

УДК 621.865.8

## ПОИСК ТРАЕКТОРИЙ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ В РАБОЧЕЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Л.А. ЛОБОРЕВА; канд. техн. наук, доц. М.М. КОЖЕВНИКОВ  
(Могилевский государственный университет продовольствия)

Рассматривается поиск траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями. Предложены новые метод и алгоритмы поиска траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов на основе нейронной сети. Предлагаемый подход, в отличие от известных, позволяет эффективно учесть сложную форму элементов роботизированной технологической ячейки. Эффективность предложенного подхода подтверждается результатами моделирования.

**Ключевые слова:** робот-манипулятор, нейронная сеть, поиск траекторий, конфигурационное пространство.

**Введение.** Поиск траекторий движения роботов в рабочей среде с препятствиями – актуальная задача робототехники. Известные алгоритмы поиска траекторий позволяют эффективно решать проблему размерности конфигурационного пространства роботов [1–4], но при этом не учитывают формы препятствий и звеньев манипулятора, что приводит к реализации траекторий низкого качества с большим объемом движений. При использовании таких алгоритмов траектория робота может быть найдена за конечное время с определенной вероятностью, т.е. свойство «полноты» решения теряется [1; 5–6].

В представленной работе предложен комбинированный метод поиска траектории сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочем пространстве с препятствиями, который позволяет эффективно учесть сложную форму элементов роботизированной технологической ячейки.

**Метод поиска траектории.** Рассмотрим робот-манипулятор, имеющий  $n$  поворотных сочленений (рисунок 1). В рабочей зоне робота расположено некоторое множество препятствий  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ , которые образуют карту препятствий.

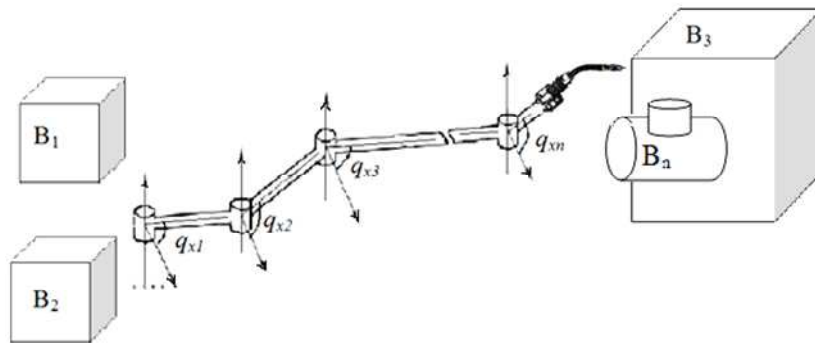


Рисунок 1. – Робот-манипулятор в рабочей среде с препятствиями  $B$

Если конфигурационное пространство этого манипулятора дискретизировано с разрешением  $N$ , то угол в каждом из сочленений  $j$  ( $j = 1:n$ ) может принимать дискретные значения  $q_{xj}$  ( $x_j \in \{1, \dots, N\}$ ), при этом величины  $q_{1j}$  и  $q_{Nj}$  задают нижнее и верхнее конструктивные ограничения на углы в сочленениях.

Дискретная модель конфигурационного пространства робота представляется в виде множества из  $N^n$  векторов [7]:

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

где  $\mathbf{q}_a = [q_{xj}]^T$  – дискретная конфигурация робота ( $x_j \in \{1, \dots, N\}$ );  $a$  – одномерный индекс, который определяется выражением

$$a = N^{n-1}x_1 + N^{n-2}x_2 + \dots + x_n - 3.$$

Множество свободных от столкновений конфигураций робота-манипулятора определяется как

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

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

Управляющее движение, реализующее 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:

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

где  $\mathbf{d}_k = q_a + (h/Nh)(q_b - q_a)$ ;  $h = 0:Nh$ ,  $Nh > N$  – 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 управляющее движение  $d_{ab}$  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. Программа управления движением по траектории, соединяющей 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 управляющих движений между этими конфигурациями  $d_{s1s2}, d_{s2s3}, \dots, d_{(sg-1)sg}$ . Критерий качества управления в дискретном конфигурационном пространстве задан в виде

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

где  $T_{sk(s_{k+1})}$  – значение весовой функции для управляющего движения  $d_{sk(s_{k+1})}$ .

На конфигурационное пространство манипулятора налагаются конструктивные ограничения вида

$$q_1 \in [q_1^-, q_1^+], q_2 \in [q_2^-, q_2^+], \dots, q_n \in [q_n^-, q_n^+]. \quad (6)$$

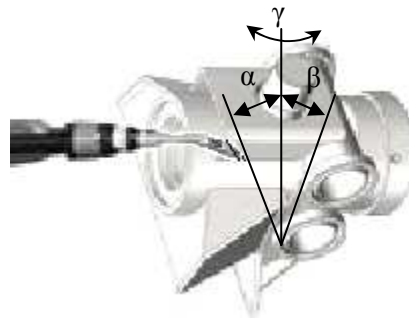
Здесь  $q_i^-, q_i^+$  ( $i = 1 \dots n$ ) задают нижнее и верхнее механические ограничения на изменение обобщенных координат;  $n$  – число степеней свободы манипулятора.

Тогда внешняя граница  $C$ -свободной области робота задается в соответствии с (6), а внутренние ее границы определяются границами препятствий  $B$ , а также следующими конструктивными ограничениями:

$$CO_M(B) \equiv \{\mathbf{q} \in C_{spaceM} | (M)_q \cap B \neq \emptyset\}, \quad \{\mathbf{q}_j \in C_{spaceM}\}_{j=1}^L. \quad (7)$$

Технологический процесс также накладывает ограничения на ориентацию сварочного инструмента. Их следует учитывать при поиске траектории движения манипулятора.

Ориентация сварочного инструмента в точке сварного шва определяется углами:  $\alpha$  – задает угол наклона плоскости движения электрода;  $\beta$  – ограничивает угол наклона электрода к линии шва (рисунок 2).



**Рисунок 2. – Общий вид сварной конструкции и углы ориентации технологического инструмента**

Величина углов  $\alpha$  и  $\beta$  в технологическом процессе сварки может изменяться в допустимом диапазоне  $\pm 10^\circ$ . Угол  $\gamma$  совместно с углами  $\alpha$  и  $\beta$  определяет ориентацию сварочного инструмента и может принимать значения в диапазоне  $\pm 180^\circ$ .

$$\alpha_1 \in [\alpha^-, \alpha^+], \quad \beta \in [\beta^-, \beta^+], \quad \gamma \in [\gamma^-, \gamma^+]. \quad (8)$$

Тогда задача поиска траектории движения робота-манипулятора в дискретном конфигурационном пространстве состоит в следующем. 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 управляющих движений, на которой достигается минимума критерий (5) с учетом технологических ограничений (6).

Величина параметра дискретизации  $N$  заранее неизвестна и подбирается в зависимости от размеров и формы препятствий в конфигурационном пространстве робота-манипулятора.

Для решения сформулированной выше задачи управления предлагается использовать метод, основанный на топологически упорядоченной нейронной сети. Эта нейронная сеть, в отличие от известных

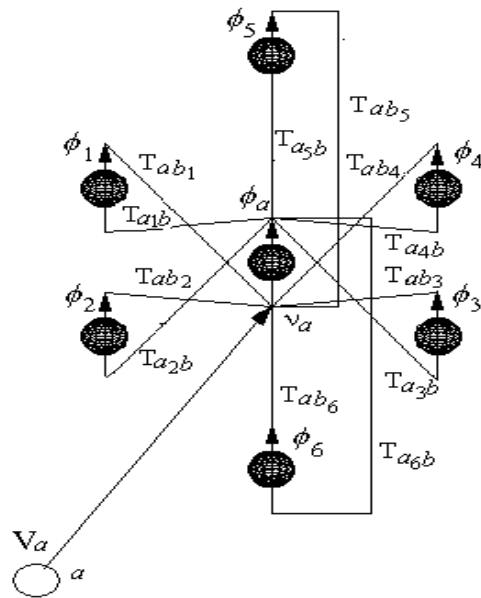


Рисунок 3. – Топологически упорядоченная нейронная сеть

типовых моделей [7; 8], 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 выражением (4). Таким образом, каждый нейрон соответствует некоторой конфигурации робота.

Каждому управляющему движению между двумя соседними конфигурациями  $q_a$  и  $q_b$  ставится 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 рисунке 3.

На вход нейрона  $a$  поступает 6 взвешенных сигналов от соседних нейронов  $T_{ab_1} \phi_1, T_{ab_2} \phi_2, \dots, T_{ab_6} \phi_6$  (см. рисунок 3), где  $T_{ab_1} \dots T_{ab_6}$  – весовые коэффициенты. 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  $q_a = [q_{Nj}]^T$  ( $j = 1:n$ ), либо не выполнены технологические ограничения:  $\alpha \notin [\alpha^- \alpha^+]$ ,  $\beta \notin [\beta^- \beta^+]$ ,  $\gamma \notin [\gamma^- \gamma^+]$ ;

$V_a = 1$ , если  $q_a = q_{sg}$ ;  $V_a = 0$  во всех остальных случаях.

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:

$$\begin{cases} \phi_a = f_a(v_a), \\ \tau_a \frac{dv_a}{dt} = \sum_{b=1}^{N^n} T_{ab} \phi_b - T_{a0} v_a + V_a, \end{cases} \quad (9)$$

где  $f_a(v_a)$  – 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.

В выражении (9) суммирование выполняется для всех  $b = 1:N^n$ , однако только  $d \leq 2n$  элементов под знаком суммы не равны нулю, так как в данной модификации нейронной сети весовые связи имеются только между соседними нейронами.

Для уменьшения времени вычисления состояний сети предлагается в качестве функции активации нейронов использовать линейную функцию с насыщением:

$$f_a(v_a) = \begin{cases} 0, & \text{если } v_a < 0, \\ v_a, & \text{если } 1 \geq v_a \geq 0, \\ 1, & \text{если } v_a > 1. \end{cases} \quad (10)$$

Такая функция активации проста для программной реализации. Так как нейроны не охвачены собственной обратной связью, линейная функция с насыщением соответствует основным требованиям, предъявляемым к функции активации: она равна нулю для нулевого входного сигнала и монотонно возрастает при положительном входном сигнале, приближаясь к единице.

Значения потенциалов, соответствующие каждой конфигурации  $q_a$ , вычисляются путем численного решения (9) на основе следующей итерационной формулы:

$$\Phi_a^{(l+1)} = f_a \left( \sum_{k=1}^D T_{ab_k} \Phi_{b_k}^{(l)} + V_a \right), \quad (11)$$

где  $l$  – номер итерации;  $D = 6$  для внутренних узлов сетки, налагаемой на пространство конфигураций манипулятора, и  $D \in \{3, 4, 5\}$  для узлов, лежащих на границе сетки.

Величина весовых коэффициентов  $T_{ab_k}$  настраивается исходя из условий:  $T_{ab_k} = 1/3n$ , если существует прямолинейный участок траектории между конфигурациями  $q_a$  и  $q_{b_k}$ , в противном случае  $T_{ab_k} = 0$ . Остальные весовые коэффициенты в  $a$ -той строке матрицы  $T$  равны нулю, так как рассматриваемая нейронная сеть топологически упорядочена.

Вычисляемое по формуле (11) потенциальное поле робота является унимодальным и достигает своего максимального значения  $\Phi_{sg} = 1$  в точке, соответствующей целевой конфигурации  $q_{sg}$ . Тогда последовательность управляющих движений  $q_{s1}, q_{s2}, \dots, q_{sg}$ , минимизирующая критерий качества (5), может быть найдена путем подъема в направлении градиента потенциального поля от начальной точки с потенциалом  $\Phi_{s1}$  до целевой точки с потенциалом  $\Phi_{sg}$ . Таким образом, формируется траектория перемещения манипулятора из одной заданной точки в другую без столкновений с препятствиями, с учетом технологических и механических ограничений.

Большинство современных сборочно-сварочных робототехнологических комплексов (РТК) оснащаются позиционером, позволяющим обеспечить оптимальное ориентирование сварных швов в пространстве. С целью снижения объема движений робота-манипулятора при выполнении ориентационных движений позиционера предлагается следующий подход. После выполнения технологической операции (сварки очередного шва) задается новая целевая точка, в которую должен переместиться рабочий инструмент робота. Если между такими перемещениями положение позиционера и сварного изделия не изменяется, осуществляется поиск траектории по тому же критерию (5) с использованием рассчитанного ранее потенциального поля. При поиске конечная точка предыдущей операции становится начальной, а целевой – новая точка. Потенциалы, соответствующие этим точкам в нейронной сети, меняются.

Если между соседними технологическими операциями, выполняемыми роботом, и перемещениями из старой точки к новой целевой точке будет меняться положение позиционера и сварного изделия, могут возникать две разные ситуации, требующие разных подходов к поиску траектории.

На рисунке 4 показано исходное положение сварной конструкции и ее положение после позиционирования, соответствующее объекту  $BB1$ , изображенному пунктиром.

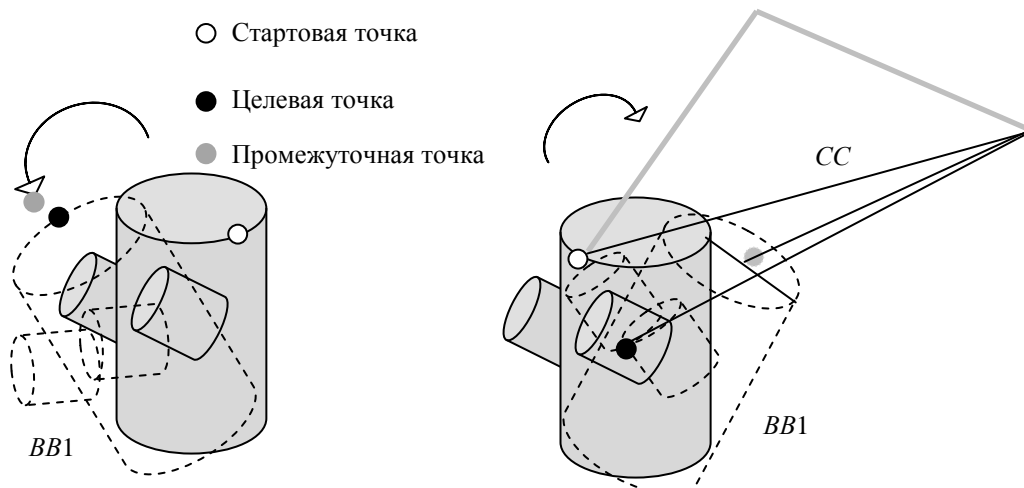


Рисунок 4. – Ориентация сварной конструкции

В первом случае после поворота позиционера новая целевая точка должна оказаться в свободном пространстве ранее сформированной карты препятствий. Для предотвращения возможного столкновения робота с позиционером или сварной конструкцией при их перемещении выбирается промежуточная це-

левая точка, которая смещается в сторону свободного пространства от конструкции на расстояние безопасного припуска, или на один шаг сетки. По ранее сформированной карте препятствий в потенциальном поле осуществляется поиск траектории к промежуточной точке. Определяется конфигурация робота в данной промежуточной точке  $q_{SB}$ . Затем в карту препятствий добавляется объект  $BB$ , образуемый геометрическим местом точек, которые занимает при движении в пространстве поворачиваемая с помощью позиционера конструкция. Далее исследуется возможность столкновения звеньев робота найденной конфигурации  $q_{SB}$  с объектом  $BB$ . Если столкновений не обнаружено, формируется траектория перемещения от старой точки к промежуточной. Затем объект  $BB$  модифицируется, принимая форму перемещенной конструкции  $BB1$ . Предыдущее положение сварной конструкции из карты препятствий удаляется. Согласно новой карте препятствий осуществляется пересчет потенциалов нейросети и поиск траектории от промежуточной точки к целевой. Поиск последующих точек сварного шва на изделии выполняется по карте препятствий с учетом нового положения сварной конструкции, т.е. объекта  $BB1$ .

Во втором случае после поворота позиционера новая целевая точка должна оказаться в пространстве, которое на ранее сформированной карте препятствий занято и является запретным. Такая ситуация вызывает сложности поиска траектории; с одной стороны, нельзя осуществить поиск по старой карте препятствий, так как целевая точка находится в запретной зоне; с другой – нельзя осуществить поиск от обратного, т.е. найти траекторию от новой целевой точки к старой, так как она тоже может оказаться в запретной зоне на модифицированной карте препятствий с учетом  $BB$  или  $BB1$ . Для поиска траектории необходимо найти такую промежуточную точку, к которой будет перемещаться робот и в состоянии без столкновений ожидать перемещения позиционера и сварной конструкции. Выбор оптимальной промежуточной точки с минимальной длиной траектории до нее от старой точки и от нее до новой точки – сложная задача. В силу сложности сварной конструкции и накладываемых на перемещения манипулятора ограничений геометрический расчет промежуточной точки весьма сложен. Предлагается поиск промежуточной точки на плоскости  $CC$ , которая образована тремя точками: предыдущей целевой, новой целевой и суставом «кисти» либо «локтя» робота-манипулятора. При пересечении плоскости  $CC$  и препятствия  $BB$  образуется кривая. В ее средней части выбирается точка, которая смещается на расстояние безопасного припуска, или одного шага сетки в сторону свободного пространства. Она и станет промежуточной точкой траектории. По старой карте препятствий осуществляется поиск траектории к этой промежуточной точке и определяется конфигурация робота в ней. Точки найденной траектории заносятся во временное хранение. Далее исследуется возможность столкновения звеньев робота при найденной конфигурации с объектом  $BB$ . Если столкновений не обнаружено, формируется траектория перемещения от старой точки к найденной промежуточной. Затем карта препятствий модифицируется, в нее заносится объект  $BB1$  и осуществляется поиск траектории от промежуточной точки к целевой. На следующем этапе проверяются на столкновение точки для выполнения сварного шва.

Если для найденной конфигурации  $q_{SB}$  в промежуточной точке обнаружено столкновение звена робота с объектом  $BB$ , делается попытка подбора новой конфигурации  $q_{sBB}$  изменением углов сочленений этого звена с соседними. Наиболее вероятно столкновение с изделием сварочного инструмента или звена между «кистью» и «локтем». В этом случае меняются углы  $q_{x_n}$  и  $q_{x_{(n-1)}}$ . Если конфигурация без столкновения в промежуточной точке с объектом  $BB$  будет найдена, проверяется возможность линейного перемещения от предпоследней точки ранее найденной траектории к подобранной. Если движение невозможно, подбор продолжается.

Если за определенное количество итераций изменение углов не приводит к поиску конфигурации без столкновений, конечная точка ранее найденной траектории отбрасывается и делается попытка поиска новой промежуточной точки, которая смещается на один шаг в сторону свободного пространства. Далее повторяются проверка на столкновение с объектом  $BB$  и возможность движения от предпоследней точки ранее найденной траектории к подобранной.

При повороте стенки-экрана позиционера на  $180^\circ$  объект  $BB = BB1$  и представляется в виде половины цилиндра, диаметр которого равен ширине стенки с допустимым припуском во избежание столкновения с манипулятором.

**Алгоритм поиска траектории.** Предлагаемый алгоритм состоит из нескольких модулей. Исходными данными модуля 1 являются: геометрические модели робота и препятствий (статических  $B$  и условно подвижных  $BB1$ ); геометрические точки стартового и целевого положения манипулятора; переменная  $d$  ( $d$  принимает значение 0, если при перемещении от стартовой точки к целевой препятствия статичны; принимает значение 1, если при перемещении от стартовой точки к целевой происходит поворот позиционера и конструкции).

Сначала определяются все свободные от статических препятствий  $B$  конфигурации робота, задаются стартовая  $q_{s1}$  и целевая  $q_{sg}$  конфигурации. Если  $d = 0$ , программа переходит к модулю 2 для поиска

траектории в потенциальном поле нейронной сети. Если  $d = 1$ , рассчитывается положение промежуточной точки и определяется ее конфигурация  $q_{sv}$ . Программа для поиска траектории перемещения к промежуточной точке переходит к модулю 2, для которого значения  $q_{s1}$  и  $q_{sv}$  будут входными данными. Затем в модуле 1 определяются конфигурации робота, свободные от нового местоположения препятствия  $BB1$ . Программа переходит к модулю 2, для которого свободные конфигурации, значения  $q_{sv}$  и  $q_{sg}$  будут входными данными.

Для модуля 2 введем обозначения:  $N_0$  – начальное значение параметра дискретизации конфигурационного пространства;  $N_{\max}$  – максимально допустимое значение параметра дискретизации конфигурационного пространства;  $N_s$  – шаг изменения параметра дискретизации;  $P$  – последовательность управляющих движений.

В предложенном алгоритме используются следующие функции:

$maxf(\phi_k)$  – функция, возвращающая максимальное значение потенциала  $\phi$  из множества  $\phi_k$ ;

$maxb(\phi_k)$  – функция, возвращающая индекс  $b$  максимального значения потенциала из множества  $\phi_k$ ;

$q(\phi)$  – функция, возвращающая конфигурацию робота, соответствующую значению потенциала  $\phi$ ;

$explore(q(\phi_a), q(\phi_b))$  – функция проверки существования управляющего движения 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 обозначений алгоритм расчета потенциального поля и поиска траектории для управления роботом-манипулятором имеет следующий вид.

#### Модуль 2

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  $\phi_a$  ( $a = 1:N^d$ ), используя формулу (9);
- 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  $b = sg$ , вернуть последовательность движений  $P$ ;
- 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  $N \leq N_{\max}$

Согласно алгоритму модуля 2 изначально конфигурационное пространство робота дискретизируется с низким разрешением  $N_0$ . При этом предполагается, что между всеми соседними конфигурациями существуют управляющие движения, т.е. всем весовым коэффициентам нейронной сети присваивается значение  $1/3n$ . Далее вычисляется потенциальное поле робота  $\phi_a$  ( $a = 1:N^d$ ) и отыскивается последовательность управляющих движений между стартовой  $q_{s1}$  и целевой  $q_{sg}$  конфигурациями путем подъема в направлении градиента. Для этого отрезки, соединяющие соседние конфигурации  $q_a$  and  $q_{bk}$ , дискретизируются с высоким разрешением  $Nh$  в соответствии с (3), и для каждой дискретной конфигурации робота  $d_k$  выполняется тест столкновения и проверяется выполнение технологических ограничений. Если

столкновения отсутствуют и ограничения удовлетворяются, выбираются две новые конфигурации на сетке низкого разрешения в направлении градиента. Если обнаружено столкновение, то соответствующее значение весового коэффициента сетки  $T_{\text{abk}}$  устанавливается в нуль. Затем потенциальное поле  $\phi_a$  ( $a = 1:N^n$ ) рассчитывается заново, и процесс поиска последовательности управляющих движений в направлении градиента повторяется. Цикл поиска повторяется до тех пор, пока последовательность управляющих движений не будет найдена, либо будет установлено, что при текущем разрешении сетки дискретизации такой последовательности не существует. В этом случае разрешение сетки увеличивается и поиск повторяется. Разрешение сетки дискретизации увеличивается до тех пор, пока последовательность управляющих движений не будет найдена либо не будет достигнуто максимально допустимое разрешение [9].

**Роботизированная ячейка.** Разработанный метод поиска траектории протестирован на примере роботизированной ячейки сборочно-сварочного комплекса. На рисунке 5 представлен РТК для сварки изделия «корпус редуктора», построенный на базе манипулятора ABB IRB1600, пятиосного позиционера ABB IRBP D600 и контроллера ABB IRC5. Пятиосный позиционер позволяет одновременно проводить сварочные операции, ориентируя свариваемое изделие с одной стороны ограничительной стенки-экрана, и операции загрузки-выгрузки – с другой. Сварка изделия выполняется в несколько этапов. Перед каждым из них выполняется установка и прихватка необходимых на данной стадии деталей. Установка и базирование деталей выполняется с помощью съемной оснастки.

В таких комплексах необходимо оптимизировать траектории, по которым движется манипулятор между этапами сварки, а также обеспечить обход препятствий в рабочей зоне и отсутствие столкновений звеньев робота и технологического инструмента с элементами РТК. Исходными данными для поиска траектории являются геометрические модели робота и препятствий.

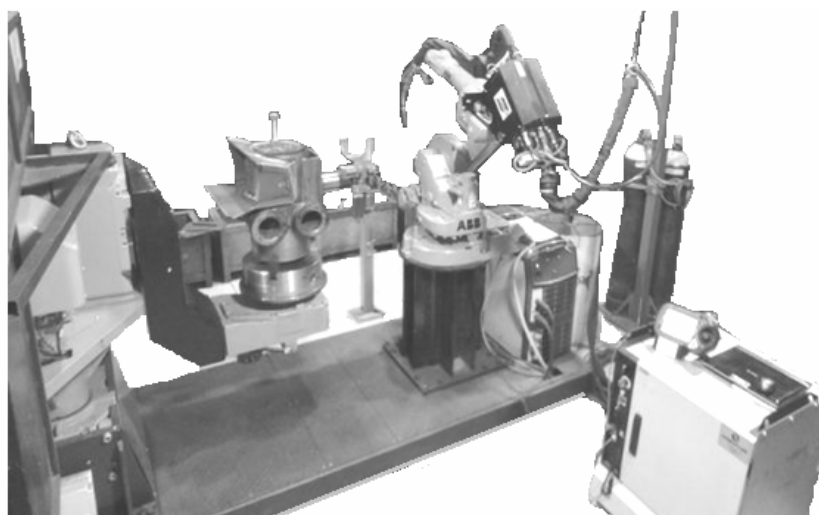


Рисунок 5. – Общий вид роботизированной ячейки

Результаты тестирования полученных траекторий показали, что предложенные алгоритмы эффективно позволяют найти свободные от столкновений траектории движения робота-манипулятора вдоль сварных швов, а также снизить объемы движений робота при выполнении позиционером ориентирующих операций.

**Заключение.** Предложен новый эффективный метод и алгоритм поиска траекторий роботоманипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на детерминистической дискретизации конфигурационного пространства и обеспечивающий свойство «полноты» решения. Данный метод учитывает сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов, и ограничения, накладываемые на углы расположения технологического инструмента. Использование упрощенной функции активации нейронной сети позволяет уменьшить время расчета состояний сети и увеличить ее быстродействие. Эффективность предложенного подхода подтверждена в ходе компьютерного моделирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Salzman, O. Asymptotically near-optimal RRT for fast, high-quality, motion planning / O. Salzman, D. Halperin // In Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. – 2014. – P. 4680–4685.

2. Geraerts, G.J. Reachability-based Analysis for Probabilistic Roadmap Planners / G.J. Geraerts, M.H. Overmars // *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. – 2007. – № 55. – P. 824–836.
3. Tangent bundle RRT: A randomized algorithm for constrained motion planning / B. Kim [et al.] // *Robotica*. – 2016. – 34. – P. 202–225.
4. Lavalley, S.M. On the relationship between classical grid search and probabilistic roadmaps / S.M. Lavalley, M. Branicky, S.R. Lindemann // *International Journal of Robotic Research*. – 2004. – № 23 (7/8). – P. 673–692.
5. Pashkevich, A.P. Neural network approach to collision free path planning for robotic manipulators / A.P. Pashkevich, M.M. Kazheunikau, A.E. Ruano // *International Journal of Systems Science*. – 2006. – № 37 (8). – P. 555–564.
6. Kavraki, L.E. Motion planning / L.E. Kavraki, S.M. Lavalley. Chap. 7 in B. Siciliano and O. Khatib, ed., *Springer Handbook of Robotics*. – 2nd ed. – Berlin : Springer, 2016. – P. 139–158.
7. Bugmann, G. Route finding by neural nets / G. Bugmann, J.G. Tylor, M.J. Denham // *Neural Networks*. – 1995. – P. 217–230.
8. Althoefer, K. *Neuro-Fuzzy Motion Planning* / K. Althoefer. – London : University of London, 1996. – P. 120.
9. Кожевников, М.М. Нейросетевой подход к планированию траекторий промышленных роботоманипуляторов / М.М. Кожевников, А.В. Господ, Л.А. Лоборева // *Информационные технологии и системы : материалы междунар. науч. конф. 24 окт. 2012 г. – Минск : БГУИР. – 2012. – С. 86–87.*

*Поступила 07.08.2017*

#### **SEARCH TRAJECTORY OF ROBOT MANIPULATORS FOR ASSEMBLY AND WELDING IN A WORKSPACE WITH OBSTACLES**

***L. LOBOREVA, M. KOZHEVNIKOV***

*The search for trajectories of assembly and welding robot manipulators in a working environment with obstacles is considered. A new method and algorithms for searching the trajectories of robot manipulators for assembly and welding based on a neural network are proposed. The proposed approach, unlike the known ones, allows to effectively take into account the complex shape of the elements of the robotic technological cell. The effectiveness of the proposed approach is confirmed by the results of modeling.*

**Keywords:** *robot manipulator, neural network, trajectory planning, configuration space.*