УДК 62.50 519.6

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ МЕТОДОМ СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА

Дивеев А.И.[1], Шмалько Е.Ю.[1]

[1]Федеральное 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

Рассматривается задача синтеза системы управления группой объектов. Приведена математическая формулировка задачи. В задаче необходимо найти многомерную функцию, которая по текущему состоянию всех объектов вычисляет значения управлений для достижения цели каждым объектом управления с наилучшим значением показателя качества управления. Мы рассматриваем группу объектов как один объект управления с расширенными векторами состояния и управления, что означает, что каждый объект в группе имеет информацию о состоянии других объектов в группе. Такой подход наряду с другими способами многообъектного управления является перспективным в виду высокого развития современных технологий и постоянного удешевления комплектующих для их создания. Для решения задачи используется метод сетевого оператора. Основная научная ценность и актуальность представленного материала состоит в формализации задачи для управления группой роботов и получение результата в виде формулы для управления. Приведен пример решения задачи синтеза управления методом сетевого оператора двумя мобильными роботами.

Ключевые слова: синтез системы управления, многообъектное управление, метод сетевого оператора, генетический алгоритм, управление группой роботов

CONTROL SYSTEM SYNTHESIS FOR ROBOTIC TEAM BY NETWORK OPERATOR

Diveev A.I.[1], Shmalko E.Y.[1]

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

The problem of the synthesis of a control system for a group of robots is considered. The mathematical formulation of the problem is given. We have to find a multidimensional function that uses the current state of all objects to calculate the control values that allow each robot to achieve the objectives with the best quality functional value. We consider a robotic team as one object with extended vectors of state and control. This means that each object in the team have a full range of information about the other members of the team. Such approach as well as other methods of multi-object control can be promising as far as technologies become more and more developed and the cost of materials for its production becomes low. A network operator method is used to solve the problem. The main scientific value and actuality of the presented paper concerns the formal description of the problem of control of the robotic team and as a result receiving a mathematical expression of control. An example of solving the problem of a control system synthesis for the group of two mobile robots is given.

Keywords: control system synthesis, multi-object control, network operator method, genetic algorithm, robotic team

При решении задачи синтеза управления необходимо найти математическое выражение, которое описывает функциональную зависимость управления от координат пространства состояния объекта управления. Найденная функция должна для любого начального состояния объекта из некоторой заданной области находить управление, которое обеспечит достижение цели управления с оптимальным значением заданного критерия качества. В последнее время задачу синтеза системы управления стало возможным решать с помощью методов символьной регрессии [5,6,8]. Мы применяем для решения задачи синтеза управления метод сетевого оператора [1-4], который представляет математическое выражение в форме целочисленной матрицы. Одним из преимуществ метода сетевого оператора перед другими методами является использование принципа базисного решения. Согласно этому принципу множество возможных решений задается в виде одного базисного решения и множества его малых вариаций. Эволюционные преобразования множества возможных решений и поиск оптимального решения осуществляются на множестве малых вариаций базисного решения. Успешность задания базисного решения определяет скорость сходимости алгоритма поиска. Решение задачи синтеза управления имеет смысл только для множества начальных состояний объекта управления, потому что найденная синтезирующая функция описывает зависимость управления от состояния объекта. Для того, чтобы решить эту проблему, метод сетевого оператора оценивает каждое возможное решение по выполнению терминальных условий и значениям критерия качества для множества начальных состояний объекта.

В настоящей работе мы применяем метод сетевого оператора для решения задачи синтеза системы управления группой объектов. Мы рассматриваем группу объектов как один объект управления с расширенными векторами состояния и управления. Такой подход, когда каждый объект в группе объектов является самостоятельной единицей, имеющей полное знание о состоянии других объектов в группе, является на наш взгляд перспективным в виду высокого развития современных технологий и удешевления комплектующих, которые еще недавно стоили дорого.

Дополнительным ограничением задачи являются динамические ограничения, определяющие отсутствие столкновений объектов с учетом их габаритов во время процесса управления. Мы применили метод сетевого оператора для решения задачи управления двумя мобильными роботами. Метод позволил найти синтезирующую функцию, которая обеспечивает достижение цели каждым объектом, при этом удовлетворено условие отсутствия столкновений роботов и обеспечена хорошая оценка качества управления.

Задача синтеза управления группой объектов

Заданы модели N объектов управления

$$\dot{\mathbf{x}}^i = \mathbf{f}^i\left(\mathbf{x}^i, \mathbf{u}^i\right),\ i = \overline{1, N}, \tag{1}$$

где $\mathbf{x}^i$ - вектор состояния объекта i, $\mathbf{u}^i$ - вектор управления объекта i, $\mathbf{x}^i \in \mathrm{R}^{n_i}$, $\mathbf{u}^i \in \mathrm{U}_i \subseteq \mathrm{R}^{m_i}$, $m_i \le n_i$, U_i - компактные множества в соответствующих векторных пространствах R^{m_i}, $i = \overline{1, N}$.

Заданы области начальных значений

$$\mathbf{x}^i(0) \in \mathrm{X}_0^i \subseteq \mathrm{R}^{n_i},\ i = \overline{1, N}, \tag{2}$$

Заданы терминальные условия

$$\varphi_{j,i}\left(\mathbf{x}^i\left(t_f^i\right)\right)=0,\ j=\overline{1,r_i},\ i=\overline{1,N}. \quad (3)$$

где $t_f^i \le t^+$, t^+ - максимальная длительность процесса управления.

Заданы кинематические уравнения, описывающие положения габаритных точек объектов

$$\mathbf{y}^i = \mathbf{g}^i\left(\mathbf{x}^i\right),\ i=\overline{1,N}, \quad (4)$$

где $\mathbf{y}^i \in \mathrm{R}^{l_i}$, $i=\overline{1,N}$.

Заданы ограничения

$$b_i\left(\mathbf{y}^i,\mathbf{y}^j\right)<0,\ i\ne j,\ i,j=\overline{1,N}, \quad (5)$$

где $b_i\left(\mathbf{y}^i,\mathbf{y}^j\right): \mathrm{R}^{l_i}\times\mathrm{R}^{l_j}\to\mathrm{R}^1$.

Выполнение условия (5) определяет отсутствие столкновения между объектами i и j.

Заданы функционалы качества

$$J_i=\int_0^{t_f^i} f_0^i\left(\mathbf{x}^i(t),\mathbf{u}^i(t)\right)dt\to\min,\ i=\overline{1,N}, \quad (6)$$

где $f_0^i\left(\mathbf{x}^i(t),\mathbf{u}^i(t)\right)$ - ограниченные снизу непрерывные функции, $i=\overline{1,N}$.

Необходимо найти синтезирующую функцию управления в виде

$$\mathbf{u}^i=\mathbf{h}^i\left(\mathbf{x}^1,\dots,\mathbf{x}^N\right), \quad (7)$$

где $\mathbf{h}^i\left(\mathbf{x}^1,\dots,\mathbf{x}^N\right): \mathrm{R}^{n_1}\times\dots\times\mathrm{R}^{n_N}\to\mathrm{R}^{m_i}$.

Синтезирующая функция (7) должна обеспечивать достижение системой (1) такого целевого состояния

$$\dot{\mathbf{x}}^i=\mathbf{f}^i\left(\mathbf{x}^i,\mathbf{h}^i\left(\mathbf{x}^1,\dots,\mathbf{x}^N\right)\right),\ i=\overline{1,N}, \quad (8)$$

$\forall\mathbf{x}^i(0)\in\mathrm{X}_0^i\subseteq\mathrm{R}^{n_i}$, $i=\overline{1,N}$, $\mathbf{h}^i\left(\mathbf{x}^1,\dots,\mathbf{x}^N\right)\in\mathrm{U}_i$, $\exists t_f^i\le t^+$, при котором выполняются условия (3) - (5) и обеспечивается минимум функционала (6).

Для решения задачи используем численный метод сетевого оператора.

Метод сетевого оператора

Подробно метод сетевого оператора описан в работах [1–4]. Применение метода сетевого оператора не предполагает никаких аналитических преобразований исходной постановки задачи. Единственным изменением задачи является замена множества начальных значений конечным множеством точек начальных значений:

$$\mathrm{X}_0^i=\left\{\mathbf{x}^{i,0,1},\dots,\mathbf{x}^{i,0,K_i}\right\},\ i=\overline{1,N}, \quad (9)$$

Проверка терминальных условий (3), ограничений (5) и вычисление критерия качества (6) выполняется для каждого начального значения из (9) и терминальных условий. Окончательная оценка возможного решения определяется по сумме значений функционалов (6) для всех начальных значений из (9) с учетом штрафа за нарушение ограничений (5) и промаха при выполнении терминальных условий (3).

Сетевой оператор является структурой данных, которая позволяет описывать математические выражения в форме целочисленной матрицы.

Для организации поиска решения метод сетевого оператора использует принцип вариаций базисного решения. Метод использует четыре малые вариации, такие как замена унарной операции, замена бинарной операции, добавление унарной операции, удаление унарной операции.

Для представления вариаций используем вектор из четырех компонент

$$\mathbf{w} = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4]^T, \tag{10}$$

где w_1 - номер малой вариации, w_2, w_3 - номер строки и столбца, w_4 - номер унарной или бинарной операции.

Для реализации поиска оптимального сетевого оператора $\tilde{\mathbf{\Psi}}$ используется упорядоченное множество элементарных вариаций

$$\mathrm{W}_i = \left(\mathbf{w}^{i,1}, \ldots, \mathbf{w}^{i,l}\right), \tag{11}$$

$$\mathrm{W}_i \circ \mathbf{\Psi} = \mathbf{w}^{i,l} \circ \ldots \circ \mathbf{w}^{i,1} \circ \mathbf{\Psi}.$$

Поиск начинаем с сетевого оператора $\mathbf{\Psi}^0$, который определяется исследователем по принципу максимальной близости к желаемому решению. Такой сетевой оператор называем базовым сетевым оператором.

Далее формируем множество вариаций $\mathrm{W}_i = \left(\mathbf{w}^{i,1}, \ldots, \mathbf{w}^{i,l}\right)$, $i = \overline{1, H}$, и вычисляем значения целевых функций для каждого нового сетевого оператора $f_0\left(\mathrm{W}_i \circ \mathbf{\Psi}^0\right)$.

В случае, если мы находим сетевой оператор, имеющий значение целевой функции лучшее, чем у базового сетевого оператора, тогда производим замену базового сетевого оператора на новый найденный сетевой оператор.

Для поиска можно использовать любой эволюционный алгоритм. В наших исследованиях мы использовали генетический алгоритм, который осуществлял поиск оптимального решения с помощью генетических операторов скрещивания и мутации над упорядоченными множествами элементарных вариаций (12).

Пример

В качестве примера рассмотрим синтез системы управления группой из двух мобильных роботов.

Математическая модель объектов управления имеет следующий вид [7]:

$$\dot{x}_i = u_{1,i}\cos(\theta_i),$$

$$\dot{y}_i = u_{1,i}\sin(\theta_i),$$

$$\dot{\theta}_i = \frac{u_{1,i}}{D_i}\tan(u_{2,i}),$$

$$i = 1,2,$$

где x_i, y_i - координаты центра масс, θ_i - угол, образуемый вектором скорости, D_i - общий геометрический параметр робота i.

Заданы начальные условия

$$\mathrm{X}_0^i = \left\{\begin{bmatrix} x_{0,1,i} & y_{0,1,i} & \theta_{0,1,i}\end{bmatrix}^T, \ldots, \begin{bmatrix} x_{0,K_i,i} & y_{0,K_i,i} & \theta_{0,K_i,i}\end{bmatrix}^T\right\},\ i = 1,2.$$

Заданы терминальные условия

$$x_i\left(t_f^i\right) = x_i^f,\ y_i\left(t_f^i\right) = y_i^f,\ \theta_i\left(t_f^i\right) = \theta_i^f .$$

Заданы ограничения на управления

$$u_{1,i}^- \le u_{1,i} \le u_{1,i}^+,\ u_{2,i}^- \le u_{2,i} \le u_{2,i}^+ .$$

Мобильный робот представляет собой прямоугольник. Координаты углов робота i определяем из соотношений

$$\tilde{x}_{j,i} = x'_{j,i}\cos(\theta_i) - y'_{j,i}\sin(\theta_i),$$

$$\tilde{y}_{j,i} = x'_{j,i}\sin(\theta_i) + y'_{j,i}\cos(\theta_i),$$

где j - номер угла робота, $j = \overline{1,4}$.

$$x'_{1,i} = x_i\cos(\theta_i) + y_i\sin(\theta_i) + D_i/2,$$

$$y'_{1,i} = -x_i\sin(\theta_i) + y_i\cos(\theta_i) + D_i/4,$$

$$x'_{2,i} = x_i\cos(\theta_i) + y_i\sin(\theta_i) - D_i/2,$$

$$y'_{2,i} = -x_i\sin(\theta_i) + y_i\cos(\theta_i) + D_i/4,$$

$$x'_{3,i} = x_i\cos(\theta_i) + y_i\sin(\theta_i) - D_i/2,$$

$$y'_{3,i} = -x_i\sin(\theta_i) + y_i\cos(\theta_i) - D_i/4,$$

$$x'_{4,i} = x_i\cos(\theta_i) + y_i\sin(\theta_i) + D_i/2,$$

$$y'_{4,i} = -x_i \sin(\theta) + y_i \cos(\theta) - D_i / 4.$$

Условие столкновения угла k, $1 \le k \le 4$, робота i с роботом j, $i \ne j$, определяем из соотношений

$$(\Delta_1(k,i,j)\Delta_2(k,i,j) > 0) \wedge (\Delta_2(k,i,j)\Delta_3(k,i,j) > 0) \wedge (\Delta_3(k,i,j)\Delta_4(k,i,j) > 0),$$

$$k = 1,\ldots,4,$$

где

$$\Delta_1(k,i,j) = (\tilde{x}_{1,j} - \tilde{x}_{k,i})(\tilde{x}_{2,j} - \tilde{x}_{1,j}) + (\tilde{y}_{1,j} - \tilde{y}_{k,i})(\tilde{y}_{2,j} - \tilde{y}_{1,j}),$$

$$\Delta_2(k,i,j) = (\tilde{x}_{2,j} - \tilde{x}_{k,i})(\tilde{x}_{3,j} - \tilde{x}_{2,j}) + (\tilde{y}_{2,j} - \tilde{y}_{k,i})(\tilde{y}_{3,j} - \tilde{y}_{2,j}),$$

$$\Delta_3(k,i,j) = (\tilde{x}_{3,j} - \tilde{x}_{k,i})(\tilde{x}_{4,j} - \tilde{x}_{3,j}) + (\tilde{y}_{3,j} - \tilde{y}_{k,i})(\tilde{y}_{4,j} - \tilde{y}_{3,j}),$$

$$\Delta_4(k,i,j) = (\tilde{x}_{4,j} - \tilde{x}_{k,i})(\tilde{x}_{1,j} - \tilde{x}_{4,j}) + (\tilde{y}_{4,j} - \tilde{y}_{k,i})(\tilde{y}_{1,j} - \tilde{y}_{4,j}).$$

Аналогично определяются условия столкновения угла k, $1 \le k \le 4$, робота j с роботом i, $i \ne j$, определяем из соотношений

$$(\Delta_1(k,j,i)\Delta_2(k,j,i) > 0) \wedge (\Delta_2(k,j,i)\Delta_3(k,j,i) > 0) \wedge (\Delta_3(k,j,i)\Delta_4(k,j,i) > 0),$$

$$k = 1,\ldots,4.$$

При выполнении условий столкновения углом k робота i с роботом j определяем величину штрафа

$$p(k,i,j) = \min\left\{\sqrt{(\tilde{x}_{k,i} - \tilde{x}_{1,j})^2 + (\tilde{y}_{k,i} - \tilde{y}_{1,j})^2},\right.$$

$$\sqrt{(\tilde{x}_{k,i} - \tilde{x}_{2,j})^2 + (\tilde{y}_{k,i} - \tilde{y}_{2,j})^2},$$

$$\sqrt{(\tilde{x}_{k,i} - \tilde{x}_{3,j})^2 + (\tilde{y}_{k,i} - \tilde{y}_{3,j})^2},$$

$$\left.\sqrt{(\tilde{x}_{k,i} - \tilde{x}_{4,j})^2 + (\tilde{y}_{k,i} - \tilde{y}_{4,j})^2}\right\}.$$

В отсутствии столкновения штраф равнялся нулю.

Критерием качества управления являлось суммарное время попадания в терминальные условия с учетом штрафов за столкновения и точности попадания по всем начальным значениям.

При поиске решения использовали следующие параметры модели. Число роботов $N = 2$. Параметр размера робота $D_1 = D_2 = 4$. Начальные условия $x_{0,1,1} = -4$, $y_{0,1,1} = 4$,

$\theta_{0,1,1} = 0$, $x_{0,2,1} = 4$, $y_{0,2,1} = 4$, $\theta_{0,2,1} = 0$, $x_{0,1,2} = -4$, $y_{0,1,1} = 2$, $\theta_{0,1,1} = 0$, $x_{0,2,2} = 4$, $y_{0,2,1} = 2$, $\theta_{0,2,1} = 0$.

Терминальные условия: $x_1^f = 0$, $y_1^f = 0$, $\theta_1^f = 0$, $x_2^f = 5$, $y_2^f = 0$, $\theta_2^f = 0$.

Ограничения на управление: $u_{1,1}^- = -5$, $u_{1,1}^+ = 5$, $u_{2,1}^- = -1$, $u_{2,1}^+ = 1$, $u_{1,2}^- = -5$, $u_{1,2}^+ = 5$, $u_{2,2}^- = -1$, $u_{2,2}^+ = 1$.

При вычислениях был использован генетический алгоритм со следующими значениями параметров: мощность начального множества возможных решений 1024, число поколений 128, число скрещиваемых пар в одном поколении 128, число векторов вариаций для одного решения 12, число поколений между сменой базисного решения 24, вероятность мутации 0.7, размерность матрицы сетевого оператора 32×32.

Первоначально для управления было задано тривиальное базисное решение в виде

$$u_{1,1} = q_1\left(x_1^f - x_1\right) + q_2\left(y_1^f - y_1\right) + q_3\left(\theta_1^f - \theta_1\right),$$

$$u_{2,1} = q_1\left(x_1^f - x_1\right) + q_2\left(y_1^f - y_1\right) + q_3\left(\theta_1^f - \theta_1\right),$$

$$u_{1,2} = q_4\left(x_2^f - x_2\right) + q_5\left(y_2^f - y_2\right) + q_6\left(\theta_2^f - \theta_2\right).$$

$$u_{2,2} = q_4\left(x_2^f - x_2\right) + q_5\left(y_2^f - y_2\right) + q_6\left(\theta_2^f - \theta_2\right),$$

где $q_i = 1$, $i = 1, \ldots, 6$.

Вместе с поиском структуры методом сетевого оператора этим же генетическим алгоритмом искали значения параметров $q_1, \ldots, q_6$. Для алгоритма поиска параметров было задано 4 бита для целой части числа и 12 бит для дробной части числа.

При поиске решения было сделано около 10 запусков. Каждый запуск использовал новое базисное решение, которое было отобрано как наилучшее решение на предыдущем запуске. Время вычисления, затраченное на один запуск, составляло 35 мин. Вычисления выполнялись на компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i7-2640M CPU @ 2.80GHz 2.80 GHz.

В результате вычислений было получено следующее решение

$$u_{i,j} = \begin{cases} u_{i,j}^-, \text{ if } \tilde{u}_{i,j} < u_{i,j}^- \\ u_{i,j}^+, \text{ if } \tilde{u}_{i,j} > u_{i,j}^+ \\ \tilde{u}_{i,j}, \text{ otherwise} \end{cases}, \ i, j = 1,2,$$

где

$$\tilde{u}_{1,1} = C\left(1-e^{-C^2}\right)+\max\{D,\cos(\delta_2),1\}+\delta_4^3+$$

$$\mu(D)+\operatorname{sgn}(q_3\delta_3)+q_3\delta_3\left(1-e^{-q_3^2\delta_3^2}\right)+\ln|q_5|,$$

$$\tilde{u}_{2,1} = \min\{C,\operatorname{sgn}(\max\{D,\cos(\delta_2),1\}),\cos(q_5\delta_5\operatorname{sgn}(\delta_4))\},$$

$$\tilde{u}_{1,2} = A+\cos(\delta_3)+\operatorname{sgn}(D)+\operatorname{sgn}(\delta_4)\sqrt{|\delta_4|}+\frac{1}{q_4}+\left(\min\left\{q_3^2\delta_3^2,q_6\delta_6\operatorname{sgn}(q_5\delta_5\operatorname{sgn}(\delta_4))\right\}\right)^2,$$

$$\tilde{u}_{2,2} = \tilde{u}_{1,2}-\tilde{u}_{1,2}^3+\mu(q_3\delta_3)+\mu\left(\min\left\{E,q_3^2\delta_3^2,q_6\delta_6\operatorname{sgn}(q_5\delta_5\operatorname{sgn}(\delta_4)),\mu(\delta_2)\right\}\right),$$

$$C=\operatorname{sgn}\left(\min\left\{D^3,q_3\delta_3\right\}\right)\ln\left(\left|\min\left\{D^3,q_3\delta_3\right\}\right|+1\right)+\operatorname{sgn}(A)e^{-|A|}+\operatorname{sgn}(q_3\delta_3)\ln(|q_3\delta_3|+1),$$

$$D=\max\left\{\arctan\left(\min\left\{q_3^2\delta_3^2,q_6\delta_6\operatorname{sgn}(q_5\delta_5\operatorname{sgn}(\delta_4))\right\}\right),\right.$$

$$\left.\min\{B,F\},\frac{1}{1+e^{-q_6\delta_6\operatorname{sgn}(q_5\delta_5\operatorname{sgn}(\delta_4))}},q_5^2\delta_5^2,e^{|\delta_4|},1\right\},$$

$$A=\operatorname{sgn}(q_3\delta_3)e^{-|q_3\delta_3|}+q_5\delta_5\operatorname{sgn}(\delta_4)++q_4\delta_4e^{q_3}+\operatorname{sgn}(B),\quad \mu(a)=\begin{cases}a, \text{ if } |a|<1\\ \operatorname{sgn}(a), \text{ otherwise}\end{cases}$$

$$B=\max\left\{F\left(1-e^{-F^2}\right),q_5\left(1-e^{-q_5^2}\right),q_2,\delta_2\right\},\; E=\min\left\{D^3,q_3\delta_3\right\}-\left(\min\left\{D^3,q_3\delta_3\right\}\right)^3,$$

$$F=\max\left\{\delta_1,q_3\left(1-e^{-q_3^2}\right)\right\},\;\delta_1=x_1^f-x_1,\;\delta_2=y_1^f-y_1,\;\delta_3=\theta_1^f-\theta_1,\;\delta_4=x_2^f-x_2,$$

$\delta_5=y_2^f-y_2$, $\delta_6=\theta_2^f-\theta_2$, $q_1=10.666$, $q_2=4.31445$, $q_3=14.716$, $q_4=14.541$, $q_5=1.19434$, $q_6=15.33496$.

Сложное математическое выражение для синтезирующей функции управления получено из найденной оптимальной матрицы сетевого оператора.

Согласно условию задачи синтезирующая функция должна обеспечивать получения управления, которое переместит двух роботов из двух различных начальных положений в одно терминальное положение. Начальные состояния были заданы так, что при движении роботов их первого начального состояния в терминальное положение должны пересекаться (см. Рис. 2).

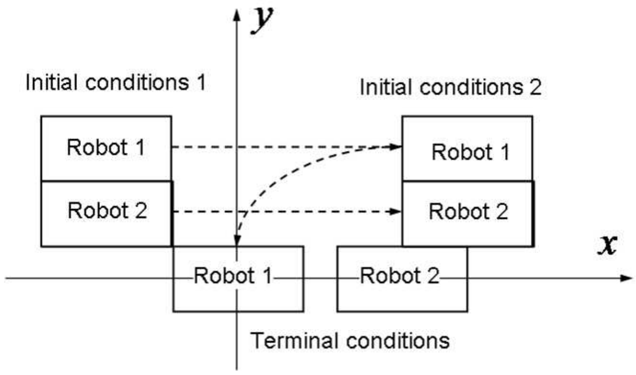

Рис.2. Начальные и конечные состояния роботов

Найденная синтезирующая функция обеспечивает такое управления, при котором оба робота их первого начального состояния перемещаются во второе состояния, а затем без пересечения траекторий перемещаются в терминальное состояние.

Результаты моделирования полученной системы управления сразу для двух начальных условий приведены на рис. 3.

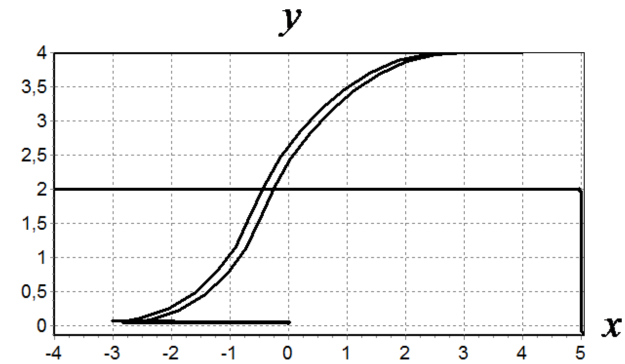

Рис.3. Траектории движения роботов из разных начальных условий

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ 13-08-00523-а and 14-08-00008-а.

Список литературы

1. Дивеев А.И. Метод сетевого оператора. М.: ВЦ РАН, 2010. 178 с.
2. Дивеев А.И., Пупков К.А., Софонова Е.А., Шмалько Е.Ю. Синтез системы управления методом сетевого оператора на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня, 2014. Труды. С.8023-8033.
3. Дивеев А.И., Шмалько Е.Ю. Формализация проблемы численного синтеза структур и параметров систем управления // Фундаментальные проблемы системной безопасности: материалы V Международной научной конференции, посвященной 90-летию со дня

рождения выдающегося ученого, генерального конструктора ракетно-космических систем академика В.Ф. Уткина. – Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2014. С.30-35.

4. Diveev A. I. A Numerical Method for Network Operator for Synthesis of a Control System with Uncertain Initial Values. Journal of Computer and Systems Sciences International, Vol. 51, No. 2, 2012, pp. 228–243.

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

6. O'Neill M., Ryan C. Grammatical Evolution. Evolutionary Automatic Programming in an Arbitrary Language. Kluwer Academic Publishers. 2002.

7. Oyama K., Nonaka K. "Model Predictive Parking Control for Nonholonomic Vehicles using Time-State Control Form". In Proceedings of 2013 ECC European Control Conference, Zurich, Switzerland, 2013, pp. 458–465.

8. Zelinka I. "Analytic programming by Means of Soma Algorithm". In Proceedings of 8th International Conference on Soft Computing Mendel02, Brno, Czech Republic, 2002, pp. 93–101.

Рецензенты:

Юрков Н.К., д.т.н., профессор, зав.кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», г.Пенза.

Никульчев Е.В., д.т.н., профессор, проректор по научной работе НОУ ВПО Московский технологический институт "ВТУ", г.Москва.