

УДК 681.5.015

М. М. КОЖЕВНИКОВ, канд. техн. наук, доц.

О. Б. ГАНАК

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий
(Могилев, Беларусь)

МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОНОВОК РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация

Исследованы задачи автоматизированного проектирования компоновок для робототехнических систем, используемых в машиностроении. Предложены методы и критерии для поиска рациональной компоновки с минимальным временем цикла работы робототехнической системы.

Ключевые слова:

робототехническая система, автоматизированное проектирование, компоновка.

При проектировании робототехнической системы возникают задачи, связанные с созданием компоновочных чертежей, отражающих взаимное размещение роботов-манипуляторов, технологического оборудования и оснастки. Возможны разнообразные варианты таких компоновок, однако при этом наиболее важно рационально разместить робот-манипулятор относительно оборудования. Важно отметить, что правильный выбор положения базы робота существенно влияет на гибкость и производительность робототехнической системы в целом.

При создании компоновок робототехнических систем средствами автоматизированного проектирования решается задача выбора некоторого варианта компоновки из множества возможных на основе заданного критерия качества. При этом технологический инструмент должен иметь беспрепятственный доступ к оборудованию, а движения робота должны формироваться с учетом конструктивных и кинематических ограничений. К наиболее распространенным критериям оценки качества компоновки относят объем движений робота, отсутствие столкновений, время цикла. В [1, 2] указывается, что, например, компоновочная схема робототехнической системы, улучшенная минимизацией критерия времени цикла, позволяет существенно снизить это время в сравнении с традиционными подходами. Следует также отметить, что использование рациональной компоновки робототехнической системы позволяет улучшить качество траекторий и упростить программирование робота-манипулятора.

В мелкосерийном производстве робототехническая система работает в следующей последовательности: захват заготовки роботом-манипулятором и ее перемещение между единицами оборудования в соответствии с технологическим процессом, перемещение робота-манипулятора в исходное положение. Цикл многократно повторяется, соответственно сокращение его общего времени позволяет увеличить пропускную способность роботизированной системы в целом. При этом на общее время цикла будут влиять такие факторы, как порядок

обхода технологического оборудования роботом и протяженность промежуточных участков траекторий между оборудованием, и, соответственно, положение базы робота. Это положение необходимо определить на этапе создания компоновки роботизированной системы.

Известные подходы к проектированию компоновки роботизированной системы, обзор которых можно найти в [2], основаны на ориентировочном определении координат базы робота-манипулятора с применением метода «рабочая оболочка». Такой метод основан на тестировании перекрытия рабочих зон технологического оборудования и «рабочей оболочки» робота-манипулятора и при определенном размещении его базы. Если ряд единиц технологического оборудования не доступны, положение базы робота меняется за счет ее линейных смещений. Положение базы робота корректируется до тех пор, пока все рабочие зоны оборудования не будут перекрыты областью «рабочей оболочки». Этот упрощенный подход рассматривает только вопрос достижимости технологического оборудования без оценки общего времени цикла.

Задачи снижения времени цикла за счет выбора рационального положения базы манипулятора относительно оборудования рассматриваются в ряде известных работ [1–4]. В частности, методика, описанная в [1], основана на формировании некоторого множества возможных положений базы манипулятора. Для каждого такого дискретного положения вычисляется время цикла на основе решения задачи коммивояжера, а затем выбирается вариант с минимальным временем. В [2] алгоритм моделируемого отжига обеспечивает как минимизацию времени цикла изменением размещения базы робота, так и поиск рациональной последовательности движений захватного устройства. Первоначально осуществляется поиск вариантов компоновок, удовлетворяющих тесту столкновений и условиям достижимости оборудования. Затем производится поиск варианта компоновки, на которой время цикла минимально на основе эвристических методов. В [3] разработана методика поиска рационального положения робота-манипулятора относительно оборудования с минимизацией времени цикла. В этой работе проведено экспериментальное исследование зависимости между временем цикла и взаимным положением оборудования и робота-манипулятора. На основе полученных экспериментальных зависимостей выполнен поиск координат базы робота, при которых время цикла минимально. Проведенные исследования показали, что по сравнению с компоновками, полученными традиционными методами, среднее время цикла можно снизить на 37 %.

Авторы [5] исследовали методику поиска рационального положения базы манипулятора в сложном рабочем пространстве с препятствиями. Качество компоновки робототехнической системы оценивалось по качеству траекторий, реализуемых технологическим инструментом на этой компоновке. Такой метод основан на том, что для каждого возможного положения базы манипулятора выполняется поиск допустимой траектории.

Аналогичная задача рассмотрена в [6]. Особенностью предлагаемой авторами этой работы методики является то, что при фиксированной рабочей

точке технологического инструмента ищется минимальное энергопотребление робота за счет изменения положения базы манипулятора.

В данной работе предложены новые методы и критерии для поиска рациональной компоновки с минимальным временем цикла работы робототехнической системы. Исходными данными при поиске рациональной компоновки робототехнической системы являются [7]: геометрические модели технологического инструмента, оборудования, геометрическая и кинематическая модели робота-манипулятора.

Поиск положения базы робота-манипулятора, при котором минимизируется некоторый критерий J , осуществляют путем последовательного повторения следующих шагов для каждого возможного положения базы:

- 1) проверка достижимости оборудования роботом-манипулятором;
 - 2) тестирование столкновений между оборудованием и роботом-манипулятором;
 - 3) оценка величины критерия качества J .
- Алгоритм вычислений приведен на рис. 1.

Алгоритм 1. Определение положения базы b оптимального по критерию времени цикла c	
1: $c \leftarrow \infty$	1
2: $b \leftarrow O$	1
3: для всех b_i	1
4: $c_i = J(b_i)$	1
5: если $c_i < c$ то	1
6: $c \leftarrow c_i$	1
7: $b \leftarrow b_i$	1
8: конец если	1
9: конец для всех	1
10: вернуть b, c	1

Рис. 1. Алгоритм поиска положения базы робота

Недостатки такого алгоритма связаны с ростом объема вычислений по мере усложнения геометрической модели роботизированной системы, при этом алгоритм позволяет найти только одно из множества возможных решений. Поиск рационального положения робота-манипулятора может сводиться к поиску максимума функции $f(b)$, которая соответствует количеству свободных от столкновений траекторий, реализуемых роботом, где b – вектор, описывающий координаты базы робота. К функции $f(b)$ не предъявляются требования непрерывности и выпуклости вследствие наличия препятствий и кинематических ограничений.

В качестве дополнительного критерия введем функцию, характеризующую удаленность робота от оборудования. При приближении технологического инструмента к оборудованию значение этой функции возрастает. Функция таким

образом зависит от величины расстояния между роботом и заданной единицей оборудования. Для промышленных роботов-манипуляторов с шестью степенями свободы это расстояние вычисляется, как расстояние от кисти робота до ближайшей точки на заданной единице оборудования.

Оценка удаленности робота-манипулятора от единицы оборудования m при положении базы робота b может быть записана как

$$\begin{aligned} m &= |d^i - r_c|; \\ d^i &= \|w_i - b\|_2; \\ r_c &= (r + R)/2, \end{aligned} \quad (1)$$

где d^i – расстояние между кистью робота с координатами w_i и точкой с координатами T_i на оборудовании; r_c – расстояние от базы робота до центра доступного ему рабочего пространства.

Значение r_c – это параметр робота-манипулятора, вычисляемый статически. На основе выражений (1) вводится модифицированный алгоритм для поиска положения базы робота-манипулятора, представленный на рис. 2. На рисунке использованы следующие обозначения: **KRA** – функция тестирования достижимости оборудования; **CF** – функция тестирования столкновений; **measure** – функция оценки расстояния до недостижимого оборудования.

Алгоритм 2. Для заданного фиксированного положения базы робота b определить достижимое оборудование n_R , доступное без столкновений оборудование n_{CF} и расстояние p до недостижимого оборудования

```

1:  $p \leftarrow 0$ 
2:  $n_R \leftarrow 0$ 
3:  $n_{CF} \leftarrow 0$ 
4: для всех от  $i=1$  до  $N_r \cdot b_i$ 
5:   если  $KRA(T_i, b) = 1$  то
6:      $n_R \leftarrow n_R + 1$ 
7:     если  $CF(T_i, b) = 1$  то
8:        $n_{CF} \leftarrow n_{CF} + 1$ 
9:     конец если
10:  иначе
11:   $m = measure(T_i, b)$ 
12:   $p \leftarrow p + m$ 
13:  конец если
13:  конец для

```

Рис. 2. Модифицированный алгоритм для поиска положения базы робота-манипулятора

Критерий для оценки качества компоновки робототехнической системы может быть представлен следующим образом:

$$f(b) = n_{cf}(b) + \alpha f_p(b). \quad (2)$$

Штрафная функция f_p в формуле (2) позволяет учесть направление поиска. Множитель α принимает значение низкое по сравнению с величиной n_{cf} , а функция f_p не выпукла. Такой подход представлен в алгоритме, приведенном на рис. 3. На рисунке обозначение FE – функция тестирования достижимости, тестирования столкновений и оценки расстояния до недостижимого оборудования, работающая в соответствии с алгоритмом, представленным ранее на рис. 2.

Алгоритм 3. Для заданного фиксированного положения базы робота b определить достижимое оборудование n_R , доступное без столкновений оборудование n_{cf} и расстояние p до недостижимого оборудования для компоновки W
1: $p \leftarrow 0$
2: $n_R \leftarrow 0$
3: $n_{cf} \leftarrow 0$
4: для всех от $i=1$ до N_w
5:инициализировать геометрическую модель W^i
6: $(p^i, n_R^i, n_{cf}^i) = FE(b)$
7: $p \leftarrow p + p^i$
8: $n_R \leftarrow n_R + n_R^i$
9: $n_{cf} \leftarrow n_{cf} + n_{cf}^i$
10: конец для

Рис. 3. Алгоритм для поиска положения базы робота-манипулятора для набора геометрических моделей робототехнической системы

Пример графической визуализации множества возможных положений базы манипулятора, полученной на базе программной реализации алгоритма 3, показан на рис. 4.

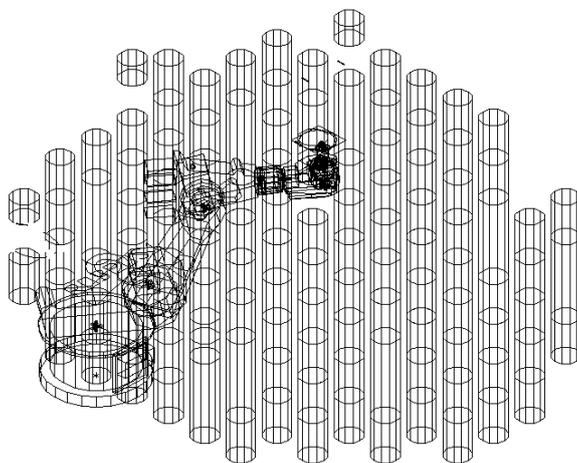


Рис. 4. Визуализация множества возможных положений базы манипулятора

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hwang, Y. K.** Optimizing Robot Placement for VisitPoint Tasks / Y. K. Hwang, P. A. Watterberg // Proceedings of the AI and Manufacturing Research Planning Project. – 1996. – P. 2–4.
2. Development of Optimisation Tools in the Context of an Industrial Robotic CAD Software Product / D. Barral [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1999. – Vol. 15, № 11. – P. 822–831.
3. Optimal robot placement using response surface method / B. Kamrani [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 44. – P. 201–210.
4. Workpiece placement optimization in robotic-based manufacturing / S. Caro [et al.] // IFAC Proceedings. – 2013. – Vol. 46. – P. 819–824.
5. **Hsu, D.** Placing a Robot Manipulator Amid Obstacles for Optimized Execution / D. Hsu, J.-C. Latombe, S. Sorkin // Proc. IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning. – 1999. – P. 280–285.
6. Multi-objective path placement optimization of parallel kinematics machines based on energy consumption, shaking forces and maximum actuator torques: Application to the Orthoglide / R. Ur-Rehman [et al.] // Mechanism and Machine Theory. – 2010. – Vol. 45. – P. 1125–1141.
7. Методика оптимального размещения роботов-манипуляторов в задачах автоматизированного проектирования / М. М. Кожевников [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 3 (76). – С. 42–51.

Контакты:

kmmk@mail.ru (Кожевников Михаил Михайлович);

mail@.bgut.by (Ганак Ольга Борисовна).

M. M. KOZHEVNIKOV, O. B. GANAK

METHODS FOR AUTOMATED DESIGN OF LAYOUTS OF ROBOTIC SYSTEMS

Abstract

The problems of computer-aided design of layouts for robotic systems which used in mechanical engineering have been studied. Methods and criteria are proposed for searching of a rational layout with minimal cycle time of a robotic system.

Keywords:

robotic system, computer-aided design, layout.