



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-49-57>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.5.015

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

М.М. КОЖЕВНИКОВ¹, О.А. ЧУМАКОВ², И.Э. ИЛЮШИН¹, А.А. ЮРКИНА¹

¹Могилевский государственный университет продовольствия
(г. Могилев, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 29 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Перспективным направлением модернизации производственных технологических процессов, использующих лазерную резку металлических заготовок, является создание роботизированных линий, выполняющих операции резки с высокой производительностью и точностью. Современные роботы-манипуляторы с вращательными осями позволяют достаточно эффективно ориентировать инструмент при выполнении операций лазерной резки, однако их широкое внедрение сдерживается низкой эффективностью известных подходов к компоновке роботизированных линий. Такие подходы основаны на применении типовых конструктивных решений с дальнейшим поиском движений звеньев робота методом проб и ошибок и зачастую не позволяют обеспечить необходимое качество траектории режущего инструмента. В данной работе предложена новая методика оптимизации положения робота-манипулятора относительно контура резки, учитывающая, по сравнению с известными подходами, ограничения на возможности движений режущего инструмента, а также кинематические и геометрические ограничения на движения самого робота. Предложенная методика основана на кинематической модели робота-манипулятора и режущего инструмента и позволяет найти координаты положения базы робота-манипулятора, при которых он сможет перемещать режущий инструмент вдоль контура резки с минимальным объемом движений в сочленениях. Поиск оптимальных координат положения базы робота-манипулятора производится в два этапа. На первом этапе область допустимых значений координат базы дискретизируется с некоторым шагом, и для каждого дискретного значения ищется траектория, на которой минимизируется объем движений в сочленениях робота. При этом учитываются технологические ограничения на ориентацию режущего инструмента относительно контура резки, а также кинематические и геометрические ограничения на движения робота-манипулятора. На втором этапе выбирается такая позиция базы, которой соответствует наименьший объем движения при перемещении технологического инструмента вдоль контура резки. Эффективность использования предложенной методики продемонстрирована на модельных примерах. Методика может быть применена при проектировании новых компоновок роботизированных комплексов лазерной резки металлических заготовок для предприятий машиностроения.

Ключевые слова: робот-манипулятор, лазерная резка, оптимизация положения, технологические ограничения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Илюшин И.Э., Юркина А.А. Методика оптимизации положения робота-манипулятора в технологическом процессе лазерной резки. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 49-57.

METHOD OF OPTIMIZATION OF THE ROBOT-MANIPULATOR POSITION IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF LASER CUTTING

MIKHAIL M. KAZHEUNIKAU¹, OLEG A. CHUMAKOU², IGOR E. ILIUSHIN¹,
ANNA A. JURKINA¹

¹*Mogilev State University of Food Technologies (Mogilev, Republic of Belarus)*

²*Belorussian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 29 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A promising direction for the production processes modernization which uses laser cutting of metal blanks is the creation of the robotic lines that perform cutting operations with high productivity and accuracy. Modern robotic manipulators with rotational axes allow to orientate the tool quite effectively when performing laser cutting operations, however, their widespread adoption is constrained by the low efficiency of the known approaches to the layout of robotic lines. Such approaches are based on the use of standard design solutions with a further search for the robot links movements by trial and error, and often do not allow to ensure the required quality of the cutting tool path. In this paper, we propose a new technique for optimizing the robot-manipulator position relative to the cutting contour, which takes into account, compared with known approaches, constraints on the possibilities of the cutting tool movements, as well as kinematic and geometric constraints on the movements of the robot itself. The proposed technique is based on a kinematic model of a robot manipulator and a cutting tool and allows finding the coordinates of the robot manipulator base position, at which it can move the cutting tool along the cutting contour with a minimum range of movements in the joints. The search of the optimal coordinates of the robotic manipulator base position is carried out in two stages. At the first stage, the area of admissible values of the coordinates of the base is discretized with a certain step and for each discrete value it is a trajectory sought on which the range of movements in the joints of the robot is minimized. This allows to take into account technological constraints on the orientation of the cutting tool relative to the cutting contour, as well as kinematic and geometric restrictions on the movements of the robot manipulator. At the second stage a position of the base is selected which corresponds to the minimal volume of movement when the technological tool is moving along the cutting contour. The effectiveness of the proposed method is demonstrated on model examples. The technique can be used in the design of new layouts of robotic systems for laser cutting of metal blanks for mechanical engineering enterprises.

Keywords: robot-manipulator, laser cutting, position optimization, technological constraints.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kazheunikau M.M., Chumakou O.A., Iliushin I.E., Jurkina A.A. Method of optimization of the robot-manipulator position in the technological process of laser cutting. Doklady BGUIR. 2021; 19(3): 49-57.

Введение

Дальнейшее повышение эффективности и гибкости производственных процессов лазерной резки может быть достигнуто на основе использования роботизированных линий. Такие линии экономически обоснованы в условиях мелкосерийного и среднесерийного производства при наличии ряда модификаций производимых изделий [1, 2]. Применение роботов-манипуляторов позволяет достаточно быстро и эффективно перенастроить линию на изменившиеся параметры линии реза и заготовки, путем перепрограммирования системы управления. Например, в кузовном производстве роботизированная лазерная резка показала эффективность на операциях обрезки кромок и реза проемов в металлических заготовках [3].

Современные промышленные роботы-манипуляторы с шестью и более степенями свободы позволяют эффективно ориентировать режущий инструмент относительно линий реза сложной геометрии, однако возникает ряд трудностей, связанных с поиском рационального расположения робота относительно таких линий реза и заготовок. При этом ряд ограничений

накладывается на траектории движения звеньев робота и режущего инструмента. В ряде известных работ [2, 4, 5] предложены критерии компоновки роботизированной линии, позволяющие учесть такие факторы, как кинематические ограничения, быстродействие, столкновения робота с препятствиями, находящимися в его в рабочей зоне. Однако эти подходы к компоновке роботизированных линий основаны на применении типовых конструктивных решений, которые предполагают доступность всех точек на линии реза. При этом проверяется достижимость линии реза инструментом при разных положениях базы и конфигурациях манипулятора. Поиск движений звеньев робота выполняется методом проб и ошибок до достижения приемлемой ориентации режущего инструмента, что зачастую не обеспечивает высокое качество траектории.

В данной работе предложена методика поиска оптимального положения робота-манипулятора относительно контура резки, учитывающая, по сравнению с известными подходами, ограничения на возможности движений режущего инструмента, а также кинематические и геометрические ограничения на движения самого робота.

Методика проведения исследования

Технология лазерной резки предполагает обход некоторого контура технологическим инструментом. Такой контур может быть с достаточной для практики точностью представлен в виде множества векторов $\{p_i \in R^3\}$, $i=1 \dots N$, определяющих координаты последовательности точек, через которые должна пройти рабочая точка режущего инструмента (рис. 1). Обычно в качестве инструмента используется твердотельный лазер, при этом луч лазера должен быть сориентирован строго перпендикулярно к поверхности металлической заготовки. Обозначим единичный вектор нормали к поверхности заготовки в i -й точке контура резки как $n_i \in R^3$, а направление перемещения рабочей точки режущего инструмента – единичным вектором, касательным к линии контура, $a_i = (p_{i+1} - p_i) / |p_{i+1} - p_i|$. Тогда положение и ориентация режущего инструмента, находящегося в i -й точке контура резки, могут быть заданы следующей матрицей однородного преобразования:

$$H_i = \begin{bmatrix} a_i & a_i \times n_i & n_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4}, \text{ где «} \times \text{» – символ, обозначающий векторное произведение.}$$

При обходе контура допускается вращать твердотельный лазер на угол $\gamma \in (-\pi, \pi]$ вокруг вектора нормали $n_i = [n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}]^T$ к поверхности заготовки. При этом ограничимся дискретными значениями угла $\gamma_j = \Delta\gamma j$, где $\Delta\gamma$ – шаг дискретизации, $j=0 \dots M$. Тогда однородная матрица положения и ориентации режущего инструмента, повернутого на угол γ_j вокруг вектора нормали n_i , будет иметь вид

$$L_{i,j} = R_{i,j} H_i, \tag{1}$$

где $R_{i,j}$ – однородная матрица вращения на угол γ_j вокруг вектора нормали n_i , равная

$$R_{i,j} = \begin{bmatrix} n_{xi}^2 V_{\gamma_j} + C_{\gamma_j} & n_{xi} n_{yi} V_{\gamma_j} - n_{zi} S_{\gamma_j} & n_{xi} n_{zi} V_{\gamma_j} + n_{yi} S_{\gamma_j} & 0 \\ n_{xi} n_{yi} V_{\gamma_j} + n_{zi} S_{\gamma_j} & n_{yi}^2 V_{\gamma_j} + C_{\gamma_j} & n_{yi} n_{zi} V_{\gamma_j} - n_{xi} S_{\gamma_j} & 0 \\ n_{xi} n_{zi} V_{\gamma_j} - n_{yi} S_{\gamma_j} & n_{yi} n_{zi} V_{\gamma_j} + n_{xi} S_{\gamma_j} & n_{zi}^2 V_{\gamma_j} + C_{\gamma_j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где $C_{\gamma_j} = \cos(\gamma_j)$; $S_{\gamma_j} = \sin(\gamma_j)$; $V_{\gamma_j} = 1 - \cos(\gamma_j)$.

Зададим ориентацию фланца робота-манипулятора тройкой единичных векторов $a_f, a_f \times n_f, n_f$. Тогда геометрические параметры режущего инструмента, закрепленного на фланце, можно определить следующим образом: T – смещение рабочей точки режущего инструмента относительно точки крепления к фланцу; L – смещение рабочей точки режущего инструмента вдоль вектора n_i ; φ – угол поворота фланца режущего инструмента вокруг

вектора a_f . С учетом этих параметров определим однородную матрицу преобразования, связывающую систему координат фланца с системой координат рабочей точки режущего инструмента:

$${}^F T_t = \begin{bmatrix} -\cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & -L \cdot \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) & 0 & L \cdot \sin(\varphi) \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

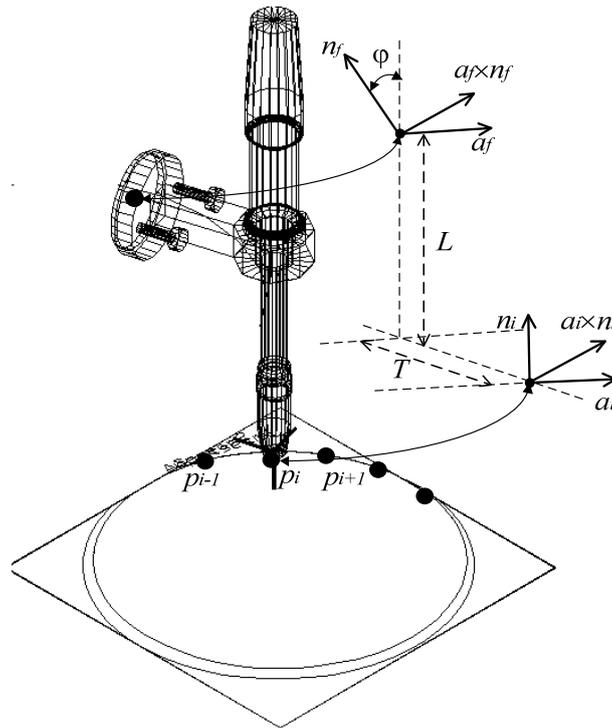


Рис. 1. Системы координат и параметры режущего инструмента
Fig. 1. Coordinate systems and cutting tool parameters

Положение и ориентация системы координат, связанной с базой робота-манипулятора относительно мировой системы координат (x_w, y_w, z_w) (рис. 2), заданы однородной матрицей преобразования

$${}^0 T_b^k = R(\delta_k) T(x_k), \quad (3)$$

где $R(\delta_k)$ – матрица, определяющая ориентацию базы робота относительно мировой системы координат (x_w, y_w, z_w) ; k – номер положения базы робота на дискретной сетке ($k=1, \dots, K$); $\delta_k = [\delta_{1k}, \delta_{2k}, \delta_{3k}]^T$ – вектор углов поворота базы робота относительно мировой системы координат; T – матрица, характеризующая сдвиг базы робота относительно мировой системы координат; $x_k = [x_k, y_k, z_k]^T$ – вектор сдвига базы робота относительно мировой системы координат.

С учетом (1) и (3) манипуляционную задачу по перемещению режущего инструмента роботом-манипулятором, размещенным в положении с номером k , можно представить в виде следующего матричного уравнения:

$$L_{i,j}^k = {}^0 T_b^k \cdot {}^b T_r(q_{i,j}^k) \cdot {}^F T_t, \quad (4)$$

где $T_r(q_{i,j}^k)$ – матрица преобразования, определяемая геометрическими характеристиками звеньев робота-манипулятора в зависимости от вектора углов поворота сочленений $q_{i,j}^k \in \mathbf{R}^d$, d – число степеней свободы робота-манипулятора.

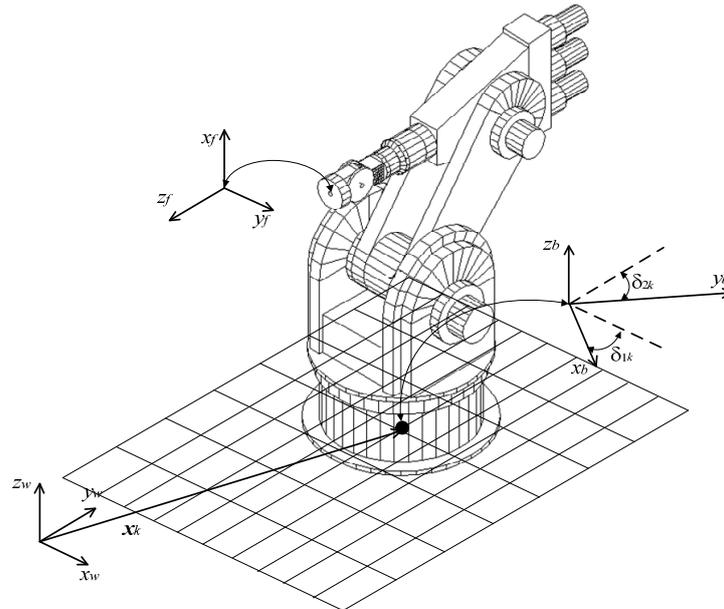


Рис. 2. Системы координат и параметры робота-манипулятора
Fig. 2. Coordinate systems and parameters of robot-manipulator

Величины углов в сочленениях манипулятора $q_{i,j}^k$ для каждого значения угла ориентации режущего инструмента γ_j и вектора сдвига базы манипулятора x_i могут быть получены путем применения известных алгоритмов решения обратной задачи кинематики [6, 7] к матричному уравнению (4). При этом для каждого из d индикаторов конфигурации μ робота-манипулятора, размещенного в позиции x_k , может быть найдено $M \cdot K$ векторов $q_{i,j}^k$, определяющих траектории изменения углов в его сочленениях при перемещении инструмента вдоль контура резки. На координаты каждого из векторов $q_{i,j}^k$ накладываются кинематические ограничения и ограничения на близость к препятствиям. В общем виде такие ограничения могут быть заданы следующим образом:

$$\Psi_{kin}(q_{i,j}^k, \mu) = 0, \quad \Psi_{col}(q_{i,j}^k, \mu) = 0, \quad (5)$$

где Ψ_{kin} , Ψ_{col} – бинарные функции, неравные нулю при нарушении кинематических ограничений и ограничений на близость к препятствиям соответственно. Более конкретный вид ограничений (5) будет определяться конструктивными особенностями манипулятора и формой препятствий.

Качество каждой траектории робота-манипулятора, размещенного в позиции x_k , можно оценить по объему движений в каждом из $n = 1, \dots, d$ углов в сочленениях робота-манипулятора:

$$J_n = \sum_{i=1}^N |q_{n,i,j}^k - q_{n,i-1,l}^k|. \quad (6)$$

Тогда траектория движения робота вдоль контура резки с минимальным объемом движений может быть найдена путем минимизации следующего критерия:

$$\min_{\gamma_j} \sum_{n=1}^d w_n J_n. \quad (7)$$

С учетом (7) задача поиска оптимального положения базы манипулятора относительно контура резки может быть записана в виде

$$F_{opt} = \min_{\gamma_j} \sum_{n=1}^d w_n J_n \rightarrow \min_{x_k}, \quad (8)$$

где w_n – весовые коэффициенты.

Учитывая содержательный смысл задачи (в процессе движения режущего инструмента положение базы манипулятора x_k должно быть неизменным), оптимизация проводится по следующей методике в два этапа. На первом этапе область значений $x_k \in [x_{\min} x_{\max}]$ дискретизируется с некоторым шагом Δx , и для каждого дискретного значения ищется траектория, на которой минимизируется критерий качества (7), при ограничениях (4), (5) для фиксированного значения индикатора конфигурации μ . Далее выбирается такая позиция базы манипулятора x_k , которой соответствует наименьшее значение критерия качества (8). Минимизация критерия качества (7) может быть эффективно выполнена, например, с использованием аппроксимации пространства поиска методом направленного графа, предложенного в авторских работах [8–10].

Результаты и их обсуждение

Для демонстрации эффективности предложенной методики рассмотрим два исследованных модельных примера. В качестве первого примера рассмотрен плоский трехзвенный манипулятор с тремя вращательными сочленениями (рис. 3). Моделирование выполнено с использованием программного пакета Matlab. Манипулятор состоит из трех звеньев длиной $l_1=1,0$ м, $l_2=1,0$ м и $l_3=0,25$ м. Контур резки задан форме квадрата со стороной $d=0,8$ м, углы которого скруглены с радиусом $r=0,1$ м. Центр контура размещен в точке $(1,0$ м, $1,0$ м), причем контур окружен препятствием, размещенным от него на расстоянии $\Delta d=0,05$ м. Дискретизация контура выполнена равномерно посредством 60 узлов.

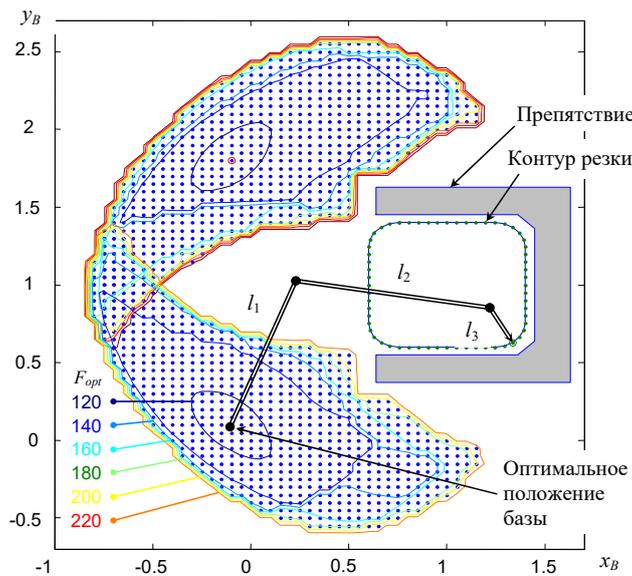


Рис. 3. Положения базы и значения критерия качества для трехзвенного манипулятора
Fig. 3. Base positions and quality criterion values for a three-link manipulator

На рис. 3 положения базы робота показаны точками, а оптимальные положения для значений индикатора конфигурации $\mu = -1$ и $\mu = 1$ обведены кругом. Линии уровня показывают области с одинаковым значением критерия качества траектории (7). Результаты поиска положения базы плоского манипулятора при различных значениях весовых коэффициентов и индикаторах конфигурации приведены в табл. 1. При моделировании использована сетка шагом $0,05$ м, включающая 61 узел. Симметрия области потенциальных решений объясняется симметрией контура резки и контура препятствия.

Второй модельный пример (рис. 4) показывает применение шестисотого промышленного манипулятора Fanuc 710iC/50 при лазерной резке сглаженного контура круглой формы. Моделирование выполнено с использованием разработанного в ходе исследований программного обеспечения на базе системы Autodesk Inventor. Манипулятор состоит из трех вращательных звеньев, выполняющих переносные движения, и кисти с тремя степенями подвижности.

Степени свободы кисти обеспечивают ориентирование режущего инструмента. Контур резки представляет собой окружность, нанесенную на плоскую металлическую заготовку (квадрат с окружностью на рис. 4 *a, b*). Дискретизация контура выполнена равномерно посредством 100 узлов. На рис. 4, *a* возможные положения базы робота показаны цилиндрами, причем высота цилиндра пропорциональна значению критерия качества (7). Соответственно положения, обозначенные цилиндрами наименьшей высоты, минимизируют критерий (7) для трех первых индикаторов конфигурации манипулятора Fanuc 710iC/50. Для большей наглядности рис. 4, *b* показывает компоновку роботизированной ячейки на виде сверху. Проведенные эксперименты показывают, что предложенная методика позволяет достаточно эффективно определять оптимальное положение базы робота-манипулятора при движении режущего инструмента по сглаженной траектории.

Таблица 1. Результаты поиска координат базы плоского манипулятора при различных значениях весовых коэффициентов

Table 1. Results of coordinates searching of the planar manipulator base for different values of the weight coefficients

Весовые коэффициенты Weight coefficients			F_{opt}		Координаты базы робота-манипулятора The coordinates of the robotic arm base			
w_1	w_2	w_3	$\mu = -1$	$\mu = 1$	$\mu = -1$		$\mu = 1$	
					x	y	x	y
1	1	0	121,71	122,83	0,65	2	0,75	-0,1
1	1	1	120,4	120,45	-0,1	1,8	-0,1	0,15
2	1	1	116,65	116,59	-0,1	1,8	-0,1	0,1
3	1	1	114,27	114,27	-0,15	1,8	-0,1	0,1
4	1	1	112,6	112,57	-0,15	1,8	-0,15	0,1

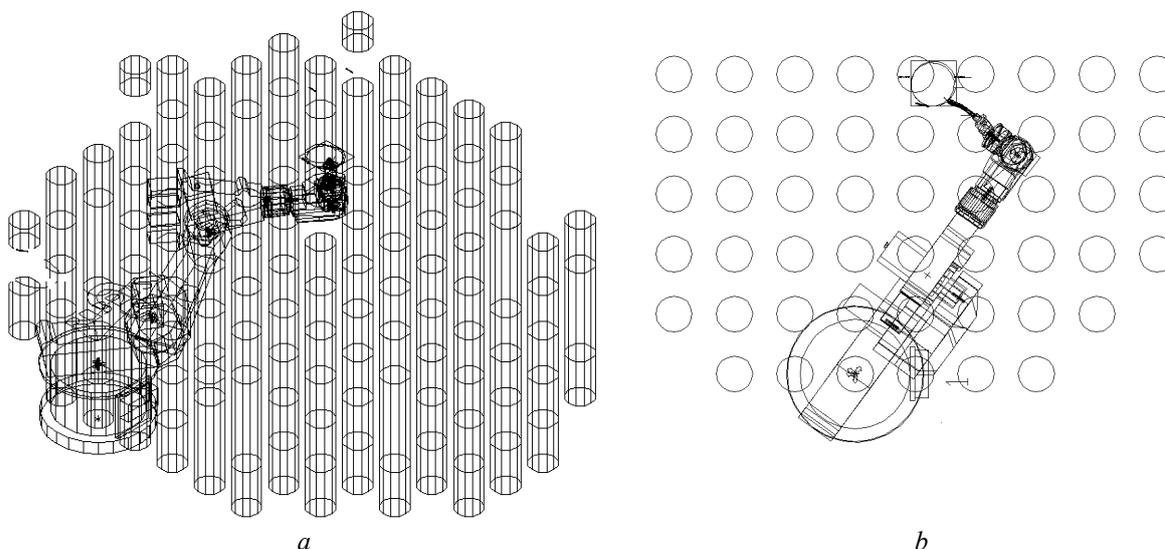


Рис. 4. Робот-манипулятор Fanuc 710iC/50 при лазерной резке кругового контура:

a – трехмерный вид; *b*– вид сверху

Fig. 4. Robotic manipulator Fanuc 710iC/50 for laser cutting of a circular contour:

a – three-dimensional view; *b*– view from above

Заключение

Разработана новая методика оптимизации положения базы робота-манипулятора, применимая при компоновке роботизированных линий лазерной резки. Предложенная методика, по сравнению с известными подходами, учитывает кинематические и геометрические ограничения на движения робота-манипулятора и режущего инструмента, а также позволяет найти положение робота, при котором режущий инструмент будет перемещаться по контуру резки с минимальным значением критерия объема движений в сочленениях.

Исследование предложенной методики проведено на модельных примерах. С целью оценки эффективности выполнено сравнение качества траекторий движения робота Fanuc 710iC/50 вдоль сглаженных круговых контуров резки с использованием типовой компоновки робототехнического комплекса и компоновки, оптимизированной по предложенной методике. Исследование показало, что применение оптимизированной компоновки позволяет в среднем на 20 % снизить объем движений робота Fanuc 710iC/50 вдоль контура резки по сравнению с типовой компоновкой, полученной методом геометрического моделирования.

Список литературы

1. Groover M. P. *Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing. 4th edition.* Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 2015.
2. Moslemipour G., Lee T., Rilling D. A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2012;60(1):11-27. DOI: 10.1007/s00170-011-3614-x
3. Dolgui A., Pashkevich A. Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting. *International Journal of Production Research.* 2009;47(20):5691-5715. DOI: 10.1080/00207540802070967.
4. Moharana B., Gupta R., Kushawaha B. Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot. *International Journal of Engineering Trends and Technology.* 2014;10(4):176-179. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V10P233.
5. Geiger M., Kach A. Integration of Laser Material Processing into the Computer-Aided Product and Process Development. *Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering.* 2000:69. DOI: 10.1007/978-94-015-9966-5_31.
6. Dolgui A., Pashkevich A. Manufacturing process planning for laser cutting robotic systems. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control.* 2008:14822-14827. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02509.
7. Qiao S., Liao Q., Wei S., Su H.J. Inverse kinematic analysis of the general 6R serial manipulators based on double quaternions. *Mechanism and Machine Theory.* 2010;45(2):19-199. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2009.05.013.
8. Pashkevich A.P., Dolgui A.B., Chumakov O.A. Multiobjective optimization of robot motion for laser cutting applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing.* 2004;17:171-183. DOI: 10.1080/0951192031000078202.
9. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Шеменков В.М., Илюшин И.Э. Методы и алгоритмы планирования траекторий роботов-манипуляторов для лазерной резки. *Вестник БПУ.* 2019;2:4-13.
10. Кожевников М.М., Чумаков О.А., Шеменков В.М., Илюшин И.Э., Юркина А.А. Оптимизация траекторий промышленных роботов-манипуляторов для лазерной резки. *Вестник БПУ.* 2020;2(67):21-30.

References

1. Groover M. P. *Automation, Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing. 4th edition.* Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 2015.
2. Moslemipour G., Lee T., Rilling D. A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2012;60(1):11-27. DOI: 10.1007/s00170-011-3614-x.
3. Dolgui A., Pashkevich A. Manipulator motion planning for high speed robotic laser cutting. *International Journal of Production Research.* 2009;47(20):5691-5715. DOI: 10.1080/00207540802070967.
4. Moharana B., Gupta R., Kushawaha B. Optimization and Design of a Laser-Cutting Machine using Delta Robot. *International Journal of Engineering Trends and Technology.* 2014;10(4): 176-179. DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V10P233.
5. Geiger M., Kach A. Integration of Laser Material Processing into the Computer-Aided Product and Process Development. *Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering.* 2000:69. DOI: 10.1007/978-94-015-9966-5_31.
6. Dolgui A., Pashkevich A. Manufacturing process planning for laser cutting robotic systems. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control.* 2008:14822-14827. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02509.
7. Qiao S., Liao Q., Wei S., Su H.J. Inverse kinematic analysis of the general 6R serial manipulators based on double quaternions. *Mechanism and Machine Theory.* 2010;45(2):19-199. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2009.05.013.

8. Pashkevich A.P., Dolgui A.B., Chumakov O.A. Multiobjective optimization of robot motion for laser cutting applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2004;17:171-183. DOI: 10.1080/0951192031000078202.
9. Kazheunikau M.M., Chuakou O.A., Shemenkov V.M., Iliushin I.E. [Methods and algorithms for planning trajectories of robotic manipulators for laser cutting]. *Vestnik BRU*. 2019;2:4-13. (In Russ.)
10. Kazheunikau M.M., Chumakou O.A., Shemenkov V.M., Iliushin I.E., Jurkina A.A. [Trajectory optimization of industrial robotic manipulators for laser cutting]. *Vestnik BRU*. 2020;2(67):21-30. (In Russ.)

Вклад авторов

Кожевников М.М. осуществил постановку задачи для проведения исследования, разработал основные подходы к оптимизации положения робота, подготовил рукопись статьи.

Чумаков О.А. разработал методику оптимизации положения робота-манипулятора относительно контура лазерной резки.

Илюшин И.Э. выполнил алгоритмизацию методики оптимизации положения робота-манипулятора.

Юркина А.А. провела исследования по оценке эффективности методики оптимизации на модельных примерах.

Authors' contribution

Kazheunikau M.M. defined the task of the study, developed basic approaches to robot position optimization, submitted the manuscript of the article.

Chumakou O.A. developed the methodology for optimizing the position of the robot-manipulator regarding the laser cutting contour.

Iliushin I.E. performed the algorithmization of the position optimizing methodology for robot-manipulator.

Jurkina A.A. investigated the estimation of the optimization methodology effectiveness using model examples.

Сведения об авторах

Кожевников М.М., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Чумаков О.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Илюшин И.Э., старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Юркина А.А., аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств Могилевского государственного университета продовольствия.

Information about the authors

Kazheunikau M.M., PhD, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production of the Mogilev State University of Food Technologies.

Chumakou O.A., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Control System Department of the Belorussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Iliushin I.E., Senior Lecturer at the Department of Automation of Technological Processes and Production of the Mogilev State University of Food Technologies.

Jurkina A.A., Postgraduate student at the Department of Automation of Technological Processes and Production of the Mogilev State University of Food Technologies.

Адрес для корреспонденции

212027, Республика Беларусь,
г. Могилев, пр. Шмидта, 3,
Могилевский государственный
университет продовольствия;
тел. +375-29-240-75-99;
e-mail: kmmk@mail.ru
Кожевников Михаил Михайлович

Address for correspondence

212027, Republic of Belarus
Mogilev, Shmidta str., 3,
Mogilev State University
of Food Technologies;
tel. +375-29-240-75-99;
e-mail: kmmk@mail.ru
Kazheunikau Mikhail Mikhailovich