

0.1. Ляховский М. Оптимизация матрицы весов MPC для управления четвероногим роботом

В данном исследовании анализируется зависимость поведения четвероногого робота от матрицы весов Q модельно-предиктивного регулятора (Model Predictive Control - MPC). Регулятор оптимизирует силы для ног в контакте с землей, используя линейную модель абсолютно твердого тела, таким образом, чтобы значение заданной целевой функции было минимально:

$$\begin{aligned} \min_{x, u_0, \dots, u_{K-1}} \quad & \sum_{k=0}^{K-1} (\|x(k+1) - x_{\text{ref}}(k+1)\|_Q^2 + \\ & \|u(k)\|_R^2) \\ \text{subject to} \quad & x(k+1) = A_k x(k) + B_k u(k) \\ & W u(k) \leq b \end{aligned}$$

где $Q \succeq 0$ и $R \succeq 0$ матрицы весов для ошибки по состоянию x и управлению u , соответственно, A и B матрицы линейной модели робота, W и b ограничение на конус трения и выбор ног в контакте.

Обучение нейронной сети для генерации оптимальных матриц Q позволило повысить эффективность отслеживания траектории при различных заданных скоростях. Моделирование выполнено в среде RaiSim, а полносвязная нейронная сеть (FCNN) реализована на Python.

Сформирован набор данных из 45 000 траекторий длительностью 2 с. Диагональные элементы матрицы Q генерировались случайным образом в диапазоне $[0.1, 100]$. Заданные скорости выбирались в пределах ± 0.7 м/с по оси x и ± 0.6 м/с по оси y . Все траектории начинались и заканчивались в начале фазы ходьбы для стандартизации условий.

Эффективность отслеживания оценивалась по нормам ошибок состояния робота. Для каждой траектории вычислялись индивидуальные и сводная нормы ошибок, формируя пары "вход-выход": вход — скорости XU и элементы Q , выход — нормы ошибок. Нейронная сеть обучалась на сформированном наборе данных для прогнозирования норм ошибок по заданным скоростям и матрице Q , выявляя зависимости без дополнительного моделирования.

Пространство скоростей XU дискретизировано в виде сетки узлов. Для каждого узла определялась траектория с минимальной нормой ошибок и соответствующая матрица Q , формируя базовый уровень для оптимизации.

Целью оптимизации являлось повышение точности работы MPC регулятора за счет улучшенной настройки матрицы весов для ошибки по состоянию x . С использованием FCNN матрица Q оптимизировалась для каждого узла скорости методом обратного распространения, минимизируя разницу между прогнозируемыми и целевыми нормами ошибок.

Моделирование траекторий с оптимизированными матрицами Q продемонстрировало повышение эффективности работы контроллера с использованием прогнозов FCNN. Сравнение с эталонной матрицей Q показало снижение суммарной нормы ошибки на 14–45% для скоростей $V_x = 0.7$ м/с, $V_y = 0$ м/с и $V_x = 0$ м/с, $V_y = 0.2$ м/с.

Разработанный алгоритм, использующий FCNN и оптимизацию Q , значительно улучшает эффективность отслеживания траектории. Снижение ошибок на 14–45% демонстрирует потенциал адаптивных методов управления для робототехники.

Научный руководитель — к.т.н. Базылев Д. Н.

Список литературы

- [1] CARLO, JARED AND WENSING, PATRICK AND KATZ, BENJAMIN AND BLEDT, GERARDO AND KIM, SANGBAE Dynamic Locomotion in the MIT Cheetah 3 Through Convex Model-Predictive Control // IROS, 2018, P. 1–9.
- [2] BLEDT, GERARDO AND WENSING, PATRICK M. AND KIM, SANGBAE Policy-regularized model predictive control to stabilize diverse quadrupedal gaits for the MIT cheetah // IROS, 2017, P. 4102–4109.