тест	СКО	#R
Ant Miner	73,65	3,38	70,24	6,21		97,26	0,74	96,00	3,27	
CORE	68,64	2,57	70,08	7,11		95,48	1,42	92,67	4,67	
HIDER	75,86	0,40	69,60	3,77		97,48	0,36	96,67	3,33	
SGERD	76,96	2,27	75,19	6,27		97,33	0,36	96,67	3,33	
TARGET	77,29	1,57	75,62	7,27		93,50	2,42	92,93	4,33	
MBA	88,36	0,44	86,75	1,47	3	97,76	0,71	94,53	3,38	3
MBA+HJ	90,18	0,76	88,74	1,42	3	97,83	0,67	95,33	3,72	3
	new-thyroid (признаки: 5, объем выборки: 215, класса: 3)					Wisconsin (признаки: 9, объем выборки: 683, класса: 2)				
	Обуч.	СКО	Тест	СКО	#R	Обуч.	СКО	Тест	СКО	#R
Ant Miner	99,17	0,58	90,76	6,85		92,58	1,65	90,41	2,56	
CORE	92,66	1,19	90,76	5,00		94,71	0,64	92,38	2,31	
HIDER	95,97	0,83	90,28	7,30		97,3	0,31	96,05	2,76	
SGERD	90,23	0,87	88,44	6,83		93	0,85	92,71	3,82	
TARGET	88,05	2,19	86,79	5,83		96,13	0,64	95,75	0,82	
MBA	98,65	0,26	95,81	1,72	3	97,02	0,34	95,52	0,51	2
MBA+HJ	98,69	0,36	95,44	2,55	3	96,98	0,35	95,82	0,72	2
	wine (признаки: 13, объем выборки: 178, класса: 3)									
	Обуч.	СКО	Тест	СКО	#R					
AntMiner	99,69	0,58	92,06	6,37						
CORE	99,06	0,42	94,87	4,79						
HIDER	97,19	0,98	82,61	6,25						
SGERD	91,76	1,31	87,09	6,57						
TARGET	85,19	1,58	82,24	7,57						
MBA	98,73	0,57	94,59	2,62	3					
MBA+HJ	98,87	0,57	95,36	2,62	3					

Заключение

В работе представлена процедура построения нечетких классификаторов на основе алгоритма «Минный взрыв» и метода Хука – Дживса. Эффективность совместной работы данных алгоритмов проверялась на наборах данных из репозитория KEEL: balance, iris, wine, new-thyroid, Wisconsin.

Алгоритм «Минный взрыв» и метод Хука-Дживса могут быть совместно применены для решения задачи оптимизации параметров нечеткого классификатора, так как настроенные вышеупомянутыми алгоритмами нечеткие классификаторы имеют достаточно высокую точность вывода по сравнению с аналогами и одиночным применением алгоритма «Минный взрыв».

Список литературы

1. Ходашинский И.А. Алгоритмы муравьиной и пчелиной колонии для обучения нечетких систем / И.А. Ходашинский, И.В. Горбунов, П.А. Дудин // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 2 (20). – С. 157–161.
2. Ходашинский И.А., Горбунов И.В. Алгоритмы идентификации интерпретируемых и точных нечетких классификаторов // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва 16–19 июня 2014 г. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. — М: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. — С. 3269–3280.
3. Sadollah A., Bahreininejad A., Eskandar H., Hamdi M. Mine blast algorithm: A new population based algorithm for solving constrained engineering optimization problems // Applied Soft Computing. – 2013. V.13. No. 5. – pp. 2592–2612.
4. ИНТУИТ. Многометрическая (многомерная) оптимизация [Электронный ресурс]: режим доступа – <http://www.intuit.ru/studies/courses/1020/188/lecture/4931>.
5. Hodashinsky I. A., Gorbunov I. V. Algorithms of the tradeoff between accuracy and complexity in the design of fuzzy approximators // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2013. V. 49. – pp. 569–577.
6. Ходашинский И.А., Горбунов И.В. Построения нечетких классификаторов на основе алгоритма пчелиной колонии // Материалы Всероссийской конференции с международным участием “Знания – Онтологии – Теории” (ЗОНТ-2011). – Новосибирск: Институт математики им. С. Л. Соболева, 2011. Т.2. – С. 117–125.
7. Alcalá-Fdez J., Fernández A., Luengo J. et al. KEEL Data-mining software Tool: data, set repository, integration of algorithms and experimental analysis framework // Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing. 2011. V.17. No. 2-3. – pp. 255–287.

ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНСТРУКТОР ПРАВИЛ БАЗЫ ЗНАНИЙ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Аннотация. В докладе рассказывается о подходе к построению правил базы знаний, основанном на использовании эргономичной визуальной нотации и специально разработанного инструментального программного средства – графического конструктора. Используемая графическая нотация обладает наглядностью, «прозрачностью» и быстротой для понимания человека. Все это должно позволить неспециалистам в области инженерии знаний и формальных языков создавать в сжатые сроки базы знаний с надлежащим качеством.

Ключевые слова: база знаний, правило, графическая нотация, эргономичное представление, система управления реального времени.

VISUAL CONSTRUCTOR OF REAL-TIME KNOWLEDGE BASE'S RULES

A.V. Tyugashev, Professor, tau797@mail.ru
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The paper devoted to approach to visualization and construction of the knowledgebase's rules. Rules of the real time knowledgebase can be shown in visual form as well as be constructed from scratch using special graphical editor.

Key words: knowledge base, real time control system, visual notation, ergonomic representation

На современном этапе развития интеллектуальных технологий можно выделить специальный класс баз знаний, а именно - базы знаний реального времени [1].

Управление современными сложными техническими комплексами на современном этапе невозможно представить без использования ЭВМ, зачастую – встроенных вычислительных систем. Непосредственным же носителем «интеллекта» является исполняемое на них программное обеспечение (ПО).

К сожалению, логика, закладываемая в ПО, является обычно жесткой, затрудняющей оперативное изменение используемых при управлении правил в случае возникновения необходимости. Весьма интересным в подобной ситуации решением, обладающим, с одной стороны, гибкостью, а с другой – достаточной степенью апробированности в других проблемных областях, связанных со сложными явлениями и процессами, является использование баз знаний. В данном случае, естественно, речь идет о базах знаний реального времени.

Существенной особенностью подобных систем является не только необходимость прийти к правильному заключению, но и то, что оно должно быть получено в рамках заданных временных ограничений (определяемых, например, скоростью движения или протекания иных физических процессов). Областью применения такого рода интеллектуальных систем могут быть мобильные технические комплексы, роботы, автоматизированные производства, и пр. Правила могут использоваться с целью технической диагностики [2], решения задач управления, повышения эффективности использования ресурсов, и т. д.

К корректности закладываемых в базу правил – и обусловленной этим надежностью функционирования интеллектуальной системы управления – при этом предъявляются повышенные требования из-за весьма высокой стоимости возможной ошибки [3–5]. Необходимая скорость реакции в некоторой аномальной ситуации в ряде случаев может исключать возможность задействования человека для экспертной оценки вывода, полученного интеллектуальной системой управления.

При этом весьма важной проблемой при использовании любых баз знаний является их наполнение [6]. Нередка ситуация, когда эксперт – носитель необходимых знаний, не являющийся математиком или специалистом в области информационных технологий, испытывает проблемы при формализованном их представлении, необходимом для внесения в машину. Еще одной существенной проблемой является обеспечение таких свойств, как непротиворечивость и целостность вносимых в базу знаний. Посредником здесь может выступать специалист – инженер по знаниям, однако в подобном случае нельзя полностью исключать возникновения эффекта «испорченного телефона». Между людьми – участниками процесса могут возникать недопонимание, использование различных систем понятий, и пр. С целью разрешения данного противоречия используются различные подходы, например, использование диалоговых подсистем, взаимодействующих с пользователем на естественном языке (ЕЯ), или некоем подмножестве ЕЯ (язык «деловой прозы», см., например, [7], и пр. Система даже может «уметь» задавать пользователю уточняющие вопросы. Однако даже диалоговый режим с последовательным уточнением, использующий естественный язык, не может полностью

исключить неточности и ошибки в силу таких особенностей ЕЯ, как неточность и многозначность.

Говоря о знаниях и интеллектуальных системах вообще, имеет смысл обратить внимание на графическую форму представления информации [8, 9].

Человек привык жить в материальном мире, ему довольно трудно разбираться с «виртуальными», информационными объектами, коими по своей сути являются программы. При этом одной из наиболее естественных форм представления (восприятия) информации для человека является графический образ. К этой форме человек прибегает всякий раз (возможно, неявно для себя), когда необходимо решать действительно сложные задачи. Человеческая культура «визуально ориентирована», достаточно упомянуть фотографии, кинофильмы, телевидение, презентации. В качестве типичных эпитетов для графического представления используются "дружественный", "интуитивный", "простой", "привлекательный", "понятный", "запоминающийся" и пр. Графика позволяет использовать метафору – представление новых или необычных для пользователя явлений через другие явления, хорошо ему известные из повседневной жизни [9].

Можно отметить удачное соответствие графики требованиям этапов постановки задачи и проектирования. Использование визуального представления позволяет создавать более компактные и наглядные спецификации. Упрощается понимание в процессе взаимодействия инженеров-системщиков, математиков и пр. Преимущества визуального представления за счет улучшения координации и взаимопонимания участников работ дают возможность повышения производительности труда.

В АО «ИСС» (г. Железногорск) существует достаточно развитая технология создания систем управления космическими аппаратами. Бортовое программное обеспечение тщательно структурируется, при его создании используется отработанная технология и ряд инструментальных программных средств. Следует отметить, что технология в целом обеспечивает такой уровень совершенства, что за все время ни одного случая стойкой потери функциональности спутником по вине программного обеспечения не было.

Важное место при этом занимает механизм автономного управления спутниками, использующий понятие «макропрограмм интегрального управления». Понимается под этим следующее. На борту функционирует специальный интерпретатор, управляемый правилами, закладываемыми в особом формате в память. Правила формулируются на специальном проблемно-ориентированном языке, использующем табличную форму представления. Пользователем является проектант космического аппарата (КА). Однако имеющиеся инструменты не предоставляют достаточного уровня «прозрачности» представляемой правилами логики управления.

В настоящее время по заказу АО «ИСС» проводятся опытно-конструкторские работы по созданию СИПР МП – системы интеллектуальной поддержки процессов проектирования и верификации макропрограмм

интегрального управления. Разрабатываемое инструментальное программное обеспечение должно по требованиям ТЗ «без швов» интегрироваться с существующими форматами и программным обеспечением. Необходимо обеспечить возможность:

- 1) визуализации структуры ранее созданных с применением использовавшихся ранее представлений и инструментов правил;
- 2) графического редактирования существующих правил с адекватным отражением всех изменений в имеющейся базе правил;
- 3) конструировании в специальном программном средстве новых правил «с нуля».

На данный момент (стадия опытного образца СИПР МП) был создан инструмент, позволяющий визуализировать и конструировать два из существующих видов макропрограмм, в том числе – макропрограммы дежурного контроля и диагностики, выполняемые на боту периодически и контролирующие текущие параметры объекта с целью выявления сигнатур аномальных ситуаций (АС).

Визуальное представление позволяет с использованием специально разработанной совместно с заказчиками нотации представлять правила базы знаний. Представление позволяет моментально (симультанно) увидеть суть посылок и заключений. Заключение в случае макропрограмм управления носят характер «акторов», связанных с выполнением (возможно, с заданием необходимых временных интервалов) необходимых в той или иной ситуации действий.

Существует редактор, с помощью которого можно задавать свойства всех составляющих макропрограммы и тем самым влиять на правила базы знаний (см. рис.).

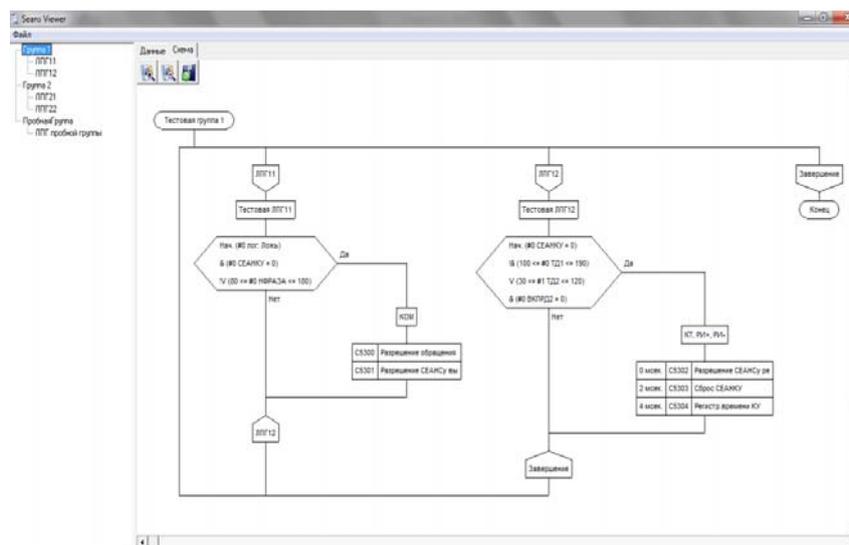


Рис. Экран средств визуализации и графического конструирования правил

В связи с тем, что в структуре макропрограмм существуют команды и для перехода к выполнению другого правила, был также разработан визуализатор связей. Макропрограмма представляется графом, в котором множество ребер отражает связи между правилами.

При этом помимо средств визуализации и графического конструирования правил в СИПР МП присутствуют:

- 1) интегрирующая оболочка;
- 2) средства автоматизации верификации;
- 3) средства документирования;
- 4) система контроля версий документации и ее соответствия версиям наборов правил базы знаний.

Интегрирующая оболочка позволяет выбрать проект (набор правил, соответствующий макропрограмме), с которым предстоит работать. Средства автоматизации верификации на основе структуры правил способны автоматически подготавливать исходные данные и в перспективе – запускать процесс автоматической верификации макропрограмм. Система документирования позволяет автоматически создавать требуемый набор документов.

Список литературы

1. Хартов В. В. Автономное управление космическими аппаратами связи, ретрансляции и навигации // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2006. – №6. – С. 29–33
2. Заведеев А.И., Ковалев А.Ю., Сыров А.С., Шатский М.А. Принципы диагностики системы управления космического аппарата // *Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами: тезисы докладов научно-технической конференции*, – М.: МОКБ «Марс», 2010. – С. 30–32.
3. Колташев А.А. Эффективная технология управления циклом жизни бортового программного обеспечения спутников связи и навигации // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2006. – №12. – С. 20–25.
4. Кочура Е.В. Разработка макропрограмм интегрального управления космическими аппаратами. *Вестник СибГАУ*, 2011, Т.1. – С. 105–107.
5. Тюгашев А.А., Ильин И.А., Ермаков И.Е.. Пути повышения надежности и качества программного обеспечения в космической отрасли // *Управление большими системами. Сборник трудов. Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН*, Вып. 39. – 2012. – С. 288–299.
6. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
7. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. – М.: Наука, 1988. – 280 с.
8. Зюбин В.Е. Графические и текстовые формы спецификации сложных управляющих алгоритмов: непримиримая оппозиция или кооперация? // *EL-Pub2002: Материалы VII Международной конференции*. – Новосибирск: 2003. – С. 57–75.
9. Тюгашев А.А. Графические языки программирования и их применение в системах управления реального времени. — Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2009 – 159 с.

АЛГОРИТМ ГАРМОНИЧЕСКОГО ПОИСКА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НЕЧЕТКИХ КЛАССИФИКАТОРОВ

Аннотация. В работе представлен алгоритм «гармонический поиск» для оптимизации параметров нечетких классификаторов. Описаны результаты экспериментов на десяти наборах данных из репозитория KEEL. Даны сравнения с аналогами.

Ключевые слова: гармонический поиск, оптимизация, нечеткий классификатор

HARMONY SEARCH FOR PARAMETERS OPTIMIZATION OF FUZZY CLASSIFIERS

I.A. Hodashinsky, Ph.D., professor, hodashn@rambler.ru

M.A. Mech, student, maxcimkj93@gmail.com

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract. In this paper, we propose fuzzy rule-based systems optimization from data for pattern recognition problems. Several numerical experiments on well-known benchmark data sets are carried out to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: harmony search, optimization, fuzzy classifier

Введение. Нечеткий классификатор – это инструмент, основанный на использовании нечетких множеств и нечеткой логики для выполнения операций классификации. Основным достоинством нечетких классификаторов является их потенциальная интерпретируемость и хороший потенциал для обучения. Для обучения нечетких классификаторов чаще всего используются метаэвристические методы [1].

Метаэвристический метод под названием «гармонический поиск» предложен в 2001 [2] и успешно применен для решения ряда научных и инженерных задач, связанных с оптимизацией [3]. Успешное применение мето-

да обусловлено простотой его понимания и реализации, а также сравнительно небольшим числом задаваемых параметров.

Целью работы является описание применения метода гармонического поиска для построения нечетких классификаторов.

Постановка задачи. Нечеткий классификатор задается правилами следующего вида:

$$R_{ij} : \text{ЕСЛИ } x_1=A_{1i} \text{ И } x_2=A_{2i} \text{ И } x_3=A_{3i} \text{ И } \dots \text{ И } x_n=A_{ni} \text{ ТО class}=c_j,$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ – вектор признаков классифицируемого объекта; A_{ki} – нечеткий терм, характеризующий k -ый признак в i -том правиле ($i \in [1, R]$), R – число правил; c_j – идентификатор j -того класса, $j \in [1, m]$.

В процессе нечеткой классификации объект относится к каждому классу с определенной степенью принадлежности, вычисленной следующим образом:

$$\beta_j(\mathbf{x}) = \sum_{R_{ij}} \prod_{k=1}^n A_{ki}(x_k), j = 1, 2, \dots, m.$$

Выходом классификатора является метка класса, определяемая следующим образом:

$$\text{class} = c_{j^*}, j^* = \arg \max_{1 \leq j \leq m} \beta_j.$$

Нечеткий классификатор может быть представлен функцией $c = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$, где $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K]$ – вектор параметров.

На множестве обучающих данных (таблице наблюдений) $\{(\mathbf{x}_p; c_p), p = 1, \dots, z\}$ определим единичную функцию

$$\text{delta}(p, \boldsymbol{\theta}) = \begin{cases} 1, & \text{если } c_p = f(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\theta}) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, p = 1, 2, \dots, z,$$

тогда численный критерий качества классификации выражается следующим образом:

$$E(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\sum_{p=1}^z \text{delta}(p, \boldsymbol{\theta})}{z}.$$

Проблема идентификации нечеткого классификатора сводится к проблеме поиска максимума указанной функции в многомерном пространстве, координаты которого соответствуют параметрам нечеткого классификатора. Для оптимизации параметров $\boldsymbol{\theta}$ предлагается использовать алгоритм «гармонический поиск».

Алгоритм гармонического поиска пошагово представлен ниже.

Шаг 1. Задать начальные значения параметров алгоритма:

N – число итераций, S – размер популяции (гармонической памяти),

$R_{\text{accept}}, R_{\text{pa}} \in [0, 1]$.

Шаг 2. Сгенерировать начальную популяцию $\{\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dots, \boldsymbol{\theta}_S\}$,

где $\boldsymbol{\theta}_i = [\theta_1^i, \theta_2^i, \dots, \theta_K^i]$.

Шаг 3. До выполнения условия останова выполнять следующие действия

Шаг 3.1. Выбрать случайным образом вектор θ_{cur} из популяции.

Шаг 3.2. Создать новый вектор θ_{new}

$$\theta_{new}^i = \begin{cases} \theta_{cur}^i, & \text{если } rand(0,1) \leq R_{accept} \\ \theta_{cur}^i + \Delta, & \text{если } rand(0,1) < R_{accept} \wedge rand(0,1) < R_{pa} \\ RandomValue, & \text{если } rand(0,1) > R_{accept} \end{cases}$$

где $\Delta = \mp rand(0,1) \cdot (\max_{\substack{i=1,\dots,S \\ j=1,\dots,K}} \theta_j^i - \min_{\substack{i=1,\dots,S \\ j=1,\dots,K}} \theta_j^i)$,

$RandomValue = \min_{\substack{i=1,\dots,S \\ j=1,\dots,K}} \theta_j^i + rand(0,1) \cdot (\max_{\substack{i=1,\dots,S \\ j=1,\dots,K}} \theta_j^i - \min_{\substack{i=1,\dots,S \\ j=1,\dots,K}} \theta_j^i)$.

Шаг 3.3. Найти θ_{worst} с минимальным значением $E(\theta_{worst})$.

Шаг 3.4. Если $E(\theta_{new}) > E(\theta_{worst})$, то заменить θ_{worst} на θ_{new} .

Шаг 4. Найти θ_{best} с максимальным значением $E(\theta_{best})$.

Шаг 5. Вернуть θ_{best} .

Эксперимент. Для оценки эффективности оптимизации параметров нечеткого классификатора алгоритмом гармонического поиска был выбран ряд наборов данных из репозитория KEEL [4]. Описание наборов приведено в табл. 1. На представленных наборах данных была осуществлена инициализация нечеткого классификатора и дальнейшая оптимизация параметров классификатора исследуемым алгоритмом. Процент правильной классификации, вычисленный после оптимизации параметров классификатора, является значением, характеризующим эффективность алгоритма на используемом для построения наборе данных.

Таблица 1. Описание наборов данных

Набор данных	Количество записей	Количество признаков	Количество классов
haberman	306	3	2
balance	625	4	3
iris	150	4	3
bupa	345	6	2
prima	768	8	2
glass	214	9	7
wine	178	13	3
segment	2310	19	7
ring	7400	20	2
spambase	4597	57	2

Эксперимент проводился по принципу кросс-валидации, согласно которому каждый набор данных был раздлен на несколько выброк, из которых

часть являлись обучающими и часть тестовыми. Для формирования выборок наборы данных разделялись на десять частей, из 90 процентов которых формировались обучающие выборки, из оставшихся 10 процентов – тестовые.

Для структурной идентификации классификатора использовался алгоритм генерации нечетких правил по экстремумам классов (ЕС), описанный в работах [5, 6].

В табл. 2 приведены результаты оптимизации параметров нечеткого классификатора алгоритмом гармонического поиска (HS), а также алгоритмами D-MOFARC и FARC-HD, экспериментально исследованными в работе [7].

Таблица 2. Эффективность нечетких классификаторов, оптимизированных алгоритмами ЕС+HS, D-MOFARC, FARC-HD

Набор данных	ЕС+HS			D-MOFARC			FARC-HD		
	#R	#L	#T	#R	#L	#T	#R	#L	#T
haberman	2	77,3	74,8	9,2	81,7	69,4	5,7	79,2	73,5
balance	3	91,9	91	20,1	89,4	85,6	18,8	92,2	91,2
iris	3	99	96,7	5,6	98,1	96,0	4,4	98,6	95,3
bupa	2	79,1	74	7,7	82,8	70,1	10,6	78,2	66,4
pima	2	80,3	75,4	10,4	82,3	75,5	20,2	82,3	76,2
glass	7	70,0	64,9	27,4	95,2	70,6	18,2	79,0	69,0
wine	3	100,0	97,2	8,6	100,0	95,8	8,3	100,0	95,5
segment	7	81,6	78,5	26,2	98,0	96,6	41,1	94,8	93,3
ring	2	95,2	94,6	15,3	94,2	93,3	24,9	95,1	94,0
spambase	2	87,0	86,6	24,3	91,7	90,5	30,5	92,4	91,6

В табл. приняты следующие обозначения: #R – число правил в нечетком классификаторе, #L – усредненный процент правильной классификации на обучающей выборке, #T – усредненный процент правильной классификации на тестовой выборке. Жирным шрифтом выделены лучшие для данного набора значения процента правильной классификации, полученные одним из трех нечетких классификаторов.

Результаты экспериментов показывают, что точность классификации нечетких классификаторов, оптимизированных алгоритмом «гармонический поиск», сопоставима с точностью классификаторов, построенных известными лучшими алгоритмами, а на пяти наборах из десяти превосходит аналоги по точности классификации. При этом число правил для алгоритмов ЕС + HS является минимальным.

Заключение. В работе представлена процедура оптимизации нечетких классификаторов на основе алгоритма «гармонический поиск». Работоспособность построенных классификаторов, настроенных приведенным алгоритмом, проверена на десяти наборах данных из репозитория KEEL. Проведенные сравнения с аналогами показали достаточно высокую точность алго-

ритма «гармонический поиск» при решении задачи оптимизации параметров нечетких систем.

Важным показателем эффективности классификаторов является их интерпретируемость, которая напрямую связана с объемом базы правил классификатора. Построенные классификаторы на основе алгоритма генерации нечетких правил по экстремумам классов и алгоритма «гармонический поиск» имеют минимально возможное число правил, которое ограничено количеством существующих классов в наборе данных.

Таким образом, алгоритм «гармонический поиск» может быть рекомендован для практического применения при решении задач построения нечетких классификаторов.

Список литературы

1. Ходашинский И.А., Дудин П.А., Лавыгина А.В. Биоинспирированные методы параметрической идентификации нечетких моделей // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2007. – Т. 2. – С. 81-92.
2. Geem Z.W., Kim J.H., Loganathan G.V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search // Simulation. – 2001. – vol. 76. – pp. 60–68.
3. Wang X., Gao X.-Z., Zenger K. An Introduction to Harmony Search Optimization Method. – Springer, 2015. – 93 p.
4. Официальный сайт репозитория KEEL [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.keel.es>.
5. Hodashinsky I. A., Gorbunov I. V. Algorithms of the tradeoff between accuracy and complexity in the design of fuzzy approximators // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2013. – vol. 49. – pp. 569–577.
6. Ходашинский И.А., Горбунов И.В. Построения нечетких классификаторов на основе алгоритма пчелиной колонии // Знания – Онтологии – Теории: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Новосибирск: Институт математики им. С. Л. Соболева, 2011. Т.2. – С. 117–125.
7. Fazzolari F., Alcalá R., Herrera F. A multi-objective evolutionary method for learning granularities based on fuzzy discretization to improve the accuracy-complexity trade-off of fuzzy rule-based classification systems: D-MOFARC algorithm // Applied Soft Computing. – 2014. – vol. 24. – pp. 470–481.

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ В ЗАДАЧЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ

Аннотация. В работе рассматривается задача планирования траектории как задача поиска пути на графе особой структуры. Предлагается декомпозиционный алгоритм ее решения. Описывается процедура декомпозиции. Приводятся результаты экспериментальных исследований алгоритма.

Ключевые слова: планирование траектории, эвристический поиск

ON ONE DECOMPOSITION METHOD SUITABLE FOR PATH PLANNING

K. Yakovlev, Ph.D., yakovlev@isa.ru
Federal Research Centre "Computer Science and Control", Moscow, Russia

Abstract. Path planning is considered as a graph search task. Decompositional algorithm is introduced and decomposition procedure is described. Results of the experimental analysis are given.

Key words: planning, path planning, path finding, heuristic search

Автоматическое планирование траектории относится к наиболее активно изучаемым проблемам современной робототехники. Несмотря на длительную историю изучения и наличие множества методов и подходов к решению этой задачи, разработка вычислительно эффективных алгоритмов планирования до сих пор остается в фокусе внимания исследователей. Одним из наиболее распространенных подходов к решению этой задачи является подход, когда последняя формулируется как задача поиска пути на графе особой структуры. Существует достаточно много графовых моделей, предназначенных для задач планирования [1]. Здесь и далее будем полагать, что имеется граф особой структуры – граф регулярной декомпозиции, метрический топологический граф (ГРД/МТ-граф), в англоязычной терминологии – grid (см. рис. 1). ГРД/МТ-граф это четверка $\mathbf{Gr} = \langle A, ADJ, d, los \rangle$, где:

A – множество клеток (вершин), представляющее собой матрицу $A_{m \times n} = \{a_{ij}\}: a_{ij} = 0 \square a_{ij} = 1, \forall i, j: 0 \leq i < m, 0 \leq j < n, m, n \in \mathbb{N}$; клетку будем называть проходимой, если $a_{ij} = 0$; непроходимой, если $a_{ij} = 1$.

$ADJ \subseteq A \times A$ – отношение, задающее смежность на множестве клеток;

$d: A \times A \rightarrow \mathbb{R}$ – метрика на множестве A ;

$los: A^+ \times A^+ \rightarrow \{true, false\}$, где $A^+ = \{a_{ij} \mid a_{ij} \in A, a_{ij} = 0\}$ – функция видимости (от англ. line-of-sight).

Индексы i, j – координаты клеток. В тех случаях, когда координаты не важны, будем обозначать клетки буквами латинского алфавита: a, b, c и т. д. Две различные клетки будем считать смежными, если им соответствуют смежные элементы матрицы A .

Будем считать, что в качестве функции d используется евклидова метрика: $d(a_{ij}, a_{lk}) = \sqrt{(l-i)^2 + (k-j)^2}$.

Нуль-траекторией $ntr(a, b)$ между двумя проходимыми клетками a, b будем называть последовательность клеток, построенную по алгоритму Брезенхема [2]. Нуль-траектории соответствует отрезок прямой на плоскости, соединяющий центры соответствующих клеток – см. рис. 1. Будем также считать, что функция видимости – los – возвращает $true$ только в том случае, если соответствующая нуль-траектория не содержит непроходимых клеток.

Упорядоченную пару клеток будем называть секцией и обозначать $e = \langle a, b \rangle$. Длиной секции будем называть величину: $len(e) = len\langle a, b \rangle = d(a, b)$. Секция $\langle a, b \rangle$ проходима, если $los(a, b) = true$.

Пусть зафиксированы две клетки графа: начальная – s , и целевая – g . Путем из s в g будем считать последовательность смежных, проходимых секций: $\pi(s, g) = \{e_1, \dots, e_v\}: e_1 = \langle s, x \rangle, e_v = \langle z, g \rangle$. Аналогично можно определить путь как последовательность клеток. Длина пути – сумма длин соответствующих секций: $len(\pi) = len(e_1) + \dots + len(e_v)$. Задача планирования траектории $\mathbf{PTask} = \langle \mathbf{Gr}, s, g \rangle$ формулируется следующим образом. Задан ГРД/МТ-граф \mathbf{Gr} и зафиксированы две вершины: начальная – s и целевая – g . Необходимо найти путь π . Кратчайший путь считается оптимальным решением задачи планирования.

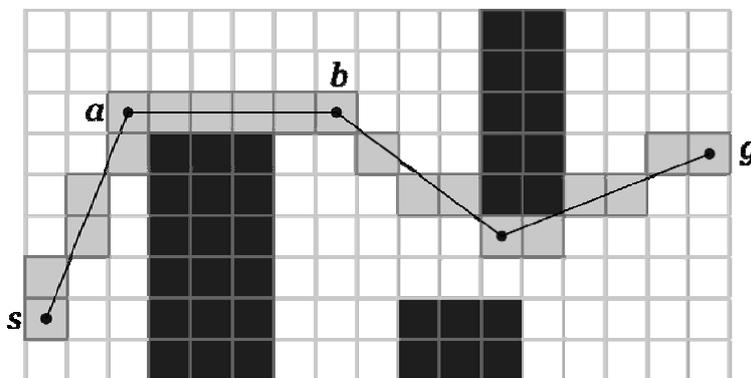


Рис. 1. ГРД/МТ-граф и путь на нем

Методы решения задачи планирования траектории, формально представленной указанным выше образом, можно разбить на два класса. К первому классу методов относятся итерационные методы, когда поиск пути осуществляется последовательно от начальной вершины к целевой (или наоборот): сначала рассматривается начальная вершина, потом смежные с ней, потом – смежные со смежными и т. д. Зачастую для сокращения пространства поиска (сокращения числа вершин графа, подлежащих обходу) метрика ГРД/МТ-графа используется в качестве эвристики. К алгоритмам этого класса относятся: алгоритм Дейкстры, A^* [3], Jump Point Search [4] и др. К другому классу относятся декомпозиционные методы. В их основе лежит принцип разбиения исходной задачи на ряд потенциально легко-разрешимых локальных подзадач с последующей композицией локальных решений в искомое глобальное. К подобным алгоритмам можно отнести, например, R^* [5], алгоритмы быстро-растущих деревьев (RRT) [6] и ряд других. Указанные алгоритмы используют для разбиения параметризованные процедуры случайного выбора, и, следовательно, весьма чувствительны к значениям входных параметров. В целом, для практических задач робототехники при правильно подобранных значениях упомянутых параметров декомпозиционные алгоритмы являются более предпочтительными вследствие их высокой вычислительной эффективности [7].

В [8] был предложен декомпозиционный метод поиска пути на МТ-графе, опирающийся на детерминированные правила декомпозиции. В [9] были исследованы его свойства, проведены экспериментальные исследования, показано превосходство (по показателям вычислительной эффективности) над имеющимися аналогами. При этом, однако, рассматривались МТ-графы содержащие лишь прямоугольные препятствия (области смежных непроходимы клеток). В данной работе предлагается метод декомпозиции, применимый для любых типов препятствий, что существенно расширяет сферу возможного применения алгоритма в различных задачах робототехники. В качестве модельной будет рассматриваться задача навигации некоторого мобильного робота (например – беспилотного летательного аппарата) в городских условиях.

Перед тем, как перейти к описанию метода декомпозиции, приведем общую схему функционирования декомпозиционного алгоритма планирования траектории:

Шаг 1. Сформировать множество частичных путей кандидатов PPC , первоначально содержащее лишь путь $PP = \{s, g\}$.

Шаг 2. Выбрать из PPC кратчайший путь PP .

Шаг 3. Если все секции PP является проходимыми, то вернуть PP в качестве решения задачи планирования.

Шаг 4. Выбрать первую по порядку в PP непроходимую секцию $\langle a, b \rangle$, и построить нуль-траекторию $ntr(a, b)$.

Шаг 5. С помощью процедур обхода препятствия по и против часовой стрелки выделить опорные клетки $\{cw_1, cw_2, \dots, cw_H\}$ и $\{ccw_1, ccw_2, \dots, ccw_T\}$ и осуществить разбиение секции $\langle a, b \rangle$ с помощью найденных клеток. Перейти к шагу 2.

Обратимся теперь к шагу 5, на котором собственно осуществляется декомпозиция. Пусть локально рассматриваемая секция непроходима, т. е. нуль-траектория пересекает некоторое препятствие obs – см. рис. 2, и клетка x – это проходима клетка нуль-траектории, «предшествующая» пересечению.

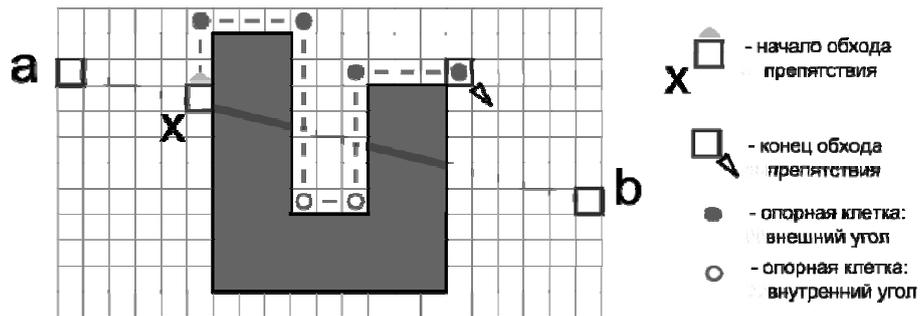


Рис. 2. Обход препятствия по часовой стрелке

Рассмотрим процедуру обхода по часовой стрелке (против часовой – аналогично). Она заключается в переборе проходимых клеток, смежных с клетками, образующими границу препятствия obs (начиная с x) и выделении из них клеток поворота – $cw_1, cw_2, \dots, cw_{|cw|}$ (т.н. опорных клеток). На рис. 2 эти клетки помечены круговыми маркерами. Секции, образуемые парами клеток $\langle cw_i, cw_{i+1} \rangle$ – суть секции, «обрамляющие» обходимое препятствие, причем каждая из этих секций – проходима. Выберем теперь такую клетку cw_H , что $\forall i=1, \dots, |cw|-1 \langle cw_H, b \rangle \cap \langle cw_i, cw_{i+1} \rangle = \emptyset$, то есть последовательность $\{cw_1, cw_2, \dots, cw_H\}$ – это проходимый путь, «огигающий» препятствие. Теперь путь $PP = \{s, \dots, a, b, \dots, g\}$ заменяется на $\{s, \dots, a, cw_1, cw_2, \dots, cw_H, b, \dots, g\}$. Заметим, что, если для обработки всегда выбирается первая по порядку непроходимая секция, то после разбиения путь имеет вид: $\{s, \dots, a, cw_1, cw_2, \dots, cw_H, g\}$, где фрагмент пути $\{s, \dots, a\}$ содержит лишь проходимые секции. Без ограничения общности можно считать, что секция $\langle a, cw_1 \rangle$ проходима (если это не так, то достаточно заменить фрагмент $\{a, cw_1\}$ на $\{a, x, cw_1\}$). Таким образом, в результате разбиения путь PP возможно содержит лишь единственную непроходимую секцию $\langle cw_H, g \rangle$, обработка которой будет осуществлена на последующих итерациях алгоритма. Схематично процесс декомпозиции (как с обходом по, так и с обходом против часовой стрелки) показан на рис. 3.

Для выбора клетки cw_H могут использоваться различные процедуры. Отметим здесь лишь самый простой и очевидный способ – перебор всех клеток поворота с проверкой на пересечение со всеми секциями $\langle cw_i, cw_{i+1} \rangle$. Фак-

тическая трудоемкость такой процедуры, очевидно, зависит от формы препятствия – чем сложнее форма (т. е. чем больше секций образует границу препятствия), тем больше времени требуется на осуществление перебора.

Также отметим, что для организации хранения частичных путей PP могут использоваться структуры данных, аналогичные структурам, используемым в алгоритмах A^* , JPS и др. итерационных алгоритмах, что обеспечивает возможность прямого сравнения по показателям емкостной эффективности (для чего достаточно лишь подсчитать число хранимых элементов пространства поиска).

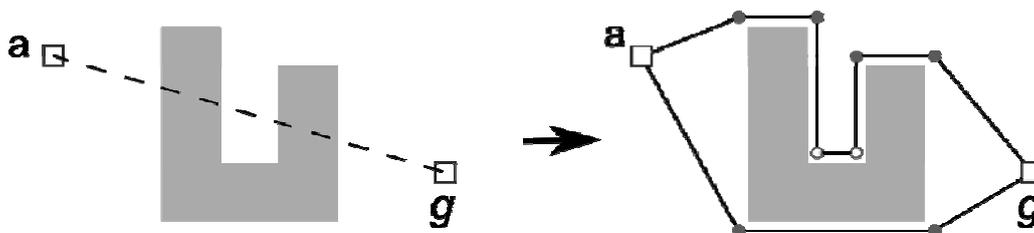


Рис. 3. Декомпозиция при планировании траектории

Перейдем теперь к результатам экспериментальных исследований.

Рассматривалась модельная задача маловысотного полета беспилотного летательного аппарата малого радиуса (0,7 м) в городских условиях. Из открытой геоинформационной базы данных OpenStreetMaps [10] было извлечено описание 100 фрагментов города Москвы размером 1,7 км на 1,7 км. Каждый фрагмент был обработан и представлен в виде ГРД/МТ-графа размером 501×501 , т. е. каждая клетка соответствовала области размером 2,7 на 2,7 метра (т. е. в клетку полностью помещается БЛА с некоторым «запасом»). Непроходимым клеткам соответствовали области, содержащие (целиком или частично) высотные строения – дома. На каждом графе было выбрано 5 различных пар «старт-цель» так, чтобы расстояние между ними составляло не менее 1,7 км (клетки располагались на противоположных концах карты). Единичный эксперимент состоял в поиске пути. Использовались алгоритмы A^* , JPS и предложенный алгоритм GrB (от англ. Grid Bug). Таким образом, всего было проведено $100 \times 5 \times 3 = 1500$ экспериментов. В каждом из них отслеживались следующие индикаторы: pl – длина пути, t – время работы, m – число рассмотренных (и сохраненных в оперативной памяти) элементов пространства поиска - показатель емкостной эффективности алгоритма. Усредненные результаты приведены в таблице.

Таблица. Результаты эксперимента

Алгоритм	m	t	pl
A^*	44 572,54	0,1383	5834,39
JPS	1 635,03	0,0115	5834,39
GrB	582,53	0,0229	5675,54

Как видно из полученных данных, алгоритм GrB строит пути на 2–3% короче, чем A* и JPS (это достигается за счет того, что GrB ищет путь в виде последовательности секций, а A* и JPS – в виде последовательности смежных клеток). При этом по показателю емкостной эффективности предложенный алгоритм существенно превосходит аналоги (JPS – в 2,8 раз, A* – в более, чем 70 раз). GrB и JPS работают на порядок быстрее A*, при этом GrB уступает по этому показателю JPS. В целом полученные данные позволяют сделать вывод о применимости предлагаемого алгоритма для решения практических задач навигации в городских условиях и его превосходстве над аналогами по отдельным показателям вычислительной эффективности.

К дальнейшим направлениям работ можно отнести теоретические исследования алгоритма, а также модификации алгоритма для получения не одного, а нескольких альтернативных путей, что также может быть полезно в задачах навигации мобильных роботов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-11-00692).

Список литературы

1. Яковлев К.С., Баскин Е.С. Графовые модели в задаче планирования траектории на плоскости // Искусственный интеллект и принятие решений. – №1. – 2013. – С. 5–12.
2. Bresenham J. E. Algorithm for computer control of a digital plotter // IBM Systems journal. – 1965. – 4(1). – pp. 25–30.
3. Hart P. E., Nilsson N. J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. – 1968. – 4(2). – pp. 100–107.
4. Harabor D., Grastien A. Online graph pruning for pathfinding on grid maps // Proceedings of the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence. AAAI Press, Menlo Park. 2011.
5. Likhachev M., Stentz A., R Search. In: Proceedings of the Twenty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence. AAAI Press, Menlo Park. 2008.
6. Kuffner J. J., LaValle S. M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning. In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'00. 2000.
7. Kuwata Y. et al. Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 17(5). – 2009.
8. Яковлев К.С. HGA*: эффективный алгоритм планирования траектории на плоскости // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2. – 2010. – С. 16–25.
9. Яковлев К.С. Исследование методов и разработка алгоритмов автоматического планирования траектории на плоскости. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. 2010.
10. Официальный сайт OpenStreetMaps [Электронный ресурс]: режим доступа <http://www.openstreetmaps.org>.

Секция 5

**ПРОГРАММНАЯ И
АППАРАТНАЯ СИМУЛЯЦИИ
РАБОТЫ МОЗГА**

А.В. Гаврилов, к.т.н., доцент, neurotechlab@yandex.ru
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
В. М. Канглер, vkangler@gmail.com
ООО «Мотив», г. Новосибирск, Россия

НЕЙРОМОРФНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация. В докладе дается обзор работ, ведущихся в области разработки нейроморфных сетей. Рассматриваются их возможные области применения и задачи, для решения которых они могут использоваться.

Ключевые слова: нейроморфные вычисления, нейронные сети, аппаратные нейронные сети, машинное обучение, автономные роботы

NEUROMORPHIC TECHNOLOGIES: STATE AND PERSPECTIVES

A.V. Gavrilov, Ph.D., docent, neurotechlab@yandex.ru
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
V.M.Kangler, vkangler@gmail.com
Motiv Ltd., Novosibirsk, Russia

Abstract. In this paper survey of projects dealing with development of neuromorphic networks is offered. Possible areas of applications of these technologies and solving tasks are described.

Key words: neuromorphic computing, neural networks, machine learning, hardware neural networks

В последние примерно 15 лет появилось новое 3-е поколение искусственных нейронных сетей [1–6], отличительной особенностью которого является использование импульсов для передачи информации между нейронами. При этом при моделировании нейронных сетей разработчики стремятся сделать их максимально похожими, с точки зрения обработки информации, на биологические нейронные сети. Примерно с 2007 года такие нейронные сети стали называться нейроморфными сетями, а область их изучения — нейроморфными вычислениями или технологиями (neuromorphic computing). Ин-

формация кодируется в таких сетях в виде интервалов между импульсами, генерируемыми нейроном в ответ на локально интегрированное в пространстве и времени возбуждение от импульсных сигналов, поступающих на его входы. Это поколение, в отличие от предыдущих поколений искусственных нейронных сетей, ориентируется на полностью аппаратную реализацию [7], т. к. программная эмуляция таких сетей неэффективна даже с использованием ускорителей в виде матричных процессоров.

Актуальность этого направления исследований и разработок «подогревается» быстрым развитием и внедрением во все области жизнедеятельности интеллектуальной робототехники.

Существующие проекты

В настоящее время в мире существуют следующие проекты, связанные с разработкой нейроморфных нейронных сетей:

1. Проект DARPA Synapse (DARPA's Systems of Neuromorphic Adaptive Plastic Scalable Electronics initiative) [8], в рамках которого финансируются работы в IBM (IBM Research) и HRL Laboratories. Соисполнителями являются несколько университетов и научных центров: Stanford University, Cornell University, University of Wisconsin-Madison, University of California, Merced, Columbia University Medical Center, Boston University, Neurosciences Institute, University of Michigan, University of California-Irvine, George Mason University, Portland State University и еще Set Corporation. Программа начата в 2008 году. За первые 5 лет объем финансирования составил более 106 миллиона долларов. Цель проекта — создание нейроморфного чипа, содержащего 10^{10} нейронов и 10^{14} синапсов.

2. Проект HBP (Human Brain Project) Евросоюза [9], в рамках которого финансируются работы в различных европейских научных центрах и университетах. В рамках этого проекта существуют, в частности, суб-проекты: Neuromorphic Computing, Cognitive Architectures, Neurorobotics, Neuroinformatics и другие. На эту программу выделено около одного миллиарда евро.

3. Проект SpiNNaker (Великобритания, с 2007 года) [10], в котором участвуют несколько британских университетов и компаний: University of Manchester, University of Southampton, University of Cambridge, University of Sheffield, ARM Ltd, Silistix Ltd, Thales.

4. Проект фирмы Qualcomm, специализирующейся в разработке процессоров для мобильных систем. В рамках проекта фирма представила однокристалльный нейронный процессор Qualcomm Zeroth [11].

5. Проект MoNETA (с 2008 года) [12] фирмы Hewlett Packard. Фирма HP впервые создала мемристоры и на их основе совместно с Бостонским университетом разрабатывает новые вычислительные архитектуры.

6. Проект Blue Brain Project (с 2005 года) университета EPFL (Швейцария). В рамках проекта максимально правдоподобно моделируется работа мозга млекопитающих на суперкомпьютере IBM Blue Gene. Результаты планируется использовать в медицине.

7. Проект Neurogrid группы Brains-In-Silicon и Стэнфордского университета. Та же цель, что и в проекте Blue Brain Project, но с использованием своего специализированного вычислительного устройства для моделирования мозга. Наиболее крупный реализованный цифро-аналоговый модуль среди прочих проектов (1 млн нейронов). Синапсы реализованы при помощи FPGA и модуля памяти, а плата с нейронами состоит из аналоговых микросхем [13]. Применение аналоговой модели является решением проблемы энергопотребления — устройство на 1 млн нейронов потребляет 3,5 Вт электроэнергии.

8. Проект FACETS/BrainScales [14] (с 2005 года) включает в себя ряд университетов во главе с Гейдельбергским университетом. В рамках проекта разрабатывается архитектура импульсных нейронных сетей и их аппаратная реализация. Реализован нейровычислительный модуль на основе специфичной цифро-аналоговой архитектуры с распределенной системой памяти и гибкой настройкой параметров синапсов. Общее количество нейронов на такой плате равняется 200 тыс., синапсов – 50 млн.

Наиболее перспективными из этих проектов являются первые три.

По проекту DARPA разработки ведутся по двум направлениям:

- 1) создание чипа на традиционной цифровой основе (IBM Research);
- 2) создание чипа с использованием мемристоров [15, 16] для обеспечения пластичности (обучаемости) синапсов нейронов (HRL Laboratories).

В 2014 г. ученые фирмы IBM создали нейронный процессор TrueNorth [17]. Чип TrueNorth содержит 5,4 миллиарда транзисторов, что позволяет реализовать один миллион нейронов и 256 миллионов связей между нейронами – синапсов.

Типы нейроморфных чипов

Нейроморфные чипы (НМЧ) можно разделить на три категории:

1. НМЧ с предварительным обучением и без возможности изменять свои параметры в процессе решения задач. Такая нейроморфная сеть представляет собой аналог жесткого алгоритма решения задачи (вычисления выходов в зависимости от входов).

2. НМЧ с предварительным обучением (построением структуры), но с возможностью изменять некоторые свои параметры в процессе решения задач, например, менять веса связей, включать или выключать связи и т. п.

3. НМЧ с возможностью изменять свои параметры в процессе решения задачи, в том числе, структуру связей и количество нейронов. Это не исключает возможности предварительного обучения НМЧ.

Области применения НМЧ и решаемые ими задачи

Области возможных применений нейроморфных чипов:

- военная робототехника;
- сервисная робототехника;
- космическая робототехника;
- системы безопасности и мчс;
- управление вооружениями;
- тренажеры;
- медицина;
- управление технологическими процессами;
- интернет;
- научные исследования;
- транспорт;
- умный дом;
- мобильные приложения;
- компьютерные игры.

Задачи, которые могут решаться с использованием нейроморфных чипов:

- визуализация многомерных данных и извлечение из них полезной информации, в том числе, решение проблем с Big Data
- принятие решений в реальном масштабе времени на основе большого количества данных (факторов) ;
- картографирование;
- навигация на основе множества различных данных;
- инвариантное распознавание объектов и ситуаций;
- распознавание (предсказание) поведения объектов/субъектов;
- сжатие данных;
- шифрование и дешифровка;
- распознавание и синтез речи;
- моделирование понимания естественного языка.

В табл. 1 представлены возможные применения нейроморфных чипов описанных выше категорий для решения определенных задач в определенных областях.

Проблемы и пути их решения

В области создания импульсных нейрочипов возникают следующие технологические и научные проблемы:

1. Трудно реализовать в СБИС большое количество связей между большим количеством нейронов. Для решения этой проблемы в настоящее время разработчики используют многоядерную архитектуру (например, в чипе TrueNorth от IBM), при которой полносвязная нейронная сеть возможна только внутри ядра, а чип состоит из множества ядер. Возможно, в недалеком будущем будет разработана технология 3-мерных СБИС, которая частично решит эту проблему.

Таблица 1. Возможные применения разных категорий НМЧ в разных областях для решения определенных задач

Задачи/ Области	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	1, 2	1, 2	2, 3	2, 3
2	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	1, 2	1, 2	2, 3	2, 3
3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3	1, 2	1, 2	2, 3	2, 3
4	2	1, 2			1, 2, 3	1, 2		1, 2		
5	2, 3	1	2, 3	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	2, 3	2, 3
6	2, 3	1, 2			1, 2	1, 2			2, 3	2, 3
7	2, 3	1, 2			1, 2, 3	1, 2			2, 3	2, 3
8	2, 3	1, 2			1, 2	1, 2			2, 3	2, 3
9	2, 3	1, 2, 3		1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2	1, 2	2, 3	2, 3
10	2, 3				2, 3	2, 3	1, 2		2, 3	2, 3
11		1, 2, 3	2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3				2, 3	2, 3
12		1, 2, 3	1, 2, 3	2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3			2, 3	2, 3
13		1, 2	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2	1, 2			2, 3	2, 3
14		1, 2		1, 2	1, 2	1, 2			1, 2, 3	1, 2, 3

2. Трудно реализовать обучение аппаратных нейронных сетей в процессе их эксплуатации, особенно, для нейрочипов категории 3. А такая способность нейрочипов необходима для их использования в бурно развиваемой области автономных интеллектуальных роботов, в частности, в социальной сфере.

3. В настоящее время недостаточно развиты подходы к обучению импульсных пороговых нейронных сетей. В таких сетях невозможно использовать алгоритм обратного распространения ошибки или его модификации. В настоящее время обучение таких сетей основано на модифицированном методе Хебба – методе STDP (Spike-Timing Dependent Plasticity) [18]. Для многослойных сетей можно применять методы ELM (Extreme Learning Machine) [19], в основе которого лежит обучение только выходного слоя. Веса промежуточного (проежуточных) слоя задаются случайно. В случае предварительного обучения на host-компьютере можно использовать для обучения генетические алгоритмы.

4. В настоящее время недостаточно развиты исследования в области построения многослойных импульсных нейронных сетей с обратными и латеральными связями, подобных биологическим сетям, обеспечивающим восприятие и мышление человека. Здесь необходимо применять опыт создания сверточных сетей и популярной сейчас концепции нейронных сетей с глубоким обучением (deep learning) [20].

Список литературы

1. Maass W. Networks of Spiking Neurons: The Third Generation of Neural Network Models. // *Neural Networks*. – Vol. 10, No. 9. – 1997. – pp. 1659–1671.
2. Gerstner W., Kistler W. M. Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. – Cambridge University Press, 2002. – 504 p.
3. Masayasu Atsumi. Sequence Learning and Planning on Associative Spiking Neural Network. // *Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'02)*, 2002. – pp.1649-1654.
4. Brette R. Spike-based models of neural computation. – 2009. – 40 с.
5. Филиппов В.А. Кортикоморфная нейросетевая архитектура, моделирование консолидации следа памяти и кибергеномика – перспективные технологии искусственных когнитивных систем. – Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2010. Материалы избранных научных трудов по теме: «Актуальные вопросы нейробиологии, нейроинформатики и когнитивных исследований». – М.: НИЯУ МИФИ. – 2010. – С. 111–144.
6. Горбаченко В.И. Нейроморфные вычисления. Состояние и перспективы. // *Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: Сб. статей XIV Междунар. научно-техн. конф.* – Пенза: ПДЗ, 2014. – С. 73-77.
7. Бендерская Е.Н., Толстов А.А. Тенденции развития средств аппаратной поддержки нейровычислений. // *Научно-технические ведомости СПбГПУ.* – 3 (174). – 2013. – С. 9–18.

8. DARPA SyNAPSE Program [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.artificialbrains.com/darpa-synapse-program>.
9. Human Brain Project [Электронный ресурс]: Режим доступа: https://www.humanbrainproject.eu/en_GB.
10. SpiNNaker Project [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://apt.cs.manchester.ac.uk/projects/SpiNNaker/project/>.
11. Qualcomm Zeroth Processors official: mimicking human brain computing [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.slashgear.com/qualcomm-zeroth-processors-official-mimicking-human-brain-computing-14301263/>.
12. Snider G. et al. From Synapses to Circuitry: Using Memristive Memory to Explore the Electronic Brain // IEEE Computer. –Vol. 44. –Iss. 2. – pp. 21–28.
13. Choudhary S. et al. Silicon Neurons that Compute. // Proc. of International Conf. on Artificial Neural Networks, LNCS. –Springer, Heidelberg, 2012. –Vol. 7552. – pp. 121–128.
14. FACETS Summary Flyer [Электронный ресурс] / Fast Analog Computing with Emergent Transient States web site // Режим доступа: http://facets.kip.uni-heidelberg.de/images/4/48/Public--FACETS_15879_Summary-flyer.pdf.
15. Wu Q., Liu B., Chen Y., Li H., Chen Q., Qinru Qiu, Bio-Inspired Computing with Resistive Memories – Models, Architectures and Applications. // Proc. Of International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – 2014.
16. Галушкин А.И. Мемристоры в развитии высокопроизводительной вычислительной техники. Национальный супер-компьютерный форум (НСКФ-2014). – [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://2014.nscf.ru/TesisAll/0_PostMoore_Plenar/08_009_GalushkinAI.pdf.
17. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface / Merolla P. A., Arthur J. V., Alvarez-Icaza R. and more // Science. – 2014. – Vol. 345. – No. 6197. – pp. 668–673.
18. Senn, W., Tsodyks, M., Markram, H. 1997. An algorithm for synaptic modification based on exact timing of pre- and post-synaptic action potentials. // Proc. of Int. Conf. on Artificial Neural Networks – ICANN'97. – Lausanne, Switzerland. – 1997. – pp. 121–126.
19. Guang-Bin Huang, Qin-Yu Zhu, K. Z. Mao, Chee-Kheong Siew, P. Saratchandran, N. Sundararajan. Can Threshold Networks be Trained Directly? – IEEE Trans. on Circuits and Systems—II: Express Briefs. – Vol. 53, No. 3. – 2006. – pp. 187–191.
20. Jurgen Schmidhuber. Deep learning in neural networks: An overview. – Technical Report IDSIA-03-14. – [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://arxiv.org/pdf/1404.7828.pdf>.

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Аннотация. Рассматривается модель импульсной нейронной сети, в которой алгоритм функционирования нейрона соответствует известным фактам из области нейрофизиологии, а принципы распознавания, обучения и эволюции сети, структуры кратковременной и долговременной памяти являются функциональными аналогиями известных или гипотетических механизмов.

Ключевые слова: импульсные нейронные сети, нейрофизиология, волновой паттерн, модель, синаптическая ловушка, алгоритм, обучение

SOFTWARE MODEL OF SPIKE NEURAL NETWORK

E.L.Romanov, Ph. D., assistant professor, romanov@corp.nstu.ru
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. the model of spike neural network is proposed. In this model the functioning of the neuron corresponds to known facts from the field of neuroscience and principles of recognition. Learning and evolution of the network structure with short-term and long-term memory is a functional analogue of known or hypothesized mechanisms.

Key words: spike neural networks, neurophysiology, wave pattern, model, synaptic catch, algorithm, training

В импульсных нейронных сетях (ИНС) основу составляют модели нейронов, в значительной мере эквивалентные биологическим. Как правило, ИНС достаточно точно воспроизводят процессы биологического нейрона на нижнем, электрохимическом уровне [1]. Но уже на уровне процессов метаболизма, интеграции и эволюции нервной системы ИНС наследуют многие решения из классических нейронных сетей. Это естественным образом связано с многообразием, сложностью и отсутствием единой теории для верхних уровней.

В предлагаемой модели делается попытка отразить следующие ключевые моменты, известные как факты или гипотезы в нейрофизиологии и психофизиологии [2, 3].

1. Мембранный потенциал нейрона суммирует изменения потенциала, вызванные возбуждением синапсов. Имеет место триггерный эффект при снижении мембранного потенциала до порогового уровня, который вызывает распространение потенциала действия по поверхности мембраны – **спайк**.

2. Аксонный бугорок имеет самый высокий уровень срабатывания. Базовая модель импульсного нейрона воспроизводит возникновение спайка на аксонном бугорке за счет пространственно-временной суммации возбуждения **на всех синапсах**.

3. Локальная деполяризация, вызванная пространственной или временной суммацией от нескольких синапсов (**синаптическая ловушка**), вызывает образование дендритового спайка.

4. Имеет место синаптическая пластичность синапсов – изменение чувствительности при понижении мембранного потенциала (например, NMDA-рецепторы), а также от других метаболических процессов в нейроне.

5. Активизация ансамбля нейронов, связанная с распознаванием образа, представляет собой устойчивую волну возбуждения (паттерн, след памяти, энграмма) и является основой мгновенной памяти распознавания [4].

6. Несвязанные ассоциативно образы вызывают волны возбуждения, прозрачны по отношению друг к другу. Для воссоздания/передачи/идентификации энграммы достаточно части ее паттерна [5].

7. Основа кратковременной памяти – метаболические процессы в нейроне, химический «коктейль», вызванный срабатыванием метаболитных рецепторов. Эти процессы могут приводить к изменению чувствительности синапсов, к активизации генома и т. д..

8. Долговременная память – структура синаптических связей системы нейронов.

9. Консолидация памяти – «слияние» содержимого долговременной памяти с кратковременной, происходит по истечении значительного времени после процесса обучения (восприятия) и связана с активизацией генного механизма эволюции, изменяющих структуру синаптических связей.

10. Консолидация и активизация генных механизмов связаны с «новизной» воспринимаемого образа или ситуации в процессе обучения.

11. Метаболические и связанные с ними эволюционные процессы обучения и запоминания изучены на уровне простейших архитектур из 2–3 нейронов, процессы над нейронными ансамблями и способы управления ими со стороны других отделов нервной системы известны в общих чертах.

В предлагаемой модели поведение импульсного нейрона соответствует известным фактам, а общая стратегия эволюции нейронной сети основана на функциональных аналогиях для известных или гипотетических механизмов. В целом это соответствует сложившемуся положению в ИНС [1, 6].

Топология нейронной сети может быть конкретизирована при разработке моделей под конкретные задачи. Достаточно определить, что в ней-

ронной сети размерности N_{neur} любой нейрон может иметь синаптические связи с N_{dend} «ближайшими» нейронами окружения. В первом приближении можно предложить линейную кольцевую модель с N нейронами, в которых i -ый нейрон имеет вектор контактов с аксонами $i - N_{dend}/2 \dots i + N_{dend}/2$ по модулю N_{newt} – **диапазон контактов (ДК)**, фактор расстояния не учитывается.

В дальнейшем будем придерживаться технологической нотации описания структуры и параметров элементов сети, принятой в объектно-ориентированном программировании, а не строго математической.

В реальности нейрон может иметь несколько синапсов, контактирующих с аксоном одного нейрона на разных ветвях дендритного дерева. Здесь можно сразу перейти к определению дендритового дерева как набора **синаптических ловушек** (в дальнейшем **ловушка**). Каждая ловушка представляет собой набор синапсов, каждый из которых связан с нейроном окружения, что можно представить в виде вектора индексов в диапазоне контактов – **SRC(k)**. Общее количество синапсов нейрона ограничено N_{syn} . Синапс может быть возбуждающим и тормозящим (последний вынесем за рамки описания) и имеет некоторую **текущую и начальную чувствительность** – **Ksens** и **Ksens0**. Размерность ловушки (**Lcatch**) – на порядок меньше диапазона контактов, может быть переменной и ограниченной некоторой величиной **Ncatch**. Ловушка создает дендритный спайк в месте локализации группы синапсов. Возможность генерации спайка за счет нескольких частей смежных ловушек исключается – это одно из допущений модели. Также должна существовать определенная зависимость между максимальным количеством ловушек на нейрон, числом распознаваемых паттернов (разрешающей способностью сети) и ее размером.

Для нейрона в целом и для каждой ловушки имеет место значение общего и локального мембранного потенциалов **Pax** и **Pcatch(i)**.

Спайк нейрона может быть вызван двумя причинами:

- генерацией дендритового спайка при срабатывании одной из ловушек;
- генерацией аксонного спайка за счет суммации (снижения) мембранного потенциала в аксонной ловушке. Чтобы обеспечить приоритет срабатывания дендритовой ловушки над аксонной необходимо ввести несколько положений, частично подтверждаемых в нейрофизиологии: изменения мембранных потенциалов синапсов распространяются к аксону с определенным коэффициентом затухания **Ksyn**, а также имеет место задержка распространения потенциала от дендритов к аксону, моделируемая в виде очереди накопленных сумм, величина задержки в тактах – **Ndelay**.

Алгоритм работы нейрона выглядит следующим образом.

1. Мембранные потенциалы **Pax** и **Pcatch(i)** устанавливаются в начальное значение **P0**.

2. На каждом шаге нейрон получает булевский вектор срабатывания нейронов в диапазоне контактов от предыдущего шага – S.

3. Для каждой ловушки подсчитывается изменение локального мембранного потенциала $P_{catch}(i) = P_{catch}(i) - (\sum K_{sens}(j) * S(SRC(j))) / L_{catch}$, т. е. локальный потенциал меняется на сумму чувствительности возбужденных синапсов в ловушке, взвешенную размерностью ловушки.

4. Если $P_{catch}(i)$ снижается до уровня возбуждения, генерируется дендритовый спайк.

5. В противном случае чувствительность возбужденных синапсов увеличивается на DK_{sens} : $K_{sens}(j) = K_{sens}(j) + DK_{sens} * S(SRC(j))$

6. При отсутствии дендритового спайка мембранный потенциал аксона уменьшается на сумму изменений мембранного потенциала от всех возбужденных синапсов $P_{ax}(t) = P_{ax}(t-1) - K_{syn} * \sum_i (\sum K_{sens}(j) * S(SRC(j)))$.

7. Если подсчитанный потенциал передается с задержкой, то для определения аксонного возбуждения нейрона используется $P_{ax}(t-NDelay)$.

8. Если P_{ax} снижается до уровня возбуждения, генерируется аксонный спайк.

9. При генерации любого спайка нейрон сбрасывается в исходное состояние и в течение нескольких тактов находится в состоянии нечувствительности.

Остается открытым вопрос о взаимодействии дендритовых и аксонных спайков. В нейрофизиологии известно, что аксонный спайк связан с распространением обратного потенциала действия по дендритному дереву, а дендритные спайки не связаны однозначно с порождением выходного спайка нейрона и не всегда являются сигналами вида «все или ничего». В модели можно предположить различные варианты влияния аксонного и дендритовых спайков на мембранные потенциалы всех, «своих» и «чужих» ловушек.

Обучение и распознавание в сети. Основой обучения сети в модели является его единство с процессом распознавания. Общая активность сети за «вычетом» активности, связанной с распознаванием, дает элемент «новизны», используемой при обучении. Естественно, что полностью разделить эти процессы невозможно. В модели это выглядит как множество **временных ловушек**, которые создаются по остаточной активности синапсов. Временные ловушки выступают здесь как аналог основной компоненты кратковременной памяти, связанной с консолидацией вновь обнаруживаемых паттернов. Обычные ловушки будем в дальнейшем называть **постоянными**.

Основные структуры памяти и нейрона и составляющие стратегии обучения ИНС (рис.1):

- **долговременная память (ДП)** – наборы постоянных ловушек нейронов, т. е. структурная компонента НС;

- **кратковременная память (КП)** – текущие значения чувствительности синапсов, а также множества временных ловушек;

- в процессе распознавания участвуют постоянные и временные ловушки;

- процесс **консолидации КП и ДП** состоит в слиянии в нейроне набора постоянных и временных ловушек с учетом интенсивностей их возбуждения. После консолидации все ловушки становятся постоянными, ловушки сверхустановленного максимального количества уничтожаются;

- работа НС в режиме обучения состоит в чередовании периодов распознавания/обучения (**бодрствования**) и консолидации (**сна**);

- в период бодрствования производится постоянный анализ входной активности нейрона, на основе которой создаются временные ловушки;

- создаваемые временные ловушки консолидируются с уже имеющимся множеством временных ловушек, стратегии консолидации могут быть аналогичны стратегиям замещения в кэш-памяти (LRU, FIFO, LFU).

Для обсуждения задач поиска временных ловушек может быть использовано графическое представление поведения нейрона на двумерной **карте входной активности**. Каждому срабатыванию ловушки на карте будет соответствовать группа единиц-спайков, суммация которых в пространстве и по времени провоцирует этот спайк.

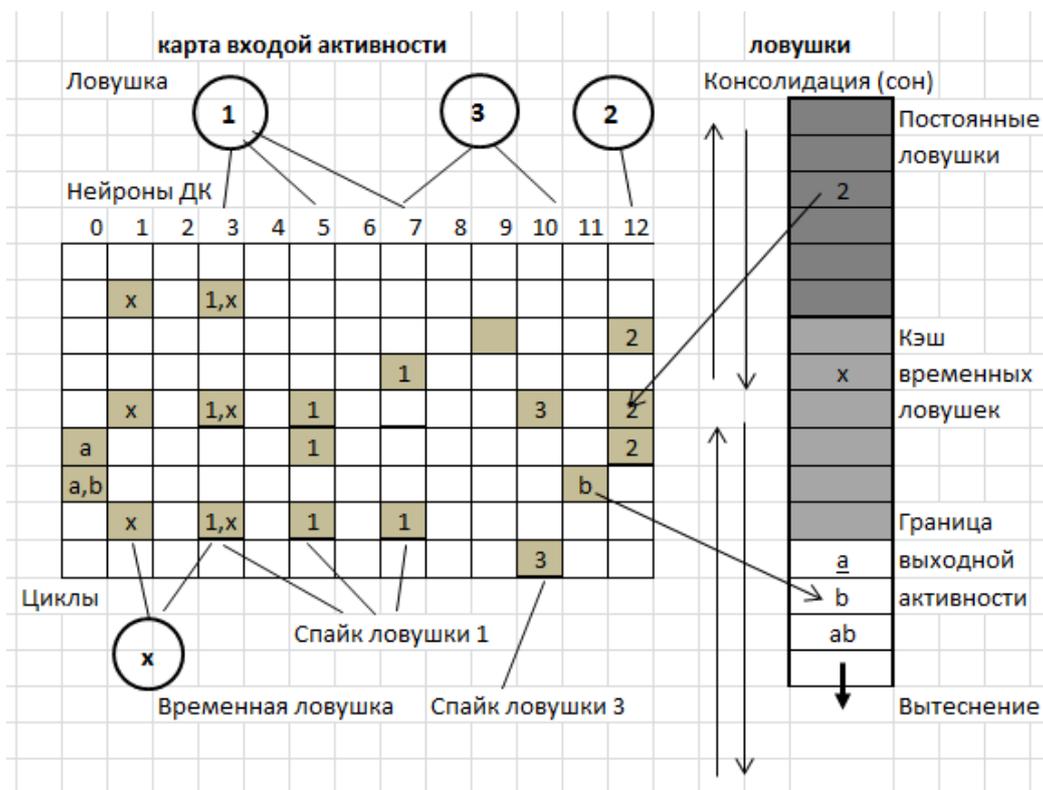


Рис. 1. Структура памяти импульсного нейрона

Поиск временных ловушек базируется на анализе пространственно-временной активности, непокрытой постоянными ловушками. Здесь необходимо учесть следующее:

- карты активности ловушек на карте перекрываются, поэтому необходимо наряду со спайками, непокрытыми ловушками, учитывать покрытые спайки, имеющие с ними пространственно-временную корреляцию;

- возможны операции расширения постоянных ловушек за счет включения непокрытой коррелированной активности, а также возможного сужения за счет исключения неактивных синапсов;

- генерация временных ловушек может быть избыточной, в пределе – комбинаторной. Избыток ловушек будет отсеиваться в процессе конкуренции;

- поскольку временные ловушки также генерируют спайки нейрона, необходимо некоторое пороговое значение количества или частоты срабатывания временной ловушки, начиная с которой она становится способной к генерации спайка.

Распознавание в сети. Волновой паттерн, соответствующий предъявляемому образцу, можно детектировать по статистике срабатывания ловушек:

- обученной НС предъявить ряд контрольных объектов и зафиксировать соответствие между ними и срабатывающими ловушками;

- в процессе обучения с учителем при создании ловушки ассоциировать ее с классом объекта, на котором производится обучение. С одной стороны, это даст дополнительные данные для консолидации паттернов распознавания, образованных в разных частях сети при их обучении на одном образе. С другой – эти данные могут быть учтены в алгоритмах консолидации памяти.

Характеристики поведения нейрона и рост сети. Интегральные характеристики поведения нейронов, связанные с ловушками и устанавливаемые для них пороговые значения могут быть положены в основу классификации нейронов по признакам – консервативный/развивающийся, активный/пассивный и далее использоваться в стратегии эволюции сети.

Список литературы

1. Кашенко С.А., Майоров В.В. Модели волновой памяти. Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 288 с.

2. Александров Ю.И. и др. Нейрон. Обработка сигналов. Пластичность. Моделирование: Фундаментальное руководство. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2008. – 548 с.

3. Николс Д., Мартин Р., Валлас Б., Фукс П. От нейрона к мозгу / Пер. с англ. – М: УРСС, 2003. – 673 с.

4. Кроль В. Психофизиология человека. – СПб.: Питер, 2003. – 304 с.

5. Редкозубов А. Паттерно-волновая модель мозга [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://www.aboutbrain.ru/wp-content/uploads/downloads/2015/03/Code%20of%20brain%20part%201-2.pdf>.

6. Gavrillov A.V. An Architecture of Neurocomputer for Image Recognition // Neural Network World. – №1. – 1991. – pp. 59–60.

Секция 6

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ
РОБОТОТЕХНИКА**

В.Н. Бондарев, к.т.н., доцент, bondarev@sevsu.ru
Т.И. Сметанина, ассистент, fampo@gmail.com
Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

ГИБРИДНАЯ ЭКСПЕРТНО-ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА ПРОДУКЦИОННОГО ТИПА

Аннотация. Рассматривается архитектура гибридной экспертно-обучающей системы, основанной на правилах-продукциях. Архитектура позволяет осуществлять вызов различных вычислительных процедур из правил, а также выполнять обмен данными между базой данных экспертной подсистемы и вычислительными модулями. Консультационная модель объяснений позволяет полнее удовлетворить требования индивидуализации процесса обучения.

Ключевые слова: гибридная экспертно-обучающая система, правила-продукции, модель объяснений

HYBRID EXPERT TUTORING SYSTEM BASED ON PRODUCTION RULES

V.N. Bondarev, PhD, Associate Professor, bondarev@sevsu.ru
T.I. Smetanina, teaching stuff, fampo@gmail.com
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Abstract. The hybrid architecture of rule-based expert tutoring system (ETS) is considered. The architecture allows to call different computational procedures from ETS rules, and also to exchange data between ETS database and computational modules. The consulting model of explanations allows satisfying the requirement of an individualization of learning process more stoutly.

Keywords: hybrid expert-tutoring system, production rules, explanation model

Подготовка современных специалистов требует организации учебного процесса с использованием новых информационных технологий, в частности, интеллектуальных обучающих систем (ИОС). Такие системы базируются на методах искусственного интеллекта для того, чтобы полнее удовлетворить потребности студентов в индивидуализации обучения [1–3].

Для адаптации процесса обучения в ИОС широко применяется технология экспертно-обучающих систем (ЭОС). При этом наряду с экспертными знаниями о предмете изучения на ЭОС возлагают функции поддержки моделей обучения и обучаемого, а также поддержки модели объяснений [3, 4].

Во многих случаях входящая в состав ИОС экспертно-обучающая компонента реализует только символьную обработку, что не позволяет, например, в процессе получения консультаций выполнять демонстрационные примеры, которые требуют численных расчетов [3]. Это ограничивает возможности ИОС.

В статье предлагается архитектура гибридной ЭОС продукционного типа (рис. 1), которая наряду с выполнением прямых и обратных выводов может осуществлять (по запросам из правил) вызов различных вычислительных процедур. Последнее обстоятельство позволяет в ходе консультации, реализуемой экспертной подсистемой, строить сценарии выполнения демонстрационных примеров, проводить с их помощью различные вычислительные эксперименты и предоставлять пользователю возможность интерактивной интерпретации получаемых результатов.

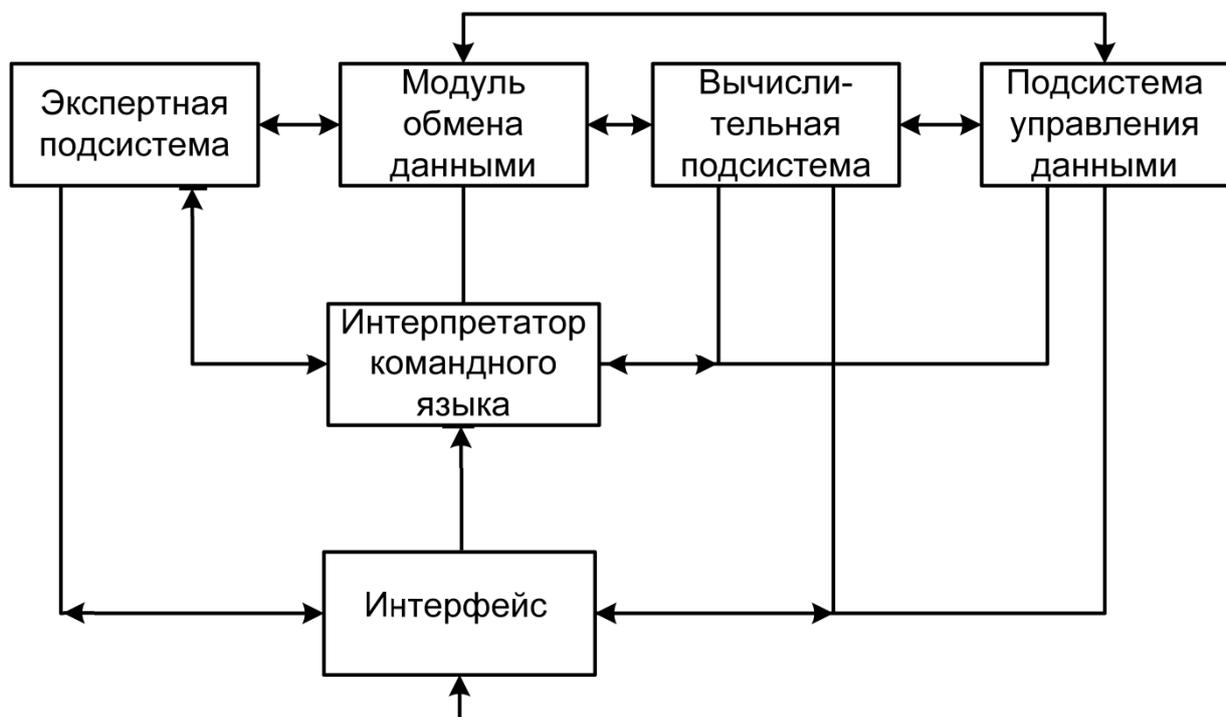


Рис. 1. Архитектура гибридной ЭОС

Система состоит из следующих подсистем: экспертной подсистемы, вычислительной подсистемы, подсистемы управления данными, пользовательского и программного интерфейсов.

Интерфейс предназначен для управления работой системы и представляет собой иерархию горизонтальных и вертикальных меню, с помощью которых можно обратиться к каждой из подсистем и выполнить отдельные ко-

манды. Кроме этого, он обеспечивает ведение диалога с обучаемым и обмен данными с другими программами и системами, в частности, со средствами сетевого взаимодействия моделей.

Экспертная подсистема предназначена для интеллектуальной поддержки процесса обучения. В рассматриваемом случае экспертная подсистема использует продукционные правила для представления знаний о стратегиях обучения, решаемых задачах, модели обучаемого. Наборы таких правил могут быть подготовлены в текстовом редакторе с использованием русского языка и восприняты системой. Для повышения эффективности работы системы правила компилируются в некоторый внутренний код.

Вычислительная подсистема может работать в одном из 2-х режимов: "Задачи" или "Процедуры". В режиме "Задачи" обучаемому предоставляются в распоряжение отлаженные цепочки технологических вычислительных модулей, ориентированные на решение специально подобранных примеров задач. В режиме "Процедуры" предоставляется доступ к отдельным численным и сервисным процедурам системы, которые можно выстраивать в необходимом порядке самостоятельно. В этом случае работа с процедурами может быть организована либо с помощью диалоговых окон, либо в режиме командной строки. Последний режим соответствует традиционной технологии работы с пакетами прикладных программ.

Отметим также, что включение в состав системы командного интерпретатора позволяет экспертной подсистеме формировать частные рекомендации по решению задач не только в текстовой форме, но и на командном языке в виде сценариев. Сценарии могут быть реализованы вычислительной подсистемой.

Подсистема управления данными обеспечивает хранение персональной информации об обучаемых, результатов тестирования, вычислительных данных и др.

С целью более полного удовлетворения индивидуальных потребностей обучаемых предлагается выделить три уровня объяснений: информационно-справочный, консультационный, задачно-ориентированный. Информационно-справочный уровень является традиционным, основывается на эталонной модели учебного курса и представляется либо в форме гипертекста, либо в форме гипермедиа.

Консультационный уровень позволяет связать общую схему эталонной модели учебного курса с задачно-ориентированной методологией обучения, предложить сценарии изучения разделов и тем учебного курса применительно к индивидуальным запросам пользователя, дать ответы на вопросы, а также рекомендации по выполнению того или иного шага преобразования решаемой задачи. Такие рекомендации формируются на основе объяснений, содержащихся в продукционных правилах и связанных с ними детальными рекомендациями в отдельных файлах. В качестве примера на рис. 2 пред-

ставлен текст правила, содержащего соответствующую объяснительную часть для экспертно-обучающей системы в области построения аппроксимирующих математических моделей.

```
правило31: если
    подцель1=да и
    модель=функциональная и
    модель=вход-выход и
    модель=стационарная и
    модель=сосредоточенная и
    модель=детерминированная
то
    исходная_модель=уравнение_1.3 и
    этап_исх_модель=вып и
    процедура=отобразить[13,8,66,21, Рекомендация ,utv29.txt] и
    процедура=добавить_протокол[utv29.txt]
```

объяснение:

Путем ответов на вопросы установлено, что модель объекта, с которым Вы имеете дело, является стационарной, детерминированной, сосредоточенной, функциональной и задает связь входа и выхода.

Отсюда следует, что исходная модель может быть в общей форме задана уравнением (или системой таких уравнений)

$$\Phi(y, x, a) = 0,$$

где x, y - соответственно входное воздействие и реакция объекта; a - вектор физических параметров объекта.

Рис. 2. Пример продукционного правила

В заключительную часть правила включены процедуры, отображающие в отдельном окне экрана детальное текстовое пояснение сути вывода и помещающее это объяснение в протокол консультации. Синтаксис правил допускает выполнение внутренних (компилируемых) или внешних процедур (исполняемые файлы). При этом внутренние процедуры имеют возможность непосредственно работать с глобальной базой фактов, внешние процедуры обмениваются данными с экспертной подсистемой посредством "почтовых ящиков".

Кроме этого, консультационный уровень предоставляет пользователю возможность изучить основные этапы получения решений на примерах конкретных задач с автоматическим подключением в процессе консультации необходимых вычислительных модулей. При вызове вычислительных модулей из правил имеется возможность интерпретировать и контролировать качество получаемых численных решений задач. Для этого разрабатываются соответствующие правила интерпретации состояний вычислительных модулей. Таким образом, появляется возможность для экспертной подсистемы следить за ходом численного решения задачи и формировать содержательные объяснения и рекомендации об отдельных этапах решения задач. Для этого

экспертная подсистема взаимодействует с вычислительной подсистемой посредством общей базы данных.

Для упомянутой выше обучающей системы в области построения аппроксимирующих математических моделей подменю консультирующего уровня содержит следующие пункты: режим, пошаговая консультация (включает специфические подпункты, определяемые предметной областью), полная консультация, просмотр результатов консультации, просмотр всего протокола вывода. Пункт "Режим" позволяет установить или отменить отображение на экране объяснений текущего шага вывода. Пункты меню "Пошаговая консультация" и "Полная консультация" предназначены для выдачи рекомендаций пользователю по отдельным этапам формирования стратегии преобразования моделей и выдачи полной стратегии преобразования в виде текста. Наличие в консультирующей подсистеме режима просмотра протокола вывода позволяет проследить всю цепочку логического вывода, проделанного системой, и тем самым детально представить объяснение хода решения задачи.

Поскольку решение задачи в консультационном режиме протекает в форме целенаправленной смены состояний базы данных ЭОС, то для обеспечения взаимодействия экспертной и вычислительной подсистем последней достаточно передать указатель на начало списка базы фактов. В этом случае вычислительная подсистема сможет просматривать базу фактов и использовать значения фактов в качестве исходных данных, а также после завершения вычислений помещать в базу фактов сведения о полученных результатах.

На задачно-ориентированном уровне обучаемому предоставляются в распоряжение цепочки вычислительных модулей, выстроенные в порядке, необходимом для решения той или иной типовой задачи. При этом имеются некоторые степени свободы на уровне задания исходных данных и формируется удобный графический интерфейс, содержащий пункты меню с названиями в терминах решаемой задачи.

Наличие расширенной подсистемы объяснений весьма важно для ЭОС. При этом комфортность общения также достигается использованием терминов из профессиональной области, подстройкой под уровень обучаемого, возможностью гибко управлять способами решения при наличии более одного способа решения.

На основе анализа запрашиваемых данных (при взаимодействии обучаемого с системой) ЭОС может создавать и изменять модель обучаемого, которая используется для адаптивной подстройки под его уровень знаний.

При объяснении решений также необходимо предоставить обучаемому возможность влиять на степень детализации объяснений — прямым управлением или с использованием сведений о текущем уровне знаний обучаемого.

Разработанная исследовательская версия системы подтвердила гибкость архитектуры, сочетающей возможности числовой и символьной обработки, продемонстрировала удобство и простоту создания базы знаний на основе представленных выше синтаксических конструкций (см. рис. 2), а также позволила отработать общую технологию взаимодействия моделей обучения и обучаемого на примерах частных задач.

Предложенная гибридная архитектура ЭОС, сочетающая возможности символьной и числовой обработки, может быть успешно использована при реализации различных принципов построения основных модулей обучающих систем: построения моделей обучаемого с помощью нейронных сетей [4], моделирования предметной области с использованием когнитивных архитектур [5, 6], применения алгоритмов рекомендательных систем для целей обучения [7].

Задачами дальнейших исследований в направлении совершенствования рассмотренной ЭОС можно считать введение фреймовых моделей представлений знаний предметной области, коннеционистских моделей обучаемого и их комбинацию с правилами-продукциями, а также развитие естественно-языкового интерфейса.

Список литературы

1. Люгер Дж. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е изд. : пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.
2. Бондарев В.Н., Аде Ф.Г. Искусственный интеллект: Учеб.пособие для вузов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. – 615 с.
3. Sharma S. [et al] Survey of Intelligent Tutoring Systems: A Review on the Development of Expert/Intelligent Tutoring Systems, various Teaching Strategies and Expert Tutoring System Design Suggestions // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2014. – Vol. 3. – Issue 11. – pp. 37–42.
4. Venkatesh R., Naganathan E.R, Maheswari N.Uma. Intelligent Tutoring System Using Hybrid Expert System With Speech Model in Neural Networks // International Journal of Computer Theory and Engineering, 2010. – Vol. 2. – No. 1. – pp. 12–16.
5. Nkambou R. Modeling the Domain: An Introduction to the Expert Module // Advances in Intelligent Tutoring Systems / R. Nkambou, J. Bourdeau, R. Mizoguchi (Eds.). – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – pp. 13–32.
6. Alevin V. Rule-Based Cognitive Modeling for Intelligent Tutoring Systems // Advances in Intelligent Tutoring Systems / R. Nkambou, J. Bourdeau, R. Mizoguchi (Eds.). – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – pp. 33–62.
7. Imran H. A. [et al] Rule-Based Recommender System to Suggest Learning Tasks // Intelligent Tutoring Systems. Proceedings of 12th International Conference, ITS 2014 Honolulu, HI, USA, June 5-9, 2014 / S. Trausan-Matu, K.E. Boyer M. Crosby, K. Panourgia (Eds.). – Springer International Publishing Switzerland, 2014. – pp. 672–674.

К.Ф. Зорькин, педагог дополнительного образования,
заведующий лабораторией робототехники, czork@mail.ru,
Красноярский краевой Дворец пионеров и школьников,
г. Красноярск, Россия

М.С. Богданович, учащийся, pilot100z@mail.ru,
Средняя общеобразовательная школа № 1 им. В. И. Сурикова
г. Красноярск, Россия

ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ В СРЕДЕ NXT-G

Аннотация. Дается представление о дистанционном управлении мощностью моторов в среде NXT-G.

Ключевые слова: робототехника, техническое образование в школе

REMOTE CONTROL OF THE ROBOT IN THE ENVIRONMENT NXT-G

K.F. Zorkin, teacher of additional education,
head of the laboratory of robotics, czork@mail.ru
Krasnoyarsk regional Palace of pioneers and schoolchildren, Krasnoyarsk, Russia

M.S. Bogdanovich, student 6th grade, pilot100z@mail.ru,
Secondary school No. 1 named after V. I. Surikov, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. given the idea about remote control of the power motors in the environment NXT-G

Keywords: robotics, technical education at school

Для тех, кто знаком с конструкторами серии LEGO MINDSTORMS, хорошо известно, что их программный блок (микроконтроллер) позволяет установить беспроводное соединение с другими блоками (NXT или EV3) посредством технологии Bluetooth. Это свойство широко используется прежде всего для того, чтобы управлять роботами MINDSTORMS на расстоянии. Для этого надо связать два блока между собой, используя стандартные процедуры, описанные практически в любом руководстве. Один блок при этом будет являться по сути пультом, а другой – управляемым устройством. Главное – помнить, что осуществлять поиск и устанавливать контакт необходимо с того блока, который в данный момент управляющий (т. е. попросту, с пульта).

Очень простой пульт можно сделать, закрепив датчики касания прямо на управляющем блоке NXT или EV3. Место и способ крепления датчиков зависят только от опыта и предпочтения конкретного человека, конструирующего пульт.

Очевидно, что для управления, т. е. для передачи и приема сигналов необходимы не только два разных устройства, но и две различные программы. В материалах предыдущих конференций уже описывались принципы и приемы управления мобильным двухмоторным роботом с помощью пульта, созданного с использованием четырех датчиков касания. В данной статье рассматривается не только способ включения и выключения двигателей мобильного робота, но и возможность управления их мощностью в стандартной среде NXT-G.

Управляющая программа состоит из трех параллельных бесконечных циклов. Верхний цикл задает уровень мощности обоих двигателей мобильного робота; нижние два в зависимости от задачи позволяют включать-выключать моторы или менять направление их вращения.

В первом (верхнем) цикле непрерывно считываются данные о том, на какой угол повернулся мотор А. Через желтую цифровую шину эти данные передаются по *Bluetooth* на почтовый ящик № 1 мобильного робота и одновременно выводятся на экран пульта. Поскольку программная среда NXT-G в отличие от EV3 не позволяет непосредственно выводить числа на экран, приходится использовать дополнительный программный блок, который переводит число в текст и только после этого вывести показания датчика поворота двигателя А на экран. В параметрах экрана полезно убрать галочку «Очистить».

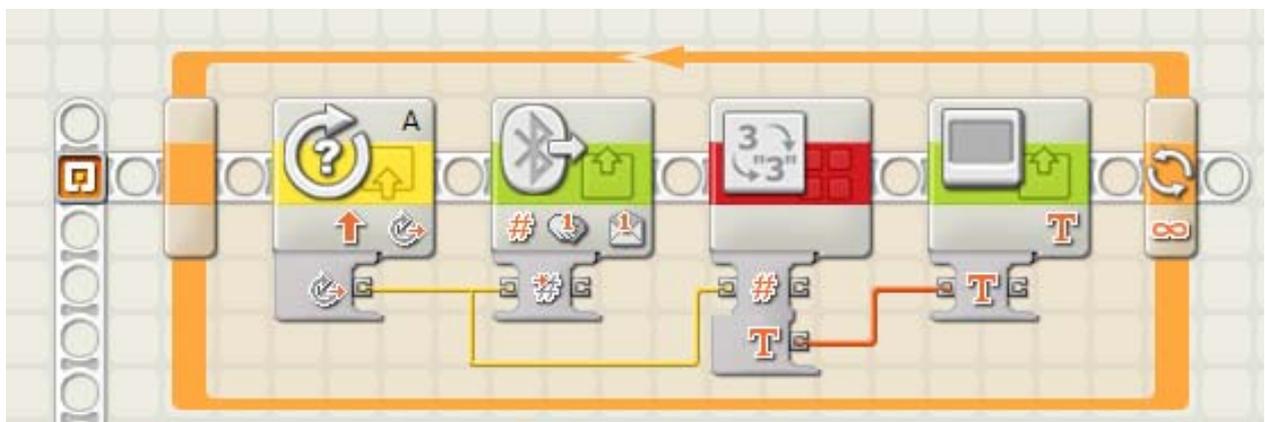


Рис. 1. Передача данных о количестве оборотов и вывод данных на экран.

Нижние два цикла управляют моторами мобильного робота. В каждом цикле посредством ветвления (т.н. «переключатель») в зависимости от состояния датчиков касания «нажат-отжат» на почтовый ящик № 2 отправляются письма с текстом «1» или «2» (с первого датчика) для одного мотора и текстом «3» или «4» (со второго датчика) для другого. Что конкретно будут делать моторы мобильного робота – включаться-выключаться или менять направление вращения – зависит от решаемой задачи.

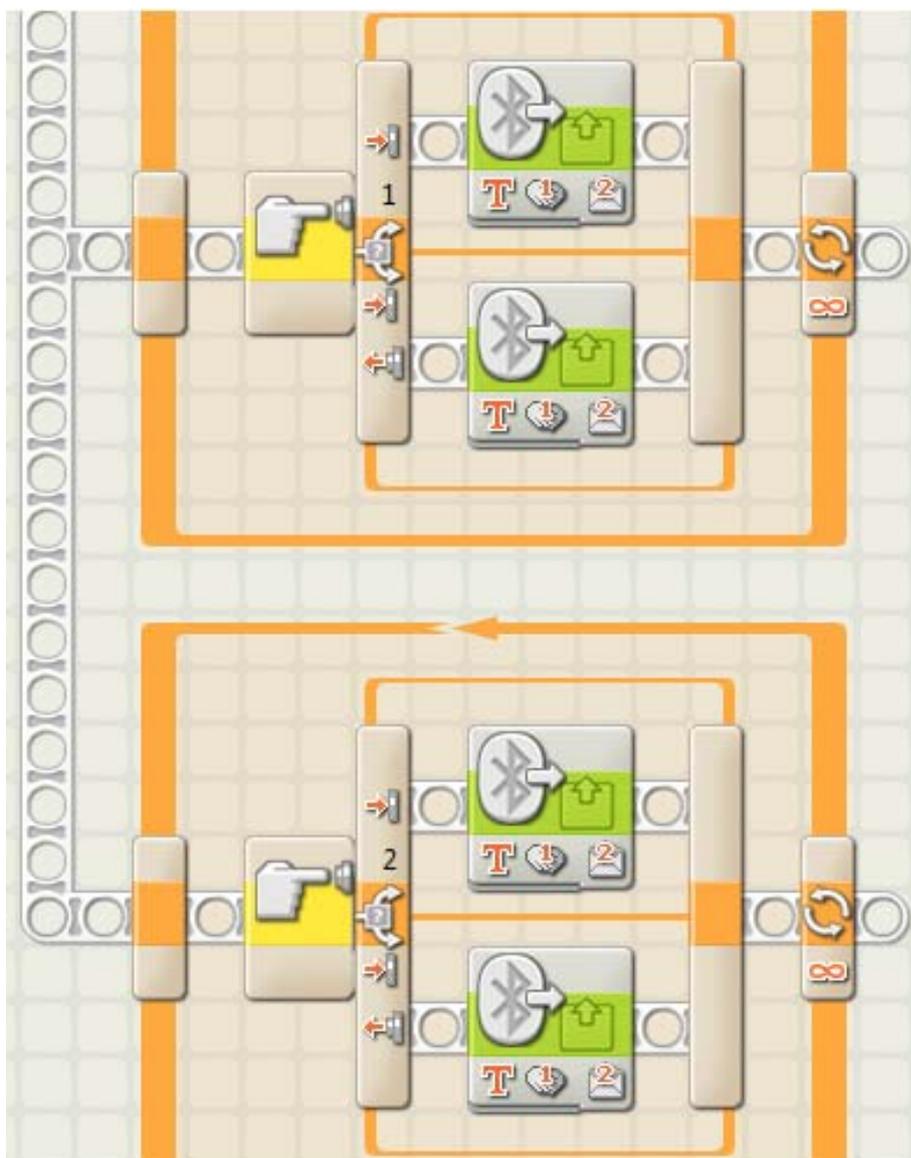


Рис. 2. Управление моторами мобильного робота

Исполняющая программа устанавливается на мобильном роботе, в данном случае она состоит из пяти бесконечных параллельных циклов.

В начале программы необходимо задать числовую переменную, например «Number 1», и записать в нее число 0 (ноль), поскольку никаких данных еще не получено. Затем в верхнем цикле через *Bluetooth* мы получаем письмо, отправленное на почтовый ящик № 1 и знакомым уже способом выводим его на экран мобильного робота. Число это зависит от угла поворота двигателя А и определяет мощность, с которой работают оба двигателя управляемого устройства. Таким образом, мы можем контролировать, с какой мощностью в каждый данный момент времени работают моторы. Это число одновременно выводится и на экран робота, который является пультом управления. Кроме этого, в цикле происходит запись значения почтового ящика № 1 в переменную «Number 1».

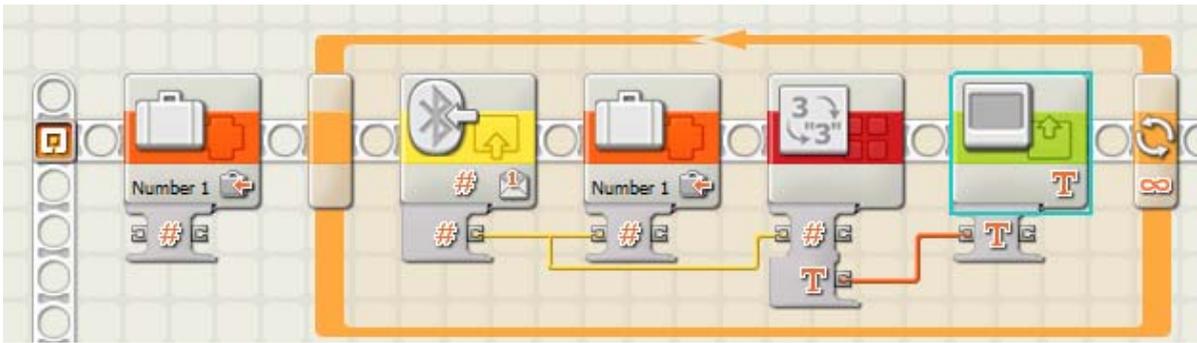


Рис. 3. Прием передаваемых числовых данных и вывод их на экран

Следующие четыре бесконечных параллельных цикла объединены в пары и управляют моторами А и В. В первом из них ожидается письмо на почтовый ящик № 2 с текстом «1». Письмо это будет отправлено только после того, как датчик касания, подключенный к порту 1 пульта управления, перейдет в состояние «нажат». После того, как данное письмо попадает в почтовый ящик, мотор А включается с мощностью, определяемой переменной «Number 1». Теперь переменная находится в состоянии считывания и передает число, находящееся в почтовом ящике № 1, которое было передано с пульта управления и которое зависит от угла поворота двигателя на пульте.

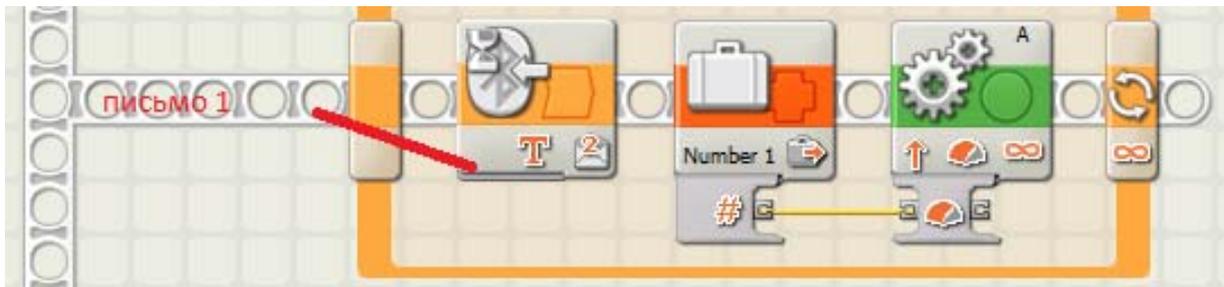


Рис. 4. Считывание данных о мощности мотора из переменной

Второй цикл в этой паре управляет выключением мотора А мобильного робота. Мотор этот выключится в тот момент, когда на почтовый ящик № 2 придет письмо текстом «2».



Рис. 5. Считывание данных о мощности мотора из переменной

Аналогичным образом работает вторая пара циклов. В зависимости от того, приходит письмо с текстом «3» или «4» на почтовый ящик № 2, включается другой мотор с той же мощностью или же выключается.

Описанный выше способ управления мобильным роботом вполне понятен учащимся среднего звена и широко применяется ими во время соревнований типа робо-регби, а также для изучения таких понятий, как *переменная, прием и передача сообщений*.

Список литературы

1. Филиппов С. А. Робототехника для детей и родителей. – СПб.: Наука, 2013. – 319 с.
2. Копосов Д. Г. Первый шаг в робототехнику. – М.: Бином, 2012. – 286 с.

РАЗРАБОТКА МНОГОВАРИАНТНОГО МАКЕТА СТАНКА С ЧПУ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ

Аннотация. В статье рассматривается задача проектирования учебного сверлильного станка с ЧПУ вариативной сборки. Рассмотрены три варианта сборки станка на базе шарико-винтовой передачи.

Ключевые слова: станок с ЧПУ, шарико-винтовая передача, шаговый двигатель

CREATE A MULTIVARIATE MODEL CNC MACHINE FOR TRAINING SPECIALISTS

A.A. Klinov, undergraduate, klin4ik11@bk.ru
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

Abstract. The article describes the training plan for the drilling machine CNC of variative assembly. Also, three variants of the assembly machine on the basis of ballscrews considered.

Key words: CNC machine, ballscrew, stepper motor

Созданию первого станка предшествовало многовековое накопление человеческим обществом производственного и технического опыта, навыков и экспериментов, в результате которых постепенно появлялись прообразы отдельных элементов будущих станков. Человечество совершенствовало свои изобретения для упрощения производства. В результате совершенствования станков появился станок с числовым программным управлением (ЧПУ). В отличие от станка с ручным управлением станок с ЧПУ обладает определенными преимуществами, такими как повышение точности обработки, высокая производительность, широкие технологические возможности, простота управления и обслуживания, быстрая переналадка, возможность расширения функций с помощью дополнительного оборудования. Для обеспечения высокой точности обработки и увеличения производительности современные станки с ЧПУ несут в себе ряд конструктивных мероприятий, та-

ких как повышенная жесткость конструкции, малое число кинематических пар и подвижных деталей, уменьшенное трение в подшипниках и направляющих и т. д. Автоматическая оптимизация процесса фрезерования и широкие возможности программирования станка с ЧПУ делают его универсальным комплексом с чрезвычайно широкими технологическими возможностями. При этом станки с ЧПУ имеют и ряд недостатков, таких как высокая стоимость оборудования, обработка всех поверхностей производится последовательно, требуется специальный подбор деталей, от оператора требуются навыки работы со станком данного класса. Так как такие станки получили широкое распространение в производстве, необходимо большое количество специалистов, которые способны работать на данном оборудовании.

В качестве одного из полнофункциональных макетов для обучения специалистов по работе со станками ЧПУ было предложено спроектировать сверлильный станок, в состав которого входит шарико-винтовая передача [1] которая представлена на рис. 1.

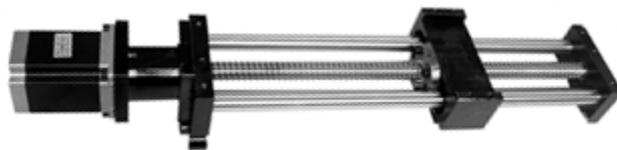


Рис. 1. Шарико-винтовая передача

Шарико-винтовая передача (ШВП) – разновидность передачи винт-гайка для преобразования вращательного движения вала шагового или серводвигателя в поступательное движение. Данная передача была выбрана за счет высокого КПД (свыше 80 % благодаря наличию тел качения), низкого коэффициента трения и, как следствие, повышенной износостойкости передачи. К достоинствам шарико-винтовых передач также относятся: высокая нагрузочная способность; бесшумность и плавность работы; высокая точность передачи; возможность использования с двигателями небольшой мощности; сравнительно невысокий нагрев в процессе работы; возможность продолжительной непрерывной работы. В данной шарико-винтовой передаче были использованы: винт, гайка, опора, опора винта, держатель шариковой гайки, шаговый мотор.

При использовании трех ШВП возможна сборка ЧПУ станка для сверления в трех вариантах.

Первый вариант представляет собой три шарико-винтовые передачи, соединенные между собой при помощи алюминиевого каркаса (подвижный портал) [2]. Данная модель станка представлена на рис. 2, а. Достоинства данного варианта станка:

- простота сборки;

- можно обрабатывать длинную заготовку;
- удобен для работы поточным методом;
- вес обрабатываемой детали ни чем не ограничен.

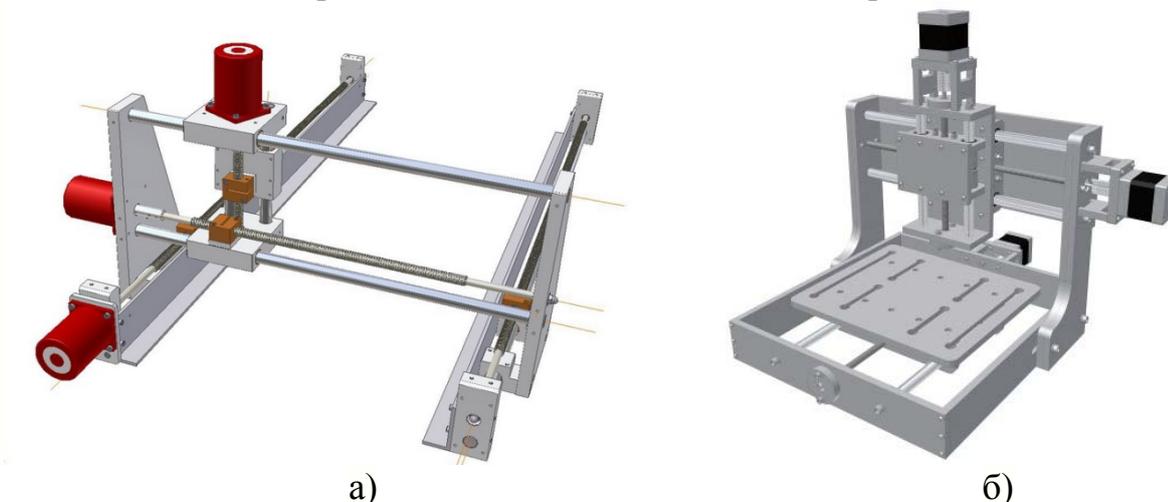


Рис. 2. Первый и второй архитектурные варианты сборки станка

Недостатком является то, что необходимо использовать хорошую, прочную направляющую, т. к. она будет испытывать большие нагрузки при обработке.

Второй вариант представлен на рис. 2, б: станок также имеет три шарико-винтовые передачи, однако, в отличие от первого варианта данная конструкция имеет подвижный стол. Достоинства данного станка: удобен для работы поточным методом и простота переделки из готовой конструкции [3].
Недостатки:

- нет возможности обработки тяжелых заготовок;
- при обработке краем заготовки возможен прогиб осей стола – т. к. вес заготовки смещенный в один край будет изгибать ось;
- ограниченный размер обрабатываемой заготовки.

Чаще всего координатные столы такой конструкции имеют размер до 15x15 см.

На рис. 3 представлен третий вариант сборки станка. Данный станок имеет конструкцию параллельной кинематики предусматривающей согласованное изменение длин трех шарико-винтовых передач, удерживающий исполнительный орган (мотор для сверления).

Достоинства данной конфигурации станка:

- высокая жесткость, обеспечиваемая за счет возникновения в несущей системе только напряжений растяжения и сжатия;
- высокие динамические показатели за счет низкой массы и параллельного распределения усилий на шаговых двигателях;
- простота конструкции, низкая металлоемкость.

Недостатки:

- сложная форма рабочего пространства и сниженное по сравнению с традиционными станками соотношение рабочей зоны и площади занимаемой станком;

- нелинейные кинематические и динамические характеристики станков, требующие нелинейных систем управления.

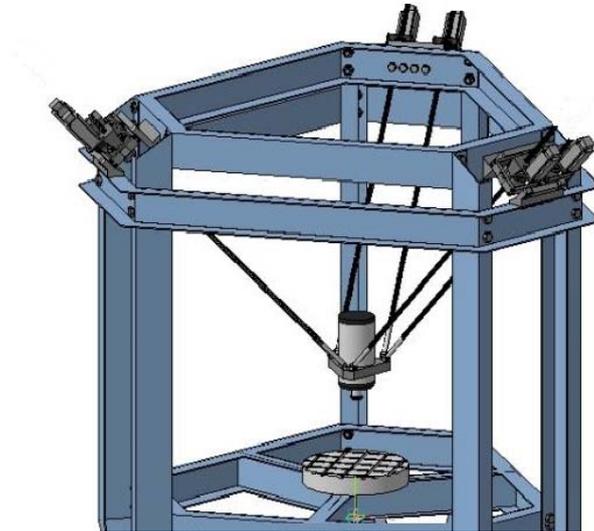


Рис. 3. Станок с параллельной кинематикой

Многовариантный макет станка ЧПУ предполагается использовать в учебном процессе. Студенты смогут собирать и разбирать станок собственноручно, что поможет им не только овладеть основными принципами работы станка, но и изучить специфику программирования, свойственную каждой из трех архитектур.

Список литературы

1. Сайт Tool-land [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://tool-land.ru>.
2. Сайт ЧПУ моделист [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://cncmodelist.ru>.
3. Сайт Item-print [Электронный ресурс]: режим доступа - <http://www.itemprint.ru>.

Ю.В. Новицкая, старший преподаватель, novitskaya@corp.nstu.ru
А.В. Гаврилов, к.т.н., доцент, gavrilov@corp.nstu.ru
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА УМНОЙ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Аннотация. В статье предлагаются архитектура и основные принципы работы системы мониторинга событий для умной учебной лаборатории. Умная учебная лаборатория, предложенная авторами ранее, основана на технологиях умного окружения и мультиагентных системах и предназначена для повышения комфорта, эффективности и безопасности проведения учебных занятий.

Ключевые слова: умное окружение, система мониторинга событий, сенсорная сеть, мультиагентные системы, коррекция ошибок

EVENT MONITORING SYSTEM OF SMART SCHOOL LABORATORY

Y.V. Novitskaya, senior lecturer, novitskaya@corp.nstu.ru
A.V. Gavrilov, Ph.D., associate professor, gavrilov@corp.nstu.ru
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. Architecture and basic principles of monitoring system for smart school laboratory are proposed in this paper. Smart school laboratory offered by authors earlier is based on smart environment technologies and multi-agent systems employed to improve comfort, effectiveness and safety during conducting of lessons.

Key words: smart environment, event monitoring system, sensor networks, multi-agent systems, fault correction

В настоящее время все более широкое распространение получают проникающие (повсеместные вычисления), позволяющие создавать комфортную среду обитания человека за счет использования умного окружения — систем, состоящих не только из управляющего центра, но и устройств, выполняющих вычисления, вынесенных за пределы основного вычислительного центра, например, планшетов, смартфонов, «умных вещей» и проч.

Такого рода системы успешно применяются в умных домах для повышения комфорта их обитателей, для улучшения качества жизни людей с ограниченными возможностями, в больницах, учебных заведениях и т. п. [1, 2].

В статье рассматривается умная учебная лаборатория, архитектура которой включает систему мониторинга событий. Система мониторинга событий является промежуточным звеном между низкоуровневой сетью датчиков и гибридной интеллектуальной системой умной учебной лаборатории. Система мониторинга событий предназначена не только для отслеживания событий, происходящих в лаборатории, путем использования низкоуровневой сети датчиков, но и уточнения показаний сети датчиков. Система мониторинга событий предоставляет возможность дальнейшего принятия решений для помощи или корректировки проведения лабораторной работы.

Умная учебная лаборатория нацелена на решение следующих задач:

- помочь преподавателю проводить лабораторные занятия с достаточно большой группой студентов;
- информировать персонально каждого студента о деталях проводимой работы, консультировать каждого студента по мере необходимости;
- наблюдать за текущим состоянием лабораторной работы в целом в отношении каждого студента, оценивать результаты работы студентов;
- помочь студенту составить требуемую последовательность шагов для выполнения лабораторной работы, выполнить правильную последовательность действий в работе, предупредить и избежать опасных ситуаций при работе с оборудованием;
- сохранить статистику выполняемой лабораторной работы для оценивания преподавателем и для дальнейшего анализа.

В [3–5] авторами предложено использование технологий окружающего искусственного интеллекта и мультиагентной технологии для разработки умной учебной лаборатории при проведении лабораторных работ в университетах и колледжах.

Этот подход к разработке систем обучения с компьютерной помощью достаточно нов. Все существующие или разрабатываемые в настоящее время обучающие системы ориентированы на поддержание процесса обучения.

В противоположность традиционным подходам поддержания процесса обучения [6] предлагаемая система может повысить комфорт и безопасность работы в лаборатории, как для студентов, так и для преподавателя (помочь в сопровождении или организации, но не в обучении) и может быть интегрирована с системами, осуществляющими концепцию повсеместных вычислений (при этом не исключается поддержка учебного процесса).

Система мониторинга в качестве источника данных для мониторинга может использовать датчики различных видов, в том числе это могут быть датчики, как установленные в помещении и отслеживающие параметры окружающей среды (температуру, освещенность), присутствие людей, так и датчики, закрепляемые в предметах, которыми пользуются люди, и одежде людей [7, 8].

Архитектура промежуточного программного обеспечения умной учебной лаборатории, состоящая из нескольких подсистем, включая систему мониторинга событий, показана на рис. 1.

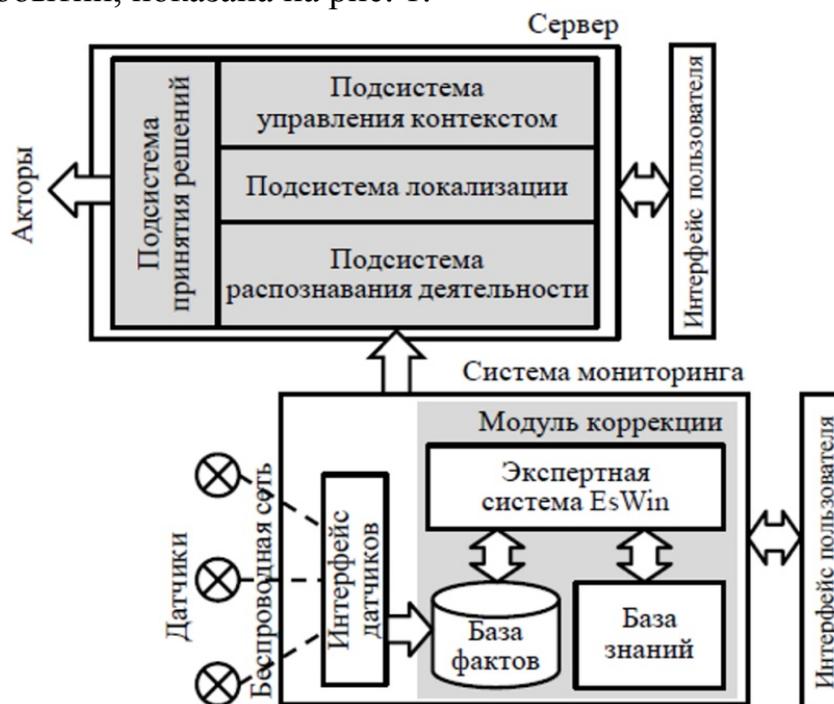


Рис. 1. Архитектура программного обеспечения умной учебной лаборатории

Подсистема принятия решений, направленная на управление умными объектами (компьютеры, переключатели (света, отопления, питания и т. д.) медиа-проектор, смартфоны и т. д.), состоит из базы знаний для принятия решений в соответствии с возможными сценариями и контекстом, описывающим текущую ситуацию.

Подсистема управления контекстом использует распознанную информацию для добавления и изменения контекста, в котором подсистема принятия решений, подсистемы локализации и распознавания решают свои задачи.

Подсистема локализации нацелена на распознавание, сохранение и отслеживание положения студентов и преподавателя, приход и уход студентов и преподавателя в/из лаборатории.

Подсистема распознавания деятельности нацелена на распознавание изображений (объектов, ситуаций, деятельности и т. д.), полученных от различных датчиков. Данные для распознавания и принятия решения предварительно обрабатываются соответствующей системой мониторинга событий для коррекции ошибок в показаниях датчиков.

Система мониторинга событий состоит из базы данных с показаниями датчиков и модуля коррекции. В базе данных хранятся необработанные данные, полученные от датчиков. Модуль коррекции выполняет коррекцию ошибок перед передачей данных датчиков для дальнейшей обработки. Данные от датчиков поступают в базу данных от беспроводной сети датчиков.

Модуль коррекции состоит из экспертной оболочки ESWIN и баз знаний и фактов.

Экспертная оболочка EsWin — программная оболочка для работы с продукционными правилами. Оболочка предназначена для решения задач обратного логического вывода на основе баз знаний [9, 10].

База знаний состоит из фреймов-классов и продукционных правил. Фреймы представляют структуру для описания некоторой сущности (события, объекта и т. п.), состоящую из слотов — характеристик этой сущности, их возможных значений, вопросов, комментариев и т. п. Значениями слотов могут быть строки, числа, лингвистические переменные, дата или время. В процессе интерпретации базы знаний фреймы-классы могут генерировать фреймы-экземпляры, предназначенные для хранения данных.

Продукционные правила используются для описания отношений между сущностями предметной области. Вывод выполняется на основе отношений, определенных в правилах вывода. В условиях и заключениях правил представлены ссылки на фреймы и их слоты.

События, происходящие в учебной лаборатории, на текущем этапе разработки моделируемые программно (в дальнейшем планируется использование различных датчиков: инфракрасных датчиков движения, контактных датчиков, web-камер, датчиков температуры и освещенности и т. п.), асинхронно генерируются клиентскими скриптами с временными интервалами, задаваемыми датчиком случайных чисел. Для каждого источника события работает собственный скрипт, моделирующий работу некоторого датчика.

Для записи и последующего хранения данных, полученных от моделей датчиков, создана база данных (БД), работающая под управлением сервера баз данных MySQL. Для каждой модели датчика сформирована собственная таблица с перечнем возможных состояний (формулировки перечня при необходимости редактируются через web-интерфейс).

Скрипт, моделирующий возникновение события, использует события из перечня собственного источника. Информация о произошедших событиях записывается в хронологическом порядке в таблицы, соответствующие каждому отдельному источнику событий.

Для коррекции искажений и шумов в показаниях датчиков используется предварительная обработка полученных данных с помощью продукционных правил и обратного логического вывода, поддерживаемых экспертной оболочкой EsWin.

Так, например, сообщение контактного датчика о присутствии студента на рабочем месте, датчика включения монитора о включении монитора и сообщение датчика движения об отсутствии движения является примером противоречивых показаний.

Для выполнения логического вывода на основе продукционных правил было принято решение об использовании SWI Prolog [11]. SWI Prolog —

свободно распространяемая в некоммерческих целях реализация языка логического программирования Prolog и среда разработки, которая предоставляет широкий набор возможностей, в том числе программный интерфейс доступа к базам данных ODBC.

Пример базы знаний в формате экспертной оболочки EsWin для коррекции показаний датчиков:

<pre> Frame = Цель Коррекция: EndF Frame = Датчик движения: (вкл; выкл; коррекция невозможна; коррекция не требуется) ... контактный: (вкл; выкл; коррекция невозможна; коррекция не требуется) включения монитора: (вкл; выкл; коррекция невозможна; коррекция не требуется) EndF Frame = Тест Состояние: (пройден; не пройден) EndF Frame = Характеристики Напряжение: (есть; нет) EndF </pre>	<pre> ... Rule 2 = (Характеристики.Напряжение; нет) Do = (Тест.Состояние; не пройден) 100 EndR Rule 3 = (Тест.Состояние; не пройден) Do = (Коррекция; Невозможна) 100 EndR Rule 4 = (Датчик.включения монитора; вкл) = (Тест.Состояние; пройден) = (Датчик.контактный; вкл) = (Датчик.движения; выкл) Do = (Коррекция; Датчик.движения; вкл) EndR ... </pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Был разработан программный модуль, выполняющий преобразование базы знаний из формата экспертной оболочки EsWin к формату предложений языка SWI-Prolog.

Продукционные правила преобразуются к следующему формату:

```

...
% Правило 2
state(slot('тест.состояние'),value('не_пройден')) :-
state(slot('характеристики.напряжение'),value('нет')).
% Правило 3
goal(slot('коррекция'),value('невозможна')) :-
state(slot('тест.состояние'),value('не_пройден')).
% Правило 4
goal(slot('коррекция'),value(slot('датчик.включения_компьютера'),value('вкл')))) :-
state(slot('датчик.включения_монитора'),value('вкл')),
state(slot('тест.состояние'),value('пройден')),
state(slot('датчик.контактный'),value('вкл')),
state(slot('датчик.движения'),value('выкл')).
...

```

В процессе логического вывода используются данные, полученные от моделей датчиков и хранящиеся в БД (база фактов). Получение данных выполняется путем формирования соответствующих SQL-запросов.

На основе данных, полученных в результате вывода, выполняется коррекция возможных ошибок в показаниях датчиков на основе правил-продукций в системе обратного логического вывода.

Предложенная умная учебная лаборатория с системой мониторинга событий обеспечит улучшение организации проведения работы преподавателя и студентов; увеличит безопасность использования сложного и небезопасного оборудования; предоставит преподавателю возможность проводить занятия в 2–3 классах одновременно. В настоящее время выполняется экспериментальная разработка и реализация как модуля коррекции, так и предложенной архитектуры в целом.

Список литературы

1. Weber W., Rabaey J. and Arts E.A., eds. Ambient Intelligence. Springer-Verlag, 2005. – 374 p.
2. Гаврилов А. В. Искусственный Домовой / А. В. Гаврилов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – № 2. – С. 77–89.
3. Гаврилов А. В. Умная учебная лаборатория / А. В. Гаврилов, Ю. В. Новицкая, Т. А. Яцевич // Робототехника и искусственный интеллект : материалы 5 Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Железногорск, 9 ноября 2013 г. – Красноярск : ЦНИ «Монография», 2013. – С. 126–134.
4. Gavrilo A. V. Towards a smart school laboratory / A. V. Gavrilo, Y. V. Novitskaya, T. A. Yatsevich // DIVAI 2014. 10 International scientific conference on distance learning in applied informatics : conf. proc. – Prague : Wolters Kluwer, 2014. – pp. 65–74.
5. Ю. В. Новицкая, А. В. Гаврилов. О применении технологий «умных сред» к автоматизации проведения лабораторных работ // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : 8-я междунар. науч.-практ. конф. : сб. науч. тр. (Коломна, 18-20 мая 2015 г.). В 2 т. – Москва : Физматлит, 2015. – Т.1. – С. 410–417.
6. Mikulecky P. Smart Environment for Smart Learning / P. Mikulecky // DIVAI 2012. 9 International scientific conference on distance learning in applied informatics : conf. proc. – Prague : Wolters Kluwer, 2012. – pp. 213–222.
7. Pandian P.S., Mohanavelu K., Safeer K.P., Kotresh T.M., Shakunthala D.T., Padaki V.C. Smart Vest: Wearable multi-parameter remote physiological monitoring system // Medical & Engineering Physics. – 2008. – V. 30, Iss. 4. – pp. 466–477.
8. Leea Young-Dong, Chungb Wan-Young. Wireless sensor network based wearable smart shirt for ubiquitous health and activity monitoring // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2008. – vol. 140, Iss. 2. – pp. 390–395.
9. Gavrilo A. V., Chistykov N. A. An architecture of the toolkit for development of hybrid expert systems / A. V. Gavrilo, N. A. Chistykov // ACIT-2005. The Second IASTED Int. Multi-Conference, Automation, Control and Applications : conf. proc. – Novosibirsk, 2005. – pp. 116–120.
10. Gavrilo A. V., Novickaja J. V. The Toolkit for development of Hybrid Expert Systems. / A. V. Gavrilo, J. V. Novickaja // KORUS-2001. The 5th Korean-Russian Symp.: symp. proc. – Tomsk : TPU, 2001. – vol. 1. – pp. 73–75.
11. SWI Prolog [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.swi-prolog.org>.

КОГНИТИВНЫЙ ИММУНИТЕТ КАК ПРОБЛЕМА И КОГНИТИВНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА КАК РЕСУРС

Аннотация. Рассматриваются два способа представления знаний, предназначенные для преодоления когнитивного иммунитета и ориентированные на когнитивную систему различных субъектов.

Ключевые слова: когнитивные системы, мультисенсорные системы, соционика, рефлексивный анализ, проектирование эксперимента

COGNITIVE IMMUNITY AS A PROBLEM AND THE COGNITIVE INFRASTRUCTURE AS A RESOURCE

V.A. Filimonov, Ph.D., professor, filimonov-v-a @yandex.ru
Sobolev Institute of Mathematics of SB RAS, Omsk Dep., Omsk, Russia

Abstract. Two ways of representation of knowledge intended for overcoming of cognitive immunity and focused on cognitive system of various subjects are considered.

Key words: cognitive systems, multitouch systems, socionics, reflexive analysis, experiment design

Термин «когнитивный иммунитет» как система блокирования субъектом определенной информации (иначе, жесткая ориентация субъектов на одностороннее восприятие определенной ситуации) был введен автором в [1] в связи с проблемами согласования представлений о Великой Отечественной войне гражданами РФ и Польши. Очевидно, что под эти определения подпадает и множество других ситуаций. Представляется, что мы имеем дело с частным случаем общего феномена наличия психологической установки, блокирующей восприятие информации как на уровне сознания, так и на уровне подсознания. Когнитивный иммунитет, в частности, априорная невосприимчивость аргументации, проявляется как на уровне локального информационного взаимодействия, так и на уровне взаимодействия социальных групп (конфликты, обусловленные религиозными, этническими, политическими и

т. п. факторами). Наличие серьезных проблем, связанных с этим феноменом, позволяет считать актуальным поиск методов его преодоления. Возникло предположение, что в определенной степени этот иммунитет можно преодолеть, используя соответствующую инфраструктуру, названную когнитивной [2, 3]. Такая инфраструктура создается на основе кросс-технологий ситуационного центра [4–6].

Когнитивный иммунитет является как проблемой, так и ресурсом, исследование и использование которого позволяет построить «тоннели» перехода от незнания к знанию. В частности, в [2] предложена технология обучения, которая состоит в том, что коллектив учителей проводит занятия с коллективом учеников. Оба коллектива могут быть виртуальными. В этом случае коллектив является системой ролей или масок в формате рефлексивного театра.

Важным компонентом технологии является классификация участников процесса. Личный опыт автора в сочетании с информацией, содержащейся в достаточно авторитетных публикациях, позволяет рекомендовать для такого рода классификации соционику, основанную на типологии личности К.-Г. Юнга. В отличие от типоведения (TypeWatching), распространенного в США и ряде других стран, соционика позволяет не только дать системное представление субъекта, но также определить стиль взаимодействия субъектов.

Одной из отличительных особенностей когнитивной инфраструктуры является визуализация образа каждого участника процесса (достижений, потенциала, наличия конфликтов, психологических характеристик и т. п.). В связи с высокой вероятностью психологических травм при такой визуализации предусмотрено создание индивидуальных и коллективных масок, под которыми работают участники. Мониторинг субъектов, которые в нашем случае осуществляет сервисная команда ситуационного центра (координатор, методолог, планшетист, игротехник), позволяет прогнозировать результаты коллективной работы и своевременно ее прекратить, либо перегруппировать участников. В принятом нами подходе принципиальна возможность формирования и функционирования коллективных субъектов (типа Н. Бурбаки), а также группы субъектов-псевдонимов, ассоциированных с одним участником. Часть процесса исследования и проектирования может быть сконструирована в театральном формате.

Перечисленные выше участники сервисной команды фактически являются функциональными местами, которые может занимать и один человек, например, преподаватель. Важно понимать, что именно делается с позиций конкретного функционального места. В качестве некоторой аналогии можно указать известные методы де Боно, в частности, «Шесть шляп мышления». Участники последовательно и синхронно надевают шляпы определенного цвета и рассматривают предмет своего исследования с помощью метода, определяемого цветом актуализированной шляпы (рациональный анализ, ин-

туция и чувства и т. п.). Аналогичным образом все функции сервисной команды могут быть выполнены одним человеком.

Более интересным является «размножение» членов учебной группы, в том числе состоящей из одного человека. Здесь может потребоваться предварительная разработка ролей и масок, а также их оперативная коррекция.

Как правило, компетенция в любой области достаточно тесно связана с мотивацией. Результаты известных экспериментов Сугаты Митры (Sugata Mitra) «Дыра в стене» и «Школа в облаках» раскрывают большой потенциал различных видов мотивации.

Дополнительно к упомянутым методикам отметим две новых авторских методики, находящиеся в стадии разработки. Первая методика предназначена для разработки учебных пособий и отличается наличием полилога (несколько собеседников обсуждают учебный материал с различных позиций, определенных когнитивными системами участников, а также их функциями в качестве членов сервисной команды ситуационного центра). Пример – вымышленная стенограмма сервисной команды при обсуждении новой темы – приведен в [7]. Заметим, что прецедент такого обсуждения создан достаточно давно – в 1274 г. В качестве примера приведем далее цитату из [8]. *«Относится ли порок любопытства к чувственному знанию?... **Возражение 3.** Далее, к любопытству...относится интерес к делам ближнего. Но интерес к делам других, похоже, не греховен, поскольку, согласно сказанному [в Писании], Бог «заповедал каждому из них обязанность к ближнему» (Сир. 17, 12). Следовательно, порок любопытства не относится к знанию такого рода частных чувственных объектов. **Отвечаю:** знание чувственных вещей определено к двум вещам. Во-первых, и в человеке, и в других животных оно определено к поддержанию тела,... Во-вторых, оно определено так, как свойственно одному только человеку, а именно к умственному знанию, созерцательному или практическому. ... С другой стороны, если кто-либо методично изучает чувственные вещи ради удовлетворения естественных потребностей или постижения интеллигибельной истины, то такое усердие в познании чувственных вещей добродетельно.»*

В последние годы в нашей стране выпущена серия учебных пособий по математике, информатике и физике, которые выполнены в стиле японских комиксов – манга. Особенностью этих книг является наличие диалогов, в ходе которых обсуждаются конкретные методы с привязкой к конкретным процессам: игре в теннис (физика), социологическим исследованиям (математическая статистика) и т.п.

Другая методика основана на Второй теореме о разнообразии в Теории рефлексивных игр В.А. Лефевра [9]. Согласно этой теореме для любого субъекта может быть подобрана группа, способная ввести этого субъекта в заданное состояние (выбор определенной альтернативы, свобода выбора, фрустрация). При этом в качестве условий задается только структура группы,

определяемая двумя типами отношений: союз либо конфликт. Союз и конфликт полагаются в данной модели базовыми характеристиками. По способу расчета модели можно уточнить понимание этих характеристик и построить процедуру ее оценки внешним наблюдателем.

Пусть заданы три субъекта А, Б и В. Каждый из субъектов А, Б заинтересован в том, чтобы субъект В выбрал одну или несколько альтернатив из множеств МАв и МБв соответственно. Отношение между субъектами А и Б субъект В квалифицирует как союз, если он воспринимает давление группы из субъектов А и Б как пересечение множеств МАв и МБв (А и Б договорились о совместных действиях). Если давление указанной группы субъект В воспринимает как объединение множеств МАв и МБв, то он это отношение квалифицирует как конфронтацию (конфликт), поскольку А и Б действуют независимо. Заметим, что данное определение конфликта отличается от определения конфликтного отношения в соционике, где конфликт обусловлен принципиальным взаимным непониманием смысла контакта при взаимной иллюзии достижения понимания.

Использование данной методики нуждается в экспериментальном исследовании, проведение которого запланировано автором в 2016 г.

Список литературы

1. Filimonow W.A. Pamięć historyczna, orientacja świadomości oraz immunitet kognitywny // «Великая Отечественная война: экономика, политика, общество, культура». – Матер. междунауч.-практ. конф. – Омск: ОмГИС, 2015. – С. 44–46. (на польск.яз.).
2. Филимонов В.А. Когнитивная инфраструктура обучения людей и роботов (текст пленарного доклада) // Робототехника и искусственный интеллект - 2014: Материалы VI междунауч.-практ. конф. – Красноярск: Центр информации, 2014. – С. 205–209.
3. Филимонов В.А. «Ненавижу математику!» или когнитивная инфраструктура против когнитивного иммунитета // Актуальные проблемы преподавания математики в техническом вузе: Матер. 5-й межвузовской научно-методической конференции. – Омск: ОмГТУ, 2015. – С. 122–127.
4. Филимонов В.А. Кросс-технологии ситуационного центра – полигон кибернетики // Математические структуры и моделирование. – 2014. – № 3 (31). – С. 87–98.
5. Филимонов В.А. Кросс-технологии ситуационного центра – когнитивная инфраструктура проектирования // Онтология проектирования, 2014. – № 4 (14). – С. 98–104.
6. Филимонов В.А. Сума технологии: три пятилетки многодисциплинарного проекта // Знания-Онтологии-Теории: Матер. Всеросс. конф. с междунауч. участием – Новосибирск: Ин-т математики им. С.Л.Соболева СО РАН, Т. 2. – С. 181–188.
7. Filimonow W.A. K Diskussionbeiträge zur Kartosemiotik und zur Theorie der Kartographie // Theoretische Probleme der Kartographie und ihrer Nachbardisziplinen: Internationales Korrespondenz-Seminar. Band 17. – Dresden, 2014. – pp. 5–13.
8. Фома Аквинский. Сумма теологии. Часть II-II. – Киев: Ника-Центр, 2011. – 576 с.
9. Лефевр В.А. Лекции по теории рефлексивных игр. – М.: Когито-центр, 2009. – 218 с.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ НОРМ КОНТРОЛЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Рассмотрена задача выявления индивидуальных потребностей учащегося при записи на электронный учебный курс. Предложена методика, формирования индивидуальных норм контроля, опираясь на механизм когнитивных карт диагностики знаний. Рассмотрены механизмы интеллектуальных автоматизированных обучающих систем, позволяющих осуществить описанную методику.

Ключевые слова: автоматизированная обучающая система, когнитивная карта диагностики знаний, индивидуализация контроля, методика

METHODOLOGY OF INDIVIDUAL CONTROL STANDARDS IN INTELLIGENT AUTOMATED EDUCATIONAL SYSTEMS

V.A. Uglev, Ph.D., docent, uglev-v@yandex.ru
Siberian Federal University, Zheleznogorsk, Russia

Abstract. The problem of identifying the individual needs of the student when recording to an e-learning course. The technique, the formation of individual control standards, based on the mechanism of cognitive map of knowledge diagnosis. The mechanisms of intelligent automated educational systems, allowing to carry out the above procedure.

Key words: automated educational system, the cognitive map of knowledge diagnosis, control individualization, method

Сопровождение и поддержка процесса передачи знаний с помощью интеллектуальных автоматизированных обучающих систем (АОС) по своей сути должна носить комплексный характер. Это значит, что должны быть максимально индивидуализированы все этапы взаимодействия ученика с АОС, основными из которых являются следующие: запись на курс, сборка вариан-

та курса, итеративное предъявление дидактического материала и его контроль, а также завершение процесса обучения. Очевидно, что от того, насколько детально удалось АОС на этапе записи на курс (анкетирование и входной контроль для выяснения личностных целей и мотивов к обучению) «разглядеть» будущего ученика, будет зависеть успешность индивидуализации последующих этапов их взаимодействия. Этап сборки курса включает в себя уточнение противоречий в ответах ученика, сборку индивидуализированного состава электронного курса, согласование его содержания с учеником, индивидуализацию норм контроля. Остановимся на рассмотрении методических аспектах автоматической индивидуализации норм контроля.

Прежде чем обсуждать процесс индивидуализации норм контроля, обратимся к самой категории нормы. Согласно словарю [1] нормой является «обычный, признанный обязательным порядок, состояние» или образец. Таким образом, показателем нормы освоения знаний в АОС должны стать результаты прохождения наборов контрольно-измерительных материалов, проверяющих успешность освоения соответствующих дидактических единиц. Очевидно, что если нормы контроля сделать фиксированные, то ни о какой индивидуализации контроля и речи быть не может. Если же нормирование изменять в угоду желаниям ученика, то это может привести к абсурдному результату. Если же пытаться реализовать требования обеих сторон, то возникает ситуация конфликта интересов. С одной стороны, учебный материал должен быть проконтролирован теми средствами, которые заложил разработчик курса, а с другой – учащийся может иметь вариативный состав курса, личностные цели обучения. Очевидно, что интеллектуальная АОС должна иметь обоснованный механизм разрешения данного конфликта, учитывая интересы обеих сторон.

Какие основания могут быть у ученика, позволяющие ядру АОС учитывать специфику его индивидуальной учебной траектории? Представим их в виде множеств факторов B и T :

- цель обучения (b_1) в виде набора следующих состояний: *любопытство* (отсутствие четкой мотивации и целей), *личное совершенствование* (преобладание внутренней мотивации к получению знаний), *решение актуальных проблем* (преобладание внешней мотивации к получению знаний) или *формальное повышение статуса* (обучение как инструмент достижения целей, не связанных со знаниями изучаемой дисциплины);

- личные предпочтения (b_2) в разрезе учебных тем, умений и навыков, развиваемых компетенций;

- форма обучения (b_3), принимающее значения *институциональное* (очное, заочное, курсы повышения квалификации) или *частное* (открытые курсы для всех желающих);

- глубина изучения предмета (b_4), принимающее значение *расширить кругозор, получить базовые знания, развить отдельные навыки и компетенции, профессионально овладеть предметной областью*;
- профильность материала (b_5), принимающий значения *не профильный, профильный общий, профильный специальный*;
- начальный уровень знаний / владения компетенциями (t_1), выявленных в результате проведения входного контроля, выраженные в процентной или балльной мере;
- запас времени (t_2), выделяемый ученику до момента демонстрации результатов обучения в форме и тоговой аттестации.

Для подтверждения указанных фактов, на этапе записи на курс (анкетирование и тест входного контроля) должны быть предусмотрены и зафиксированы ответы на соответствующие вопросы. Далее должен быть сделан ряд обобщений в модели ученика. Для дальнейшего принятия компромиссных решений потребуется концентрация модели ученика, базовой и индивидуализированной сборки электронного курса. Для этого воспользуемся механизмом когнитивных карт диагностики знаний (ККДЗ), позволяющем не только объединить указанные структуры, но и визуализировать семантические зависимости в составе электронного курса [2]. Для примера рассмотрим фрагмент ККДЗ для дисциплины «Имитационное моделирование» (рис.), прошедшую этапы синтеза сборки курса, уточнения ее состава и его согласования с учеником.

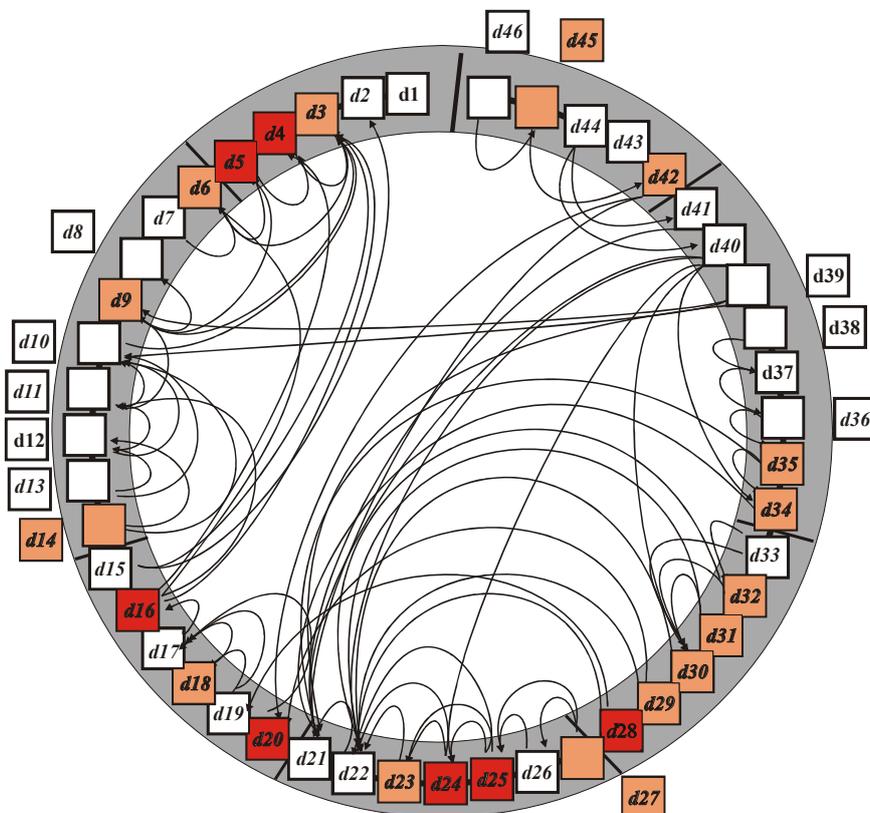


Рис. Фрагмент ККДЗ по дисциплине «Имитационное моделирование» одного из учащихся на этапе сборки курса

Курс состоит из 46 дидактических единиц (n), обязательных к контролю на начальном этапе работы с курсом. На рисунке видно, что были выявлены дидактические единицы, как относящиеся к ядру курса (дидактические единицы, имеющие более темный цвет)¹, так и исключенные из него как справочные (объекты за внешним контуром карты). На рисунке отмечены не только сами дидактические единицы, но и семантические связи (M) между ними в виде множества стрелок. Таким образом, для принятия решений о глубине проверки i -ой дидактической единицы (где $i \in 1..n$), мы должны опираться на такой алгоритм обработки знаний, который будет учитывать текущую обстановку, требования составителей курса и индивидуальные запросы ученика, имитируя афферентный синтез² [3, 4]. Получим отображение вида:

$$f : \langle B, T, M \rangle \xrightarrow{i} k_i, \quad (1)$$

где k – это уровень глубины контроля дидактической единицы с индексом i . Выделим нормы (уровни контроля), которые может принимать k :

- 1) углубленное изучение с экзаменационной формой контроля (выставление балла или отметки);
- 2) базовое изучение материала в форме дифференцированного зачета (выставление отметки, но без принципиальных требований к высоким показателям уровня освоения);
- 3) ознакомительное изучение с зачетной формой контроля (демонстрация знаний не ниже минимального порогового уровня);
- 4) отсутствие контроля по причине низкой важности дидактической единицы для курса, ее справочный характер или исключения содержащего ее модуля.

Тогда укрупненная методика определения нормы контроля для i -ой дидактической единицы, опираясь на механизм отображения (1) в соответствии с этапами концентрации знаний из [5], будет состоять из следующих этапов:

1. На индивидуализированном составе учебного курса, представленного в виде ККДЗ, отмечаются все дидактические единицы, входящие в глобальное ядро курса или в локальное ядро курса с высокой концентрацией семантических связей, и им присваивается первый уровень контроля. Его следует применять не только для дидактических единиц, включенных в ядро курса, но и для тех, которые являются наиболее важными для самого ученика.

2. Выбираем из оставшихся дидактических единиц те, которые имеют тесные семантические связи с элементами глобального ядра или включены в локальное, и применяем для них второй уровень контроля.

¹ Ядро курса имеет глобальную компоненту, обязательную при любой сборке материала в курс, и локальную, учитывающуюся только в том случае, если соответствующий учебный модуль был прямо или косвенно отмечен учеником как важный.

² На этапе сборки курса еще не показателей динамики обучения, поэтому они не включены в начальную модель, но будут применены в дальнейшем.

3. Далее отмечаем те элементы курса, которые были включены в сборку курса по причине удержания семантической целостности материала, но имеет значительный показатель важности для конкретного учебного модуля, развития важных для ученика компетенций и навыков, и применяем для них третий уровень контроля.

4. Прочим дидактическим единицам присваивается четвертый уровень контроля. В основном это наименее важный материал, который носит дополнительный характер и может не отвечать личным предпочтениям ученика (особенно когда целью обучения является *формальное повышение статуса* и курс имеет статус *не профильный*).

Очевидно, что методика будет эффективна лишь тогда, когда учащийся добросовестно подошел к этапу анкетирования, принял участие в согласовании курса и будет содержать ряд дополнительных правил-исключений. Так же отметим, что предложенная методика применяется на этапе сборки курса. На результаты ее применения опирается адаптивный алгоритм синтеза набора контрольно-измерительных материалов (включая выбор методик их оценки). Но в тех случаях, когда ученик на очередном этапе обучения демонстрирует низкий уровень понимания материала по определенной дидактической единице, то все базовые дидактические единицы, с которыми у нее были связи из *M*, автоматически включаются в контроль, даже если они имеют статус справочных. Учащийся о данных изменениях информируется через диалоговую систему, а также может получить ее комментарии о причинах изменений состава контрольно-измерительного материала [6].

Отметим еще один специальный случай, когда ученик выбирает форму обучения *частную*, а цель обучения – *любопытство* или *личное совершенствование* (внеинституциональный подход). Очевидно, что никаких специальных требований по составу и глубине освоения компетенций, а также структурных элементов курса априори нет. Несмотря на видимость «анархии», интеллектуальное ядро АОС должно опираться на модель курса, особенно на те дидактические единицы, которые входят в глобальное ядро курса. Но при этом возможна максимальная глубина индивидуализации, т. к. будут детально учтены все акценты учащегося, указанные на этапе записи на курс и согласованные при сборке его структуры.

Для примера с рис. будет следующее соотношение форм контроля: экзаменационная форма – 14, зачетная форма – 13, без оценки – 7. Здесь было учтено, что дидактическая единица № 23 была указана учеником как освоенная, и этот факт был подтвержден результатами входного теста. При этом в итоговом контроле данная дидактическая единица проверяется на общих основаниях. Это также не исключает принудительного возвращения соответствующих контрольно-измерительных материалов в состав промежуточных проверок в случае, если будут выявлены затруднения в изучении материалов,

имеющих сильные дочерние семантические связи с данной дидактической единицей.

Реализация предложенного подхода, опираясь на ККДЗ, предполагает проработку как базы знаний, так и решателя АОС. Несмотря на заманчивость применения в базе знаний исключительно коллекции продукционных правил [7], принятие решений должно быть многошаговым [5]. Это позволит детально проанализировать модель ученика и сложившиеся условия обучения, а также реализовать стратегию обратного вывода знаний в ситуациях, когда учащийся хочет детально ознакомиться с аргументами обучающей системы по вопросам организации и проведения контрольно-измерительных мероприятий.

Представленная методика позволяет применить принципы индивидуализации к этапу выработки норм контроля при организации электронного обучения. Но эта методика будет эффективна лишь при комплексном подходе, когда все этапы обучения будут ориентироваться на единую стратегию сопровождения обучения (в данном случае, опираясь на когнитивную карту диагностики знаний). Тогда можно будет говорить о создании индивидуальной среды обучения, максимально эффективно мотивирующей ученика к интеллектуальному росту.

Список литературы

1. Толковый словарь русского языка. Том I. Под редакцией Д.Н. Ушакова. – М.: Астрель, АСТ, 2000. – 848 с.
2. Углев В.А., Ковалева Т.М. Когнитивная визуализация как инструмент сопровождения индивидуального обучения // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2014. – № 3. – С.420-449. Режим доступа – <http://technomag.bmstu.ru/doc/700661.html>.
3. Анохин П.К. Философский смысл проблемы естественного и искусственного интеллекта // Синергетика и психология. Вып. 3. Когнитивные процессы. – М.: Когито-Центр, 2004. – С. 301–319.
4. Uglev V.A., Filimonov V.A., Mishkina N.Yu. Hybrid approach to the management by feedback when working with automated educational systems // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Omsk: OmGTU, 2015. – p. 1–4.
5. Uglev V.A. Implementation of Decision-making Methods in Intelligent Automated Educational System Focused on Complete Individualization in Learning // AASRI Procedia, vol. 6, 2014. – pp. 66-72 (DOI 10.1016/j.aasri.2014.05.010).
6. Углев В.А., Рогожникова М.А. Организация естественно-языкового диалогового взаимодействия человека с интеллектуальной автоматизированной обучающей системой // Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных: XXIII Всероссийский семинар. – Красноярск, 2015.– С. 121–129.
7. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.

Робототехника и Искусственный Интеллект 2015

**Материалы VII Всероссийской
научно-технической конференции
с международным участием**

г. Железногорск, 11 декабря 2015