

Адаптивное ПИД-управление с компенсацией возмущений для траекторного следования в роботизированных манипуляторах

Лван Мо Аунг, Щагин А.В., Ла Мин Маун Маун, Аунг Мьо Наинг

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Аннотация: В статье рассматривается задача динамического управления 3-связным манипулятором, предназначенным для траекторного следования в условиях внешних динамических возмущений. Для обеспечения устойчивости работы системы предлагается адаптивный ПИД-регулятор, основанный на методах кинематики и динамики многозвенной системы. Подробно описаны аналитические выводы прямой кинематики, вычисление матрицы Якобиана и алгоритм компенсации возмущений. Экспериментальная часть представлена в виде моделирования в MATLAB, результаты которого иллюстрируются графиками движения, сходимости ошибки, зависимости углов звеньев и управляющих моментов, а также сравнительными таблицами характеристик системы при различных уровнях возмущений.

Ключевые слова: робототехника, манипулятор, адаптивный ПИД-регулятор, динамическое управление, прямая кинематика, матрица Якобиана, компенсация возмущений.

Введение

Развитие робототехнических систем требует создания надежных методов управления для сложных многозвенных манипуляторов, способных работать в условиях внешних динамических возмущений [1-3]. Особенно актуальной является задача траекторного следования, когда конечный исполнитель должен точно достигать заданных целевых точек. В данной работе предлагается метод динамического управления 3-связным манипулятором на основе адаптивного ПИД-регулятора. Такой подход позволяет компенсировать воздействие внешних возмущений, возникающих в процессе работы, и обеспечивает высокую точность позиционирования [4].

В статье рассмотрены следующие вопросы:

1. Теоретическое обоснование модели манипулятора, включая прямую кинематику и вычисление матрицы Якобиана.
 2. Разработка алгоритма адаптивного ПИД-регулирования с компенсацией динамических возмущений.
-

3. Аналитические выводы для оценки влияния возмущений на динамику системы.

4. Экспериментальное моделирование в MATLAB, результаты которого подтверждают эффективность предлагаемого подхода [5-7].

Математическая модель

Прямая кинематика

Рассмотрим 3-связный манипулятор с длинами звеньев L_1 , L_2 и L_3 . Обозначим углы поворота звеньев как θ_1 , θ_2 и θ_3 . Тогда положение каждого звена определяется по следующим формулам [1,2]:

- Первое звено:

$$x_1 = L_1 \cos \theta_1, y_1 = L_1 \sin \theta_1 \quad (1)$$

- Второе звено:

$$x_2 = x_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), y_2 = y_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

- Конечный исполнитель (третье звено):

$$x_3 = x_2 + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), y_3 = y_2 + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3)$$

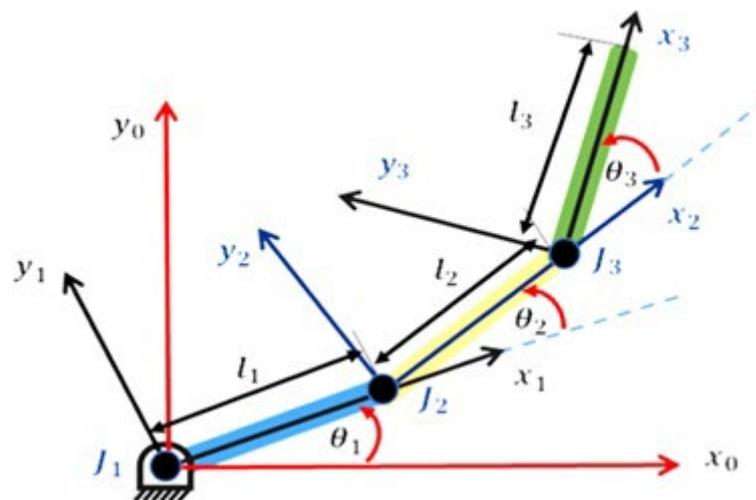


Рис. 1. – Схематическое изображение манипулятора с обозначением звеньев и углов

Матрица Якобиана

Для вычисления влияния изменения углов звеньев на положение конечного исполнителя используется матрица Якобиана J . Для данной системы она имеет вид:

$$J = \begin{pmatrix} -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Дифференцируя координаты x_3 и y_3 по каждому из углов, получаем необходимые частные производные для построения матрицы J .

Динамическая модель и компенсация возмущений

Основная цель – обеспечить следование траектории $(x_d(t), y_d(t))$ с компенсацией внешних возмущений. Пусть ошибка позиционирования задаётся как:

$$e(t) = \begin{pmatrix} x_d(t) - x_3(t) \\ y_d(t) - y_3(t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Управляющее воздействие рассчитывается по формуле адаптивного ПИД-регулятора [4,8]:

$$F_{control}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

С учётом динамических возмущений, которые можно аппроксимировать как пропорциональные скорости изменения позиции (через якобиан), итоговая сила имеет вид:

$$F_{total}(t) = F_{control}(t) - \gamma x(t) \quad (7)$$

где γ – коэффициент возмущения, а $x(t) = J\theta(t)$.

Используя транспонированный якобиан J^T , можно получить управляющий момент [2,8]:

$$\tau(t) = J^T F_{total}(t). \quad (8)$$

Обновление углов звеньев осуществляется по схеме:

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + \alpha \tau(t), \quad (9)$$

где α – адаптивный масштабный коэффициент.

Разработка алгоритма управления Алгоритм ПИД-регулирования

Алгоритм состоит из следующих этапов:

1. **Инициализация переменных:** Задание начальных углов $\theta(0)$, накопленной ошибки, предыдущей ошибки и параметров регулятора.
2. **Вычисление прямой кинематики:** На каждом временном шаге определяется положение конечного исполнителя с использованием уравнений раздела 3.1.
3. **Расчёт ошибки позиционирования:** Вычисляется вектор ошибки $e(t)$ и его норма $\|e(t)\|$.
4. **Вычисление управляющего воздействия:** На основе текущей ошибки, интегральной и дифференциальной составляющих рассчитывается $F_{control}(t)$.
5. **Моделирование возмущений:** Определяется дополнительное возмущающее воздействие, пропорциональное скорости изменения углов, с помощью якобиана.
6. **Расчёт управляющих моментов:** Применяется транспонированный якобиан для получения моментов $\tau(t)$.
7. **Интеграция:** Обновление углов звеньев с использованием адаптивного масштабного коэффициента α .

Алгоритм компенсации динамических возмущений

Компенсация возмущений производится за счёт включения в общий управляющий сигнал дополнительного слагаемого:

$$F_{total}(t) = F_{control}(t) - \gamma(J[\theta(t) - \theta(t - \Delta t)]) \quad (10)$$

что позволяет корректировать динамическую ошибку, вызванную внешними факторами. Такой подход обеспечивает устойчивости адаптивность системы к изменениям динамических характеристик среды.

Экспериментальное моделирование в MATLAB

Параметры моделирования

В Таблице № 1 приведены основные параметры моделирования системы.

Таблица № 2

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
1	Длина 1-го звена	L_1	1.0	м
2	Длина 2-го звена	L_2	1.0	м
3	Длина 3-го звена	L_3	0.5	м
4	Временной шаг	dt	0.01	с
5	Шагов на цель		500	шагов
6	Коэффициент K_p		2.0	-
7	Коэффициент K_i		0.05	-
8	Коэффициент K_d		0.2	-
9	Коэффициент возмущения	γ	5.0	H/(м/с)
10	Адаптивный масштаб	α	0.005	-

Структура эксперимента

В ходе моделирования выполняется следующее:

- Анимация движения манипулятора: Реализована динамическая визуализация с отображением положения конечного исполнителя, целевых точек и траектории движения.
- Графики сходимости ошибки: Построение зависимости величины ошибки позиционирования от времени.

- Графики изменения углов и управляющих моментов: Отображаются изменения углов звеньев и величины управляющих моментов в зависимости от времени.
- Анализ влияния возмущений: Проведен сравнительный анализ поведения системы при различных значениях γ .

Результаты моделирования

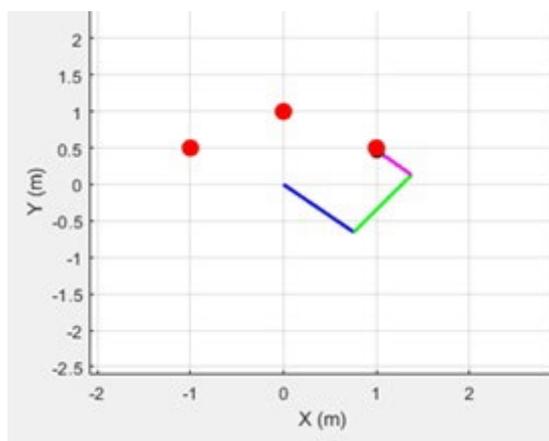


Рис. 2.

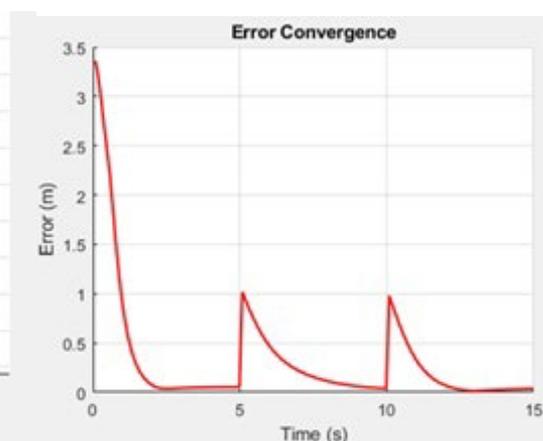


Рис. 3.

Рисунок 2 иллюстрирует динамическую анимацию движения манипулятора. Рисунок 3 показывает график сходимости ошибки позиционирования, где видно, что несмотря на наличие возмущений, ошибка стремится к нулю.

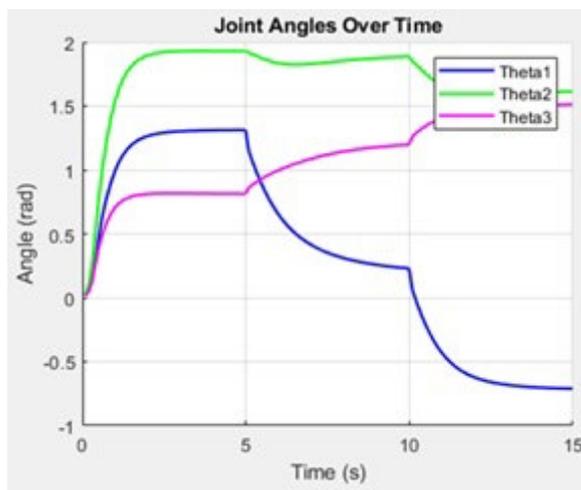


Рис. 4.

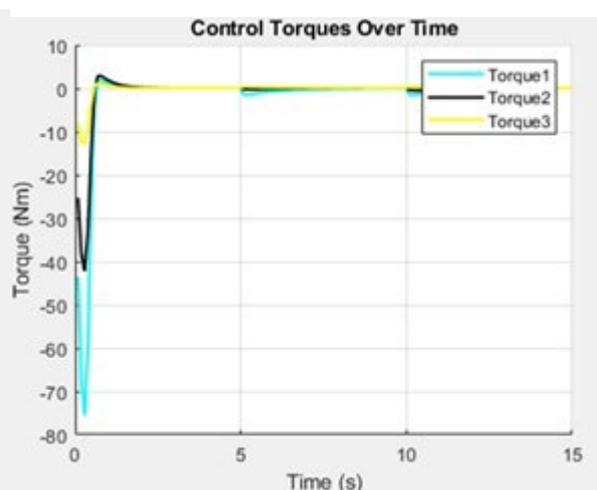


Рис. 5.

Рисунок 4 демонстрирует зависимости изменения углов звеньев, а Рисунок 5 – график управляющих моментов.

Таблица № 2 содержит сравнительный анализ характеристик системы при изменении коэффициента возмущения γ .

Таблица № 2

γ (Н/(м/с))	Максимальная ошибка (м)	Среднее значение τ (Н·м)	Время сходимости (с)
0.5	0.02	0.15	2.5
5	0.05	0.28	3.1
10	0.08	0.40	3.8
15	0.12	0.55	4.5

Анализ показывает, что увеличение коэффициента возмущения приводит к росту управляющих усилий и увеличению времени сходимости, однако адаптивный ПИД-регулятор успешно компенсирует возмущения и обеспечивает достижение заданных целевых точек.

Обсуждение результатов

Анализ устойчивости системы

Результаты моделирования демонстрируют высокую устойчивость системы:

- Даже при возрастании коэффициента γ наблюдается стремление ошибки к нулю.
- Адаптивный характер регулятора позволяет корректировать динамические изменения и поддерживать устойчивость траекторного следования.
- Влияние возмущений отражается в росте управляющих моментов, однако за счёт выбора параметров K_p , K_i и K_d удаётся добиться требуемой точности.

Возможности для дальнейших исследований

В дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть:

- Применение нелинейных методов адаптивного управления.
- Интеграцию алгоритмов оптимизации для автоматической настройки параметров ПИД-регулятора.
- Расширение модели на 6-связные манипуляторы и системы с гибкими звеньями.

Заключение

В статье представлен детальный анализ динамического управления 3-связным манипулятором с использованием адаптивного ПИД-регулятора в условиях внешних динамических возмущений. Проведённые аналитические выводы по прямой кинематике и вычислению матрицы Якобиана легли в основу разработки компенсационной схемы. Экспериментальное моделирование в MATLAB подтвердило эффективность предложенного подхода: система демонстрирует устойчивость, быструю сходимость ошибки и возможность компенсации значительных динамических возмущений. Полученные результаты могут служить базой для дальнейших исследований в области управления роботизированными системами [9,10].

Литература

1. Андреев Кирилл Современная робототехника: перспективы развития. Компоненты и технологии. 2000, №4. URL: cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-robototehnika-perspektivu-razvitiya.
2. Петров П.П., Сидоров С.С. Анализ современных тенденций научных исследований в регионе // Научная мысль Кавказа. 2009. №3. С. 316–318.

3. Кузнецов, К.К. Имитационное моделирование взаимосвязи инициаторов высокотехнологичных инноваций // Инженерный вестник Дона, 2009, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250

4. Малышев А.К., Ростиславский М.Б. Инновационные подходы к компьютерным технологиям//Всероссийская компьютерная конференция. Москва: Прогрессор, 2013. С. 175–186.

5. Смирнов В.А. Динамика роботизированных манипуляторов. СПб: Политехника, 2015. 320 с.

6. Lee H., Kim J. A Novel Control Strategy for Mobile Robots // Robotics and Autonomous Systems. 2018. Vol. 102. Pp. 45–53.

7. Zhang L., Wang Y. Recent Developments in Industrial Electronics Control//IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. Vol. 68. №7. Pp. 6012–6020.

8. Притыкин Ф.Н., Осадчий А.Ю. Способ кодирования информации при задании геометрических моделей исполнительных механизмов роботов // Инженерный вестник Дона, 2014, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2363.

9. Козлов А.Н., Белов А.А. Матричные методы в задачах кинематики манипуляторов. М.: Машиностроение, 2017. 198 с.

10. Smith R., Johnson M. Emerging Trends in Robotic Manipulation // International Journal of Robotics Research. 2019. Vol. 38. №5. Pp. 543–567.

References

1. Andreev Kirill Komplenty` i tee`nologii . №4, 2000. URL: cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-robototekhnika-perspektivy-razvitiya.

2. Petrov P.P., Sidorov S.S. Nauchnaya mysl' Kavkaza. 2009. №3. pp. 316–318.

3. Kuznecov, K.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2009, №1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2009/250.



4. Maly`shev A.K., Rostislavskij M.B. Vserossijskaya komp'yuternaya konferenciya. Moskva: Progressor, 2013. pp. 175–186.
5. Smirnov V.A. Dinamika robotizirovanny`x manipulyatorov [Dynamics of robotic manipulators]. SPb: Politexnika, 2015. 320 p.
6. Lee H., Kim J., A Novel Control Strategy for Mobile Robots, Robotics and Autonomous Systems. 2018. Vol. 102. Pp. 45–53.
7. Zhang L., Wang Y. Recent Developments in Industrial Electronics Control, IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. Vol. 68. №7. Pp. 6012–6020.
8. Prity`kin, F.N., Osadchij A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2363/.
9. Kozlov A.N., Belov A.A. Matrichny`e metody` v zadachax kinematiki manipulyatorov [Matrix methods in manipulator kinematics problems]. M.: Mashinostroenie, 2017. 198 p.
10. Smith R., Johnson M. Emerging Trends in Robotic Manipulation. International Journal of Robotics Research. 2019. Vol. 38. №5. Pp. 543–567.

Дата поступления: 1.02.2025

Дата публикации: 26.03.2025