

УДК 681.5.015

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М.М. КОЖЕВНИКОВ¹, А.П. ПАШКЕВИЧ², О.А. ЧУМАКОВ³

¹Могилевский государственный университет продовольствия
пр. Шмидта, 3, Могилев, 212027, Беларусь

²Ecole des Mines de Nantes La Chantrerie
rue Alfred Kastler, 4, B.P. 20722 - F-44307 Nantes, France

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 4 марта 2010

Предложен новый метод планирования траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на использовании топологически упорядоченной нейронной сети. Метод позволяет эффективно учесть сложную форму препятствий в промышленных роботизированных комплексах и обеспечивает приемлемое для практики количество тестов на столкновение.

Ключевые слова: роботы-манипуляторы, нейронные сети, планирование траекторий/

Введение

Эффективное внедрение роботизированных технологических комплексов (РТК) тесно связано с созданием систем автономного программирования роботов. При этом одной из наиболее трудоемких задач является задача планирования траектории манипулятора в рабочей среде с препятствиями. Эта задача заключается в нахождении последовательности локаций робота, движение по которым не приводит к столкновениям с препятствиями, причем начальная и целевая конфигурации заданы заранее [1].

Большинство современных методов планирования траектории основаны на модели конфигурационного пространства робота-манипулятора, заданной в виде дискретного множества свободных от столкновений конфигураций. Это множество формируется на основе вероятностных алгоритмов [2–3] либо детерминистических алгоритмов [4–7]. Необходимо отметить, что известные детерминистические алгоритмы предполагают дискретизацию конфигурационного пространства робота с очень высоким разрешением, для того, чтобы обеспечить существование прямолинейных участков траекторий (связанность) между узлами сетки дискретизации. Это ведет к тому, что количество тестов столкновения при планировании растет экспоненциально с ростом размерности конфигурационного пространства. С другой стороны вероятностные алгоритмы позволяют обойти проблему размерности, но не учитывают форму препятствий и форму звеньев манипулятора, что приводит к реализации траекторий низкого качества с большим объемом движений, причем сходимость достигается только с некоторой вероятностью. При использовании таких алгоритмов траектория робота может быть найдена за конечное время также лишь с определенной вероятностью, т.е. свойство "полноты" решения обеспечивается лишь с определенной вероятностью [1, 4, 8].

В данной работе предложен новый метод планирования траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на детерминистической дискретизации конфигурационного пространства. В отличие от известных, этот метод учитывает

сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов. Предложенный подход основан на топологически упорядоченной нейронной сети, которая моделирует весовую функцию, характеризующую расположение робота-манипулятора относительно препятствий. В соответствии с этим подходом первоначально генерируется приближенная траектория робота, конфигурационное пространство которого дискретизировано с низким разрешением, а также предполагается отсутствие столкновений при движении робота между узлами сетки дискретизации. Если при движении робота по такой траектории зафиксировано столкновение, то матрица связей в нейронной сети модифицируется и генерируется новая траектория при неизменном разрешении сетки дискретизации. Такой процесс повторяется до тех пор, пока свободная от столкновений траектория найдена, либо предельное число итераций достигнуто. Последнее означает, что необходимо увеличить разрешение сетки дискретизации и повторить процесс поиска траектории. Такой метод в отличие от известных позволяет генерировать траектории робота без предварительной проверки его движений на столкновение, что обеспечивает приемлемое практике количество тестов столкновения при сохранении свойства "полноты" при фиксированном шаге дискретизации.

Постановка задачи

Рассмотрим робот-манипулятор с n поворотными сочленениями (рис. 1,а), в рабочей зоне которого расположено некоторое множество препятствий $B=\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$. Если конфигурационное пространство этого робота дискретизировано с разрешением N , то угол в каждом из сочленений j ($j=1:n$) может принимать дискретные значения q_{xj} ($xj \in \{1, \dots, N\}$), при этом величины q_{1j} и q_{Nj} задают нижнее и верхнее конструктивные ограничения на углы в сочленениях (рис. 1,б). Тогда дискретная модель конфигурационного пространства рассматриваемого робота может быть представлена в виде множества из N^n векторов

$$DC = \mathbf{q}_a \mid a = 1 \dots N^n, \quad (1)$$

где $\mathbf{q}_a = [q_{xj}]^T$ — дискретная конфигурация робота ($xj \in \{1, \dots, N\}$), a — одномерный индекс, значения которого вычисляются по формуле $a = N^{n-1}x_1 + N^{n-2}x_2 + \dots + xn - 3$.

Множество свободных от столкновений конфигураций робота-манипулятора определяется следующим образом:

$$DC_f = \mathbf{q}_a \in DC \mid M \mathbf{q}_a \cap B = \emptyset, \quad (2)$$

где $M(\mathbf{q}_a)$ — робот-манипулятор M , установленный в конфигурацию \mathbf{q}_a .

Прямолинейный участок траектории между двумя конфигурациями \mathbf{q}_a и \mathbf{q}_b ($a \neq b, \mathbf{q}_a, \mathbf{q}_b \in DC_f$) задается в виде множества векторов

$$\mathbf{d}_{ab} = \mathbf{d}_k \mid M \mathbf{d}_k \cap B = \emptyset, \quad (3)$$

где $\mathbf{d}_k = \mathbf{q}_a + (h/Nh)(\mathbf{q}_b - \mathbf{q}_a)$; $h=0:Nh, Nh > N$ — параметр дискретизации прямолинейного участка траектории.

Дискретная конфигурация робота $\mathbf{q}_b \in DC_f$ является соседней с конфигурацией $\mathbf{q}_a \in DC_f$, если между ними существует прямолинейный участок траектории \mathbf{d}_{ab} и индекс b удовлетворяет одному из соотношений

$$\begin{aligned} b_1 &= a - N^{n-1} \rightarrow x_1 - 1, x_2, \dots, x_n, \quad b_2 = a + N^{n-1} \rightarrow x_1 + 1, x_2, \dots, x_n, \\ \dots & \\ b_{d-1} &= a - 1 \rightarrow x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, \quad b_d = a + 1 \rightarrow x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n + 1. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, каждая конфигурация \mathbf{q}_a может иметь $d \leq 2n$ соседних конфигураций.

Траектория, соединяющая стартовую \mathbf{q}_{s1} и целевую \mathbf{q}_{sg} конфигурации робота, представляет собой последовательность, состоящую из соседних конфигураций $\mathbf{q}_{s1}, \mathbf{q}_{s2}, \dots, \mathbf{q}_{sg} \in DC_f$, и

прямолинейных участков, соединяющих эти конфигурации $d_{s_1s_2}, d_{s_1s_3}, \dots, d_{(s_g-1)s_g}$. Критерий "качества" траектории в дискретном конфигурационном пространстве зададим в виде

$$J = \sum_{k=1}^{g-1} T_{sk \ sk+1} \mathbf{d}_{sk \ sk+1}, \quad (5)$$

где $T_{sk \ (sk+1)}$ — значение весовой функции для прямолинейного отрезка траектории $\mathbf{d}_{sk \ (sk+1)}$.

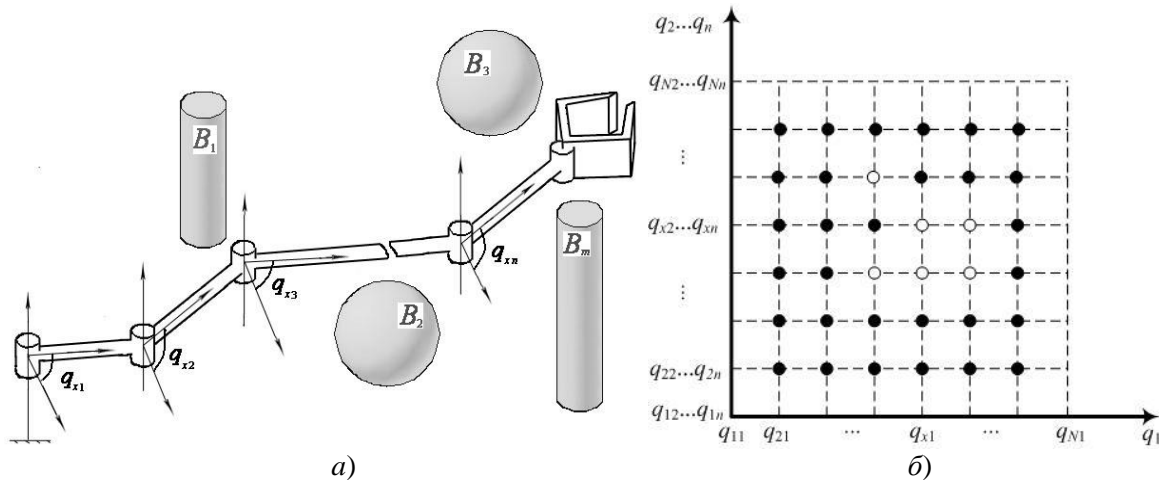


Рис. 1. Робот-манипулятор и его дискретное конфигурационное пространство

Тогда задача планирования траектории в дискретном конфигурационном пространстве может быть сформулирована следующим образом: среди всех последовательностей дискретных конфигураций $\mathbf{q}_{s1}, \mathbf{q}_{s2}, \dots, \mathbf{q}_{sg} \in DC_f$, координаты которых лежат внутри области ограниченной предельно допустимыми значениями углов в сочленениях q_{1j} и q_{Nj} ($j=1:n$) найти последовательность, на которой достигается минимума критерий (5).

Необходимо также отметить, что необходимая величина параметра дискретизации N заранее неизвестна и существенно зависит от формы препятствий в конфигурационном пространстве робота-манипулятора.

Нейросетевая модель для планирования траектории

Для решения сформулированной выше задачи планирования траектории предлагается использовать метод, основанный на топологически упорядоченной нейронной сети. Предложенная модификация нейронной сети представляет собой множество, состоящее из N^n нейронов, которые распределены над областью n -мерного конфигурационного пространства. Таким образом, каждой дискретной конфигурации робота \mathbf{q}_a ставится в соответствие нейрон с индексом a , соединенный с d соседними нейронами, имеющими индексы $b_k, k=1 \dots d$. Значения индексов b_k определяются в соответствии с (4), таким образом, расположение нейрона в системе координат нейронной сети соответствует некоторой конфигурации робота. Каждому прямолинейному участку траектории между двумя соседними конфигурациями \mathbf{q}_a и \mathbf{q}_b ставится в соответствие величина весовой связи между нейронами a и b равная T_{ab_k} . Пример такой структуры для робота с тремя степенями свободы ($n=3$) представлен на рис. 2. Здесь на вход нейрона a поступает 6 взвешенных сигналов от соседних нейронов $T_{ab_1} \phi_1, T_{ab_2} \phi_2, \dots, T_{ab_6} \phi_6$ (рис. 2,а), где $T_{ab_1} - T_{ab_6}$ весовые коэффициенты.

Также на вход каждого нейрона a поступает внешний сигнал V_a (рис. 2,б), значение которого определяется следующим образом: $V_a = -1$, если $\mathbf{q}_a \notin DC_f$, либо $\mathbf{q}_a = [q_{1j}]^T$ ($j=1:n$), либо $\mathbf{q}_a = [q_{Nj}]^T$ ($j=1:n$); $V_a = 1$ если $\mathbf{q}_a = \mathbf{q}_{sg}$; $V_a = 0$ во всех остальных случаях.

Распределение потенциалов ϕ_a ($a=1:N^n$) на выходе нейронной сети с такой структурой определяет потенциальное поле робота-манипулятора в соответствии со следующей системой уравнений:

$$\dot{\phi}_a = f_a(v_a), \quad \tau_a \frac{dv_a}{dt} = \sum_{b=1}^{N^n} T_{ab} \phi_b - T_{a0} v_a + V_a, \quad (6)$$

где $f_a(\bullet)$ — функция активации нейрона a ; v_a — значение потенциала на входе нейрона a ; ϕ_b — значение потенциала на входе нейрона b , соседнего с нейроном a ; τ_a, T_{ab}, T_{a0} — весовые коэффициенты нейронной сети.

Необходимо отметить, что в выражении (6) суммирование выполняется для всех $b=1:N^n$, однако только $d \leq 2n$ элементов под знаком суммы не равны нулю, поскольку в предлагаемой модификации нейронной сети весовые связи имеются только между соседними нейронами. В качестве функции активации нейронов использована следующая функция:

$$f_a(v_a) = \begin{cases} 0, & \text{если } v_a < 0; \\ \tanh v_a, & \text{если } v_a \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

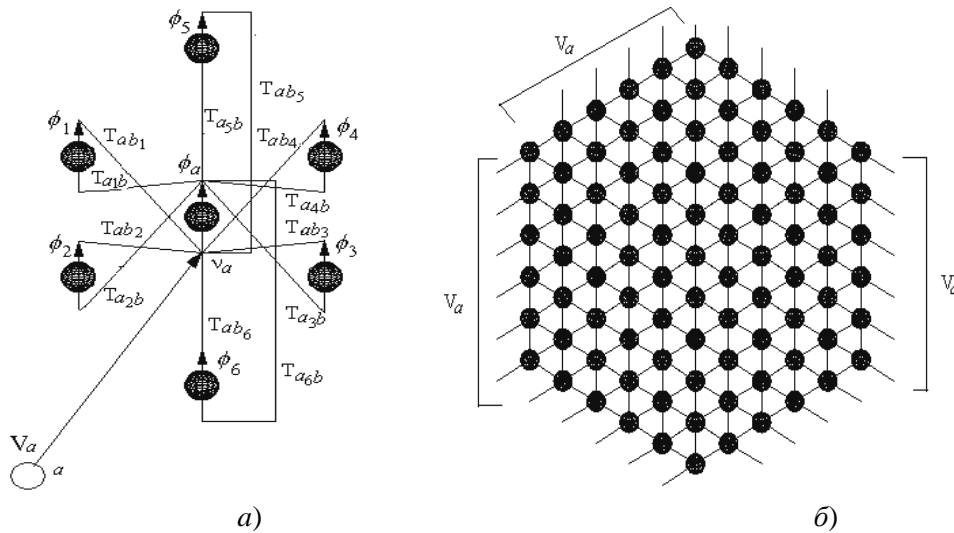


Рис. 2. Топологически упорядоченная нейронная сеть

Значения потенциалов, соответствующие для каждой конфигурации q_a , вычисляются путем численного решения (6) на основе следующей итерационной формулы:

$$\phi_a^{(l+1)} = f_a \left(\sum_{k=1}^d T_{ab_k} \phi_{b_k}^{(l)} + V_a \right), \quad (8)$$

где l — номер итерации.

Величина весовых коэффициентов T_{ab_k} выбирается, исходя из условий асимптотической устойчивости нейронной сети [8, 9]. В частности, в работе [9] показано, что при $|T_{ab_k}| < 1/3n$ обеспечивается асимптотическая устойчивость топологически упорядоченной нейронной сети с функциями активации вида (7). Таким образом, значения весовых коэффициентов устанавливаются следующим образом: $T_{ab_k} = 1/3n$, если существует прямолинейный участок траектории между конфигурациями q_a и q_{b_k} и $T_{ab_k} = 0$ в противном случае.

Вычисляемое по (8) потенциальное поле робота является унимодальным и достигает своего максимального значения $\phi_{sg}=1$ в точке, соответствующей целевой конфигурации q_{sg} [8]. Тогда траектория робота $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg}$, минимизирующая критерий "качества" (5), может быть найдена путем подъема в направлении градиента потенциального поля от начальной точки с потенциалом ϕ_{s1} до целевой точки с потенциалом ϕ_{sg} . Такой метод планирования траектории реализован в виде алгоритма, описанного в следующем разделе.

Алгоритм планирования траектории

Введем следующие обозначения: N_0 — начальное значение параметра дискретизации конфигурационного пространства; N_{\max} — максимально допустимое значение параметра дискретизации конфигурационного пространства; N_s — шаг изменения параметра дискретизации; P — траектория робота. В предложенном алгоритме используются следующие функции: $\max f(\phi_{b_k})$ — функция, возвращающая максимальное значение потенциала ϕ из множества ϕ_{b_k} ; $\max b(\phi_{b_k})$ — функция, возвращающая индекс b максимального значения потенциала из множества ϕ_{b_k} ; $q(\phi)$ — функция, возвращающая конфигурацию робота, соответствующую значению потенциала ϕ ; $explore(q(\phi_a), q(\phi_b))$ — функция проверки существования прямолинейного участка траектории между двумя конфигурациями робота $q(\phi_a)$ и $q(\phi_b)$ в соответствии с формулой (3). Если такой участок траектории существует, данная функция возвращает значение "1", в противном случае она возвращает значение "0".

С учетом этих обозначений алгоритм планирования траектории имеет вид:

Исходные данные: геометрическая модель робота и препятствий, стартовая q_{s1} и целевая q_{sg} конфигурации

```

1:   Установить начальное значение параметра дискретизации  $N \leftarrow N_0$ ;
2:   повторять
3:       Вычислить  $V_a$  для параметра дискретизации  $N$ ;
4:       Установить весовые коэффициенты нейронной сети в  $T_{ab_k} \leftarrow 1/3n$  ( $k=1:d$ );
5:       повторять
6:           Вычислить потенциальное поле  $\phi_a$  ( $a=1:N^n$ ) используя (8);
7:            $a \leftarrow s1$ ;
8:           повторять
9:                $\phi \leftarrow \max f(\phi_{b_k})$ ;
10:               $b \leftarrow \max b(\phi_{b_k})$ ;
11:               $p \leftarrow explore(q(\phi_a), q(\phi_b))$ ;
12:               $P \leftarrow \{q(\phi_a), q(\phi_b)\}$ ;
13:              если  $b=sg$  то вернуть траекторию  $P$ ;
14:               $a \leftarrow b$ ;
15:          до тех пор пока  $p=0$ ;
16:           $T_{ab_k} \leftarrow 0$ ;
17:           $P \leftarrow 0$ ;
18:      до тех пор пока  $\phi_{s1}=0$ ;
19:       $N \leftarrow N+N_s$ ;
20:  до тех пор пока  $N \leq N_{\max}$ .

```

Данный алгоритм функционирует следующим образом. Первоначально конфигурационное пространство робота дискретизируется с низким разрешением N_0 и предполагается, что между всеми соседними конфигурациями существуют прямолинейные участки траектории, т.е. всем весовым коэффициентам нейронной сети присваивается значение $1/3n$. Далее вычисляется потенциальное поле робота ϕ_a ($a=1:N^n$) и ищется траектория между стартовой q_{s1} и целевой q_{sg} конфигурациями путем подъема в направлении градиента. Для этого отрезки, соединяющие соседние конфигурации q_a and q_{b_k} , дискретизируются с высоким разрешением Nh в соответствии с (3) и для каждой дискретной конфигурации робота d_k выполняется тест столкновения. Если столкновения отсутствуют, то выбирается две новые конфигурации на сетке низкого разрешения в направлении градиента. Если обнаружено столкновение, то значение весового коэффициента сети T_{ab_k} устанавливается в нуль.

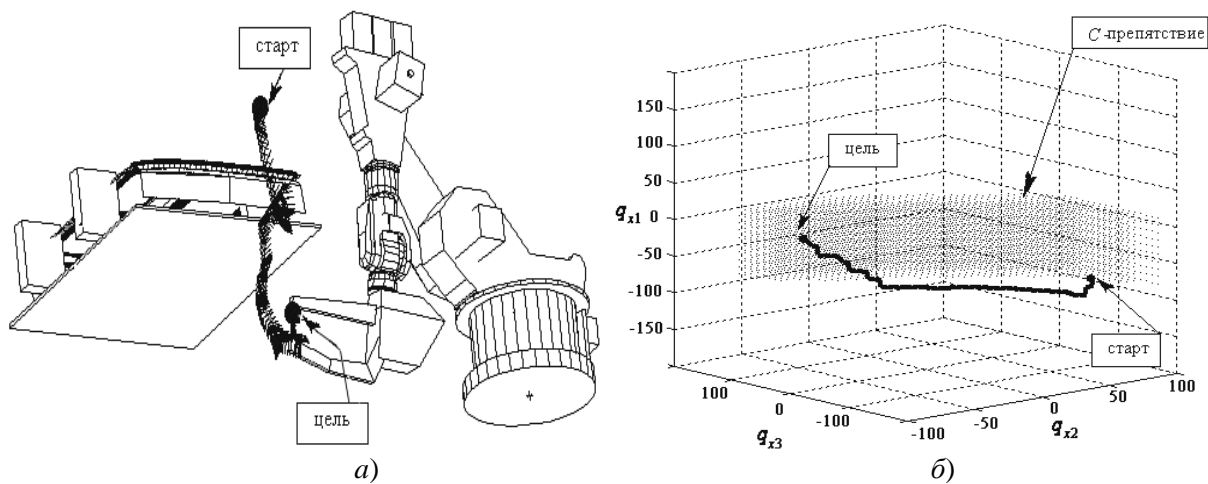


Рис. 3. Свободная от столкновения траектория между конфигурациями $q_{s1}=[-70 \ 57 \ -80 \ 0 \ 2 \ 0]^T$ и $q_{sg}=[-50 \ 0 \ 160 \ 0 \ 10 \ 0]^T$

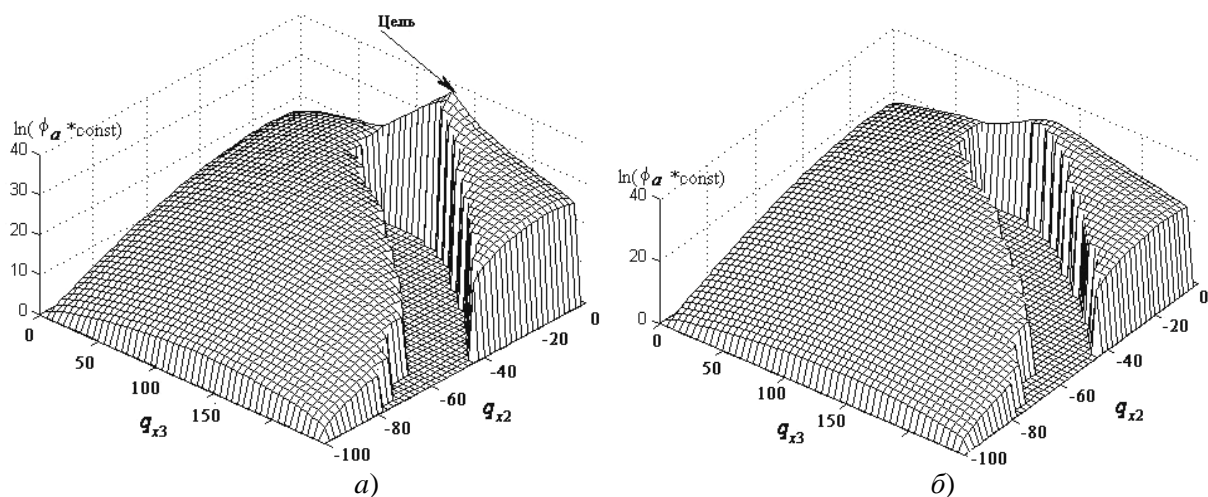


Рис. 4. Потенциальное поле робота для значений $q_{x1}=-50^\circ$ (а) и $q_{x1}=-30^\circ$ (б)

Далее потенциальное поле ϕ_a ($a=1:N^n$) перерасчитывается, и процесс поиска траектории в направлении градиента повторяется. Цикл поиска траектории повторяется до тех пор, пока траектория не найдена, либо не будет установлено, что на текущем разрешении сетки дискретизации траектории не существует. В этом случае разрешение сетки увеличивается и поиск повторяется. Разрешение сетки дискретизации увеличивается до момента нахождения траектории, либо максимально допустимого разрешения.

Исследование эффективности метода

Исследование эффективности предложенного метода выполнялось в среде САПР ROBOMAX. Алгоритм планирования реализован на языке программирования C++ и интегрирован в данную САПР. Тестирование разработанного программного обеспечения проводилось на ЭВМ с тактовой частотой процессора 3 ГГц. В качестве объекта использовалась роботизированная ячейка, включающая робот-манипулятор KR125, оснащенный сварочными клещами, свариваемую деталь (деталь кабины автомобиля ГАЗель), кондукторную плиту и технологическую оснастку (рис. 3,а). В качестве препятствий в данном случае рассматриваются сварная конструкция, технологическая оснастка, а также кондукторная плита. Для поиска свободной от столкновений траектории между конфигурациями $q_{s1}=[-70 \ 57 \ -80 \ 0 \ 2 \ 0]^T$ и $q_{sg}=[-50 \ 0 \ 160 \ 0 \ 10 \ 0]^T$ (рис. 3,б) были использованы нейронные сети с количеством нейронов N^3 . Для различных значений параметра дискретизации N экспериментально было определено количество тестов столкновений и приблизительное время вычислений. Из таблицы видно, что алго-

ритм сходится за приемлемое для практики время: 0,47 с, 26,51 с, 134,6 с при дискретности конфигурационного пространства 8000, 25000 и 1000000 узлов соответственно.

Время генерации траектории при различных значениях параметра дискретизации

Параметр дискретизации N	Количество тестов столкновения	Время генерации вектора V_a , с	Время генерации потенциального распределения, с	Время градиентного поиска, с
20	8000	0,15	0,3	0,02
50	25000	4,1	22,3	0,11
100	1000000	12,2	122,2	0,23

Исследована сходимость разработанного алгоритма. На рис. 4 показаны примеры потенциальных распределений для двух значений q_{x1} для сетки дискретизации размерности $50 \times 50 \times 50$. Анализ полученных поверхностей потенциального распределения показывает, что полученное потенциальное распределение унимодально, и в каждом сечении максимальное значение потенциала имеет узел, ближайший к целевому, причем максимальное значение потенциала достигается на целевом узле. Также исследование сходимости алгоритма показало, что для сетей различной размерности состояние равновесия достигается после $6,4 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^7$, $8 \cdot 10^7$ итераций для сетей с размерностями $20 \times 20 \times 20$, $50 \times 50 \times 50$, $100 \times 100 \times 100$, соответственно.

На основе полученной траектории сформирована технологическая программа на языке программирования робота SRCL (*Siemens Robot Control Language*). Тестирование этой программы в подсистеме *off-line* программирования САПР ROBOMAX показало, что она обеспечивает свободное от столкновения движение манипулятора. Таким образом, анализ результатов данных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый подход эффективен при планировании траекторий в сборочно-сварочном РТК.

Заключение

В данной работе предложен новый метод планирования траекторий роботоманипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на детерминистической дискретизации конфигурационного пространства, обеспечивающей свойство "полноты" решения. В отличие от известных, этот метод учитывает сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов. Предложенный подход основан на топологически упорядоченной нейронной сети, которая моделирует весовую функцию, характеризующую расположение робота-манипулятора относительно препятствий.

Эффективность предложенного метода планирования подтверждается результатами тестирования в среде САПР ROBOMAX.

Статья подготовлена в рамках гранта Т09М-085, финансируемого Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований.

TRAJECTORY PLANNING FOR INDUSTRIAL ROBOTIC MANIPULATORS USING NEURAL NETWORK

M.M. KAZHEUNIKAU, A.P. PASHKEVICH, O.A. CHUMAKOV

Abstract

A new method is proposed for trajectory planning of robotic manipulators in the workspace with obstacles, which is based on topologically ordered neural network. This method takes in to account highly-irregular obstacles shape of industrial robotic cells and provides a reduced number of collision checking.

Литература

1. *Choset H., Lynch K.M., Hutchinson S. et al.* Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. MIT Press. Boston. 2005.
2. *Sucan I.A., Kavraki L.E.* // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. St. Louis. MO. USA. 2009. P. 2434–2439.
3. *Hauser K., Latombe J.C.* // ICAPS09 Workshop on Bridging the Gap between Task and Motion Planning. Thessaloniki. Greece. 2009.
4. *LaValle S.M., Branicky M., Lindemann S.R.* // Int. J. of Robotic Research. 2004. Vol. 23 (7/8). P. 673–692.
5. *Erickson L.H., LaValle S.M.* // Proc. of the 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Kobe. Japan. 2009. P. 2068–2073.
6. *Knepper R.A., Mason M.T.* // Proc. of the 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009. P. 3260–3265.
7. *Yershova A., LaValle S.M., Mitchell J.C.* Algorithmic Foundation of Robotics VIII. Berlin: Springer-Verlag. 2009. P. 385–399.
8. *Pashkevich A, Kazheunikau M., Ruano A.E.* // Int. J. of Systems Science. 2006. Vol. 37(8). P. 555–564.
9. *Пашкевич А.П., Кожевников М.М.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. №4. С. 78–81.