

2. Расстояние между точками должно быть не менее 10 мкм.

3. Методическая погрешность по абсолютному значению отклонения параметров реальной поверхности от рассчитанных параметров моделируемой поверхности не превышает $0,1 \cdot 10^{-6}$ м.

ВЫВОДЫ

Разработанный метод обладает следующими преимуществами:

- высокой точностью – методическая погрешность по абсолютному значению не превышает $0,1 \cdot 10^{-6}$ м;
- возможностью измерения расположенной произвольным образом поверхности, что позволяет, в частности, решать задачу определения соосности;
- возможностью определения отклонений формы.

УДК 681.5.015

СИНТЕЗ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ В КОНФИГУРАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ

Докт. техн. наук, проф. ПАШКЕВИЧ А. П., асп. КОЖЕВНИКОВ М. М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Эффективное внедрение и эксплуатация роботизированных технологических комплексов (РТК) сборки и сварки тесно связаны с созданием систем компьютерного проектирования и аналитического программирования РТК. Одной из наиболее трудоемких задач является генерация последовательности программных движений робота-манипулятора и синтеза траектории, свободной от столкновения с препятствиями [1]. В работе предлагается решение этой задачи на основе концепции конфигурационного пространства с учетом специфики сборки/сварки.

Анализ существующих работ показывает, что в настоящее время для решения рассматриваемой задачи используются три основных класса методов на основе: динамического программирования; гармонических функций; искусственных нейронных сетей. Так, первый подход развивается [2, 3]. Исследования показали, что в случае плоских карт конфигурационного пространства невысокой дискретности эффективным является применение A^* -алгоритма. В [4, 5] для решения задачи син-

теза траектории робота предложено использовать гармонические функции. В качестве аналоговой модели гармонической функции использована резистивная сетка, состояние которой приближает решение уравнения Лапласа при граничных условиях первого рода. Третий подход развивается в [6], где предложена модификация сети Хопфильда, предназначенная для решения задачи синтеза оптимальной последовательности движений мобильного робота, а также для плоского «stick-like» манипулятора с двумя степенями свободы. G. Bugmann и K. Althoefer предложили несколько иной подход, основанный на NRG (Neuro Resistive Grid) сети [7, 8], позволяющий реализовать синтез последовательности движений в плоском конфигурационном пространстве манипулятора MA2000. Здесь используется алгоритм расчета состояния сети, реализующего грубое приближение гармонической функции (так называемый To&Fro алгоритм).

Как показал проведенный анализ, существующие алгоритмы синтеза программных дви-

жений в конфигурационном пространстве не учитывают специфику сварочно-сборочных роботов-манипуляторов, а также технологические требования, предъявляемые при сборке и сварке. Поэтому возникает необходимость в разработке новых алгоритмов синтеза программных движений, учитывающих особенности сборочно-сварочных РТК. В данной статье задача синтеза траектории решается для трехмерного конфигурационного пространства с учетом реальной геометрической формы звеньев и препятствий.

В общем случае задача синтеза движений в конфигурационном пространстве робота-манипулятора заключается в отыскании последовательности точек-конфигураций, реализующих свободную от столкновения траекторию между стартовой и целевой локациями. При этом на трехмерное конфигурационное пространство сборочно-сварочного манипулятора налагаются ограничения вида:

$$q_1 \in [q_1^- \ q_1^+]; \quad q_2 \in [q_2^- \ q_2^+]; \quad q_3 \in [q_3^- \ q_3^+], \quad (1)$$

где q_i^+, q_i^- , $i = \overline{1,3}$, задают нижнее и верхнее ограничения на изменение обобщенных координат.

Тогда внешняя граница C -свободной области задается параллелепипедом (1), а ее внутренние границы определяются соответствующими границами C -препятствий

$$CO_M(B) \equiv \{q \in C_{\text{space}M} \mid (M)_q \cap B\}, \quad (2)$$

которые в общем случае могут быть несвязными. В данном случае задача синтеза программных движений сводится к определению последовательности конфигураций между стартовой и целевой точками внутри ограниченной C -свободной области. В качестве критерия, характеризующего «качество» последовательности конфигураций, выберем функционал вида

$$J(q(R)) = \sum_{R=0}^{N-1} \Phi(q(R)), \quad (3)$$

где $\Phi(q(R))$ – значение весовой функции на конфигурации $q(R)$. Тогда задача синтеза оптимальной последовательности конфигураций

может быть сформулирована следующим образом: среди всех последовательностей, существующих в заданной C -свободной области, границы которой определяются в соответствии с (1) и (2), и соединяющих стартовую q_{start} и целевую q_{goal} конфигурации, найти последовательность, на которой достигает экстремума функционал (3).

Синтез программных движений на основе гармонических функций. Предлагаемый подход к синтезу последовательности программных движений основан на аппарате трехмерных дискретных гармонических функций, обладающих свойством унимодальности [4]. Рассмотрим гармоническую функцию $\phi(x)$, $x \in R^3$, заданную в области $\Omega \subset R^3$, которая удовлетворяет уравнению Лапласа вида

$$\Delta\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial x_3^2} = 0 \quad (4)$$

и имеет непрерывные частные производные в Ω . Граничные условия зададим в виде:

$$\phi(x) = \psi(x); \quad x \in \Gamma\Omega, \quad (5)$$

где ψ – функция, определенная на границе $\Gamma\Omega$. В рассматриваемом случае граница формируется следующим образом: целевой конфигурации ставится в соответствие максимальное значение потенциала, в то время как запретным конфигурациям ставится в соответствие его минимальное значение. Тогда полученная в результате решения уравнения (4) гармоническая функция, описывающая потенциальное поле, может быть использована для градиентного поиска последовательности конфигураций q_1, q_2, \dots, q_p . При этом для указанной последовательности выполняется условие возрастания потенциала $\phi(x_1) < \phi(x_2) < \dots < \phi(x_p)$, где $x_i, i = 1:p$ – вектор, определяющий i -ю точку в трехмерном пространстве, поставленную в соответствие конфигурации q_n . Необходимо отметить, что на полученной таким образом последовательности минимизируется функционал вида $J(x_n) = \sum_{n=1}^p \phi(x_n)$. Как отмечается

в [4–7], получить точное аналитическое решение уравнения (4) в задаче генерации потенциального поля в конфигурационном пространстве невозможно вследствие сложной формы внутренних границ, которые могут быть несвязными. Поэтому для решения уравнения Лапласа (4) применим численный подход. Реализуя аппроксимацию производных разностями, приведем уравнение (4) к виду

$$\frac{\phi_{i+1,j,k} - 2\phi_{i,j,k} + \phi_{i-1,j,k}}{\Delta x_1^2} + \frac{\phi_{i,j+1,k} - 2\phi_{i,j,k} + \phi_{i,j-1,k}}{\Delta x_1^2} + \frac{\phi_{i,j,k+1} - 2\phi_{i,j,k} + \phi_{i,j,k-1}}{\Delta x_1^2} = 0.$$

Если используется сетка с одинаковым по всем трем направлениям шагом (т. е. $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = \Delta$), то уравнение может быть записано

$$\phi_{i+1,j,k} + \phi_{i-1,j,k} + \phi_{i,j+1,k} + \phi_{i,j-1,k} + \phi_{i,j,k+1} + \phi_{i,j,k-1} - 6\phi_{i,j,k} = 0. \quad (6)$$

Отсюда получим уравнение, задающее значение потенциала на (i, j, k) узле сетки:

$$\phi_{i,j,k} = (\phi_{i+1,j,k} + \phi_{i-1,j,k} + \phi_{i,j+1,k} + \phi_{i,j-1,k} + \phi_{i,j,k+1} + \phi_{i,j,k-1}) / D, \quad (7)$$

где $D=6$ для внутренних узлов сетки, а для узлов сетки, лежащих на границе $D \in \{3, 4, 5\}$. В [4, 5] указывается, что в простейшем случае численное решение уравнения Лапласа при граничных условиях (2) может быть реализовано на основе метода Гаусса–Зейделя, однако специфика систем компьютерного проектирования РТК позволяет сформулировать следующие требования к модели, реализующей потенциальное распределение на сетке. Искомая модель должна:

- формировать дискретную гармоническую функцию в приемлемое для практики время;
- реализовывать быстрый перерасчет потенциального распределения при смене карты, задающей конфигурационное пространство ма-

нипулятора, т. е. обеспечивать гибкость при изменении окружения;

- обеспечивать возможность коррекции потенциального поля с целью учета технологических ограничений, характерных для сборочно-сварочных производств.

Как отмечалось выше, одним из эффективных гибких средств синтеза гармонических функций над конфигурационным пространством являются искусственные нейронные сети с обратными связями. Однако существующие нейросетевые модели не учитывают перечисленные выше требования, поэтому актуальна задача разработки новых нейросетевых моделей синтеза трехмерных гармонических функций над конфигурационным пространством сборочно-сварочного манипулятора с учетом сформулированных требований.

Нейросетевая модель для генерации гармонической функции. В данной работе для генерации гармонической функции над трехмерным конфигурационным пространством манипулятора предлагается использовать модификацию нейронной сети типа NRG. Элементарной ячейкой предлагаемой нейронной сети является трехмерная структура, образованная шестью нейронами (рис. 1а). Выход каждого a -го нейрона поступает на вход каждого из b соседних нейронов. Предлагаемая модификация сети в отличие от известных работ [7, 8] представляет собой объединение N трехмерных структур, распределенных над областью трехмерного пространства (рис. 1б). Таким образом, каждому нейрону ставится в соответствие узел дискретной карты, задающей конфигурационное пространство. Положению нейрона в координатной системе NRG соответствует единственная конфигурация робота. На вход каждого нейрона также поступает внешний сигнал от узла, задающего слой пространственной памяти. В данном случае слой такой памяти представляет собой множество узлов, которые позволяют буферизировать состояние трехмерной карты конфигурационного пространства. Любой узел этого слоя, соответствующий запретной области в конфигурационном пространстве, имеет активность «-1», а узел, соответствующий целевой конфигурации, имеет активность «+1». Все остальные узлы

слоя пространственной памяти установлены в нуль.

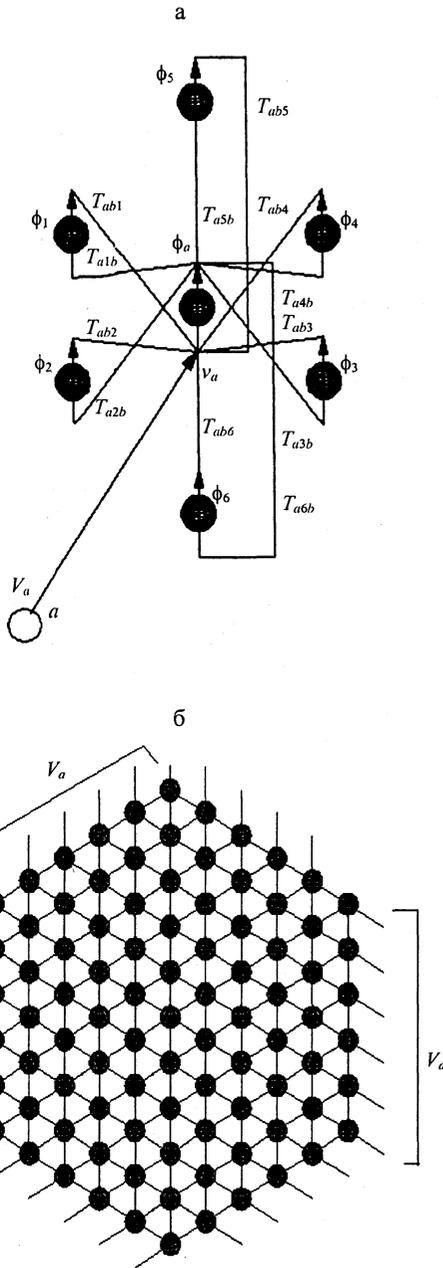


Рис. 1. Топологически упорядоченная NRG на основе трехмерных структур

Рассмотрим аналоговую модель трехмерной структуры для предлагаемой модификации NRG (рис. 2). Для удобства перейдем от трехмерных индексов (i, j, k) к одномерным, упорядочив все нейроны в лексикографическом порядке. Соответствующий одномерный индекс обозначим через $a = N^2i + Nj + k$, где N – параметр дискретизации конфигурационного про-

странства $(i, j, k \in \{1 \dots N\})$. Тогда для индексов соседних нейронов, которые обозначим через $b_1 \dots b_6$, имеем:

$$\begin{aligned} b_1(a) &= a - N^2 \rightarrow (i - 1, j, k); \\ b_2(a) &= a + N^2 \rightarrow (i + 1, j, k); \\ b_3(a) &= a - N \rightarrow (i, j - 1, k); \\ b_4(a) &= a + N \rightarrow (i, j + 1, k); \\ b_5(a) &= a - 1 \rightarrow (i, j, k - 1); \\ b_6(a) &= a + 1 \rightarrow (i, j, k + 1). \end{aligned}$$

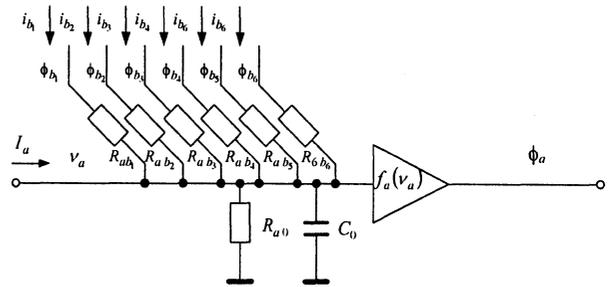


Рис. 2. Схематическое изображение аналоговой модели узла NRG

Применяя к узлу a первый закон Кирхгофа, получаем

$$\sum_{b=1}^{N^3} i_{ab} + I_a - C_0 \frac{dv_a}{dt} - \frac{v_a}{R_{a0}} = 0, \quad (8)$$

где i_{ab} – ток, текущий от узла b к узлу a ; I_a – ток от внешнего источника; v_a – значение потенциала на входе нейрона a ; суммирование ведется по всем $b = 1 \dots N^3$, так как проводимости между всеми узлами, кроме соседних, приняты равными нулю. Уравнение (8) может быть также представлено в виде

$$C_0 \frac{dv_a}{dt} = \sum_{b=1}^{N^3} \frac{\phi_b - v_a}{R_{ab}} - \frac{v_a}{R_{a0}} + I_a. \quad (9)$$

Тогда распределение потенциала в NRG задается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \tau_a \frac{dv_a}{dt} &= \sum_{b=1}^{N^3} T_{ab} \phi_b - T_{a0} v_a + V_a, \\ a &= 1, 2, \dots, N^3; \quad \phi_a = f_a(v_a), \end{aligned} \quad (10)$$

при

$$T_{ab} = R_{ab}^{-1} / \sum_{b=1}^{N^3} R_{ab}^{-1}; \quad \tau_a = C_0 / \sum_{b=1}^{N^3} R_{ab}^{-1};$$

$$T_{a0} = 1 + R_{a0}^{-1} / \sum_{b=1}^{N^3} R_{ab}^{-1}.$$

Функции активации нейронов $f_a(x)$ подбираются таким образом, чтобы для $f_a(x)$, а также для их производных существовали обратные функции (т. е. $v_a = F_a(\phi_a)$). Определим область значений для $df_a(x)/dx$ как $0 < m_a \leq df_a/dx \leq M_a$, $a = 1, 2, \dots, N^3$, тогда справедливо соотношение [6] $M_a^{-1} \leq dF_a/dx \leq m_a^{-1}$. С учетом данного выражения перейдем от (10) к системе уравнений вида

$$\tau_a \frac{dF_a(\phi_a)}{d\phi_a} \frac{d\phi_a}{dt} = \sum_{b=1}^{N^3} T_{ab} \phi_b - T_{a0} F_a(\phi_a) + V, \quad (11)$$

$$a = 1, 2, \dots, N^3,$$

либо в матричном виде

$$\tau \frac{dF(\phi)}{d\phi} \frac{d\phi}{dt} = T\phi - T_0 F(\phi) + V, \quad (12)$$

где

$$T = (T_{ab})_{N^3 \times N^3}; \quad \phi = [\phi_1 \dots \phi_{N^3}]^T; \quad T_0 = \text{diag}(T_{10} \dots T_{N^3 0});$$

$$V = [V_1 \dots V_{N^3}]^T; \quad F(\phi) = [F_1(\phi_1) \dots F_{N^3}(\phi_{N^3})]^T.$$

Причем все диагональные элементы матрицы равны нулю ($T_{ab} = 0$), так как каждый нейрон a не охвачен обратной связью. Кроме того, в каждой строке число ненулевых элементов соответствует числу соседних нейронов и равно от 3 до 6. Величины весовых коэффициентов T_{ab} , T_{b0} , а также параметры, задающие ограничения на производные активационных функций, выбираются таким образом, чтобы гарантировать существование состояния равновесия в сети, а также его асимптотическую устойчивость [9]:

$$-p_b \frac{T_{b0}}{M_b} + \sum_{a=1}^{N^3} p_a |T_{ab}| < 0, \quad \forall b = 1 \dots N^3, \quad (13)$$

где $p_a > 0$; $p_b > 0$ – положительные константы. Кроме того, при выборе весовых коэффициентов T_{ab} , T_{b0} необходимо обеспечить выполнение соотношений (7), вытекающих из уравнения Лапласа. Таким образом, выражения (11)–(13) позволяют построить нейросетевую модель потенциального поля, используемую при синтезе программных движений робота-манипулятора.

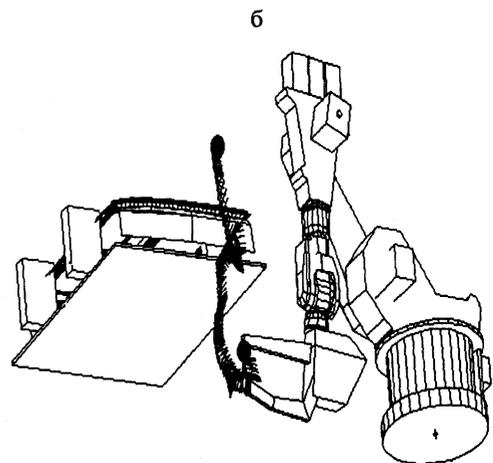
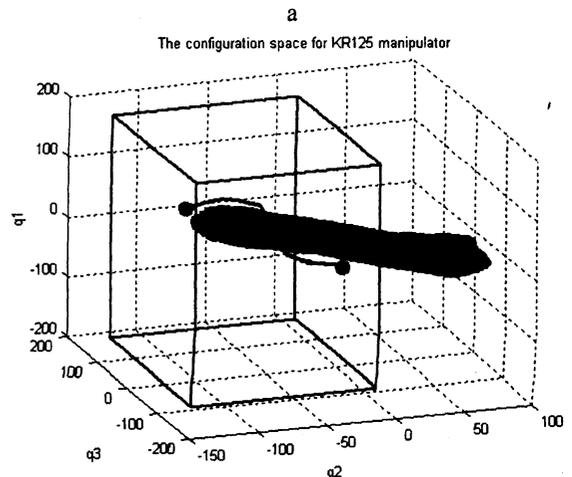


Рис. 3. Свободная от столкновения траектория между конфигурациями $q_{st} = [-26 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0]^T$ и $q_{gt} = [0 \ -57 \ 142 \ 0 \ 10 \ 0]^T$ в рабочем пространстве манипулятора KR125

Исследование эффективности предложенных алгоритмов. Эффективность разработанных алгоритмов синтеза программных движений исследована в среде подсистемы аналитического программирования САПР

ROBOMAX. Объектом исследования является роботизированная ячейка, которая включает робот-манипулятор KR125, оснащенный сварочными клещами, свариваемую деталь (кабину автомобиля Газель) и технологическую оснастку (рис. 3а). В качестве препятствия в данном случае рассматриваются сварная конструкция, технологическая оснастка, а также кондукторная плита. Полученная карта трехмерного конфигурационного пространства изображена на рис. 3б. На основе численного расчета установившегося значения вектора состояния предложенной модификации NRG-сети синтезировано приближение гармонической функции. Далее реализован алгоритм градиентного поиска последовательности конфигураций в потенциальном поле, определяемом полученным приближением этой функции. На основе данной последовательности сформированы технологические программы на языке программирования робота SRCL (Siemens Robot Control Language). Тестирование программ в системе off-line программирования показало, что они обеспечивают свободное от столкновения движение манипулятора. Таким образом, анализ результатов данных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый подход эффективен, так как полученная последовательность конфигураций дает возможность реализовать свободную от столкновений траекторию манипулятора.

ВЫВОД

Задача синтеза программных движений в конфигурационном пространстве робота манипулятора имеет важное значение при проектировании РТК сварки и сборки. В данной работе предложен эффективный алгоритм синтеза программных движений для сборочно-сварочных манипуляторов. В отличие от известных процедур данный алгоритм позволяет учесть геометрические характеристики конфигурационных пространств промышленных роботов, а также технологические требования, предъявляемые при сборке и сварке. Предложенный

алгоритм основан на синтезе дискретной гармонической функции над трехмерным конфигурационным пространством манипулятора. Далее в полученном таким образом потенциальном поле осуществляется градиентный поиск последовательности, соединяющей стартовую и целевую конфигурации манипулятора. Для реализации гармонической функции над трехмерным конфигурационным пространством разработана модификация NRG-сети.

Экспериментальная проверка предложенного алгоритма синтеза в системе САПР ROBOMAX показала, что он позволяет эффективно реализовать свободную от столкновения траекторию в конфигурационном пространстве сборочно-сварочного робота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашкевич А. П. Автоматизированное проектирование промышленных роботов и робототехнологических комплексов для сборочно-сварочных производств. – Мн.: БГУИР, 1996.
2. Althoefer K. Neuro-Fuzzy Motion Planning / Dept. of Electronic and Electrical Eng., Kings's College University of London, 1996.
3. Latombe J.-K. Robot Motion Planning. – Boston, 1991.
4. Connolly C. I., Burnas J. B., Weiss R. Path Planning Using Laplace's Equation // Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation. – Los Alamos, 1990. – P. 2102–2106.
5. Connolly C. I. Burnas J. B. A Model for the Functioning of the Striatum // Biological Cybernetics, 68, Springer-Verlag, 1993. – P. 535–544
6. Glasius R., Komoda A., Gielen S. Neural Network Dynamics for Path Planning and Obstacle Avoidance // Neural Networks. – Vol. 8., № 1. – P. 125–133, Elsevier Science Ltd., USA, March 1994.
7. Bugmann G., Tylor J. G., Denham M. J. Route finding by Neural Nets // Neural Networks, Alfred Waller Ltd., Henley-on-Thames, UK, 1995. – P. 217–230.
8. Althoefer K., Fraser D. A., Bugmann G. Rapid Path Planning for Robotic Manipulators Using an Emulated Resistive Grid // Electronics Letter. – Vol. 31, № 22. – P. 1960–1961, Stevenage, UK, October 26, 1995.
9. Guan Z-H., Chen G., Qin Y. On Equilibria, Stability, and Instability of Hopfield Neural Networks // IEEE Transaction on Neural Networks. – Vol. 11, № 2, March 2000. – P. 534–540.