

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ТРАЕКТОРИЯМ МЕТОДОМ ВАРИАЦИОННОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Дивеев А.И.¹, Ибадулла С.И.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук, Москва, Россия (119333, Москва, ул. Вавилова, 40), e-mail: aidiveev@mail.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Российский университет дружбы народов, (117198, Москва, Миклухо-Маклая, 6), e-mail: sabit_sss@mail.ru

Работа посвящена решению задачи синтеза системы управления движением мобильного робота. Рассматривается задача стабилизации движения мобильного робота вдоль заданных пространственных траекторий. Для решения задачи используется метод вариационного генетического программирования. В процессе решения задачи синтеза рассматривались несколько траекторий, отличающихся наличием не дифференцируемых, угловых, точек и частотой изменения направлений движения. Найденная с помощью метода вариационного генетического программирования система управления для одной траектории проверялась по точности движения на остальных траекториях. В результате численных экспериментов была получена одна система управления, которая обеспечивала качественное точное движение мобильного робота по всем заданным траекториям.

Ключевые слова: синтез системы управления, вариационное генетическое программирование, мобильный робот

SYNTHESIS OF THE CONTROL SYSTEM FOR THE MOVEMENT OF THE MOBILE ROBOT ON SPATIAL TRAJECTORIES BY VARIATIONAL GENETIC PROGRAMMING

Diveev A.I.¹, Ibadulla S.I.²

¹Institution of Russian Academy of Science Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Moscow, Russia (119333, Moscow, Vavilova str., 40), e-mail: aidiveev@mail.ru

²Peoples' Friendship University of Russia (117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str., 6), e-mail: sabit_sss@mail.ru

This paper is devoted to the solution of a synthesis problem of a control system for the movement of the mobile robot. The problem of stabilization of the mobile robot movement along the set spatial trajectories is considered. For the solution of the synthesis problem the method of variational genetic programming is used. In the course of the solution of the synthesis problem of synthesis some trajectories differing in existence not differentiable angular, points and the frequency of change of the directions of the movement were considered. The control system found by means of the variational genetic programming for one trajectory was checked on movement accuracy on other trajectories. As a result of numerical experiments one control system which provided the high-quality exact movement of the mobile robot on all set trajectories was received.

Keywords: control systems synthesis, variational genetic programming, mobile robot

Метод вариационного генетического программирования [1-5] был создан как модификация базового метода генетического программирования [7] для решения задачи синтеза системы управления. Данная задача требует нахождения математического выражения функции, описывающей зависимость значений вектора управления от вектора состояния объекта управления. Трудность решения задачи синтеза заключается в том, что помимо минимизации критерия качества, заданного в виде интегрального функционала, найденная функция управления должна еще обеспечивать и достижение объектом цели управления. При эволюционном поиске в начальном множестве случайно сгенерированных

возможных решений очень небольшая часть решений обеспечивает достижение цели управления. Это обстоятельство приводит к значительному увеличению времени поиска решения. С целью увеличения эффективности алгоритма поиска оптимального решения метод вариационного генетического программирования использует принцип малых вариаций базисного решения, заимствованный из метода сетевого оператора [8-12]. Согласно данному принципу исследователь задает первоначально базисное решение, для задач синтеза систем управления это решение, в первую очередь, должно обеспечить достижение цели управления. Начальное множество возможных решений генерируется как множество наборов вариаций базисного решения. Эволюционный алгоритм поиска выполняет все необходимые операции, в частности, если используется генетический алгоритм, то операции скрещивания и мутации, на наборах малых вариаций базисного решения. В процессе поиска оптимального решения базисное решение заменяется на наилучшее найденное к этому моменту решение.

Метод вариационного генетического программирования сравнивался с методом генетического программирования [3] и показал свою эффективность при решении задачи синтеза оптимального управления. Методом вариационного генетического программирования решено несколько задач синтеза управления, в частности, задача оптимальной парковки мобильного робота из различных начальных условий с учетом пространственных ограничений [1]. Настоящая работа посвящена продолжениям исследований метода вариационного генетического программирования для синтеза систем управления. В работе рассматривается популярная для мобильных роботов задача синтеза оптимального управления движением вдоль пространственной траектории. Особенностью задачи является необходимость получения одной системы управления, обеспечивающей точное движение робота по различным пространственным траекториям.

Задача синтеза управления движением вдоль пространственной траектории

Рассмотрим формальную постановку задачи синтеза управления траекторным движением. Задана математическая модель объекта управления.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где \mathbf{x} - вектор состояния объекта, \mathbf{u} - вектор управления, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbb{R}^m$, U - замкнутое ограниченное множество, $m \leq n$.

Задана область начальных условий

$$\mathbf{x}(0) \in X_0 \subseteq \mathbb{R}^n. \quad (2)$$

Заданы k пространственных траекторий движения в форме $n-r$ -мерных многообразий

$$\eta_{i,j}(\mathbf{x}) = 0, \quad i = \overline{1, r}, \quad j = \overline{1, k}. \quad (2)$$

Траектории (2) называем пространственными, так как они не зависят от времени.

Вместе с траекториями (2) заданы также начальная и конечная точки

$$\mathbf{x}^{0,j}, \mathbf{x}^{f,j}, \eta_{i,j}(\mathbf{x}^{0,j}) = 0, \eta_{i,j}(\mathbf{x}^{f,j}) = 0, \quad i = \overline{1, r}, \quad j = \overline{1, k}. \quad (3)$$

Необходимо найти управление в форме

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad (4)$$

где $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ - искомая синтезирующая функция, $\mathbf{h}(\mathbf{x}): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, удовлетворяющая следующим свойствам:

- $\forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{h}(\mathbf{x}) \in U$;
- $\forall \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 \in X_0 \subseteq \mathbb{R}^n$ решение $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)$ системы $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}))$ должно обеспечивать минимум функционалу и удовлетворять условиям попадания в начальную и конечную точки траектории

$$J(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)) = \sum_{j=1}^k \sqrt{\sum_{i=1}^r \int_0^{t_{f,j}} \eta_{i,j}^2(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0))} \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\mathbf{x}(t_{0,j}, \mathbf{x}^0) = \mathbf{x}^{0,j}, \quad \mathbf{x}(t_{f,j}, \mathbf{x}^0) = \mathbf{x}^{f,j}, \quad 0 \leq t_{0,j} < t_{f,j} < \infty. \quad (6)$$

В качестве технической стратегии реализации системы управления, обеспечивающей движение по траектории, зададим точки на каждой заданной траектории

$$T_j = \left(\mathbf{x}^{0,j}, \mathbf{x}^{1,j}, \dots, \mathbf{x}^{p_j,j} = \mathbf{x}^{f,j} \right), \quad j = \overline{1, k}. \quad (7)$$

где

$$\forall \mathbf{x}^{v,j} \in T_j \quad \eta_{i,j}(\mathbf{x}^{v,j}) = 0, \quad j = \overline{1, k}, \quad (8)$$

$$\left\| \mathbf{x}^{v,j} - \mathbf{x}^{v-1,j} \right\|_2 \leq d_j, \quad v = \overline{1, p}, \quad j = \overline{1, k}, \quad (9)$$

d_j - заданная величина, определяющая количество точек p_j на траектории T_j , $j = \overline{1, k}$.

Система управления движением объекта по траектории представляет собой систему стабилизации объекта относительно заданной точки из множества (7) с дополнительным условием переключения точек.

Для системы стабилизации относительно пространственной точки синтезирующая функция (4) в качестве аргумента должна использовать отклонение от заданной целевой точки

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}\left(\mathbf{x}^{v,j} - \mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)\right), \quad (10)$$

В данном случае система управления должна дополнительно включать подсистему переключения целевых точек, например, по условию ее достижения или по истечении некоторого заданного промежутка времени

$$v \leftarrow v + 1, \text{ если } \left(\left\| \mathbf{x}^{v,j} - \mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0) \right\|_2 \leq \varepsilon \right) \vee (t - t_{v-1} < \Delta t), \quad (11)$$

где ε и Δt - заданные положительные величины, определяющие точность и скорость движения по траектории.

Для решения задачи (1-6) синтеза системы управления движением объекта по пространственной траектории со стратегией (7)-(11) стабилизации относительно точек траектории используем метод вариационного генетического программирования [1], [3].

Пример синтеза системы управления движением по траектории

В качестве примера рассмотрим задачу синтеза системы управления движением мобильного робота по заданным пространственным траекториям.

Математическая модель объекта управления имеет следующий вид

$$\dot{x} = u_1 \cos(\theta), \quad \dot{y} = u_1 \sin(\theta), \quad \dot{\theta} = \frac{u_2}{L} \tan(u_2), \quad (12)$$

где L - постоянный параметр объекта.

Управление объектом ограничено в виде

$$u_1^- \leq u_1 \leq u_1^+, \quad u_2^- \leq u_2 \leq u_2^+. \quad (13)$$

Для системы (12) задано множество начальных условий

$$X_0 = \left\{ \left[x_{0,1} \quad y_{0,1} \quad \theta_{0,1} \right]^T, \dots, \left[x_{0,M} \quad y_{0,M} \quad \theta_{0,M} \right]^T \right\}. \quad (14)$$

Заданы пространственные траектории в виде

$$\eta_j(x, y) = 0, \quad j = \overline{1, k}. \quad (15)$$

В качестве траекторий рассматривались $k = 4$ траектории, две из которых были гладкими, а две – с разрывами по производным.

Синтез системы управления выполнялся методом вариационного генетического программирования. Рассматривалась стратегия управления стабилизации точек траектории. При вычислительном эксперименте были приняты следующие значения параметров модели и задачи: $L = 4$, $u_1^- = -5$, $u_1^+ = 5$, $u_2^- = -\pi/2$, $u_2^+ = \pi/2$, $M = 4$, $x_{0,1} = -0,5$, $y_{0,1} = -0,25$, $\theta_{0,1} = 0$, $x_{0,2} = -0,25$, $y_{0,2} = -0,25$, $\theta_{0,2} = 0$, $x_{0,3} = -0,5$, $y_{0,3} = 0,25$, $\theta_{0,3} = 0$, $x_{0,4} = -0,25$, $y_{0,4} = 0,25$, $\theta_{0,4} = 0$, $\varepsilon = 0,01$, $\Delta t = 2$ с., $d = 0,32$, $p = 32$.

В результате синтеза была получена следующая синтезирующая функция:

$$u_i = \begin{cases} u_i^-, & \text{если } \tilde{u}_i < u_i^- \\ u_i^+, & \text{если } \tilde{u}_i > u_i^- \\ \tilde{u}_i, & \text{иначе} \end{cases} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1 &= \arctan\left(f_{3,3}\left(q_1, \delta, \operatorname{sgn}(A)\left(e^{|A|} - 1\right)\right) - f_{3,3}^3\left(q_1, \delta, \operatorname{sgn}(A)\left(e^{|A|} - 1\right)\right)\right), \\ \tilde{u}_2 &= f_{3,1}\left(\operatorname{sgn}(\sin(\delta))e^{-|\sin(\delta)|}, \sin^3\left(e^{q_1} - e^{3q_1}\right), q_2\right), \\ \delta &= \theta - \arctan\left(\frac{y^{v,j} - y}{x^{v,j} - x}\right), \quad A = \mu\left(\sqrt{\sin^2(q_2) + \ln^2|\sin(\delta)|}\right), \quad \mu(\alpha) = \begin{cases} \alpha, & \text{если } |\alpha| < 1 \\ \operatorname{sgn}(\alpha), & \text{иначе} \end{cases}, \\ f_{3,3}(\alpha, \beta, \gamma) &= \begin{cases} \beta - \alpha, & \text{если } |\alpha - \beta| < |\alpha - \gamma| \\ \gamma - \alpha, & \text{иначе} \end{cases}, \quad f_{3,1}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} \gamma, & \text{если } \alpha < \beta \\ -\gamma, & \text{иначе} \end{cases}, \\ q_1 &= 11,29565, \quad q_2 = 12,13770. \end{aligned}$$

На рис 1-4 приведены графики движения мобильного робота с полученным управлением по заданным пространственным траекториям. Там же приведены целевые точки траекторий, помеченные маркерами.

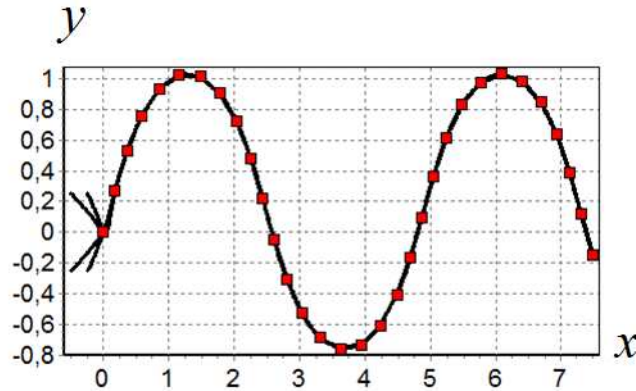


Рис. 1. Движение робота по траектории 1

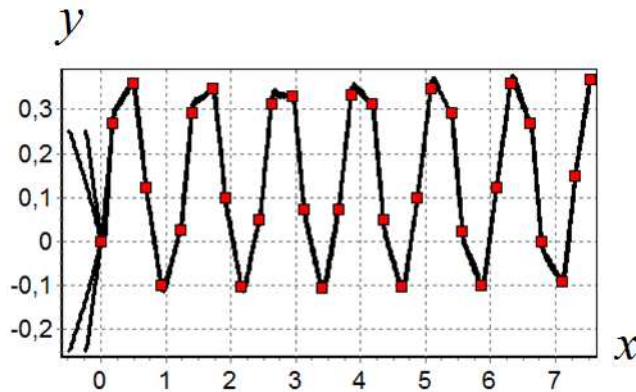


Рис. 2. Движение робота по траектории 2

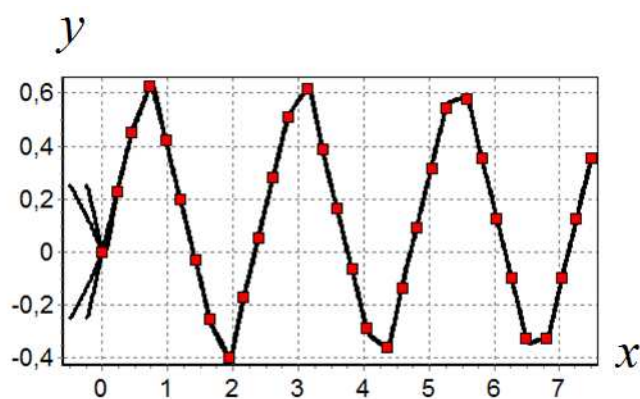


Рис. 3. Движение робота по траектории 3

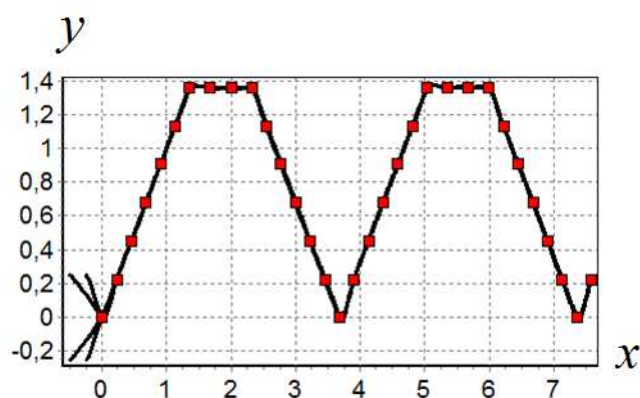


Рис. 4. Движение робота по траектории 4

Как видно из результатов моделирования полученная нелинейная система управления обеспечивает достаточно качественное движение робота по заданным пространственным траекториям. Точность прохождения целевых точек траектории достаточно высока. Начальные условия практически не влияют на качество управления.

Работа выполнена по гранту РФФИ № 14-08-00008-а.

Список литературы

1. Ибадулла С.И., Дивеев А.И., Софронова Е.А. Решение задачи синтеза системы управления методом вариационного генетического программирования// Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/113-11697>.
2. Ибадулла С.И. Оптимальное решение задачи синтеза систем управления с помощью метода вариационного генетического программирования // Материалы традиционной V Республиканской научно-практической конференции «Образования. Наука. Инновация: Актуальные вопросы и его развитие» - Кызылорда. 29 ноябрь 2014г. – С. 337 – 341.
3. Дивеев А.И., Ибадулла С.И. Сравнение методов генетического и вариационного генетического программирования на примере задачи синтеза управления для модели

«Хищник-жертва»// Эл. научно-техн. изд. Наука и образование. Эл. № ФС 77 48211 Гос. рег. № 0421200025 ISSN 1994-0408 #5 май, 2014 г. DOI 10.7463/ 0514.0709252.

4. Дивеев А.И., Ибадулла С.И. Метод вариационного генетического программирования для синтеза систем управления // Труды одиннадцатого международного симпозиума Интеллектуальные системы INTELS'2014/ под ред. К.А. Пупкова, Москва, 30 июня-04 июля 2014 г. С. 74-77.

5. Дивеев А.И., Ибадулла С.И. Численный метод вариационного генетического программирования для синтеза системы управления мобильного робота/ // Труды Международного симпозиума Надежность и качество ; под ред. Н.К. Юркова. – Пенза - 26 мая – 01 июня. - 2014. - Т. 1. - С. 30-35.

6. Дивеев А.И., Ибадулла С.И., Конырбаев Н.Б. Синтез системы управления методом символьной регрессии // Сборник трудов международной научно-практической конференции, посвященной научно-педагогической деятельности академика А.Д.Тайманова «Современная математика: проблемы и приложения» - Алматы. 24-26 октября 2013г.

7. Koza J.R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. Cambridge, Massachusetts, London, MA: MIT Press. 1992. 819 p.

8. Дивеев А.И., Софронова Е.А. Метод сетевого оператора и его применение в задачах управления. М.: РУДН, 2012. 182 с.

9. Дивеев А.И. Численный метод сетевого оператора для синтеза системы управления с неопределенными начальными значениями// Известия РАН ТиСУ. 2012, № 2. С. 63-78.

10. Дивеев А. И., Атиенсия Вильягомес Х. М. Метод сетевого оператора для синтеза интеллектуальной системы управления динамическим объектом // Cloud of Science. – 2014. – Т.1. – № 2. – С. 191-201.

11. Diveev A.I., Sofronova E.A. Numerical method of network operator for multiobjective synthesis of optimal control system // Proceedings of Seventh International Conference on Control and Automation (ICCA'09) Christchurch, New Zealand, December 9-11, 2009. P. 701-708.

12. Diveev A.I., Sofronova E.A. The Network Operator Method for Search of the Most Suitable Mathematical Equation// Chapter in the book Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications/ Edited by Shangce Gao. Intech. Printed 2012. February, Croatia. P. 19-42.

Рецензенты:

Никутьчев Е.В., д.т.н., профессор, проректор по научной работе НОУ ВПО Московский технологический институт, г. Москва;

Демидова Л.А., д.т.н., профессор кафедры вычислительной и прикладной математики ФГБОУ ВПО Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань.