

# Планирование траекторий промышленных роботов-манипуляторов при наличии препятствий в рабочей зоне

Кожевников М.М.; Господ А.В.

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств, механический факультет  
УО «Могилевский государственный университет продовольствия»  
Могилев, Республика Беларусь  
e-mail: kmmk@mail.ru

**Аннотация** — 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:** робот-манипулятор; конфигурационное пространство; нейронные сети

## I. ВВЕДЕНИЕ

Эффективное внедрение и использование роботизированных технологических комплексов (РТК) тесно связано с созданием систем автономного программирования роботов [1]. 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 [2-4]. В данной работе предложен новый алгоритм планирования траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на детерминистической дискретизации конфигурационного пространства. В отличие от известных этот подход учитывает сложную форму препятствий характерную для сборочно-сварочных РТК.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим, робот-манипулятор с  $n$  поворотными сочленениями (рис. 1), 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. 2). Тогда дискретная модель конфигурационного пространства рассматриваемого робота может быть представлена в виде множества из  $N^n$  векторов

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

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

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

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

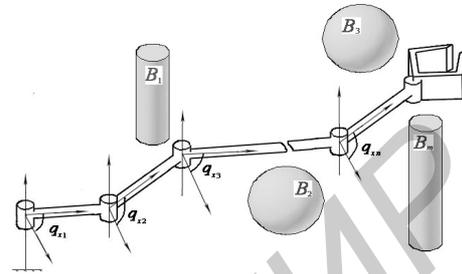


Рис. 1. Робот-манипулятор в среде с препятствиями

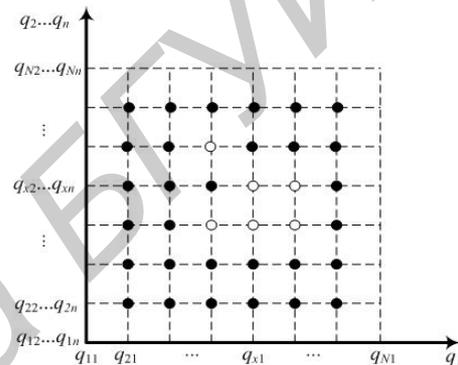


Рис. 2. Дискретное конфигурационное пространство робота-манипулятора

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

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

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

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

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  $d_{s1s2}, d_{s1s2}, \dots, d_{(sg-1)sg}$ . Критерий «качества» траектории в дискретном конфигурационном пространстве зададим в виде

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

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

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 достигает 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.

### III. НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ

Для решения сформулированной выше задачи планирования траектории предлагается использовать алгоритм, основанный на топологически упорядоченной нейронной сети (рис. 3). Распределение потенциалов  $\phi_a$  ( $a=1:N^n$ ) 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  $f_a(\bullet)$  – функция активации нейрона  $a$ ,  $v_a$  – значение потенциала на входе нейрона  $a$ ,  $\phi_b$  – значение потенциала на входе нейрона  $b$ , соседнего с нейроном  $a$ ,  $\tau_a$ ,  $T_{ab}$ ,  $T_{a0}$  – весовые коэффициенты нейронной сети. Также на вход каждого нейрона  $a$  поступает внешний сигнал  $V_a$ , значение которого определяется следующим образом:  $V_a = -1$ , если  $q_a \notin DC_f$ , 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.

Предложенный нейросетевой алгоритм планирования траектории робота-манипулятора 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  $T_{abk} \leftarrow 1/3n$  ( $k=1:d$ );
- 5: **повторять**
- 6: Вычислить потенциальное поле  $\phi_a$  ( $a=1:N^n$ ) путем интегрирования (6);
- 7:  $a \leftarrow s1$ ;
- 8: **повторять**
- 9:  $\phi \leftarrow \max f(\phi_{b_k})$ ;
- 10:  $b \leftarrow \max b(\phi_{b_k})$ ;
- 11:  $p \leftarrow \text{explore}(q(\phi_a), q(\phi_b))$ ;
- 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**  $N \leq N_{\max}$ .

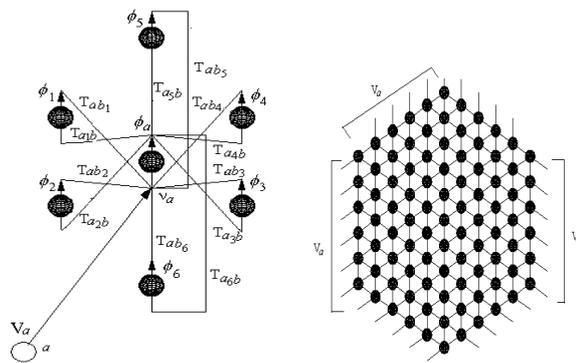


Рис. 3. Топологически упорядоченная нейронная сеть

В алгоритме приняты 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  $\phi$  из множества  $\phi_{b_k}$ ;  $\max b(\phi_{b_k})$  – функция, возвращающая индекс  $b$  максимального значения потенциала из множества  $\phi_{b_k}$ ;  $q(\phi)$  – функция, возвращающая конфигурацию робота, соответствующую значению потенциала  $\phi$ ;  $\text{explore}(q(\phi_a), q(\phi_b))$  – 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», иначе она возвращает значение «0».

Исследование эффективности предложенного алгоритма 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 конструкция, технологическая оснастка, а также кондукторная плита. Результаты проведенных экспериментов подтверждают эффективность предложенного подхода.

[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. MIT Press. Boston. 2005.

[2] LaValle, S. M. Planning Algorithms / S. M. LaValle. – Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2006. – 1023 p.

[3] LaValle, S.M. On the relationship between classical grid search and probabilistic roadmaps. / S.M. LaValle, M. Branicky, S.R. Lindemann // International Journal of Robotic Research. – 2004. – № 23(7/8). – P. 673-692.

[4] Tsianos, K. Replanning: A powerful planning strategy for hard kinodynamic problems / K. Tsianos, L.E. Kavraki // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2008. – P. 1667-1672.