

УДК 621.9.06

DOI 10.62595/1819-5245-2026-2-28-35

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОБИЛЬНОГО РОБОТА СИСТЕМЫ ИНСТРУМЕНТООБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА В УСЛОВИЯХ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЯЧЕЙКИ

М. И. МИХАЙЛОВ, Ф. А. АББАС

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Разработана роботизированная система инструнтообеспечения обрабатывающего центра, а также траектория движений мобильного и стационарного роботов с учетом производственных условий.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, моделирование, зона обслуживания, траектория движения робота.

Для цитирования. Михайлов, М. И. Оптимизация параметров мобильного робота системы инструнтообеспечения обрабатывающего центра в условиях гибкой производственной ячейки / М. И. Михайлов, Ф. А. Аббас // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 2 (105). – С. 28–35. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-28-35>

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF A MOBILE ROBOT FOR A TOOL SUPPLY SYSTEM OF A MACHINING CENTER IN A FLEXIBLE PRODUCTION CELL

M. I. MIKHAILOV, F. A. ABBAS

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

A robotic tool supply system for a machining center has been developed, as well as a trajectory of movements for mobile and stationary robots, taking into account production conditions.

Keywords: robotic complex, modeling, service area, robot movement trajectory.

For citation. Mikhailov M. I., Abbas F. A. Optimization of the parameters of a mobile robot for a tool supply system of a machining center in a flexible production cell. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 2 (105), pp. 28–35 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-28-35>

Введение

Традиционно система инструнтообеспечения обрабатывающего центра включает в себя накопитель инструментальных блоков и стационарный робот для их замены. Достоинство таких систем заключается в автономности обработки, а к недостаткам можно отнести большую емкость накопителя, т. е. в большое количество инструментальных блоков, неиспользуемых в любой момент, что создает большие динамические нагрузки на станок и повышает стоимость обработки. Применение робототехнических систем в структуре гибких производственных систем позволяет повысить эффективность использования инструментальной оснастки.

Как известно, робототехнические системы (РТС) являются эффективным средством комплексной автоматизации производственных процессов в промышленности [1–3].

Как правило, манипуляционные системы структурно представляют собой разомкнутые кинематические цепи [4], звенья которых моделируются абсолютно твердыми телами [5–9].

Для обеспечения работоспособности РТС необходимо решать обратную задачу кинематики и динамики. Существует несколько методов решения обратных задач, к числу которых относятся методы обратных преобразований, винтовой алгебры, а также геометрический [10–12]. Программирование движений манипуляционной системы промышленного робота (Off-line программирование) обычно производится поэтапно.

На первом этапе выполняется планирование траекторий движения рабочего органа промышленного робота [13–16].

Эта задача может быть разрешена различными способами, суть которых сводится к аппроксимации или интерполяции выбранной траектории полиномами некоторого класса. Затем выбирается последовательность опорных точек, в которых производится коррекция параметров движения манипулятора на пути от начальной конечной точке траектории.

Начальная и конечная точки траектории могут быть заданы как в присоединенных, так и в декартовых координатах. Чаще всего используются декартовы координаты, поскольку в них удобнее задавать правильное положение схвата. Кроме того, присоединенные координаты не пригодны в качестве рабочей системы координат еще и потому, что оси сочленений большинства манипуляторов не ортогональны, вследствие чего невозможно независимое описание положения и ориентации схвата. Если же в начальной и конечной точках траектории требуется знание присоединенных координат, их значения можно получить с помощью программы решения обратной задачи кинематики. Как правило, траектория, соединяющая начальное и конечное положения схвата, не единственна.

На втором этапе определяются обобщенные координаты, обеспечивающие положение рабочего органа на заданной (программной) траектории [14].

Существуют два основных подхода к планированию траекторий в декартовом пространстве.

В первом из них большинство вычислений, оптимизация траекторий и последующее регулирование движения производятся в декартовых координатах. Узловые точки на заданной прямолинейной траектории в декартовом пространстве выбираются через фиксированные интервалы времени. Вычисление значений присоединенных координат в этих точках производится в процессе управления движением манипулятора.

Второй подход состоит в аппроксимации прямолинейных участков траектории в декартовом пространстве траекториями в пространстве присоединенных переменных, полученных в результате интерполяции траектории между соседними точками, – полиномами низкой степени. Регулирование движения в этом подходе производится на уровне присоединенных переменных.

Поскольку управление манипулятором осуществляется в пространстве присоединенных переменных, а траектория движения задается в декартовом пространстве, обычно пользуются полиномиальной аппроксимацией для формирования заданной траектории в декартовом пространстве.

Основой этого способа является алгоритм формирования последовательности дополнительных узловых точек на заданной декартовой траектории при аппроксимации ее кривой.

Цель работы – сокращение количества инструментальной оснастки, стационарно расположенной на обрабатывающем центре.

Методика моделирования

Система инструментообеспечения обрабатывающего центра представлена на рис. 1, включающая в себя инструментальный склад гибкой производственной ячейки (на рис. 1 не показана), накопитель инструментальных блоков, расположенный на обрабатывающем центре 1, мобильную роботизированную платформу 7, с накопителем инструментальных блоков 6, емкость которого соответствовала инструментальной наладке, необходимой для обработки детали, стационарный робот 5, промежуточную ячейку 4, загрузочный манипулятор 3 для установки инструментов в накопитель обрабатывающего центра.

Процесс автоматизации смены инструмента рассматривается на примере работы в условиях гибкой производственной ячейки обрабатывающего центра BYVER 500.

Задача РТС заключается в следующем: извлечение требуемых инструментов из инструментального склада, транспортировка их по заранее сформированной траектории к станку, сбор отработанных инструментов и установка новых – все это в процессе непрерывной работы станка для достижения максимальной производительности. После завершения цикла работы отработанный инструмент направляется в отделение восстановления и подготовки инструмента.

На мобильной платформе 7 инструмент устанавливается в барабанный накопитель 6 в ориентированном положении (рис. 1).

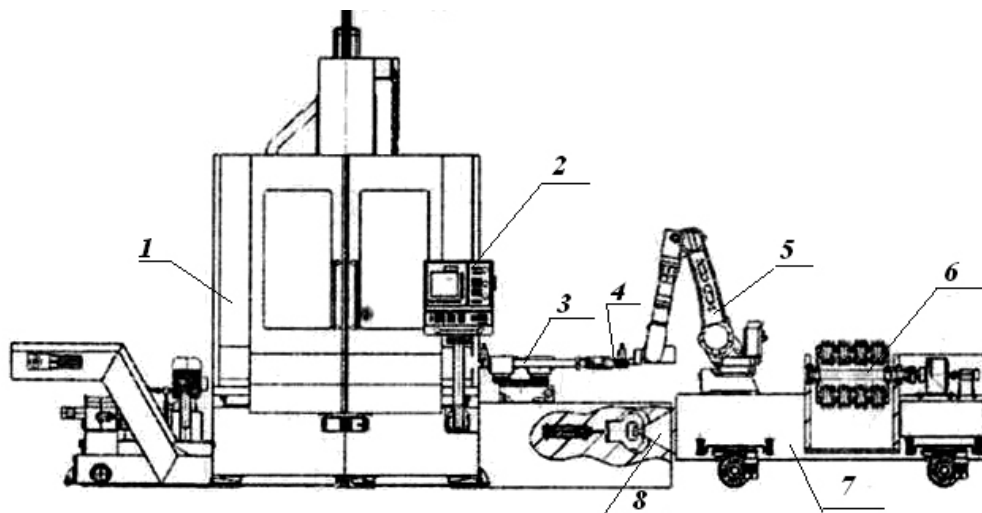


Рис. 1. Общий вид робототехнической системы

Накопитель оснащен приводом на базе электродвигателя, волнового редуктора и датчика положения. Волновой редуктор повышает выходной момент, что особенно важно при неравномерной загрузке накопителя (например, когда все инструменты сосредоточены в одной половине барабана). Для предотвращения выпадения инструментов в нижней части накопителя предусмотрены пружинные зажимы.

Подвижная платформа перемещается с помощью четырех приводных и управляемых колес. Поворот каждого колеса выполняется отдельным сервоприводом.

Таким образом, первое ограничение формируется из допускаемого радиуса поворота R_r , в соответствии с выбранной планировкой гибкой производственной ячейки:

$$R_r = \frac{L}{\operatorname{tg}\alpha_1 + \operatorname{tg}\alpha_2} \leq [R_r]. \quad (1)$$

После этого рассчитываются управляемые параметры мобильной роботизированной платформы (углы поворота внутренних и наружных колес мостов):

– внутренних колес

$$\operatorname{tg}\alpha_{iB} = \frac{L \operatorname{tg}\alpha_i}{L - 0,5B_i(\operatorname{tg}\alpha_1 + \operatorname{tg}\alpha_2)}; \quad (2)$$

– наружных колес

$$\operatorname{tg}\alpha_{iH} = \frac{L \operatorname{tg}\alpha_i}{L + 0,5B_i(\operatorname{tg}\alpha_1 + \operatorname{tg}\alpha_2)}, \quad (3)$$

где B_i – ширина колеи i -го моста.

Затем определялась взаимосвязь между углами поворота колес одного моста. Для переднего моста, изображенного на рис. 2, находим:

$$\operatorname{tg}\alpha_{1B} = \frac{AD}{R_r - 0,5B_1}; \quad \operatorname{tg}\alpha_{1H} = \frac{AD}{R_r + 0,5B_1}. \quad (4)$$

Исключив из этих выражений R_r , получаем:

$$\operatorname{ctg}\alpha_{1H} - \operatorname{ctg}\alpha_{1B} = \frac{B_1 \operatorname{tg}\alpha_1 + \operatorname{tg}\alpha_2}{L}. \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет заключить, что разница котангенсов углов поворота наружного и внутреннего колес – величина переменная при выборе управляемой точки платформы с различными углами передней и задней базами платформы ($\alpha_1 \neq \alpha_2$).

Возникновение увода передних и задних колес приводит к тому, что действительный радиус поворота отличается от теоретического (в основном в большую сторону). Кроме того, наблюдается некоторое смещение мгновенного центра поворота у платформы с эластичными в боковом направлении колесами по сравнению с положением мгновенного центра поворота платформы с жесткими колесами.

Таким образом, радиус поворота для платформы со всеми управляемыми колесами:

$$R = \frac{L}{\operatorname{tg}(\alpha_1 - \delta_{\text{вБ1}}) + \operatorname{tg}(\alpha_2 - \delta_{\text{вБ2}})} \leq [R]. \quad (6)$$

После этого рассчитывалось смещение центра поворота $e = ED$:

$$e = R \operatorname{tg}(\alpha_2 + \delta_{\text{вБ2}}) - R_r \operatorname{tg}\alpha_2. \quad (7)$$

Дальнейшая оптимизация параметров мобильного робота производилась по динамической нагрузке на платформу. Для этого определялось положение центра масс в точке C платформы с роботом и накопителем (рис. 2). Рассчитывались проекции составляющих скорости v_C на оси подвижной системы координат:

$$v_{Cx} = \frac{v_D}{\cos \varpi t}; \quad (8)$$

$$v_{Cy} = v_D \cos \varpi t \sin \varpi t. \quad (9)$$

Затем определялись проекции составляющих скорости v_C на оси неподвижной системы координат:

$$v_{CY} = v_{Cy} \cos \beta - v_{Cx} \sin \beta; \quad (10)$$

$$v_{CX} = -v_{Cx} \cos \beta - v_{Cy} \sin \beta. \quad (11)$$

Выполнив дифференцирование по времени скоростей v_{Cx} и v_{Cy} , получали ускорения центра масс робота в неподвижной системе координат:

$$\begin{aligned} a_{cX} &= -\dot{v}_{Cx} \cos \beta + v_{Cx} \omega \sin \beta - \dot{v}_{Cy} \sin \beta - v_{Cy} \omega \cos \beta; \\ a_{cY} &= -\dot{v}_{Cx} \sin \beta - v_{Cx} \omega \cos \beta + \dot{v}_{Cy} \cos \beta - v_{Cy} \omega \sin \beta, \end{aligned} \quad (12)$$

где \dot{v}_{Cx} – ускорение при поступательном движении платформы; \dot{v}_{Cy} – ускорение бокового смещения центра масс платформы; ω – угловая скорость поворота платформы.

Для определения искомым ускорений центра масс платформы в подвижной системе координат проецировали векторы ускорений \bar{a}_{cX} и \bar{a}_{cY} на подвижные оси x и y :

$$a_{cX} = -a_{cX} \cos \beta - a_{cY} \sin \beta;$$

$$a_{cY} = -a_{cX} \sin \beta + a_{cY} \cos \beta.$$

С учетом соотношений (12) после преобразований получим:

$$a_{cX} = \dot{v}_{Cx} + v_{Cy} \omega; \quad a_{cY} = -v_{Cx} \omega + \dot{v}_{Cy}. \quad (13)$$

После этого формировались выражения для определения скорости и ускорения бокового смещения центра масс платформы. В соответствии с рис. 2:

$$\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{v_{cy}}{v_{cx}}; \quad v_{cy} = v_{cx} \operatorname{tg} \alpha_c = \frac{v_{cx}(R_T \operatorname{tg} \alpha_2 - b)}{R_T}. \quad (14)$$

Тогда с учетом принятых обозначений, получим:

$$\begin{aligned} a_{cX} &= \dot{v}_{Cx} + \frac{v_{Cx} v_D (R_T \operatorname{tg} \alpha_2 - b)}{R_T^2}; \\ a_{cY} &= \dot{v}_{Cy} - v_{Cx} \frac{v_D}{R_T}. \end{aligned} \quad (15)$$

Угловое ускорение робота определялось по формуле

$$\varepsilon = \dot{\omega} = \frac{d(v_{cx} / R_T)}{dt} = \frac{\dot{v}_D R_T \cos \varpi t + \varpi R_T \sin \varpi t}{R_T^2 \cos^2 \varpi t}. \quad (16)$$

Чаще всего центр масс расположен выше верней поверхности платформы на величину z , что создает дополнительные инерционные нагрузки ($P_{си}$) на колеса, которые приводят к опрокидывающему моменту.

Учитывая это, сформировано дополнительное ограничение параметров мобильного робота:

$$\frac{G}{g}(z + R_k) \frac{\dot{v}_D R_t CD}{R_{тс}^2} \leq G \frac{B}{2}, \quad (17)$$

где z – координата расположения центра тяжести; R_k – радиус колес; B – расстояние между колесами

Заключение

Разработаны математические модели оптимизации параметров мобильного робота, работающего в системе инструментообеспечения обрабатывающего центра. Предложенная архитектура гибкой производственной ячейки позволяет полностью автоматизировать цикл смены инструмента без остановки технологического оборудования и минимизировать участие человека в процессе.

Литература

1. Асфаль, Р. Роботы и автоматизация производства / Р. Асфаль ; пер. с англ. М. Ю. Евстигнеева. – М. : Машиностроение, 1989. – 446 с.
2. Афонин, В. Л. Интеллектуальные робототехнические системы : курс лекций / В. Л. Афонин, В. А. Макушкин. – М. : Интернет-ун-т информ. технологий, 2009. – 199 с.
3. Белоусов, И. Р. Управление роботами через сеть Интернет / И. Р. Белоусов // Доклады НАН Беларуси. – 2002. – № 2 (383). – С. 198–201.
4. Виттенбург, Й. С. Динамика систем твердых тел / Й. С. Виттенбург ; пер. с англ. В. Н. Рубановского. – М. : Мир, 1980. – 292 с.
5. Воробьев, Е. И. Анализ кинематики пространственных исполнительных механизмов манипуляторов методом матриц / Е. И. Воробьев // Механика машин. – 1970. – Вып. 53. – С. 8–16.
6. Воробьев, Е. И. Механика промышленных роботов : в 3 кн. / Е. И. Воробьев, О. Д. Егоров, С. А. Попов. – М. : Высш. шк., 1988. – Кн. 1 : Кинематика и динамика. – 304 с.
7. Крахмалев, О. Н. Методика анализа влияния сил инерции на динамику манипуляционных роботов / О. Н. Крахмалев // Теория механизмов и машин. – 2012. – № 2 (20). – Т. 10. – С. 41–53.
8. Булгаков, А. Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление / А. Г. Булгаков, В. А. Воробьев. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2012. – 485 с.
9. Верещагин, А. Ф. Планирование траектории исполнительного органа манипуляционного робота / А. Ф. Верещагин, В. Л. Геперозов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1978. – № 2. – С. 76–87.
10. Вертю, Ж. Телеуправление роботами с помощью ЭВМ / Ж. Вертю, Ф. Куафе ; пер. с фр. В. Б. Тарасов. – М. : Мир, 1989. – 198 с.
11. Воробьев, Е. И. Синтез механизмов по заданному движению твердого тела в пространстве / Е. И. Воробьев // Механика машин, 1978. – Вып. 54. – С. 25–33.
12. Механика миниатюрных роботов / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков, Л. Ф. Фомин, В. Г. Чашухин. – М. : Наука, 2010. – 265 с.
13. Медведев, В. П. Синтез оптимального управления приводами манипулятора / В. П. Медведев // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации : тр. 12 междунар. научн.-техн. семинара, Алушта, сент. 2003 г. – М. : МЭП, 2003. – С. 133.

14. Гречановский, Е. Н. Метод планирования движения манипулятора при наличии препятствий / Е. Н. Гречановский, И. Ш. Пинскер // Модели. Алгоритмы. Принятие решения. – М. : Наука, 1979. – С. 100–142.
15. Пол, Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора / Р. Пол ; пер. с англ. А. Ф. Верещагина, В. Л. Генерозова. – М. : Наука, 1976. – 103 с.
16. Luh, J. On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators / J. Y. S. Luh, M. W. Walker, R. P. C. Paul // ASME. – 1980. – Vol. 102. – P. 69–76.

Reference

1. Asfal' R. *Robots and industrial automation*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 446 p. (in Russian).
2. Afonin V. L., Makushkin V. A. *Intelligent robotic systems*. Moscow, Internet-universitet informatsionnykh tekhnologii, 2009. 199 p. (in Russian).
3. Belousov I. R. Controlling robots via the Internet. *Doklady NAN Belarusi*, 2002, no. 2 (383), pp. 198–201 (in Russian).
4. Vittenburg I. S. *Dynamics of rigid body systems*. Moscow, Mir Publ., 1980. 292 p. (in Russian).
5. Vorob'ev E. I. Analysis of the kinematics of spatial actuators of manipulators using the matrix method. *Mekhanika mashin*, 1970, iss. 53, pp. 8–16 (in Russian).
6. Vorob'ev E. I., Egorov O. D., Popov S. A. *Mechanics of industrial robots*. Moscow, Vyssei shkoly Publ., 1988. Book. 1. Kinematics and dynamics. 304 p. (in Russian).
7. Krakhmalev O. N. Methodology for analyzing the influence of inertial forces on the dynamics of manipulation robots. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2012, no. 2 (20), vol. 10, pp. 41–53 (in Russian).
8. Bulgakov A. G., Vorob'ev V. A. *Industrial robots. kinematics, dynamics, control, and management*. Moscow, SOLON-PRESS Publ., 2012. 485 p. (in Russian).
9. Vereshchagin A. F., Geperozov V. L. Trajectory planning of the executive body of a manipulation robot. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1978, no. 2, pp. 76–87 (in Russian).
10. Vertyu Zh., Kuafe F. *Computer-aided remote control of robots*. Moscow, Mir Publ., 1989. 198 p. (in Russian).
11. Vorob'ev E. I. Synthesis of mechanisms based on a given motion of a rigid body in space. *Mekhanika mashin*, 1978, iss. 54, pp. 25–33 (in Russian).
12. Gradetskii V. G., Knyaz'kov M. M., Fomin L. F., Chashchukhin V. G. *Mechanics of miniature robots*. Moscow, Nauka Publ., 2010. 265 p. (in Russian).
13. Medvedev V. P. *Sintez optimal'nogo upravleniya privodami manipulyatora. Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii: tr. 12 mezhdunar. nauchn.-tekhn. seminara, Alushta, sent. 2003 g.* [Modern technologies in control, automation and information processing: Proceedings of the 12th international scientific and technical seminar, Alushta, September 2003]. Moscow, MEП, 2003, P. 133 (in Russian).
14. Grechanovskii E. N., Pinsker I. Sh. Method of planning the movement of a manipulator in the presence of obstacles. *Modeli. Algoritmy. Prinyatie resheniya*, Moscow, Nauka Publ., 1979, pp. 100–142 (in Russian).
15. Pol R. *Simulation. Path planning and motion control of a robotic manipulator*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 103 p.
16. Luh J. Y. S., Walker M. W., Paul R. P. C. On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators. *ASME*, 1980, vol. 102, pp. 69–76.