

Система управления мобильным роботом на основе прогнозирующих моделей

П. В. Абрамов¹, С. М. Богданова², А. П. Бондарчук³, Д. М. Филатов⁴
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹pvaabramov@etu.ru, ²bsm@yandex.ru, ³apbondarchuk@yandex.ru, ⁴dmfilatov@etu.ru

Аннотация. В статье рассматривается методика построения системы управления с предсказывающими моделями для мобильного робота с избыточной архитектурой. В основе такого подхода лежат нелинейные модели кинематики и динамики робота. Отдельной задачей становятся выбор и настройка оптимального регулятора. Предлагаемая реализация совмещает в себе идеи локального планирования и управления работой приводов.

Ключевые слова: управление с прогнозирующими моделями; мобильный робот; оптимальное управление

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире все чаще возникает задача создания как систем беспилотного управления транспортными средствами, так и систем помощи водителю, например, при смене полосы движения, парковки. Требование к наличию автономного управления также появляется и у мобильных роботов различного назначения.

Среди множества уже готовых и внедренных решений наиболее часто встречаются различные программные средства, использующие в чистом виде системы автоматического управления с ПИД-регуляторами, нечетким управлением [1], системы, основанные на оптимальном управлении [2, 3]. Также довольно широкое распространение получили системы, построенные на базе Robot operating system (ROS) или других средствах разработки и развертывания систем управления роботами.

В данной статье рассматривается применение управления с предсказывающими моделями, относящегося к классу систем оптимального управления. Объектом управления будет выступать мобильный робот с избыточной архитектурой (с 4 ведущими и 4 рулящими колесами или 4WS4WD). Подобная технология уже применялась для управления непосредственно приводами робота-водителя автомобиля. А также существует реализация локального планера на его основе в ROS. Однако ключевым отличием данной разработки от уже имеющихся является совмещение внутри одного регулятора и локального планировщика, и прямой генерации и передачи команд приводам робота.

II. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Как было сказано выше, предполагаемым объектом управления является мобильный робот с избыточной архитектурой. Как следует из названия системы управления, в ее основе должна лежать модель объекта управления, причем, чем точнее она будет, тем

теоретические более качественным должно быть регулирование.

Для описания объекта управления используются две модели: велосипедная модель кинематики с 3 степенями свободы и полная модель динамики, учитывающая сопротивление воздуха, наклон дороги и распределение весов по колесам. Такая модель имеет 15 степеней свободы.

Ниже приведено математическое описание велосипедной модели кинематики робота (1). Вектор управления такой модели имеет лишь две составляющие: скорость робота и угол поворота колеса.

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \varphi \\ \dot{y} = V \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = \frac{V \tan \varphi}{l} \end{cases} \quad (1)$$

В основе модели динамики робота лежит метод Ньютона–Эйлера. Отличительной особенностью этой модели является полное представление модели действия сил трения, поскольку фактически угол скольжения может быть неограничен из-за отсутствия неголономных и механических ограничений, как, например, у автомобиля.

У такого типа робота важно контролировать и учитывать распределение весов по всем четырем колесам робота, поскольку имеется возможность в силу конструкции появления боковых и продольных сил, достаточных, чтобы значительно изменить качество сцепления колес с дорожным полотном и вообще опрокинуть робот. Более подробное математическое описание модели мобильного робота с избыточной архитектурой можно найти в [4].

III. УПРАВЛЕНИЕ С ПРЕДСКАЗЫВАЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ

Задачу управления с предсказывающей моделью можно разделить на 2 подзадачи, решающие основные проблемы такого подхода: поиск численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений и поиск оптимального управления, минимизирующего функцию потерь и удовлетворяющего заданным ограничениям (ограничениям равенства и/или неравенства) [3, 5–7].

Для численного решения системы дифференциальных уравнений был применен метод Рунге–Кутты 4-го порядка (2).

$$\begin{cases} k_1 = hf(x_i, y_i) \\ k_2 = hf(x_i + h/2, y_i + k_1/2) \\ k_3 = hf(x_i + h/2, y_i + k_2/2) \\ k_4 = hf(x_i + h, y_i + k_3) \\ y_{i+1} = y_i + [k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4]/6 \end{cases} \quad (2)$$

Процесс поиска оптимального управления и минимизации функции потерь построен на базе модифицированного градиентного метода AMSgrad [3] [8].

$$\begin{aligned} g_i &= \nabla f(\theta_i) \\ m_i &= b_1 m_{i-1} + (1 - b_1) g_i \\ v_i &= b_2 v_{i-1} + (1 - b_2) g_i^2 \\ \bar{v}_i &= \begin{cases} v_i, & \bar{v}_{i-1} < v_i \\ \bar{v}_{i-1}, & \bar{v}_{i-1} > v_i \end{cases} \\ \theta_{i+1} &= \theta_i - \frac{am_i}{\sqrt{\bar{v}_i} + e} \end{aligned} \quad (3)$$

Функция потерь составлена таким образом, что включает в себя основную цель в виде минимизации невязки текущих координат и координат целевой точки (включая ориентацию робота), а также ряд ограничений неравенства представленных квадратичными штрафными функциями. Эти ограничения включают в себя безопасное расстояние до препятствий и ограничения на управление.

Итоговую структуру систему управления можно представить схемой, показанной на рис. 1. Работа системы управления начинается с контроллера, задающего целевую точку, координаты препятствий и желаемую точность (либо число итераций оптимизатора). Сразу за ним алгоритм оптимизации генерирует управляющее воздействие, для модели и функции потерь (при наличии ограничений на управление). Результаты моделирования движения также направляются в функцию потерь в виде конечной точки траектории модели и пересечений траектории с препятствиями. Рассчитанное функцией потерь значение минимизируется алгоритмом оптимизации. Следовательно, на следующем шаге и далее алгоритм оптимизации пытается подобрать наиболее удовлетворительное значение управления.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование работы системы управление производилось с использованием самостоятельно разработанного программного обеспечения, реализованного с помощью языка C++ и среды Matlab. Ниже на рис. 2 изображены сгенерированные с помощью регулятора траектории на основе велосипедной модели и модели динамики. На тоже графике точками отмечены препятствия. Безопасное расстояние до препятствий выбрано 0.25 м. Тестовая задача представляет собой заезд в бок задним ходом.

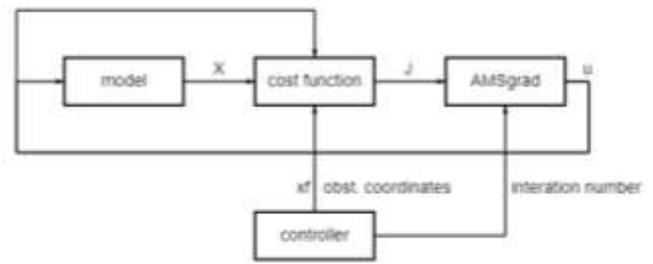


Рис. 1. Структурная схема системы управления

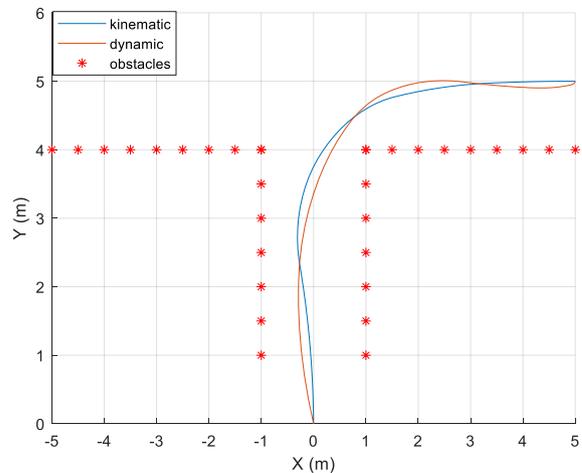


Рис. 2. Траектории модели

Моделирование производилось с использованием следующих параметров, представленных ниже. В табл. 1 приведены ключевые параметры, с использованием которых производился поиск оптимального управления.

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ ОПТИМИЗАЦИОННОГО АЛГОРИТМА

Параметр	Значение
a	0.3
b ₁	0.9
b ₂	0.9999
n (число итераций)	10000
Горизонт планирования	5
Частота смены управления	2

Основные параметры моделей кинематики и динамики приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Параметр	Значение
Длина, м	0.94
Ширина, м	0.63
Высота, м	0.2
Коэффициент трения	0.8
Масса, кг	70
Момент инерции, кг*м ³	228
Радиус колес, м	0.125

Графики сгенерированных с помощью системы управления с предсказывающей моделью сигналов управления показаны на рис. 3 и 4.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в предыдущем разделе результаты моделирования показывают возможности использования управления с предсказывающими моделями для генерации оптимальных безаварийных траекторий движения мобильного робота с избыточным управлением. Причем их реализация возможно не только по модели кинематики робота, требующей малое число вычислительных ресурсов в силу низкого порядка и общей простоты. Но также возможна реализация такого алгоритма управления и на основе гораздо более сложной модели динамики.

Такой подход с использованием предсказывающего управления на основе моделей динамики, сочетающий в себе одновременно систему управления движением и локальный планировщик, позволяет упразднить так называемый средний уровень управления. Предполагается, что при этом повысятся требования к производительности аппаратной части, однако это позволит сократить ее объем. И в ходе дальнейших исследований по данному направлению планируется переход от моделирования к реальному роботу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] A. Vinogradov, A. Terentev, M. Kochetkov and V. Petrov. Model of Fuzzy Regulator of Mobile Robot Motion Control System // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). 2019. Pp. 2109-2112.
- [2] H. M. Khalid. An Augmented Lagrangian-Based Optimal Control: An Application Towards an Electric Vehicle // 2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM). 2019. Pp. 152-156.
- [3] J. Kabzan, L. Hewing, A. Liniger and M. N. Zeilinger. Learning-Based Model Predictive Control for Autonomous Racing // IEEE Robotics and Automation Letters. 2019. Vol. 4, no. 4. Pp. 3363-3370.
- [4] D. M. Filatov, P. V. Abramov and S. M. Bogdanova. Trajectory Motion Simulation of a Mobile Robot // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). 2021. Pp. 874-877.
- [5] А. Туз, В. Браун-Аквей, Ф. Лемпго, А. Кулаков, В. Богатиков. Управление с прогнозирующими моделями // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. №3. С. 151-161.
- [6] C. Rösmann, A. Makarow and T. Bertram. Online Motion Planning based on Nonlinear Model Predictive Control with Non-Euclidean Rotation Groups // 2021 European Control Conference (ECC). 2021. Pp. 1583-1590.
- [7] G. Torrente, E. Kaufmann, P. Föhn and D. Scaramuzza. Data-Driven MPC for Quadrotors // IEEE Robotics and Automation Letters. 2021. Vol. 6, no. 2. Pp. 3769-3776.
- [8] S.J. Reddi, S. Kale, S. Kumar. On the convergence of adam and beyond // ICLR 2018. 2018. Pp. 1-23.

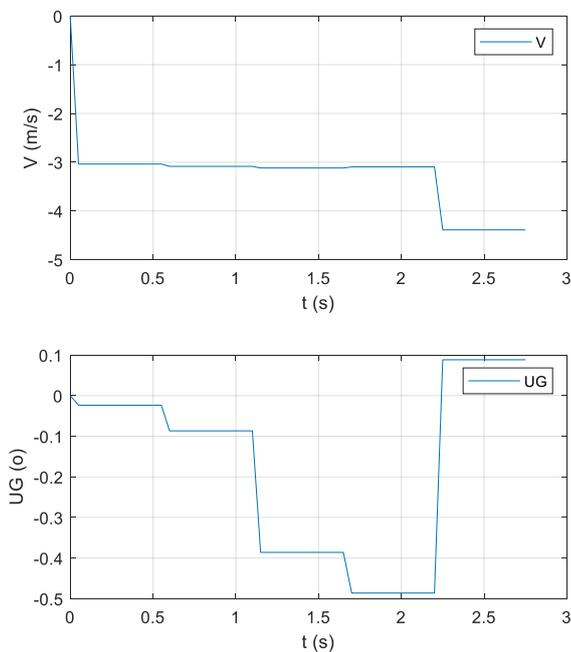


Рис. 3. Сигналы управления велосипедной модели кинематики

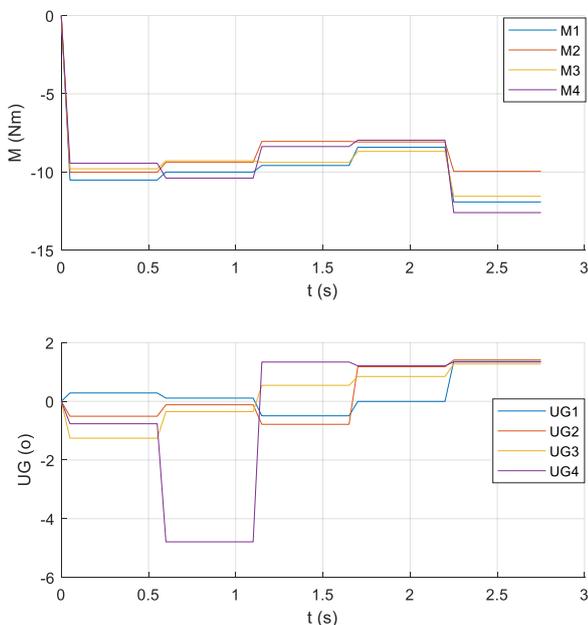


Рис. 4. Сигналы управления модели динамики