

УДК 621.865.8

doi:10.18720/SPBPU/2/id-125

М.Я. Альвардт¹, Х.М. Аль-Аражи²

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИЗБЕГАНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ И СИНГУЛЯРНОСТЕЙ В РОБОТИЗИРОВАННОМ МАНИПУЛЯТОРЕ



¹Альвардт Мохаммад Ясин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (920)470-0241, E-mail: moh.alwardat@yahoo.com.



²Аль-Аражи Хасан Мохаммед,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (964)790 259 7660, E-mail: uotechnology.edu.iq.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы разработки алгоритма управления в реальном времени для избегания препятствий и сингулярностей в роботизированном манипуляторе с шестью степенями свободы. Предложенный подход сочетает ПИД-регулятор в декартовом пространстве с методом обратной кинематики на основе демпфированных наименьших квадратов (ДНК) и оптимизацией в нуль-пространстве. Контроллер адаптивно переключается между режимами избегания, стабилизации и удержания в зависимости от расстояния до ближайшего препятствия, обеспечивая при этом плавность движения и устойчивость системы. Разработанный метод демонстрирует улучшенные показатели управляемости, устойчивости и безопасности по сравнению с классическим ДНК-подходом.

Ключевые слова: Манипулятор, избегание препятствий, сингулярность, ПИД-регулятор, демпфированные наименьшие квадраты ДНК, оптимизация в нуль-пространстве.

Введение

Современные роботизированные системы широко используются в различных сферах человеческой деятельности, включая промышленность, медицину и сервисные задачи [1], [2]. Одной из актуальных проблем при управлении роботизированными манипуляторами является обеспечение их эффективной и безопасной работы в средах, насыщенных препятствиями и характеризующихся потенциальными сингулярностями [3], [4]. Необходимость решения этих задач обусловлена потребностью в устойчивости и плавности движений, что является ключевым аспектом надежного функционирования роботизированных комплексов [5].

Целью настоящей работы является разработка алгоритма управления в реальном времени, направленного на эффективное избегание препятствий и предотвращение сингулярностей для роботизированного манипулятора с шестью степенями свободы. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- Разработать методику интеграции ПИД-регулятора с методом демпфированных наименьших квадратов (ДНК);
- Реализовать оптимизацию в нуль-пространстве для повышения манипулируемости и соблюдения механических ограничений;
- Провести моделирование и оценить эффективность предлагаемого алгоритма.

Современные исследования в области управления роботизированными манипуляторами показывают, что существующие методы часто сосредоточены либо на избегании препятствий, либо на минимизации влияния сингулярных конфигураций. Например, классический ДНК эффективно решает задачи обращения кинематики, но без оптимизации в нулевом пространстве остается уязвимым к сингулярностям [6], [7]. Методы динамического планирования траекторий улучшают избегание препятствий, но не всегда обеспечивают сохранение высокой манипулируемости системы [8], [9].

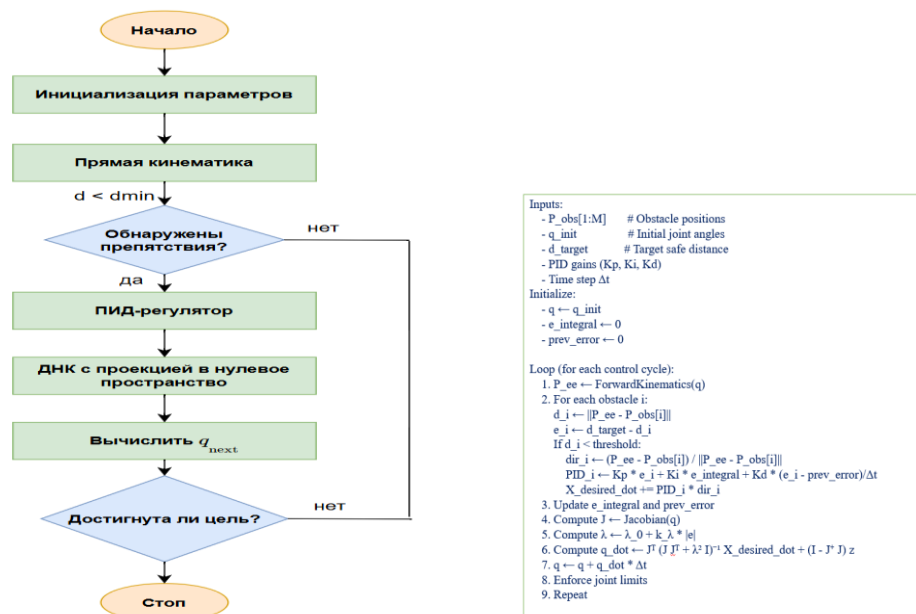
В то же время комплексные решения, одновременно учитывающие избегание препятствий и предотвращение сингулярностей в реальном времени, в научной литературе остаются ограниченными [10], [11], [12]. В связи с этим в данной работе предлагается интегрированный подход, сочетающий ПИД-регулирование, демпфированное обращение кинематики и оптимизацию в нулевом пространстве, что позволяет обеспечить устойчивое и безопасное движение манипулятора в сложных операционных условиях.

Основные результаты, полученные в ходе исследования, подтвердили эффективность предложенного алгоритма. Использование интегрированного подхода позволило значительно улучшить показатели

безопасности и устойчивости траекторий манипулятора, а также обеспечить его плавную работу в сложных условиях.

Методы

Разработанный алгоритм предназначен для обеспечения безопасного перемещения роботизированного манипулятора в реальном времени при наличии препятствий в рабочем пространстве. Он основан на вычислении расстояния до ближайшего объекта и динамическом изменении траектории движения с использованием интеграции ПИД-регулятора, демпфированного метода наименьших квадратов (ДНК) и оптимизации в нуль-пространстве.



Алгоритм 1: Пошаговый псевдокод (Pseudocode) для избегания препятствий

Для реализации поставленных задач и достижения целей исследования был разработан комплексный подход, основанный на интеграции трёх основных методов управления роботизированным манипулятором:

1. ПИД-регулятор в декартовом пространстве: данный метод использовался для генерации требуемой скорости конечного эффектора на основе оценки текущего расстояния до ближайших препятствий. Сигнал управления вычислялся следующим образом:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Где $e(t)$ — ошибка в момент времени t . $u(t)$ — управляющий выходной сигнал (используется как величина скорости). k_p — Пропорциональный коэффициент →

реагирует на текущую ошибку. k_i — Интегральный коэффициент $\rightarrow$ накапливает прошлые ошибки (уменьшает установившуюся ошибку). k_d — Дифференциальный коэффициент $\rightarrow$ предсказывает будущую тенденцию (подавляет колебания).

2. Метод ДНК: для обеспечения численной устойчивости вычислений в условиях близости к сингулярным конфигурациям использовался метод ДНК, выраженный формулой:

$$\dot{q}_{\text{днк}} = J^T (J J^T + \lambda^2 I)^{-1} \dot{X}_{\text{desired}} \quad (2)$$

Где: γ — коэффициент демпфирования (используется для предотвращения неустойчивости вблизи сингулярностей). I — единичная матрица. $\dot{X}_{\text{desired}}$ — желаемая скорость конца исполнительного органа. $\dot{q}_{\text{днк}}$ — результирующий вектор скоростей сочленений.

3. Оптимизация в нуль-пространстве: для использования избыточных степеней свободы манипулятора и выполнения вторичных задач (таких как избегание механических ограничений суставов и повышение манипулируемости) была применена техника оптимизации в нуль-пространстве:

$$\dot{q} = \dot{q}_{\text{днк}} + (I - J^+ \cdot J) z \quad (3)$$

Где: J^+ — псевдообратная матрица на основе ДНК для избежания сингулярностей. I — единичная матрица. z — вторичная цель (например, отталкивание суставов от пределов или уход от сингулярностей). $(I - J^+ \cdot J)$ — проектор нулевого пространства, обеспечивающий, чтобы влияние z не мешало достижению требуемой скорости конечного звена.

Интеграция ПИД, ДНК и нуль-пространств

Разработанный контроллер основан на многоуровневом подходе, объединяющем методы ПИД-регулирования, демпфированных наименьших квадратов ДНК и оптимизации в нуль-пространстве. Контроллер работает в режиме реального времени и обеспечивает непрерывную коррекцию траектории движения манипулятора при наличии препятствий и потенциальных сингулярностей.

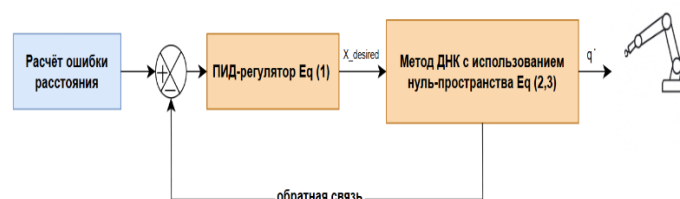


Рис. 1. Блок-схема контроллера

Математическое описание алгоритма избегания препятствий

1. Расчет расстояния до препятствия: Euclidean distance $d_{ee} = \|P_{ee} - P_{obstacle}\|$ где P_{ee} — положение конца манипулятора, $P_{obstacle}$ — положение ближайшего препятствия.

2. Ошибка расстояния: $e(t) = d_{target} - d_{ee}$. Это значение ошибки передаётся в ПИД-регулятор для генерации соответствующей реакции:

- Если $e(t) > 0$, манипулятор находится слишком далеко от препятствия (нужно немного приблизиться);
- Если $e(t) < 0$, манипулятор слишком близко (нужно быстро отодвинуться);
- Если $e(t) = 0$ манипулятор находится на оптимальном расстоянии.

3. ПИД-регулятор:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

4. Направление движения:

$$\hat{v} = \frac{P_{ee} - P_{obstacle}}{\|P_{ee} - P_{obstacle}\|}$$

5. Скорость в декартовом пространстве:

$$\dot{X}_{desired} = u(t) \cdot \hat{v}$$

$$\dot{X}_{desired} = \sum_{i \text{ with } d_i < d_{max}} (P_i + I_i + D_i) \frac{P_{ee} - P_{obstacle}}{\|P_{ee} - P_{obstacle}\|}$$

6. Адаптивное демпфирование: $\lambda = \lambda_0 + k_\lambda \cdot |e(t)|$

7. Метод ДНК: $\dot{q}_{днк} = J^T (J J^T + \lambda^2 I)^{-1} \dot{X}_{desired}$

8. Оптимизация в нуль-пространстве: $\dot{q} = \dot{q}_{днк} + (I - J^+ \cdot J) z$

9. Индекс манипулируемости: $m = \sqrt{|\det(J^T J)|}$. Меньшее значение показателя m указывает на приближение робота к сингулярной конфигурации, что может негативно сказаться на эффективности управления.

10. Обновление состояния суставов: $q_{new} = q_{current} + \dot{q} dt$

Результаты

Результаты численного моделирования подтвердили эффективность предложенного алгоритма управления. При наличии трех статических препятствий в рабочем пространстве манипулятора система корректно определяла расстояние до ближайшего объекта и формировала безопасную траекторию движения конечного эффектора. Наблюдалось устойчивое избегание препятствий и стабильная работа при приближении к потенциальным сингулярностям.

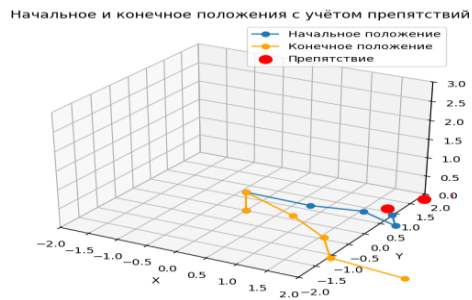


Рис. 2. Конфигурация робота

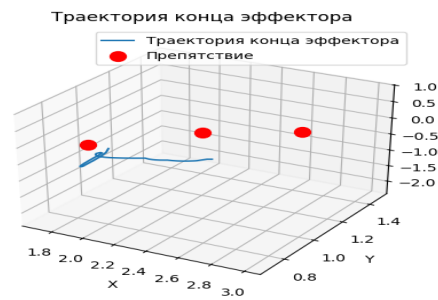


Рис. 3. Траектория движения

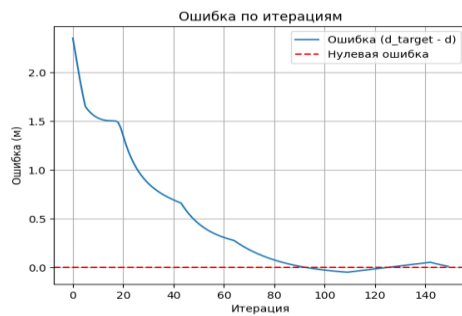


Рис. 4. Индекс манипулируемости

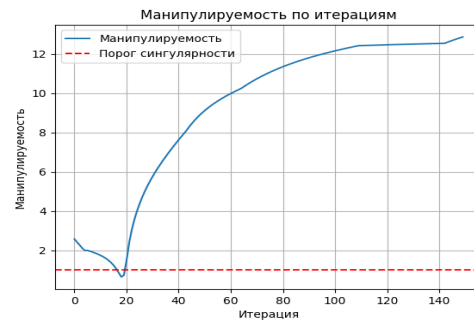


Рис. 5. Ошибка расстояния во времени

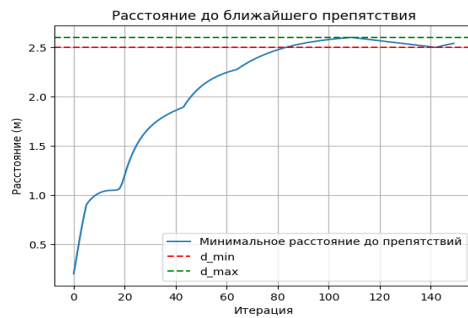


Рис. 6. Расстояние до ближайшего препятствия

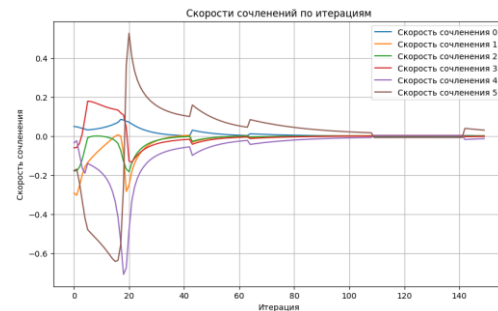


Рис. 7. Скорости сочленений

Таблица 1. Параметры предложенного алгоритма избегания препятствий

Параметр	Символ	Значение	Единица
ПИД	K_p, k_i, k_d	0.32, 0.005, 0.05	-
Шаг по времени	dt	0.15	s
Коэффициент демпфирования	λ	0.005	-
DLS base parameter	d_{min}	0.01	-
DLS scaling factor	k_λ	0.1	-
Мин и мак расстояние	d_{min}, d_{max}	2.5, 2.6	m
Целевое расстояние	d_{target}	2.55	m
Порог сингулярности	m_{thresh}	1.0	-
Количество итераций	N_{iter}	150	-

Сравнение ДНК и ДНК с оптимизацией в нуль-пространстве

Для оценки эффективности предлагаемой стратегии управления было проведено сравнительное исследование между классическим методом наименьших квадратов с демпфированием ДНК и усовершенствованным методом ДНК с оптимизацией в нулевом пространстве. Оба подхода были применены к одной и той же начальной конфигурации и среде с препятствиями для обеспечения справедливой оценки. Были оценены три основных показателя эффективности:

- Определитель матрицы JJ^T : для оценки избегания сингулярностей.
- Индекс манипулируемости: для количественной оценки подвижности манипулятора.
- Минимальное расстояние до ближайшего препятствия: для оценки эффективности избегания препятствий.

Таблица 2. Сравнение метода ДНК и ДНК с оптимизацией в нуль-пространстве

Metric	Только ДНК	ДНК в нуль-пространстве
Определитель матрицы JJ^T	57.5	57.9
Индекс манипулируемости	7.7	7.8
Минимальное расстояние (m)	2.0	2.5

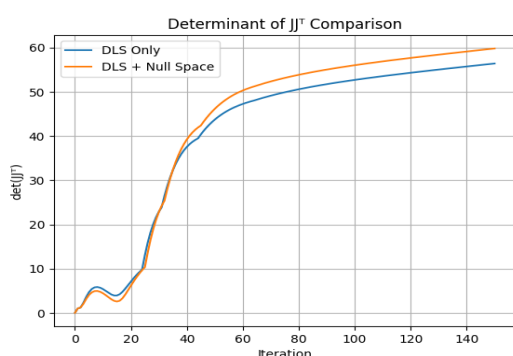


Рис. 8. Определитель матрицы JJ^T

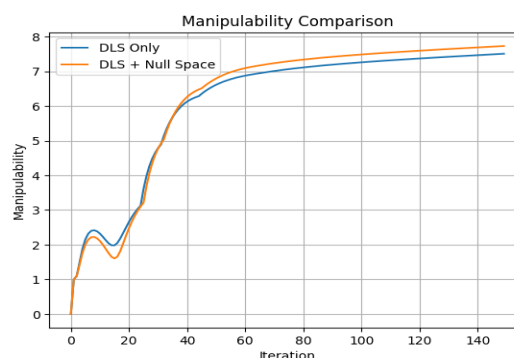


Рис. 9. Индекс манипулируемости

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода в сравнении с традиционными методами обратной кинематики. Интеграция ПИД-регулятора, метода ДНК и оптимизации в нуль-пространстве позволила достичь более стабильного и безопасного поведения манипулятора при работе в сложных условиях.

Особое внимание заслуживает тот факт, что предложенный контроллер демонстрирует улучшенные характеристики по нескольким ключевым метрикам:

- увеличение минимального расстояния до ближайших препятствий;
- повышение значения индекса манипулируемости;
- снижение колебаний суставных скоростей и сглаженность траектории движения.

Кроме того, динамическое переключение между режимами избегания, демпфирования и удержания позволило обеспечить адаптивное поведение системы, сохраняя её устойчивость при различных сценариях внешней среды. Такой подход делает предложенную стратегию особенно перспективной для применения в робототехнических системах, функционирующих в реальном времени и в условиях высокой неопределённости.

Заключение

В данной статье представлена эффективная и устойчивая стратегия управления для шестистепенного роботизированного манипулятора, обеспечивающая одновременное избегание препятствий и сингулярных конфигураций в режиме реального времени. Разработанный подход объединяет пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) контроллер с методом обратной кинематики, основанным на затухающих наименьших квадратах (ДНК), и оптимизацией в нулевом пространстве. Это позволяет системе не только реагировать на близость к препятствиям, но и избегать нежелательных конфигураций без нарушения основной задачи управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Zhang, L., Du, H., Qin, Z., Zhao, Y., & Yang, G. Real-time optimized inverse kinematics of redundant robots under inequality constraints. *Scientific Reports*. 2024. 14(1). pp. 29754. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81174-8>.
- [2] Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М., М'боло О.Э., Кочнева О. Исследование сингулярностей манипуляторов-роботов. *Автоматизация. Современные технологии*. 2024. №10. С. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179.
- [3] Hameed, F. S., Alwan, H. M., & Ateia, Q. A. Obstacle avoidance method for highly redundant robotic arms. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. p. 012017.

- [4] Zhang, Y., & Wang, H. Redundancy-based motion planning with task constraints for robot manipulators. *Sensors*. 2025. pp. 1900. <https://doi.org/10.3390/s25061900>.
- [5] Elmogy, A., Alhemaly, N., & El-Ghaish, H. An enhanced neuro-adaptive PID sliding mode control for robot manipulators: Promoting sustainable automation. *Neural Computing and Applications*. 2025. pp. 6877–6898. <https://doi.org/10.1007/s00521-025-10980-6>
- [6] Wang, X., Liu, X., Chen, L., & Hu, H. Deep-learning damped least squares method for inverse kinematics of redundant robots. *Measurement*. 2021. pp. 108821. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108821>.
- [7] Beck, F., Vu, M. N., & Kugi, A. Singularity avoidance with application to online trajectory optimization for serial manipulators. *IFAC World Congress*. pp. 284-291 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02516>
- [8] Palmieri, G., & Scoccia, C. Motion planning and control of redundant manipulators for dynamical obstacle avoidance. *Machines*. 2021. pp. 121. <https://doi.org/10.3390/machines9060121>.
- [9] Ju, F., Jin, H., Wang, B., & Zhao, J. A predictable obstacle avoidance model based on geometric configuration of redundant manipulators for motion planning. *Sensors*. 2023. pp. 4642. <https://doi.org/10.3390/s23104642>
- [10] Li, Y., & Wang, L. Comprehensive research and analysis on obstacle–singularity–joint limit avoidance of redundant robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2024. <https://doi.org/10.1177/17298806241233910>.
- [11] Yoon, M., Kang, M., Park, D., & Yoon, S. Learning-based initialization of trajectory optimization for path-following problems of redundant manipulators. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2023. pp. 9686–9692. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2023.10161234>
- [12] Pagnotta, D., & Monteriu, A. Redundancy resolution scheme for manipulators subject to inequality constraints. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2023. pp. 575–590. <https://doi.org/10.1007/s12555-021-0641-8>.
- [13] Zhang, X., Fan, B., Wang, C., & Cheng, X. An improved weighted gradient projection method for inverse kinematics of redundant surgical manipulators. *Sensors*. 2021. pp. 7362. <https://doi.org/10.3390/s21217362>
- [14] Альвардат М.Я., Ал-Аражи Х.М., М'боло О.Э., Кочнева О. Геометрический вывод якобиана для шести степеней свободы с призматическим звеном. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2024. №4. С. 261–269. DOI: 10.31776/RTCJ.12403.
- [15] Liang, Z., Quan, P., Di, S., & Huang, Z. Inverse kinematics optimization for redundant manipulators using motion-level factor. *Mathematics*. 2025. pp. 624. <https://doi.org/10.3390/math13040624>.

REAL-TIME CONTROL ALGORITHM FOR OBSTACLE AND SINGULARITY AVOIDANCE IN A ROBOTIC MANIPULATOR

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

²Технологический университет - Ирак

Abstract

This work addresses the development of a real-time control algorithm for obstacle and singularity avoidance in a six-degree-of-freedom robotic manipulator. The proposed approach combines a Cartesian PID controller with an inverse kinematics method based on Damped Least Squares (DLS) and null space optimization. The controller adaptively switches between avoidance, stabilization, and holding modes depending on the distance to the nearest obstacle, ensuring smooth motion and system stability. The developed method demonstrates improved performance in terms of manipulability, stability, and safety compared to the classical DLS approach.

Keywords: Manipulator, obstacle avoidance, singularity, PID controller, damped least squares, null space optimization.

REFERENCES

- [1] Zhang, L., Du, H., Qin, Z., Zhao, Y., & Yang, G. Real-time optimized inverse kinematics of redundant robots under inequality constraints. *Scientific Reports*. 2024. pp. 29754. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81174-8>.
- [2] Alwardat M.Y., Al-Araji H.M., M'bolo O.E., Kochneva O. Investigation of Singularities in Robot Manipulators. *Automation. Modern Technologies*. 2024. No. 10. pp. 173–179. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-173-179.
- [3] Hameed, F. S., Alwan, H. M., & Ateia, Q. A. Obstacle avoidance method for highly redundant robotic arms. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. p. 012017.
- [4] Zhang, Y., & Wang, H. Redundancy-based motion planning with task constraints for robot manipulators. *Sensors*. 2025. pp. 1900. <https://doi.org/10.3390/s25061900>.
- [5] Elmogy, A., Alhemaly, N., & El-Ghaish, H. An enhanced neuro-adaptive PID sliding mode control for robot manipulators: Promoting sustainable automation. *Neural Computing and Applications*. 2025. pp. 6877–6898. <https://doi.org/10.1007/s00521-025-10980-6>.

- [6] Wang, X., Liu, X., Chen, L., & Hu, H. Deep-learning damped least squares method for inverse kinematics of redundant robots. *Measurement*. 2021. pp. 108821. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108821>.
- [7] Beck, F., Vu, M. N., & Kugi, A. Singularity avoidance with application to online trajectory optimization for serial manipulators. *IFAC World Congress*. pp. 284-291 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02516>
- [8] Palmieri, G., & Scoccia, C. Motion planning and control of redundant manipulators for dynamical obstacle avoidance. *Machines*. 2021. pp. 121. <https://doi.org/10.3390/machines9060121>.
- [9] Ju, F., Jin, H., Wang, B., & Zhao, J. A predictable obstacle avoidance model based on geometric configuration of redundant manipulators for motion planning. *Sensors*. 2023. pp. 4642. <https://doi.org/10.3390/s23104642>.
- [10] Li, Y., & Wang, L. Comprehensive research and analysis on obstacle–singularity–joint limit avoidance of redundant robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2024. <https://doi.org/10.1177/17298806241233910>.
- [11] Yoon, M., Kang, M., Park, D., & Yoon, S. Learning-based initialization of trajectory optimization for path-following problems of redundant manipulators. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2023. pp. 9686–9692. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2023.10161234>.
- [12] Pagnotta, D., & Monteriu, A. Redundancy resolution scheme for manipulators subject to inequality constraints. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2023. pp. 575–590. <https://doi.org/10.1007/s12555-021-0641-8>.
- [13] Zhang, X., Fan, B., Wang, C., & Cheng, X. An improved weighted gradient projection method for inverse kinematics of redundant surgical manipulators. *Sensors*. 2021. pp. 7362. <https://doi.org/10.3390/s21217362>
- [14] Alwardat M.Y., Al-Araji H.M., M'bolo O.E., Kochneva O. Geometric Derivation of the Jacobian for a Six-Degree-of-Freedom Manipulator with a Prismatic Link. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2024. No. 4. pp. 261–269. DOI: 10.31776/RTCJ.12403.
- [15] Liang, Z., Quan, P., Di, S., & Huang, Z. Inverse kinematics optimization for redundant manipulators using motion-level factor. *Mathematics*. 2025. pp. 624. <https://doi.org/10.3390/math13040624>.