

УДК 004.8

КИНОДИНАМИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ В СРЕДЕ С ДВИЖУЩИМИСЯ ПРЕПЯТСТВИЯМИ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

К.С. Яковлев (*yakovlev@isa.ru*)^{1,2}А.А. Андрейчук (*andreychuk@mail.com*)²Ю.С. Белинская (*belinskaya.us@gmail.com*)¹Д.А. Макаров (*makarov@isa.ru*)¹¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва² Институт искусственного интеллекта AIRI, Москва

Аннотация. Планирование траектории для неголономных робототехнических систем в среде с динамическими препятствиями – нетривиальная задача, для которой отсутствует универсальное решение. В работе предлагается сведение этой задачи к поиску пути на графе кинодинамических примитивов движения, которые предварительно строятся методом накрытий. Для учета темпоральной компоненты при планировании предлагается использование подхода безопасно-интервального планирования¹.

Ключевые слова: планирование траектории, эвристический поиск, управление, метод накрытий, примитивы движения.

Введение

Зачастую в искусственном интеллекте и робототехнике задача планирования траектории рассматривается как задача поиска пути на графе, вершинам которого соответствуют допустимые состояния мобильного робота, ребрам – элементарные траектории (например, отрезки). Для вдоль такой траектории обычно применяются методы теории автоматического управления (например, управление с прогнозирующими моделями, MPC). Зачастую для неголономных роботов итоговые траектории существенно отличаются от первоначально спланированных. В случае, когда в среде имеются препятствия, в том числе – движущиеся, это повышает риск столкновений. Для снижения этого риска в данной работе предлагается

¹ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 20-57-00011.

использовать следующий подход. До начала планирования строится база кинодинамических примитивов движения, т.е. коротких по продолжительности траекторий движения, учитывающих кинематические и динамические ограничения робота. Затем осуществляется эвристический поиск пути на графе, индуцируемом примитивами. Затем осуществляется следование по построенной траектории. Как показывают результаты проведенного экспериментального исследования (численного моделирования), отклонение робота от траектории при таком подходе не превышает 11 см., что существенно снижает риск столкновений.

1 Постановка задачи

Рассмотрим робота с дифференциальным приводом. Состояние робота в любой момент времени задается тройкой $s(t)=(x, y, \theta)$, где x, y – координаты центра масс, θ – угол поворота. Управление задается двойкой $u(t)=(v, \omega)$: линейная и угловая скорость (векторные величины). Обозначим через $Sobs(t)$ конфликтное множество состояний в момент t , т.е. при $s(t) \in Sobs(t)$ робот сталкивается с динамическим или статическим препятствием. Пусть заданы начальное и целевое состояния: $start, goal \notin Sobs(t)$. Задача состоит в отыскании управления $u(t)$, такого что результирующая траектория системы из $start$ в $goal$ лежит вне $Sobs(t)$ для любого t .

2 Метод решения

Предлагаемый метод состоит из 3 фаз: построение примитивов движения, поиск пути на решетке примитивов, следование по траектории.

Задача построения отдельного примитива движения является задачей с двумя граничными условиями, т.е. нужно построить $u(t)$, переводящее систему из одного заданного состояния в другое. Для решения этой задачи используется метод накрытий [Белинская и др, 2014], разработанный для плоских динамических систем (система, описывающая движения робота с дифференциальным приводом, является плоской [Tang, 2009]) и сводит исходную задачу к двум связанным задачам Коши, для которых достаточно просто получить решение.

После построения заданного числа примитивов (в работе строится 96 примитивов движения и 56 примитивов вращения на месте), осуществляется поиск пути на графе, состоящем из этих примитивов. На этом этапе происходит учет статических и динамических препятствий. Для учета последних для каждой вершины графа рассчитывается безопасный интервал, т.е. временной интервал в течение которого робот может находиться в этой вершине без столкновений: $[t1, t2]$. Затем осуществляется эвристический поиск в пространстве $(k, [t1, t2])$, где k – это вершина графа,

с помощью алгоритма SIPP [Яковлев, 2020]. Результатом является исполнимая и неконфликтная траектория.

Следование по построенной траектории осуществляется с помощью комбинированного закона управления. Для примитивов поворота на месте и движения используются различные контроллеры, переключение между которыми осуществляется по времени. Необходимость использования различных контроллеров обусловлена тем фактом, что при $v=0$ система не является плоской.

3 Результаты экспериментальных исследований

Исследование проводилось на двух типах карт размера 64x64 м: пустой и карте комнат, соединенных узкими проходами. Число динамических препятствий варьировалось от 100 до 250. Они двигались по случайным траекториям с фиксированными скоростями. Старт и финиш всегда располагались в противоположных частях карты.

Среднее время работы планировщика варьировалось от 0.15 до 3.3 с (в зависимости от типа карты и числа движущихся препятствий). Предсказуемо наиболее простой конфигурацией для планировщика была пустая карта с малым числом динамических препятствий.

После построения расчетных траекторий осуществлялось следование по ним с замером среднеквадратичного отклонения. В среднем оно составило 1 см (при максимуме в 11 см). Таким образом, роботу удавалось проследовать по траектории практически без отклонений.

Заключение

Предложенный подход представляется перспективным для внедрения в системы управления колесными роботами с дифференциальным приводом, т.к. обеспечивает высокую скорость планирования и точность следования по построенной траектории.

Список литературы

- [Белинская и др, 2014] Белинская Ю.С., Четвериков В.Н. Метод накрытий для терминального управления с учетом ограничений. // Дифференциальные уравнения. 2014. Т. 50, № 12. С. 1629 - 1639.
- [Яковлев, 2020] Яковлев К.С. АА-SIPP: Алгоритм планирования в среде с динамическими препятствиями // Искусственный интеллект и принятие решений, 1, 2020. С. 80-82.
- [Tang, 2009] Tang C. Differentially Flatness-based Kinematic and Dynamic Control of a Differentially Driven Wheeled Mobile Robot // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics.