

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК В СИСТЕМЕ ВНЕШНЕГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ

**М. В. Кубриков**

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева,  
г. Красноярск, Российская Федерация*

*В статье рассматривается реализация цифрового двойника в системе адаптивного управления роботами-манипуляторами. Использование цифровых двойников для планирования, контроля и поддержания жизненного цикла производственного оборудования формирует устойчивое внедрение роботизированных комплексов в технологические процессы высокотехнологичных предприятий. В статье предлагается новый подход, позволяющий решать задачи прямой и обратной кинематики для роботов-манипуляторов. Подход заключается в представлении кинематической схемы робота-манипулятора, обладающего шестью вращательными сочленениями, в виде векторной модели. В качестве реализации данного подхода разработан облегченный математический аппарат, позволяющий существенно снизить вычислительную нагрузку. Все основные расчеты производятся на стороннем сервере, не задействуя вычислительную мощность роботов-манипуляторов. Это позволяет интегрировать математический аппарат в цифровой двойник и сторонние программные пакеты. За счет малой вычислительной нагрузки использование предложенного подхода в системах управления позволяет снизить задержки при работе в режиме реального времени с возможностью увеличения количества роботов-манипуляторов и осуществления контроля с более высокой дискретизацией. Использование цифрового двойника в коллаборации системы роботов позволяет проектировать более универсальные рабочие места и сборочные линии, оптимизировать их загруженность.*

*Ключевые слова: цифровой двойник, производственная линия, сборка, роботизация, автоматизация, производственный процесс.*

### Введение

В высокотехнологичном производстве все большее распространение находят роботы-манипуляторы, способные выполнять широкий спектр операций в зависимости от их компоновки, размеров и исполнительного звена, закрепленного на выходном фланце. Также возрастает доля автоматизированных производств, на которых несколько роботов одновременно выполняют работу в рамках одной технологической ячейки. В результате возникает необходимость не просто запрограммировать каждого робота по отдельности, но и учесть их совместные перемещения в режиме реального времени. Для этого могут быть использованы системы внешнего управления технологической ячейкой, способные моделировать одновременные движения нескольких роботов,

прогнозировать потенциальные опасности столкновений и корректировать траектории каждого из роботов в случае необходимости.

### 1. Обзор существующих решений

Проблемой создания подобных систем является разработка математической модели при решении задачи обратной кинематики робота-манипулятора. Рассмотрим исследования разных авторов при решении данной задачи.

Зачастую задачу обратной кинематики решают как задачу оптимизации [1–3], где параметрами являются значения углов осей манипуляторов, минимизируя при этом значение отклонения положения исполнительного устройства от желаемой точки.

В [1] представлено решение задачи обратной кинематики манипулятора, работающего как в среде без препятствий, так и в загроможденном рабочем пространстве. В этой работе рассматри-

✉ kubrikov@sibsau.ru

вается использование метода оптимизации роя двунаправленных частиц для получения решения задачи обратной кинематики манипулятора. Алгоритм двунаправленного поиска помогает найти решение быстрее, чем обычный однонаправленный поиск. Отмечается, что необходимо дальнейшее исследование для изучения эффективности двунаправленного поиска с помощью метода развязки манипулятора с использованием других метаэвристических методов, таких как генетический алгоритм, алгоритм муравьиной колонии, методы Ньютона-Рэпсона и т. д. Кроме того, метод требует доработки, чтобы получить глобальное оптимальное решение.

В [3] предлагается метод расчета обратной кинематики, основанный на улучшенном алгоритме оптимизации роя частиц (PSO) применимый к обычным роботам. Вводится метод нелинейной динамической инерционной корректировки веса, основанный на концепции подобию, что делает процесс поиска более надежным, а также решается проблема локального оптимального решения. В то же время вводятся несколько популяций для одновременного выполнения поиска оптимального решения, предлагается оператор иммиграции для увеличения разнообразия популяции частиц в итерации. Результаты испытаний показывают, что предложенный метод имеет более высокую стабильность для общих задач обратного решения кинематики робота и может значительно повысить как точность, так и скорость по сравнению с исходным алгоритмом PSO.

В [5] рассматривается аналитический метод решения, основанный на параметризации углов шарниров и описании кинематических взаимосвязей на основе метода Денавита-Хартенберга. В результате аналитического определения параметров локальных систем координат шарниров выполняется аналитическое определение углов поворота шарниров робота. Полученные аналитические решения включают преобразования от полярных систем координат к декартовым координатам, что делает их громоздкими и не удобными для практического применения, при этом не исключает использования численного решения методом Ньютона-Рафсона.

В [6] предложен численный метод решения задачи обратной кинематики для робота с несферическим кистевым шарниром. Основные кинематические уравнения получены в соответствии с методом Денавита-Хартенберга с последующим их решением численным методом Ньютона-Рафсона. Приведенные авторами параметры производительности и точности алгоритма свидетельствуют о его неэффективности.

В [7] предложен метод получения кинематических уравнений для робота с шестью степенями свободы. При использовании метода

Денавита-Хартенберга предложено разбить кинематическую схему робота на несколько подцепей с последующим их объединением на основе новых условий и соответствующих уравнений. Было проанализировано несколько методов разрезания манипулятора на подцепи с тремя степенями свободы с последующим их объединением. Предлагаемый в статье одномерный поиск не является оптимальным решением, т. к. при слишком большом шаге необходимое решение обратной кинематики будет упущено. При малом шаге время поиска будет увеличено.

В [8] предложен подход к численному решению задачи обратной кинематики, основанный на решении прямой задачи кинематики робота методом Денавита-Хартенберга и алгоритмах искусственного интеллекта (Soft computing), позволяющих избегать сингулярности. Предложенные методы с исследовательской точки зрения представляют интерес, однако практическое применение ограничено вследствие низкой производительности и точности решений.

В [9] авторы предлагают модифицированный алгоритм искусственной пчелиной колонии (ABC) для решения задачи обратной кинематики для манипулятора с пятью степенями свободы. Экспериментальные результаты показывают, что их алгоритм имеет среднеквадратичную ошибку на 60 % меньшую, чем стандартный ABC.

Однако, с одной стороны, такой подход позволяет получать адекватные решения за небольшое количество итераций, а также позволяет ввести ограничения на некоторые углы и положения. С другой стороны, многие алгоритмы оптимизации, особенно стохастические, не гарантируют достижения заданной точности за конечное число итераций. К тому же, многие алгоритмы требуют дискретного шага, что вносит дополнительные трудности: при малом шаге может слишком сильно расти вычислительная нагрузка, при большом шаге невозможно достичь высокой точности решения.

В рассмотренных работах авторы используют представление Денавита-Хартенберга, предполагающее последовательное перемножение матриц преобразования для перехода от базовой системы координат к системе координат исполнительного механизма, закрепленного на фланце робота. Такие аналитические решения приводят к появлению громоздких систем уравнений, не удобных для практического применения, а их численное решение становится малоэффективным.

## 2. Новый подход в решении обратной кинематики

Предлагается новый подход, позволяющий решать задачи прямой и обратной кинематики для роботов-манипуляторов. Подход заключается

в представлении кинематической схемы робота-манипулятора, обладающего шестью вращательными сочленениями, в виде векторной модели. В виду геометрических особенностей робота, первые 4 вектора совершают свои перемещения и повороты в одной плоскости. Таким образом, на основе векторного уравнения формировалась система нелинейных алгебраических уравнений, решаемая численным методом Ньютона, на каждой итерации которого решалась система линейных алгебраических уравнений методом Зейделя.

В рамках создания системы управления для решения прямой и обратной задачи кинематики предлагается измененный подход, в соответствии с которым на первом этапе составляется кинематическая схема робота с выявлением всех звеньев и сочленений (рис. 1).

Далее по кинематической схеме составляется система векторов в пространстве. Векторы имеют возможность поворачиваться в соответствии с кинематикой робота, при этом их длины фиксированы (рис. 2). Вектора  $p_{wrist}$  и  $p_{flange}$  явля-

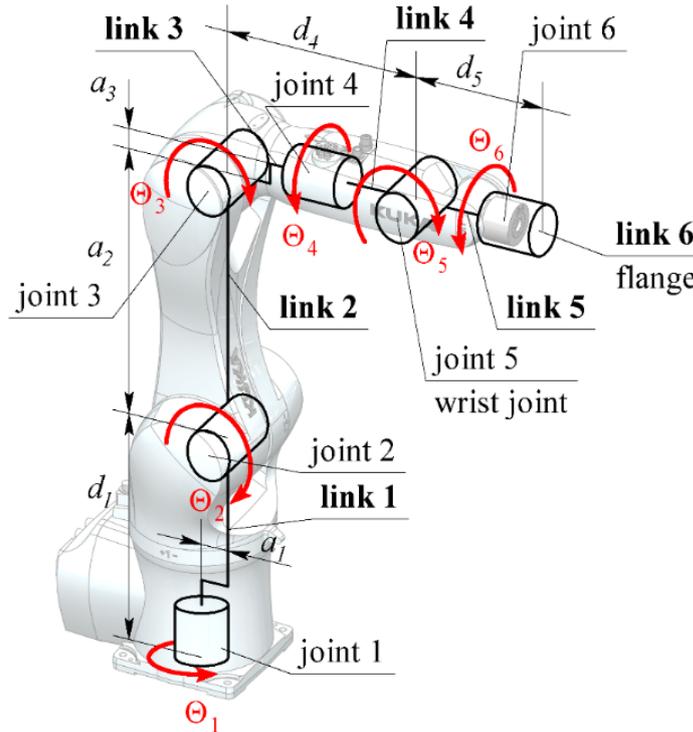


Рис. 1. Кинематическая схема робота KUKA KR6 R900

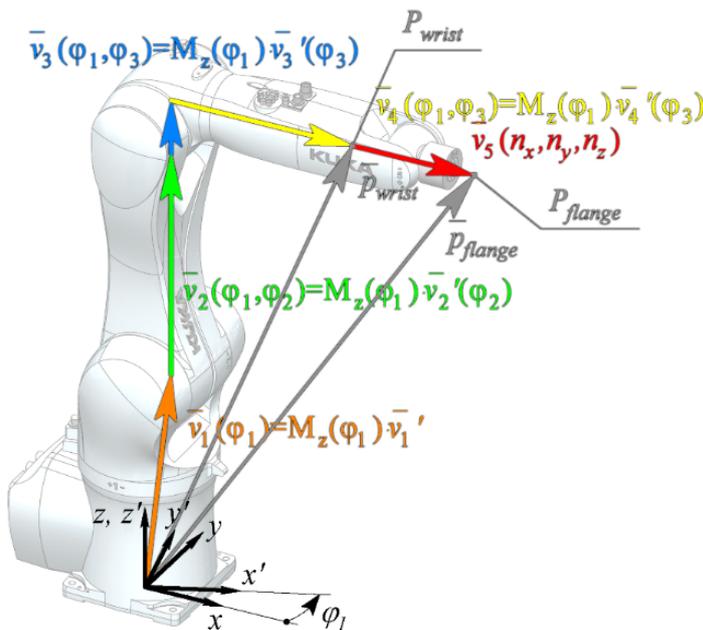


Рис. 2. Векторная модель робота в начальном положении

ются результирующими и определяют перемещение точки кистевого сустава и присоединительно-го фланца робота соответственно.

При решении задачи обратной кинематики для определения положения промежуточных звеньев робота сначала вычисляются координаты центра кистевого сустава, затем определяется значение угла поворота плоскости и решается система нелинейных алгебраических уравнений относительно углов наклона. И на заключительном этапе определяются углы поворота.

Для численного решения системы нелинейных алгебраических уравнений применяется метод Ньютона (метод касательных) [10], в котором на каждой итерации цикла производится замена нелинейной функции линейной и находится корень путем решения системы линейных алгебраических уравнений методом Зейделя [11].

Если для гарантированной сходимости метода Зейделя линейную систему можно привести к нормальной форме, то сходимость метода Ньютона зависит от начальных приближений.

Данный подход реализован в виде программы для имитационного моделирования работы роботов-манипуляторов, позволяющей визуализировать процесс перемещения и последовательность положений всех звеньев робота. Алгоритм был проверен на заданной в виде архимедовой спирали траектории, аппроксимированной прямыми отрезками. Результатом работы программы является набор точек, заданных в формате AXIS. В сравнении с распространенным методом Денавита-Хартенберга предложенный метод обладает на порядок меньшим количеством математических операций (52 против 790), что особенно актуально при создании адаптивных систем управления, работающих в режиме реального времени.

Таким образом, за счет малой вычислительной нагрузки использование предложенного подхода в системах управления позволяет снизить задержки при работе в режиме реального времени, учитывать большее количество роботов-манипуляторов, осуществлять контроль с более высокой точностью. Высокая точность позволит не только достигать исполнительным устройством точку назначения с меньшим отклонением, но и осуществ-

лять контроль положения всех сочленений манипуляторов при их работе.

При программировании совместной работы нескольких роботов необходимо иметь возможность смещения и переориентации базовой точки, а также контроля положения промежуточных звеньев в процессе движения для минимизации риска столкновения роботов.

### 3. Реализация программного обеспечения и цифровой ДВОЙНИК

На основе предложенного подхода удалось реализовать цифровой двойник реального времени, где построение траектории возложено на вычислительные мощности стороннего сервера. В отличие от классического метода управления по «жестко» заданной траектории удалось получить быстро адаптирующуюся систему с возможностью масштабирования на несколько роботов-манипуляторов. Это позволяет реализовать механизм коллаборативного управления в режиме реального времени роботом-манипулятором, использовать техническое зрение, сенсоры и датчики для адаптивного изменения траектории движения робота-манипулятора, будь то обход препятствия или уклонение от столкновения с другим движущимся роботом или даже компенсация смещения изделия при ручном позиционировании на рабочем столе.

На основе полученной математической модели и с учетом выбранных методов численного решения систем уравнения было разработано программное обеспечение с возможностью визуализации процесса движения робота.

### Заключение

Предложенный метод решения задачи обратной кинематики для роботов-манипуляторов обладает простотой реализацией и гарантированной сходимостью при нахождении решений, а в сравнении с распространенным методом Денавита-Хартенберга на порядок меньшим количеством математических операций, что особенно актуально при создании систем управления в режиме реального времени.

### Список литературы

- [1] Rayankula V., Pathak P., Junco S. Inverse kinematics of mobile manipulator using bidirectional particle swarm optimization by manipulator decoupling // Mechanism and Machine Theory. 2019. vol. 131. pp. 385–405. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.09.022.
- [2] Zhang T., Cheng Yo., Wu H., Yan Sh., Handroos H., Zheng L., Ji H., Pan P. Dynamic accuracy ant colony optimization of inverse kinematic (DAACOIK) analysis of multi-purpose deployer (MPD) for CFETR remote handling // Fusion Engineering and Design. 2020. vol. 156. P. 111522. doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111522.
- [3] Yiyang L., Xi J., Hongfei B., Zhining W., Liangliang S. A General Robot Inverse Kinematics Solution Method Based

- on Improved PSO Algorithm // IEEE Access. 2021. vol. 9. pp. 32341–32350. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059714.
- [4] World's Top 10 Industrial Robot Manufacturers [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marketresearchreports.com/blog/2019/05/08/world%E2%80%99s-top-10-industrial-robot-manufacturers> (дата обращения: 01.03.2023).
- [5] Tong Yu., Liu J., Liu Yu., Yuan Yu. Analytical inverse kinematic computation for 7-DOF redundant sliding manipulators // Mechanism and Machine Theory. 2021. vol. 155. P. 104006. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104006.
- [6] Li J., Yu H., Shen N., Zhong Zh., Lu Yi., Fan J. A novel inverse kinematics method for 6-DOF robots with non-spherical wrist // Mechanism and Machine Theory. 2021. vol. 157. P. 104180. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104180.
- [7] Xiao F., Li G., Jiang D., Xie Yu., Yun J., Liu Yi., Huang L., Fang Z. An effective and unified method to derive the inverse kinematics formulas of general six-DOF manipulator with simple geometry // Mechanism and Machine Theory. 2021. vol. 159. P. 104265. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104265.
- [8] Lopez-Franco C., Hernandez-Barragan J., Alanis A. Y., Arana-Daniel N. A soft computing approach for inverse kinematics of robot manipulators // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2018. vol. 74. pp. 104–120.
- [9] El-Sherbiny A., Elhosseini M. A., Haikal A. Y. A new ABC variant for solving inverse kinematics problem in 5 DOF robot arm // Applied Soft Computing Journal. 2018. vol. 73. pp. 24–38.
- [10] Ryaben'kii V. S., Tsynkov S. V. A Theoretical Introduction to Numerical Analysis. New York : CRC Press, 2006. P. 243.
- [11] Sauer T. Numerical Analysis (2nd ed.). Pearson Education Inc., 2005. P. 109.
- [12] Pikalov I., Spirin E., Saramud M., Kubrikov M. Vector model for solving the inverse kinematics problem in the system of external adaptive control of robotic manipulators // Mechanism and Machine Theory. 2022. vol. 174. P. 104912. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104912.

## DIGITAL TWIN IN THE SYSTEM OF EXTERNAL ADAPTIVE CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS

**M. V. Kubrikov**

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*The article discusses the implementation of a digital twin in the system of adaptive control of robotic manipulators. The use of digital twins to plan, control and maintain the life cycle of production equipment forms the sustainable introduction of robotic systems into the technological processes of high-tech enterprises. The use of a digital twin in the collaboration of a robot system allows you to design more versatile workplaces and assembly lines, and optimize their workload. A new approach is proposed that allows solving problems of direct and inverse kinematics for robotic manipulators. The approach is to represent the kinematic diagram of a robotic arm with six rotational joints as a vector model. Due to the low computational load, the use of the proposed approach in control systems makes it possible to reduce delays when working in real time, with the ability to increase the number of robotic arms and control with higher accuracy.*

*Keywords: digital twin, production line, assembly, robotics, automation, production process.*

### References

- [1] Rayankula V., Pathak P., Junco S. Inverse kinematics of mobile manipulator using bidirectional particle swarm optimization by manipulator decoupling // Mechanism and Machine Theory, 2019, vol. 131, pp. 385–405. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.09.022.
- [2] Zhang T., Cheng Yo., Wu H., Yan Sh., Handroos H., Zheng L., Ji H., Pan P. Dynamic accuracy ant colony optimization of inverse kinematic (DAACOIK) analysis of multi-purpose deployer (MPD) for CFETR remote handling // Fusion Engineering and Design, 2020, vol. 156, P. 111522. doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111522.
- [3] Yiyang L., Xi J., Hongfei B., Zhining W., Liangliang S. A General Robot Inverse Kinematics Solution Method Based on Improved PSO Algorithm // IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 32341–32350. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059714.

- [4] World's Top 10 Industrial Robot Manufacturers. Available at: <https://www.marketresearchreports.com/blog/2019/05/08/world%E2%80%99s-top-10-industrial-robot-manufacturers> (accessed 01.03.2023).
- [5] Tong Yu., Liu J., Liu Yu., Yuan Yu. Analytical inverse kinematic computation for 7-DOF redundant sliding manipulators // Mechanism and Machine Theory, 2021, vol. 155, P. 104006. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104006.
- [6] Li J., Yu H., Shen N., Zhong Zh., Lu Yi., Fan J. A novel inverse kinematics method for 6-DOF robots with non-spherical wrist // Mechanism and Machine Theory, 2021, vol. 157, P. 104180. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104180.
- [7] Xiao F., Li G., Jiang D., Xie Yu., Yun J., Liu Yi., Huang L., Fang Z. An effective and unified method to derive the inverse kinematics formulas of general six-DOF manipulator with simple geometry // Mechanism and Machine Theory, 2021, vol. 159, P. 104265. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104265.
- [8] Lopez-Franco C., Hernandez-Barragan J., Alanis A. Y., Arana-Daniel N. A soft computing approach for inverse kinematics of robot manipulators // Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2018, vol. 74, pp. 104–120.
- [9] El-Sherbiny A., Elhosseini M. A., Haikal A. Y. A new ABC variant for solving inverse kinematics problem in 5 DOF robot arm // Applied Soft Computing Journal, 2018, vol. 73, pp. 24–38.
- [10] Ryaben'kii V. S., Tsynkov S. V. A Theoretical Introduction to Numerical Analysis. New York : CRC Press, 2006, P. 243.
- [11] Sauer T. Numerical Analysis (2nd ed.). Pearson Education Inc., 2005, P. 109.
- [12] Pikalov I., Spirin E., Saramud M., Kubrikov M. Vector model for solving the inverse kinematics problem in the system of external adaptive control of robotic manipulators // Mechanism and Machine Theory, 2022, vol. 174, P. 104912. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104912.

## Сведения об авторах

*Кубриков Максим Викторович* – кандидат технических наук, доцент, директор института космической техники Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2007 году. Область научных интересов: космическая техника, робототехника, оптимизация производственных процессов, цифровой двойник.

ORCID: 0000-0003-0282-0291