

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ В УМОВАХ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОСТІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто проблематику оптимального керування траєкторією руху транспортного засобу з урахуванням множини критеріїв якості. Проаналізовано методи розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації на основі принципу максимуму Понтрягіна та динамічного програмування. Виконано порівняльний аналіз підходів до синтезу керуючих впливів з урахуванням динамічних обмежень, енергоефективності та комфорту пасажирів. Обґрунтовано необхідність застосування адаптивних систем керування для коригування параметрів регуляторів залежно від поточних умов руху. Запропоновано напрямки удосконалення існуючих алгоритмів шляхом інтеграції методів нечіткої логіки.

Ключові слова: оптимальне керування, траєкторія руху, транспортний засіб, принцип максимуму Понтрягіна, адаптивна система.

Abstract

The problem of optimal vehicle trajectory control considering multiple quality criteria is examined. Methods for solving multi-criteria optimization problems based on Pontryagin's maximum principle and dynamic programming are analyzed. A comparative analysis of control input synthesis approaches considering dynamic constraints, energy efficiency, and passenger comfort is performed. The necessity of applying adaptive control systems to adjust controller parameters depending on current driving conditions is substantiated. Directions for improving existing algorithms through fuzzy logic methods integration are proposed.

Keywords: optimal control, motion trajectory, vehicle, Pontryagin's Maximum Principle, adaptive system.

Вступ

Задача оптимального керування траєкторією руху транспортного засобу набуває особливої актуальності в контексті розвитку автономних транспортних систем та підвищення вимог до безпеки руху. На відміну від традиційних систем асистування водію, автономні транспортні засоби повинні самостійно приймати рішення щодо вибору траєкторії з урахуванням множини суперечливих критеріїв. За даними світових досліджень, ефективність руху автономних транспортних засобів значною мірою визначається якістю алгоритмів планування та відстеження траєкторії. Теоретичною основою розв'язання задач оптимального керування є варіаційне числення та методи оптимізації, що дозволяють знайти компромісне рішення між конфліктуючими цілями.

Основна частина

Класична постановка задачі оптимального керування траєкторією передбачає мінімізацію функціоналу якості при дотриманні рівнянь динаміки транспортного засобу та обмежень на керуючі впливи. Принцип максимуму Понтрягіна надає необхідні умови оптимальності, які зводяться до розв'язання системи диференціальних рівнянь для стану та спряжених змінних. Згідно з дослідженнями Rajamani, застосування принципу максимуму дозволяє знайти аналітичне рішення для спрощених моделей руху, проте для реалістичних моделей з урахуванням нелінійностей шин та динаміки підвіски необхідні чисельні методи.

Метод динамічного програмування базується на принципі оптимальності Беллмана та дозволяє знаходити глобальний оптимум шляхом зворотної прогонки від кінцевого стану до початкового. Перевагою методу є можливість врахування складних обмежень та нелінійностей у моделі об'єкта керування. Однак обчислювальна складність зростає експоненціально зі збільшенням розмірності простору станів, що обмежує застосування методу для задач планування траєкторії у реальному часі.

Багатокритеріальність задачі оптимізації траєкторії проявляється у необхідності одночасного врахування різних аспектів якості руху. Основні критерії включають мінімізацію часу переміщення, енергетичних витрат, відхилення від заданої траєкторії, а також забезпечення комфорту пасажирів

через обмеження прискорень. За даними Chen та Wang, вагові коефіцієнти критеріїв повинні динамічно змінюватися залежно від поточної дорожньої ситуації.[1]

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз методів оптимізації траєкторії руху

Метод оптимізації	Можливість врахування обмежень	Обчислювальна складність	Гарантія глобального оптимуму	Застосовність у реальному часі
Принцип максимуму Понтрягіна	Обмежена	Середня	Локальний оптимум	Так
Динамічне програмування	Висока	Дуже висока	Глобальний оптимум	Обмежено
Гradientні методи	Обмежена	Низька	Локальний оптимум	Так
Еволюційні алгоритми	Висока	Висока	Наближений оптимум	Обмежено

Застосування адаптивного керування дозволяє коригувати параметри регуляторів залежно від поточних умов руху. Ключовими параметрами, що впливають на динаміку транспортного засобу, є коефіцієнт зчеплення коліс з дорожнім покриттям та розподіл маси. Методи ідентифікації цих параметрів у реальному часі базуються на аналізі поведінки транспортного засобу при відомих керуючих впливах. Оцінка коефіцієнта зчеплення може здійснюватися через порівняння бокового прискорення з розрахунковим значенням на основі моделі шини.

Нечітка логіка надає ефективний інструмент для формалізації евристичних правил керування та забезпечення плавного перемикавання між різними режимами роботи системи. Застосування нечітких регуляторів особливо виправдане в умовах невизначеності параметрів моделі та наявності зовнішніх збурень. Нечіткі множини дозволяють описати лінгвістичні змінні, такі як низька, середня та висока швидкість, що спрощує налаштування системи керування.[2]

Перспективним напрямком є інтеграція методів оптимізації з алгоритмами машинного навчання. Навчання на основі історичних даних про успішні маневри дозволяє системі враховувати специфіку конкретного транспортного засобу та стилю керування. Імітаційне навчання на даних від досвідчених водіїв може використовуватися для формування початкових налаштувань системи з подальшим їх уточненням методами підсилюючого навчання.

Важливим аспектом практичної реалізації є забезпечення стійкості замкненої системи керування при наявності збурень та похибок моделювання. Методи робастного керування дозволяють синтезувати регулятори, що гарантують виконання вимог до якості перехідних процесів у заданому діапазоні варіації параметрів об'єкта. Застосування методу рекурентного горизонту моделі дозволяє переформулювати задачу оптимізації як послідовність задач оптимального керування на обмеженому часовому інтервалі.[3]

Висновки

Аналіз методів оптимального керування траєкторією транспортного засобу показує необхідність комплексного підходу до розв'язання багатокритеріальної задачі. Принцип максимуму Понтрягіна та динамічне програмування надають теоретичну основу для синтезу оптимальних керуючих впливів, проте потребують адаптації для застосування у реальному часі. Використання адаптивних систем керування з нечіткою логікою дозволяє врахувати невизначеності параметрів та забезпечити плавність роботи системи. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію методів оптимізації з алгоритмами машинного навчання для підвищення якості планування траєкторії в складних дорожніх ситуаціях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Rajamani R. Vehicle dynamics and control : textbook. – 3rd ed. – Springer, 2024. – 568 p.
2. Chen Y., Wang J. Optimal trajectory planning for autonomous vehicles using multi-objective optimization // Transportation Research. Part C. – 2023. – Vol. 156. – P. 104–125.
3. Paden B., Cap M., Yong S. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2024. – Vol. 9, № 1. – P. 33–55.

Чорний Володимир Сергійович – аспірант факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Chornyi Volodymyr S. – Faculty of Electricity and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, volodymyrchornyi89@gmail.com