

**РОБОТОТЕХНИКА
И МЕХАТРОНИКА**

УДК 621.865.8:004.7.032.26

М. М. Кожевников

канд. техн. наук, доц.

А. В. Господ

*Могилевский государственный университет продовольствия
г. Могилев, Республика Беларусь*

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

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.

M. M. Kazheunikau, A. V. Gospad

Mogilev State University of Food Technologies, Mogilev, Belarus

TRAJECTORY PLANNING OF INDUSTRIAL ROBOTS USING NEURAL NETWORK

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.

Key words: robotic-manipulators, neural network, trajectory planning.

Эффективное внедрение роботизированных технологических комплексов (РТК) тесно связано с созданием систем автономного программирования роботов. При этом одной из наиболее трудоемких задач является планирование 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.

Большинство современных методов планирования траектории промышленных роботов основаны на модели конфигурационного

пространства манипулятора, заданной в виде дискретного множества свободных от столкновений конфигураций. Это множество формируется на основе вероятностных алгоритмов [1–3] либо детерминистических [4–5].

В данной статье 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.

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

$$DC = \{q_a \mid a = 1 \dots N^n\} \quad (1)$$

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

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

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

где $M(q_a)$ – робот-манипулятор M , установленный в конфигурацию q_a .

Прямолинейный участок траектории между двумя конфигурациями q_a и q_b ($a \neq b$, $q_a, q_b \in DC_f$) задается в виде множества векторов

$$d_{ab} = \{d_k \mid M(d_k) \cap B = \emptyset\}, \quad (3)$$

где $d_k = q_a + (h/Nh)(q_b - q_a)$, $h = 0:Nh$, $Nh > N$ – параметр дискретизации прямолинейного участка траектории.

Дискретная конфигурация робота $q_b \in DC_f$ является соседней с конфигурацией $q_a \in DC_f$, если между ними существует прямолинейный участок траектории d_{ab} и индекс b удовлетворяет одному из соотношений

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

Таким образом, каждая конфигурация q_a может иметь $d \leq 2n$ соседних конфигураций.

Траектория, соединяющая стартовую q_{s1} и целевую q_{sg} конфигурации робота, представляет собой последовательность, состоящую из соседних конфигураций $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg} \in DC_f$ и прямолинейных участков, соединяющих эти конфигурации, $d_{s1s2}, d_{s2s3}, \dots, d_{(sg-1)sg}$. Критерий «качества» траектории в дискретном конфигурационном пространстве зададим в виде

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

где $T_{sk(sk+1)}$ – значение весовой функции для прямолинейного отрезка траектории $d_{sk(sk+1)}$.

Тогда задача планирования траектории в дискретном конфигурационном пространстве может быть сформулирована следующим образом: среди всех последовательностей дискретных конфигураций $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg} \in DC_f$ 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).

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 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 q_a и q_b ставилась в соответствие величина весовой связи между нейронами a и b , равная T_{abk} . 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 $T_{ab1} \phi_1, T_{ab2} \phi_2, \dots, T_{ab6} \phi_6$ (рис. 2, а), где $T_{ab1} - T_{ab6}$ – весовые коэффициенты.

Также на вход каждого нейрона a поступает внешний сигнал V_a (рис. 2, б), значение которого определяется следующим образом:

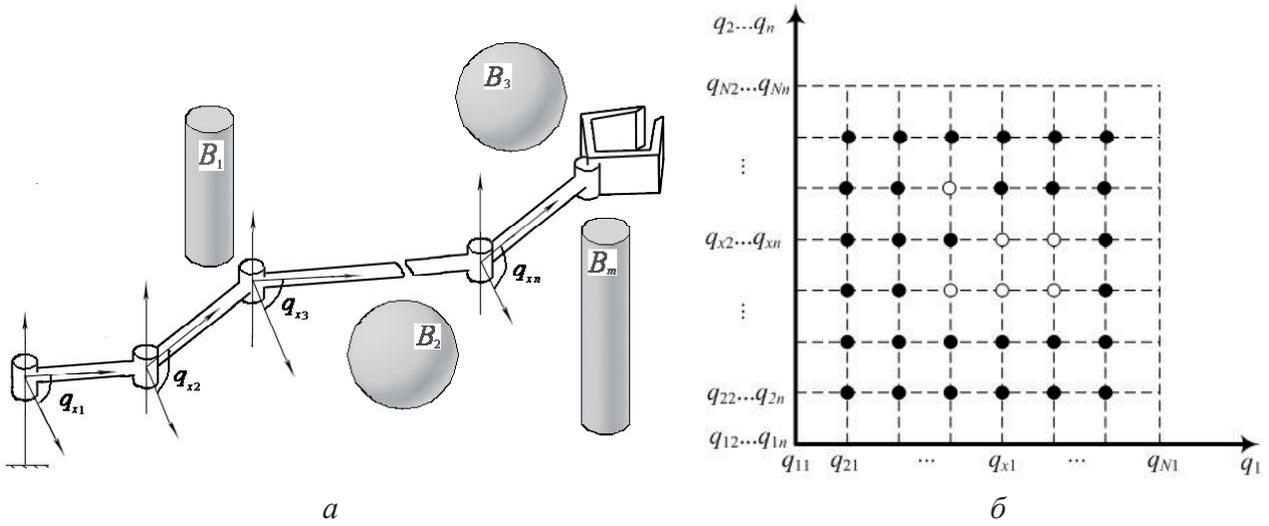


Рис. 1. Робот-манипулятор и его дискретное конфигурационное пространство

$V_a = -1$, если $q_a \notin DC_p$ либо $q_a = [q_{1j}]^T$ ($j = 1:n$), либо $q_a = [q_{Nj}]^T$ ($j = 1:n$); $V_a = 1$, если $q_a = q_{sg}$; $V_a = 0$ 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:

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

где $f_a(v_a)$ – 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.

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

$$\phi_a^{(l+1)} = f_a \left(\sum_{k=1}^d T_{ab_k} \phi_b^{(l)} + V_a \right), \quad (7)$$

где l – номер итерации.

Введем следующие обозначения: N_0 – начальное значение параметра дискретизации конфигурационного пространства; N_{max} – максимально допустимое значение пара-

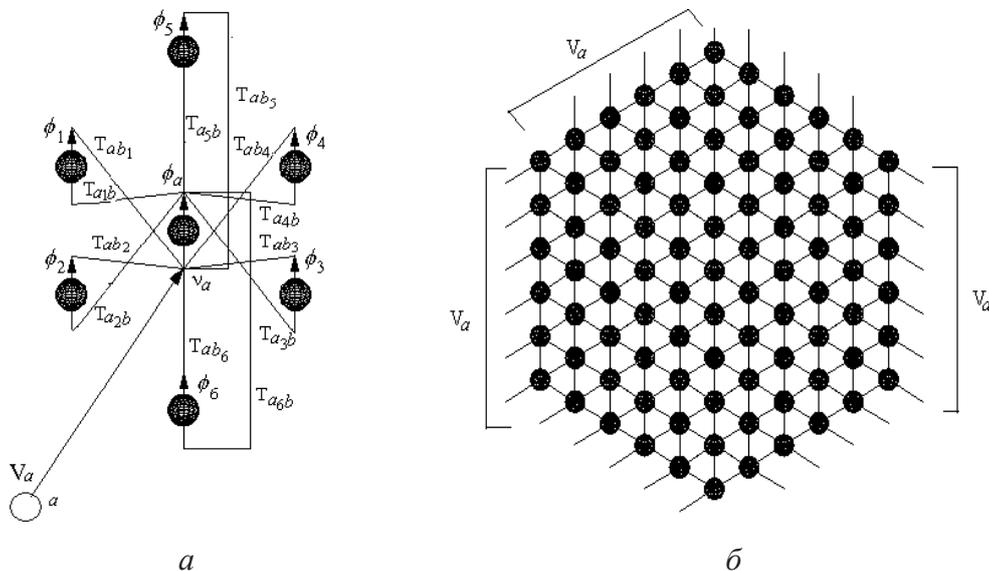


Рис. 2. Топологически упорядоченная нейронная сеть

метра дискретизации конфигурационного пространства; N_s – шаг изменения параметра дискретизации; P – траектория робота. В предложенном алгоритме используются следующие функции: $maxf(\phi_{b_k})$ – функция, возвращающая максимальное значение потенциала ϕ из множества ϕ_{b_k} ; $maxb(\phi_{b_k})$ – функция, возвращающая индекс b максимального

ектории 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».

Предложенный алгоритм планирования траектории имеет следующий 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 $T_{abk} \leftarrow 1/3n$ ($k=1:d$);
- 5: **повторять**
- 6: Вычислить потенциальное поле ϕ_a ($a=1:N^n$) используя (7);
- 7: $a \leftarrow s1$;
- 8: **повторять**
- 9: $\phi \leftarrow maxf(\phi_{b_k})$;
- 10: $b \leftarrow maxb(\phi_{b_k})$;
- 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: $T_{abk} \leftarrow 0$;
- 17: $P \leftarrow 0$;
- 18: **до тех пор пока** $\phi_{s1} = 0$;
- 19: $N \leftarrow N + N_s$;
- 20: **до тех пор пока** $N \leq N_{max}$.

Таблица 1

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	100000	12,2	122,2	0,23

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 тра-

Исследование эффективности предложенного метода выполнялось в среде САПР ROBOMAX. В качестве объекта использовалась роботизированная ячейка, включающая робот-манипулятор KR125, оснащенный

сварочными клещами, свариваемую деталь (деталь кабины автомобиля ГАЗель), кондукторную плиту и технологическую оснастку. В качестве препятствий в данном случае рассматриваются сварная конструкция, технологическая оснастка, а также кондукторная плита. Для различных значений параметра дискретизации N экспериментально было определено количество тестов столкновений и приблизительное время вычислений (табл. 1). Из таблицы видно, что алгоритм сходится за приемлемое для практики время: 0,47 с, 26,51 с, 134,6 с при дискретности конфигурационного пространства 8000, 25 000 и 1 000 000 узлов соответственно.

Библиографические ссылки

1. Choset H., Lynch K. M., Hutchinson S., Kantor G., Burgard W., Kavraki L. E., Thrun S. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. Boston : MIT Press, 2005.
2. Sucas I. A., Kavraki L. E. On the Performance of Random Linear Projections for Sampling-Based Motion Planning // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis. MO. USA, 2009. P. 2434–2439.
3. Hauser K., Latombe J. C. Integrating task and PRM motion planning: Dealing with many infeasible motion planning queries. ICAPS09 Workshop on Bridging the Gap between Task and Motion Planning. Thessaloniki. Greece, 2009.
4. LaValle S. M., Branicky M., Lindemann S. R. On the relationship between classical grid search and probabilistic roadmaps // International Journal of Robotic Research. 2004. Vol. 23 (7/8). P. 673–692.
5. Erickson L. H., LaValle S. M. Survivability: Measuring and ensuring path diversity Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe. Japan, 2009. P. 2068–2073.