

В.М. Синєглазов, В.П. Хоцянівський, М.В. Шевченко
(Національний авіаційний університет, Україна)

Адаптивне керування роботами-маніпуляторами в динамічному середовищі за допомогою нейронних мереж

Метою дослідження є розробка підходу до планування траєкторії руху робота-маніпулятора за допомогою інтелектуальної системи на основі нейронних мереж. Пропонується система, яка може сприймати навколишнє середовище та керувати рухом робота, генеруючи правильні команди керування. Для цього було вирішено завдання аналізу середовища.

Вступ

На ранніх етапах проєктування роботизованого маніпулятора необхідно точно визначити динамічну модель системи та її параметри для розробки контролера [1]. Традиційні методи управління, такі як обчислювальне управління моментом і зворотне динамічне керування, дозволяють досягти ефективного контролю за рахунок розрахунку моменту робота-маніпулятора та побудови динамічного рівняння [2], що забезпечує високі результати керування [3]. Проте ці підходи передбачають можливість отримання точної моделі системи. Насправді, отримати точну математичну модель робота в реальних умовах експлуатації доволі складно [4].

Багато завдань вимагають від роботів адаптації до змінних умов абонавчання нових моделей поведінки. Наприклад, робот, задіяний у виробництві автомобілів, повинен мати можливість адаптуватися до змін у моделях автомобілів. У деяких випадках можливо вручну запрограмувати потрібні дії, але часто це є неприйнятним через часті зміни середовища або його непередбачуваність для інженерів, які розробляють систему.

Машинне навчання надає роботам можливість обробляти великі обсяги даних у реальному часі, дозволяючи приймати швидші та точніші рішення. Це покращує їх розуміння навколишнього середовища й об'єктів у ньому. Наприклад, роботи можуть ідентифікувати об'єкти за допомогою комбінації візуальних, тактильних і звукових датчиків, що дає змогу розпізнавати об'єкти та відповідно на них реагувати, підвищуючи гнучкість і безпеку їхньої роботи.

Аналіз існуючих та методів планування руху роботизованого маніпулятора

Планування траєкторії полягає в розробці плавного й оптимального шляху, по якому рухатиметься рука робота при переході з одного положення в інше. Цей процес враховує такі фактори, як уникнення перешкод, обмеження швидкості, а також оптимізацію шляху відповідно до критеріїв, таких як час, енергоспоживання чи навантаження. Планування траєкторії забезпечує ефективний і безпечний рух руки до необхідної позиції.



Рис. 1. Роботизована рука з 5 DOF

Аналіз традиційних методів планування руху роботів передбачає розгляд ключових підходів, таких як геометричне планування траєкторії, метод зворотної кінематики, динамічне програмування та випадкові методи позиціонування й оптимізації.

Геометричне планування траєкторії визначає рух робота на основі геометричних характеристик робочого простору. Цей метод дозволяє точно задавати положення та орієнтацію маніпулятора, що є його основною перевагою. Однак він має певні обмеження в адаптації до мінливих умов і може виявитися складним для користувачів, особливо при вирішенні завдань із високими вимогами до зручності використання [5].

Метод зворотної кінематики використовується для визначення вхідних кутів або положень маніпулятора, які потрібні для досягнення заданої траєкторії або положення. Він ефективний для вирішення задач у конкретних точках простору й широко застосовується в системах керування промисловими роботами [6]. Незважаючи на це, метод може втратити точність при складних завданнях, оскільки існує багато можливих рішень для однієї задачі, що ускладнює пошук оптимального варіанту.

Динамічне програмування розглядає рух маніпулятора як послідовність дій, орієнтованих на мінімізацію заданих критеріїв (наприклад, час або енерговитрати). Цей метод є ефективним для задач оптимізації та планування траєкторій, особливо коли враховуються динамічні обмеження робота. Однак його застосування може бути обчислювально затратним у реальному часі при роботі в складних середовищах або для завдань із великою кількістю ступенів свободи [7].

Випадкові методи позиціонування та методи оптимізації** використовують випадкові точки для зменшення кількості проміжних точок на траєкторіях або застосовують оптимізаційні алгоритми для пошуку оптимальних рішень. Ці методи спрямовані на досягнення ефективного планування руху, особливо в умовах, де точні математичні моделі є складними або не доступними для використання.

Кожен із зазначених методів має свої переваги та недоліки, які слід враховувати під час вибору підходу для конкретних завдань у робототехніці.

Для проведення порівняльного аналізу вищевказаних підходів необхідно скласти таблицю, в якій буде відображено їх основні характеристики та відмінності (табл. 1).

Таблиця 1. Порівняльний аналіз існуючих підходів

Підхід:	Особливості:	Переваги:	Обмеження:
Геометричне планування траєкторії	Визначає рух робота за геометричними характеристиками робочого простору	Забезпечує точне положення та орієнтацію робота	Складність вирішення задач для складних конфігурацій
		Зручне управління для користувача	Обмежена адаптація до змінних умов
Метод зворотної кінематики	Визначає вхідні кути або положення маніпулятора для досягнення певної точки	Ефективний у вирішенні задач для конкретних точок	Втрата точності в складних задачах
		Використовується у більшості систем керування	Велика кількість можливих розв'язків у складних задачах
Динамічне програмування	Розглядає рух маніпулятора як послідовність дій з мінімізацією критеріїв	Ефективний для оптимізації та планування траєкторій	Обчислювально витратний для реального часу
		Дозволяє враховувати динамічні обмеження робота	Складність у використанні в реальних часових умовах
Випадкові позиції та методи оптимізації	Використання випадкових точок	Скорочення кількості проміжних точок у траєкторіях	Залежність від початкового вибору випадкових точок
	Використання методів оптимізації	Досягнення оптимальних розв'язків	Потреба в обчислювальних ресурсах, особливо при складних задачах

Вирішення проблеми

Сучасні вимоги до автоматизованих систем зумовлюють необхідність розробки нових методів планування руху для забезпечення точності та оптимальності робототехнічних дій у динамічних виробничих середовищах. Нехай динаміка роботи в дискретному часі відбувається як f_x :

$$x_{k+1} = f_x(x_k, u_k),$$

де $x_k \in \chi$ та $u_k \in U$ позначають стан і керуючий вхід системи на k -му кроці пошуку.

У роботі розглядаються статичні перешкоди та динамічні перешкоди, рух яких відомий. У цій статті траєкторія π визначається як ряд станів і команд керування рівнем:

$$\pi = (x_0, u_0, x_{t_0}, x_1, u_1, x_{t_1}, \dots, x_k, u_k, x_{t_k}),$$

де t_k – крок у часі k -ї проміжної точки на траєкторії.

Існуючі підходи часто мають обмеження та не забезпечують необхідної гнучкості для вирішення динамічних сценаріїв виробництва. Ця потреба виникає

через притаманний динамізм виробничого середовища, в якому працюють роботи [8].

Для успішного маніпулювання об'єктом завдання буде розділено на завдання:

A. Визначення траєкторії з метою нейтралізації зіткнення

Оскільки вивчення повного простору розв'язків є дуже складним і погано масштабується для інших проблем, наш підхід починається з вивчення локального простору можливих розв'язків f_{local} :

$$f_{\text{local}} \left(x_k, \varphi_k \middle| x_{\text{goal}} \rightarrow u_k \right).$$

Простір локально можливих рішень складається з усіх можливих політик керування, які враховують лише стан локальної системи (наприклад, стан середовища φ_k , поточний стан робота x_k і цільовий стан x_{goal}) і направляють робота від поточний стан до зони воріт за допомогою k -ої команди керування u_k кроки пошуку.

B. Аналіз середовища з метою визначення його особливостей

Оскільки в даній роботі розглядаються середовища зі статичними та динамічними перешкодами, геометричну та часову інформацію середовища необхідно представити у вигляді стану середовища φ_k на k -му кроці пошуку та використати у підзадачі визначення траєкторії для того, щоб нейтралізувати зіткнення.

C. Визначення керованих впливів для виконавчих органів з метою реалізації руху

Необхідно розрахувати час виконання та інтерполяцію руху робота між двома станами, щоб перевірити наявність зіткнень між роботом і перешкодами під час переходу з одного стану в інший на кожному кроці пошуку. Таким чином, запропонований підхід вивчає реалістичну високорівневу динаміку робота, керованого рухом.

Рішення проблеми

Для вирішення проблеми планування руху роботів-маніпуляторів пропонується використання інтелектуальних систем керування на основі нейронних мереж. Завдяки своїй гнучкості та здатності адаптуватися до мінливих умов, нейронні мережі відіграють ключову роль в оптимізації руху роботів, спрощуючи процеси калібрування їх компонентів і підвищуючи точність та швидкість роботи.

Висновок

Результатом є рекомендації щодо підходу до вирішення проблеми підвищення точності позиціонування та реагування на динамічні перешкоди роботів-маніпуляторів за допомогою нейронних мереж. Основні рекомендації включають наступне:

1) Посадження згорткових нейронних мереж із рекурентними нейронними мережами, довготривалими короткочасними спогадами або мережами на основі механізму уваги (Трансформери) для врахування часових залежностей у динамічних сценах. Це забезпечує глибше розуміння рухів об'єктів і підвищує точність їх розпізнавання.

2) Використання LSTM і Transformer для прогнозування майбутніх положень об'єктів дозволяє ефективно планувати траєкторії руху маніпулятора з урахуванням можливих перешкод. Це скорочує час планування та підвищує загальну ефективність системи.

3) Створення мережі, яка перетворює команди високого рівня в специфічні керовані сигнали для виконавчих органів маніпулятора. Вхідний рівень отримує команди, приховані рівні обробляють інформацію, а вихідний рівень генерує певні керовані ефекти.

4) Використання зворотного зв'язку для адаптації параметрів мережі на основі вихідного сигналу та результатів виконаних рухів. Це дозволяє системі навчатися на реальних даних і коригувати свої дії для досягнення більшої точності та ефективності.

Реалізація цих рекомендацій дозволяє значно підвищити точність позиціонування роботів-маніпуляторів та їх здатність реагувати на динамічні перешкоди в режимі реального часу.

Список літератури

[1] A.V. Duka, "Neural Network based Inverse Kinematics Solution for Trajectory Tracking of a Robotic Arm," *Procedia Technol.*, 12, 20–27, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.451>

[2] D.G. Arseniev, L. Overmeyer, H. Kälviäinen, and B. Katalinić, *Cyber-Physical Systems and Control*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34983-7>

[3] S. Islam, and X.P. Liu, "Robust Sliding Mode Control for Robot Manipulators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58, 2011, 2444–2453. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2062472>

[4] M.J. Yazdanpanah, G. Karimian Khosrowshahi, Robust Control of Mobile Robots Using the Computed Torque Plus H_∞ Compensation Method. Available online: <https://www.sciencegate.app/document/10.1109/cdc.2003.1273069>

[5] S.B. Niku, "Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications," *John Wiley & Sons.*, 2010. <https://doi.org/10.5772/40>

[6] Ryo Kikuuwe, & Bernard Brogliato, "A New Representation of Systems with Frictional Unilateral Constraints and Its Baumgarte-Like Relaxation," *Multibody System Dynamics*, pp. 267–290, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11044-015-9491-6>

[7] X. Wang, Q. Wu, T. Wang, and Y. Cui, "A Path-Planning Method to Significantly Reduce Local Oscillation of Manipulators Based on Velocity Potential Field," *Sensors*. 2023. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/23/9617>.

[8] V. Khotsyanivskiyi, & V. Sineglazov, "Machine learning in the task of auto-calibration of moving elements of robotic systems on the example of stepper motor control," *In International scientific and technical conference "AVIA"*, Kyiv: National Aviation University, 2023, pp. 9.37–9.41. [in Ukraine]