

Машиностроение и машиноведение

УДК 004.896

Оптимизация адаптивного управления роботом-манипулятором с восемью степенями свободы

С.А. Финкомесс, Х.М. Ал-Аражи

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Optimization of adaptive control of a robotic manipulator with 8 degrees of freedom

S.A. Finecomess, H.M. Al-Araji

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

Предложена адаптивная система управления роботом-манипулятором с восемью степенями свободы, позволяющая решать такие проблемы управления механизмами с большим числом степеней свободы, как вычислительная сложность, сходимость параметров и устойчивость в условиях динамической неопределенности. Адаптивная система управления разработана на основе подхода Ляпунова, что позволяет в реальном времени оценивать неизвестные параметры для обеспечения точного отслеживания траектории робота-манипулятора. Проведено моделирование в среде MATLAB с помощью разработанной адаптивной системы управления, выявившее у нее более высокую производительность, чем у эталонных методов. По сравнению с методами управления на основе прогнозирующей модели (Model Predictive Control) и фильтра Калмана среднеквадратическая ошибка уменьшилась на 97,0 и 95,5 % соответственно. Также значительно снизились время установления, время нарастания и ошибка в установившемся режиме. Анализ полученных результатов подтвердил, что система адаптивного управления является надежным и высокоэффективным решением для оптимизации сложных робототехнических систем с большим числом степеней свободы.

EDN: BHABQM, <https://elibrary/bhabqm>

Ключевые слова: восемь степеней свободы, робот-манипулятор, адаптивное управление, параметры Денавита — Хартенберга, кинематика, динамика

This study presents an adaptive control system for an eight-degree-of-freedom robotic manipulator, aimed at resolving persistent challenges in controlling high-degree-of-freedom systems, such as computational complexity, parameter convergence, and ensuring stability under dynamic uncertainties. The controller is designed based on a Lyapunov approach, enabling real-time estimation of the system's unknown parameters and ensuring accurate tracking of a desired trajectory. Numerical experiments conducted in the MATLAB environment demonstrate the superiority of the proposed adaptive controller over benchmark methods. The results show a 97 % improvement in Root Mean Square Error compared to

Model Predictive Control (MPC) and a 95.5 % improvement compared to the Kalman filter-based method, along with a significant reduction in settling time, rise time, and steady-state error. The obtained data convincingly confirms that the proposed adaptive control method is a robust and highly effective solution for optimizing complex robotic systems with a high number of degrees of freedom.

EDN: BHABQM, <https://elibrary/bhabqm>

Keywords: eight degrees of freedom, robotic manipulator, adaptive control, Denavit-Hartenberg parameters, kinematics, dynamics

Управление роботом-манипулятором (РМ) с большим числом степеней свободы имеет такие нерешенные проблемы, как вычислительная сложность, сходимость параметров и устойчивость в условиях динамической неопределенности. Серийный РМ с восемью степенями свободы, имея повышенную маневренность и гибкость для решения сложных задач в производстве, хирургии и автоматизации, служит примером этих нерешенных проблем из-за сложной, нелинейной и часто неопределенной динамики [1–7].

Адаптивное управление позволяет компенсировать параметрические неопределенности (нагрузку, трение) и обеспечивает точное отслеживание траектории РМ там, где традиционные контроллеры неэффективны [8–14]. Однако его применение для высокоизбыточных систем требует дальнейшего изучения.

Цель работы — оптимизация производительности РМ с восемью степенями свободы с помощью адаптивной системы управления.

Новизна работы заключается в комплексной разработке и проверке адаптивной системы управления, которая обеспечивает уровень производительности, недостижимый другими передовыми методами управления на основе прогнозирующей модели (Model Predictive Control — MPC) и фильтра Калмана (ФК), особенно в динамических и неопределенных условиях.

Математическая модель РМ с восемью степенями свободы и его система управления.

Принцип работы серийного РМ с восемью степенями свободы. Схема серийного РМ с восемью степенями свободы, описывающая его кинематические и динамические характеристики [15], приведена на рис. 1.

Принцип работы рассматриваемого РМ основан на скоординированном движении его сочленений и звеньев для достижения точного положения и ориентации рабочего органа в

трехмерном пространстве. Каждая степень свободы определяет возможность независимого движения, обеспечиваемого вращательными (поворотными) или линейными (призматическими) сочленениями. Благодаря восьми степеням свободы РМ обладает повышенной гибкостью и маневренностью, что делает его пригодным для решения сложных задач в таких областях, как производство, хирургия и исследование космоса. Анализ работы РМ охватывает его кинематику, динамику, управление и координатную сочленений [16–18].

Кинематика. Прямая задача кинематики заключается в определении положения и ориентации рабочего органа по углам в сочленениях. Для определения преобразования между последовательными звеньями РМ с восемью степенями свободы используют правило Денавита — Хартенберга [19]. Параметры Денавита — Хартенберга [20] РМ с восемью степенями свободы для каждого i -го сочленения приведены в табл. 1, где a_{i-1} — длина звена; α_{i-1} — угол скручивания звена; d_i — смещение звена; θ_i — угол в сочленении.

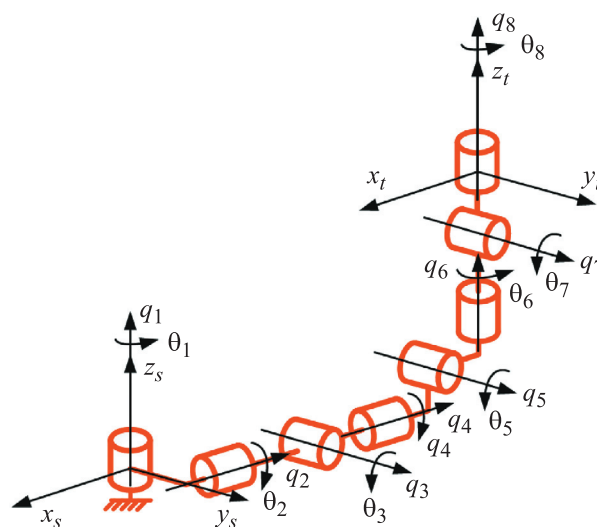


Рис. 1. Кинематическая схема серийного РМ с восемью степенями свободы

Матрица преобразования при переходе от $(i-1)$ -го звена к i -му звену имеет вид [21]

$$\mathbf{T}_i^{i-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Общая матрица преобразования от основания до рабочего органа является произведением отдельных матриц преобразования [22]:

$$\mathbf{T}_{i+1}^0 = \mathbf{T}_1^0 \times \mathbf{T}_2^1 \times \mathbf{T}_3^2 \times \mathbf{T}_4^3 \times \dots \times \mathbf{T}_8^7. \quad (2)$$

Положение и ориентацию рабочего органа можно найти из матрицы $\mathbf{T}_{i+1}^0$.

Обратная задача кинематики заключается в вычислении углов в сочленениях, необходимых для достижения желаемого положения и ориентации рабочего органа. Для РМ с восемью степенями свободы эта задача обычно имеет бесконечное количество решений, поэтому используются методы оптимизации или избыточности [23].

Задача формулируется следующим образом [24]:

$$\mathbf{q} = f^{-1}(X_\Psi), \quad (3)$$

где $\mathbf{q}$ — вектор углов в сочленениях, $\mathbf{q} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_8]^T$; X_Ψ — желаемая поза (положение и ориентация) рабочего органа.

Вектор угловой скорости i -го звена в базовой системе координат вычисляется как

$$\boldsymbol{\omega}_i = \sum_{j=1}^8 (\boldsymbol{\sigma}_j \dot{\mathbf{q}}_j \mathbf{z}_{i-1}), \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\sigma}_i$ — параметр, определяющий тип i -го сочленения; $\dot{\mathbf{q}}_i$ — вектор обобщенной скорости i -го сочленения; $\mathbf{z}_{i-1}$ — единичный вектор оси вращения i -го сочленения.

Неизвестные параметры для расчета

$$\mathbf{J}_0(\mathbf{q}) = [\boldsymbol{\sigma}_1 \mathbf{z}_0 \quad \boldsymbol{\sigma}_2 \mathbf{z}_1 \quad \dots \quad \boldsymbol{\sigma}_8 \mathbf{z}_7], \quad (5)$$

где $\mathbf{J}_0(\mathbf{q})$ — матрица Якоби.

Для решения этой задачи часто используют численные методы, такие как метод Якобиана или градиентный спуск [25].

Динамика МР. Динамика МР описывает взаимосвязь между моментами в сочленениях и движением МР. Уравнения движения можно вывести, используя методы Лагранжа или Ньютона — Эйлера.

Таблица 1

Параметры Денавита — Хартенберга РМ с восемью степенями свободы

i	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i
1	0	0	0	0
2	$-\pi/2$	150	$\pi/2$	-243
3	$-\pi/2$	0	0	0
4	$\pi/2$	0	π	270
5	$-\pi/2$	85	$\pi/2$	0
6	$\pi/2$	60	0	270
7	$-\pi/2$	0	0	0
8	$\pi/2$	0	0	-148

Метод Лагранжа является особенно эффективным для РМ с большим числом сочленений, так как позволяет избежать необходимости учета внутренних сил между звеньями.

Лагранжиан определяется как

$$L = K - P, \quad (6)$$

где K — полная кинетическая энергия, P — полная потенциальная энергия.

Уравнение движения Лагранжа имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau}, \quad (7)$$

где $\boldsymbol{\tau}$ — вектор моментов, возникающих в сочленениях.

Метод Ньютона — Эйлера позволяет вычислять силы и моменты, действующие на каждое звено. Уравнения движения имеют вид

$$\begin{cases} F_i = m_i \ddot{p}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \mathbf{I}_i); \\ \boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{I}_i) + \mathbf{r}_i \times F_i, \end{cases} \quad (8)$$

где F_i — сила, действующая на i -е звено; m_i — масса i -го звена; $\ddot{p}_i$ — линейное ускорение i -го звена; $\boldsymbol{\omega}_i$ — угловая скорость i -го звена; $\mathbf{I}_i$ — тензор инерции i -го звена; $\boldsymbol{\tau}_i$ — крутящий момент, действующий на i -е звено; $\mathbf{r}_i$ — радиус-вектор центра масс i -го звена.

Устранение избыточных связей позволит использовать дополнительные степени свободы. Это можно сделать путем оптимизации в нулевом пространстве, методами проекции градиента, стратегии приоритета задач.

В общем случае применяют уравнение

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^+ \dot{\mathbf{X}} + (\mathbf{I} - \mathbf{J}^+ \mathbf{J}) \dot{\mathbf{q}}_0, \quad (9)$$

где $\mathbf{J}^+$ — псевдообратная матрица Якоби; $\dot{\mathbf{X}}$ — желаемая скорость перемещения рабочего органа; $\dot{\mathbf{q}}_0$ — вектор вторичной задачи.

Адаптивное управление — метод управления системами с неопределенными или изменяющимися во времени параметрами. Далее приведена математическая модель адаптивной системы управления для РМ с восемью степенями свободы.

Система адаптивного управления. Применение адаптивного управления к РМ с восемью степенями свободы обусловлено несколькими основными причинами, связанными со сложностью и неопределенностью. Большое число степеней свободы приводит к тому, что движение одного сочленения влияет на все остальные, и создает сложную нелинейную динамику, которую трудно точно моделировать с фиксированными параметрами. Адаптивное управление становится необходимым для компенсации этой немоделируемой динамики и учета параметрических неопределенностей, таких как неизвестная или смещающаяся полезная нагрузка и изменение инерции. Кроме того, система управления должна сохранять устойчивость к внешним возмущениям и эксплуатационной изменчивости. Также критерием является возможность идентификации и настройки в реальном времени контроллера, который непрерывно обновляет свою внутреннюю модель и законы управления для обеспечения стабильности, точности и желаемой производительности по всем восьми степеням свободы, несмотря на присущие этому сложности.

Динамическая модель РМ с восемью степенями свободы имеет следующий вид:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (10)$$

где $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ — симметричная положительно определенная матрица инерции размера 8×8 ; $\ddot{\mathbf{q}}$ — вектор ускорения сочленений, $\ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^8$; $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ — матрица Кориолиса и центробежных сил размера 8×8 ; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ — вектор силы тяжести, $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^8$; $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}})$ — вектор силы трения, $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^8$.

Параметризация динамической модели. Динамику можно линейно параметризовать через набор неизвестных параметров (например, массы, инерции, коэффициентов трения)

$\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^p$, где p — количество параметров. Тогда выражение (10) принимает вид

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) = \\ = \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\theta}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ — матрица регрессора размера $8 \times p$ (известные функции $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$ и $\ddot{\mathbf{q}}$).

Представим модель (11) следующим образом:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\mu}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{p}(\mathbf{q}) = \mathbf{F},$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ — матрица инерции в декартовой системе координат; $\boldsymbol{\mu}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ — вектор сил Кориолиса и центробежных сил в декартовой системе координат; $\mathbf{F}$ — вектор силы, приложенной к рабочему органу в декартовой системе координат, $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^m$; $\mathbf{p}(\mathbf{q})$ — вектор силы тяжести в декартовой системе координат, $\mathbf{p}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^m$.

Эта интегрированная модель позволяет контроллеру управлять РМ на основе декартовой системы координат. Набор кинематических уравнений обеспечивает базовую математическую структуру для разработки динамических моделей и управления РМ с восемью степенями свободы.

Алгоритм адаптивного управления. Как уже указывалось, адаптивное управление РМ с восемью степенями свободы позволяет справляться с такими неопределенностями в системе, как изменение полезной нагрузки, трение или немоделируемая динамика. Адаптивная система управления непрерывно обновляет параметры на основе ошибки между желаемой и фактической траекториями, обеспечивая точную и надежную работу.

На основе кинематических и динамических моделей РМ с математической моделью (1)–(9) в систему управления добавлен механизм адаптивного управления. Эта комбинация, реализованная благодаря кинематическим и динамическим моделям, создает РМ, который является одновременно динамически устойчивым и высокофункциональным, так как полностью использует восемь степеней свободы.

Алгоритм адаптивного управления включает в себя расчет минимальных и максимальных критериев модели РМ с восемью степенями свободы и их проверку. Если критерии соблюдены, система анализирует явление (процесс) в регионе и одновременно завершает тестирование. Затем она оценивает закон

управления, чтобы обеспечить необходимые изменения.

Если все условия выполнены, то алгоритм завершает работу. В противном случае шаг по времени увеличивается, а минимальные и максимальные критерии пересчитываются на основе модели РМ с восемью степенями свободы. Процедура повторяется до тех пор, пока все условия не будут выполнены.

Закон адаптивного управления. Этот закон основан на управлении с обратной связью для стабилизации системы и законе адаптивного обновления для оценки неизвестных параметров.

Управление с обратной связью. Входной управляющий сигнал определяется следующим образом:

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r) \hat{\theta} + K_p e + K_d \dot{e},$$

где $\hat{\theta}$ — оценка неизвестного вектора параметров θ , $\hat{\theta} \in \mathbb{R}^p$; K_p — положительно определенная матрица коэффициентов пропорционального усиления размера 8×8 ; e — ошибка положения (являющаяся искомой траекторией), $e = q_d - q$ (q_d — желаемое положение); K_d — положительно определенная матрица коэффициентов производного усиления, размера 8×8 ; $\dot{e}$ — ошибка угловой скорости, $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$; $\ddot{q}_r$ — опорное угловое ускорение, $\ddot{q}_r = \ddot{q}_d + K_d \dot{e} + K_p e$.

Закон адаптивного обновления. Оценка параметров $\hat{\theta}$ обновляется онлайн согласно следующему закону адаптации [5]:

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}) \dot{e},$$

где Γ — положительно определенная матрица адапционного прироста размера $p \times p$.

Такая структура гарантирует, что ошибка отслеживания стремится к нулю даже без предварительного знания динамических параметров θ РМ.

Результаты и обсуждение. Эффективность отслеживания траектории РМ с восемью степенями свободы при адаптивном управлении отражает рис. 2, где приведены зависимости желаемых (полученных с помощью планировщика) и фактических (измеренных) углов в сочленениях РМ от времени. Результаты моделирования подтверждают эффективность адаптивного контроллера, демонстрируя последовательное снижение ошибки отслеживания, так как контроллер изучает динамику системы и корректирует ее параметры в реальном времени. Такая онлайн-адаптация гарантирует, что углы в сочленениях будут сходиться с желаемыми, что является свойством устойчивости, строго подтвержденным анализом Ляпунова.

Эффективность адаптивного контроллера при управлении угловыми скоростями сочленений РМ отражает рис. 3, где приведены зависимости угловых скоростей сочленений РМ от времени. Видно, что адаптивный контроллер обеспечивает точное отслеживание угловой скорости сочленения динамическим регулированием крутящего момента для минимизации

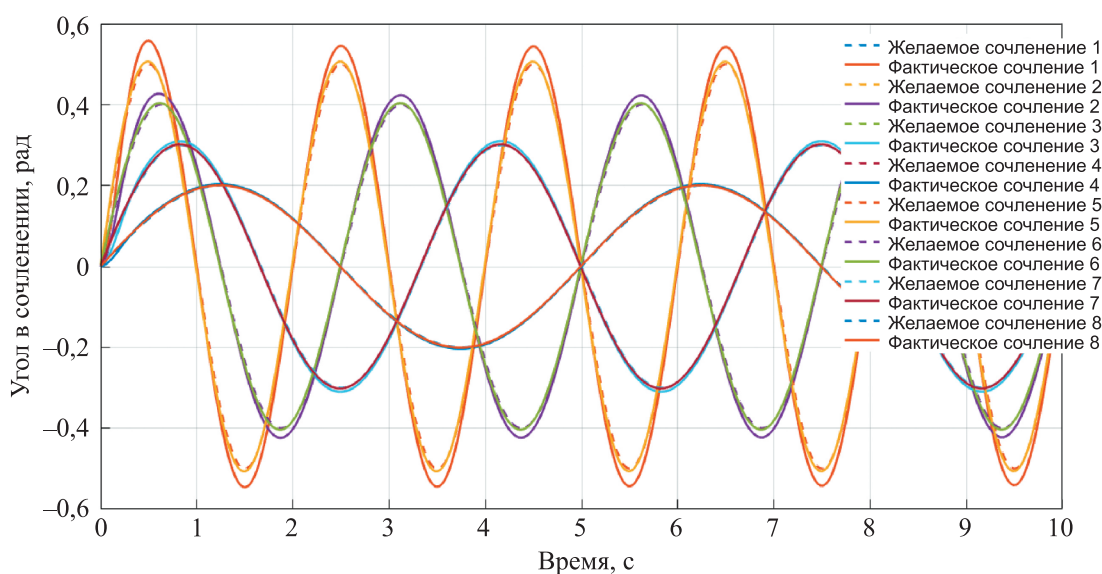


Рис. 2. Зависимости желаемых и фактических углов в сочленениях РМ от времени

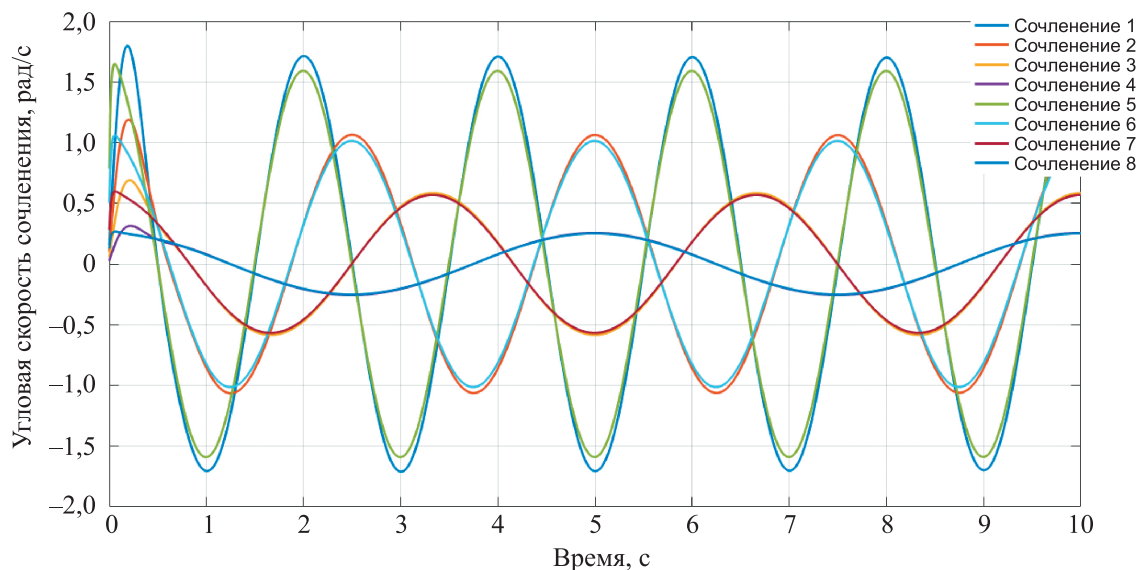


Рис. 3. Зависимости угловых скоростей сочленений РМ от времени

Таблица 2

Показатели производительности контроллеров

Показатель	Система управления			$\Delta_{\text{МРС}}, \%$	$\Delta_{\text{ФК}}, \%$
	МРС	ФК	Адаптивная		
Время установления, с	1,20	0,98	0,50	58,3	49,0
Время нарастания, с	0,9	0,5	0,2	77,8	60,0
Перерегулирование, %	0,89	0,80	0,02	97,8	97,5
Ошибка в установившемся режиме, %	0,460	0,300	0,012	97,4	96,0
Среднеквадратическая ошибка	0,600	0,400	0,018	97,0	95,5

ошибок. Это достигается путем оценки параметров в реальном времени, позволяя контроллеру изучать и компенсировать динамику системы, что приводит к приближению фактических угловых скоростей к желаемым.

Результаты сравнения показателей производительности адаптивного контроллера и систем управления на основе МРС [324] и ФК [25] приведены в табл. 2, где $\Delta_{\text{МРС}}$ и $\Delta_{\text{ФК}}$ — улучшение показателя адаптивного контроллера относительно первой и второй системы соответственно. Видно, что у адаптивной системы управления показатели значительно лучше. По сравнению с системой управления на основе МРС у адаптивного контроллера время установления снизилось на 58,3 %, время нарастания — на 77,8 %, перерегулирование — на 97,8 %, ошибка в установившемся режиме — на 97,4 %, среднеквадратическая ошибка — на 97,0 %, а по сравнению с регулятором на основе ФК — на 49,0; 60,0; 97,5; 96,0 и 95,5 % соответственно.

Полученные результаты отражают способность адаптивного контроллера обеспечивать точное и стабильное отслеживание траектории РМ с большим числом степеней свободы за счет эффективной компенсации неопределенностей системы.

Выводы

1. Разработана адаптивная система управления РМ с восемью степенями свободы, позволяющая решать проблемы управления РМ с большим числом степеней свободы. Предложенный контроллер основан на подходе Ляпунова, позволяющем оценивать неизвестные параметры системы в реальном времени, такие как переменная полезная нагрузка и немоделируемые динамические характеристики, тем самым обеспечивая точное отслеживание траектории РМ и устойчивость в условиях динамических неопределенностей.

2. Эффективность предложенного адаптивного контроллера оценена с помощью численного моделирования в среде MATLAB путем сравнения с системами управления на основе MPC и ФК. Результаты однозначно демонстрируют превосходство адаптивного метода. По среднеквадратической ошибке адаптивный контроллер превосходит системы управления на основе MPC и ФК на 97,0 и 95,5 % соответственно. Кроме того, адаптивный контроллер показал значительное улучшение переходных и установившихся характеристик с существенным сокращением времени установления (58,3 %), времени нарастания (77,8 %), перерегулирования (97,8 %) и ошибки в установив-

шемся режиме (97,4 %) по сравнению с системой управления на основе MPC, а также аналогичные результаты по сравнению с системой на основе ФК.

3. Анализ полученных данных показал, что предложенная система адаптивного управления является не только теоретически обоснованной, но и высокоэффективной и надежной для сложных робототехнических систем. Она устраняет проблемы вычислительной сложности и обеспечивает сходимость параметров, вследствие чего ее можно применять для оптимизации производительности РМ с большим числом степеней свободы в динамичных и неопределенных условиях.

Литература

- [1] Yang, Y. et al. A patch-based real-time six degrees of freedom object pose refinement method for robotic manipulation. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 2024, vol. 21, no. 2, doi: <https://doi.org/10.1177/17298806241229270>
- [2] Ma D., Zhang C., Xu Q., Zhou G. Large and small-scale models' fusion-driven proactive robotic manipulation control for human-robot collaborative assembly in industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2026, 97, p. 103078.
- [3] Zhou Z., Li Z., Du S. et al. Robot adoption and enterprise R&D manipulation: evidence from China. *Technol. Forecast. Soc. Change*, 2024, vol. 200, art. 123134, doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123134>
- [4] Bittencourt L.D.F.G., Fraga M.A. Initial development of a low-cost assistive robotic manipulator using ESP32. *IEEE IC_ASET*, 2024, doi: https://doi.org/10.1109/IC_ASET61847.2024.10596218
- [5] Amiri F., Khorashadizadeh S. Adaptive control of a class of uncertain nonlinear systems using brain emotional learning and Legendre polynomials. *Trans. Inst. Meas. Control*, 2023, vol. 46, no. 9, pp. 1667–1679, doi: <https://doi.org/10.1177/01423312231203270>
- [6] Wang H., Li Y. Adaptive control of robot manipulators with closed architecture. *Automatica*, 2024, vol. 162, art. 111040, doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2023.111040>
- [7] Unver Ş., Selim E., Tatlicioglu E. et al. Adaptive control of BLDC driven robot manipulators in task space. *IET Control Theory Appl.*, 2024, vol. 18, no. 15, pp. 1910–1921, doi: <https://doi.org/10.1049/cth2.12631>
- [8] Rodriguz-Molina A., Villarreal-Cervantes M.G., Pantoja-Gacia J.S. et al. Metaheuristic adaptive control based on polynomial regression and differential evolution for robotic manipulators. *Appl. Soft Comput.*, 2024, vol. 151, art. 111116, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111116>
- [9] Zhang Y., Mo K., Shen F. et al. Self-adaptive robust motion planning for high DoF robot manipulator using deep MPC. 3rd RAIIC, 2024, pp. 139–143, doi: <https://doi.org/10.1109/RAIIC61787.2024.10671222>
- [10] Ahmed S., Azar A.T. Adaptive fractional tracking control of robotic manipulator using fixed-time method. *Complex Intell. Syst.*, 2024, vol. 10, no. 6, pp. 369–382, doi: <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01164-7>
- [11] Obuz S., Tatlicioglu E., Zergerpglu E. Adaptive Cartesian space control of robotic manipulators: a concurrent learning based approach. *J. Frankl. Inst.*, 2024, vol. 361, no. 6, art. 106701, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2024.106701>
- [12] Khan G.D. Adaptive neural network control framework for industrial robot manipulators. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 63477–63483, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3396782>

- [13] He Y., Xiao L., Wang Z. et al Fuzzy neural network approach to adaptive robust nonsingular sliding mode control for predefined-time tracking of a quadrotor. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 2024, vol. 32, no. 12, pp. 6775–6788, doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2024.3464564>
- [14] Vongkunghae T., I. Aly. A., Dogan K.M. Distributed model reference adaptive control for an uncertain modular robotic system. *AIAA SCITECH Forum*, 2024, paper AIAA 2024-0116, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2024-0116>
- [15] Li G., Zhang F., Fu Y. et al. Joint stiffness identification and deformation compensation of serial robots based on dual quaternion algebra. *Appl. Sci.*, 2018, vol. 9, no. 1, art. 65, doi: <https://doi.org/10.3390/app9010065>
- [16] Zhou Z., Song J., Xie X. et al. Towards Building AI-CPS with NVIDIA Isaac Sim: an industrial benchmark and case study for robotics manipulation. *ICSE-SEIP '24*, 2024, pp. 263–274, doi: <https://doi.org/10.1145/3639477.3639740>
- [17] Pu H., He L., Cheng P. et al. CORMAND2: a deception attack against industrial robots. *Engineering*, 2024, vol. 32, pp. 186–201, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.01.013>
- [18] Omar M., Wang K., Kun D. et al. Robust data-driven dynamic model discovery of industrial robots with spatial manipulation capability using simple trajectory. *Nonlinear Dyn.*, 2024, vol. 112, no. 11, pp. 9155–9177, doi: <https://doi.org/10.1007/s11071-024-09526-7>
- [19] Tian J., Zhong X., Peng X. et al. Model-free visual servoing based on active disturbance rejection control and adaptive estimator for robotic manipulation without calibration. *Ind. Robot*, 2024, vol. 51, no. 5, pp. 820–836, doi: <https://doi.org/10.1108/IR-12-2023-0347>
- [20] Liu C., Tang D., Zhu H. et al. The e-Bike motor assembly: Towards advanced robotic manipulation for flexible manufacturing. *Robot. Comput -Integr. Manuf.*, 2024, vol. 85, art. 102637.
- [21] Kong Y., Yang L., Chen C. et al. Online kinematic calibration of robot manipulator based on neural network. *Measurement*, 2024, vol. 238, art. 115281, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115281>
- [22] Xiao M., Yang C., Gao S. Waterbomb origami mechanism pneumatic manipulator design based on DH parameter method and symmetric folding hypothesis. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 27843–27857, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3365514>
- [23] Alwardat M.Y., Alwan H.M. Forward and inverse kinematics of a 6-DOF robotic manipulator with a prismatic joint using MATLAB robotics toolbox. *IJATEE*, 2024, vol. 11, no. 117, pp. 1096–1110, doi: <http://dx.doi.org/10.19101/IJATEE.2024.111100210>
- [24] Zakey N., Zaman M.H.M., Ibrahim M.F. Structural optimization of 4-DOF agricultural robot arm. *Jurnal Kejuruter*, 2024, vol. 36, no. 3, pp. 1127–1134, doi: [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(3\)-23](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(3)-23)
- [25] Mustary S., Kashem M.A., Chowdhury M.A. et al. Mathematical model and evaluation of dynamic stability of industrial robot manipulator. *Syst. Soft Comput.*, 2024, vol. 6, art. 200071, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2023.200071>

References

- [1] Yang. Y. et al. A patch-based real-time six degrees of freedom object pose refinement method for robotic manipulation. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 2024, vol. 21, no. 2, doi: <https://doi.org/10.1177/17298806241229270>
- [2] Ma D., Zhang C., Xu Q., Zhou G. Large and small-scale models' fusion-driven proactive robotic manipulation control for human-robot collaborative assembly in industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2026, 97, p. 103078.
- [3] Zhou Z., Li Z., Du S. et al. Robot adoption and enterprise R&D manipulation: evidence from China. *Technol. Forecast. Soc. Change*, 2024, vol. 200, art. 123134, doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123134>
- [4] Bittencourt L.D.F.G., Fraga M.A. Initial development of a low-cost assistive robotic manipulator using ESP32. *IEEE IC_ASET*, 2024, doi: https://doi.org/10.1109/IC_ASET61847.2024.10596218
- [5] Amiri F., Khorashadizadeh S. Adaptive control of a class of uncertain nonlinear systems using brain emotional learning and Legendre polynomials. *Trans. Inst. Meas. Control*, 2023, vol. 46, no. 9, pp. 1667–1679, doi: <https://doi.org/10.1177/01423312231203270>

- [6] Wang H., Li Y. Adaptive control of robot manipulators with closed architecture. *Automatica*, 2024, vol. 162, art. 111040, doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2023.111040>
- [7] Unver Ş., Selim E., Tatlicioglu E. et al. Adaptive control of BLDC driven robot manipulators in task space. *IET Control Theory Appl.*, 2024, vol. 18, no. 15, pp. 1910–1921, doi: <https://doi.org/10.1049/cth2.12631>
- [8] Rodriguz-Molina A., Villarreal-Cervantes M.G., Pantoja-Gacia J.S. et al. Metaheuristic adaptive control based on polynomial regression and differential evolution for robotic manipulators. *Appl. Soft Comput.*, 2024, vol. 151, art. 111116, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111116>
- [9] Zhang Y., Mo K., Shen F. et al. Self-adaptive robust motion planning for high DoF robot manipulator using deep MPC. 3rd RAIIC, 2024, pp. 139–143, doi: <https://doi.org/10.1109/RAIIC61787.2024.10671222>
- [10] Ahmed S., Azar A.T. Adaptive fractional tracking control of robotic manipulator using fixed-time method. *Complex Intell. Syst.*, 2024, vol. 10, no. 6, pp. 369–382, doi: <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01164-7>
- [11] Obuz S., Tatlicioglu E., Zergerpglu E. Adaptive Cartesian space control of robotic manipulators: a concurrent learning based approach. *J. Frankl. Inst.*, 2024, vol. 361, no. 6, art. 106701, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2024.106701>
- [12] Khan G.D. Adaptive neural network control framework for industrial robot manipulators. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 63477–63483, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3396782>
- [13] He Y., Xiao L., Wang Z. et al Fuzzy neural network approach to adaptive robust nonsingular sliding mode control for predefined-time tracking of a quadrotor. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 2024, vol. 32, no. 12, pp. 6775–6788, doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2024.3464564>
- [14] Vongkunghae T., I. Aly. A., Dogan K.M. Distributed model reference adaptive control for an uncertain modular robotic system. *AIAA SCITECH Forum*, 2024, paper AIAA 2024-0116, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2024-0116>
- [15] Li G., Zhang F., Fu Y. et al. Joint stiffness identification and deformation compensation of serial robots based on dual quaternion algebra. *Appl. Sci.*, 2018, vol. 9, no. 1, art. 65, doi: <https://doi.org/10.3390/app9010065>
- [16] Zhou Z., Song J., Xie X. et al. Towards Building AI-CPS with NVIDIA Isaac Sim: an industrial benchmark and case study for robotics manipulation. *ICSE-SEIP '24*, 2024, pp. 263–274, doi: <https://doi.org/10.1145/3639477.3639740>
- [17] Pu H., He L., Cheng P. et al. CORMAND2: a deception attack against industrial robots. *Engineering*, 2024, vol. 32, pp. 186–201, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.01.013>
- [18] Omar M., Wang K., Kun D. et al. Robust data-driven dynamic model discovery of industrial robots with spatial manipulation capability using simple trajectory. *Nonlinear Dyn.*, 2024, vol. 112, no. 11, pp. 9155–9177, doi: <https://doi.org/10.1007/s11071-024-09526-7>
- [19] Tian J., Zhong X., Peng X. et al. Model-free visual servoing based on active disturbance rejection control and adaptive estimator for robotic manipulation without calibration. *Ind. Robot*, 2024, vol. 51, no. 5, pp. 820–836, doi: <https://doi.org/10.1108/IR-12-2023-0347>
- [20] Liu C., Tang D., Zhu H. et al. The e-Bike motor assembly: Towards advanced robotic manipulation for flexible manufacturing. *Robot. Comput. -Integr. Manuf.*, 2024, vol. 85, art. 102637.
- [21] Kong Y., Yang L., Chen C. et al. Online kinematic calibration of robot manipulator based on neural network. *Measurement*, 2024, vol. 238, art. 115281, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115281>
- [22] Xiao M., Yang C., Gao S. Waterbomb origami mechanism pneumatic manipulator design based on DH parameter method and symmetric folding hypothesis. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 27843–27857, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3365514>
- [23] Alwardat M.Y., Alwan H.M. Forward and inverse kinematics of a 6-DOF robotic manipulator with a prismatic joint using MATLAB robotics toolbox. *IJATEE*, 2024, vol. 11, no. 117, pp. 1096–1110, doi: <http://dx.doi.org/10.19101/IJATEE.2024.111100210>
- [24] Zakey N., Zaman M.H.M., Ibrahim M.F. Structural optimization of 4-DOF agricultural robot arm. *Jurnal Kejuruter*, 2024, vol. 36, no. 3, pp. 1127–1134, doi: [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(3\)-23](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(3)-23)

- [25] Mustary S., Kashem M.A., Chowdhury M.A. et al. Mathematical model and evaluation of dynamic stability of industrial robot manipulator. *Syst. Soft Comput.*, 2024, vol. 6, art. 200071, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2023.200071>

Статья поступила в редакцию 26.11.2025

Информация об авторах

ФИНКОМЕСС Саироэль Амертет — аспирант Высшей школы автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая улица ул., д. 29, e-mail: sairoel@mtu.edu.et).

АЛ-АРАЖИ Хасан Мохаммед — кандидат технических наук, доцент Высшей школы автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая улица ул., д. 29, к. 1, e-mail: hassana@mail.ru).

Information about the authors

FINECOMESS Sairoel Amertet — Postgraduate, Graduate School of Automation and Robotics, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: sairoel@mtu.edu.et).

AL-ARAJI Hasan Mohammed — Candidate of Science (Eng.), Professor, Graduate School of Automation and Robotics, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport. Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (195251, St. Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: alarazhi_hm@spbstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Финкомесс С.А., Ал-Аражи Х.М. Оптимизация адаптивного управления роботом-манипулятором с восемью степенями свободы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 9, с. 20–29.

Please cite this article in English as:

Finecomess S.A., Al-Araji H.M. Optimization of adaptive control of a robotic manipulator with 8 degrees of freedom. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 9, pp. 20–29.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Видеонавигация автономных роботов»

Автор В.П. Носков

Рассмотрены методы и алгоритмы формирования моделей внешних сред и определения координат объекта управления по данным бортовых систем технического зрения, обеспечивающие автоматическое планирование и обработку целенаправленных траекторий движения и являющиеся основой построения автономных средств управления робототехнических и мехатронных систем. Приведены программно-аппаратные средства основных подсистем автономной системы управления движением и результаты их работы в составе наземных роботов и беспилотных летательных аппаратов в реальных условиях различных сред.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>