

## МЕТОД ЛОКАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЙ ДЛЯ РОБОТА С ВЕЛОСИПЕДНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

Аграновский М. А.<sup>1</sup>

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Яковлев К. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
agrinscience@gmail.com

### Введение

Задача планирования движения для мобильных роботов и беспилотных автомобилей является одной из ключевых в современной автономной робототехнике. Прямое построение глобальной кинематически-согласованной траектории с одновременным учётом всех препятствий сопряжено со значительными вычислительными затратами. В связи с этим процесс планирования традиционно реализуется посредством декомпозиции на глобальный и локальный уровни. Алгоритмы глобального поиска обычно формируют лишь грубую опорную траекторию, которая обеспечивает обход препятствий, но зачастую оказывается физически невыполнимой из-за игнорирования строгих неголономных ограничений системы (непрерывная гладкость, минимальный радиус поворота).

Для обеспечения кинематической реализуемости пути методы глобального поиска интегрируются с алгоритмами локального планирования. Вычисление локальных траекторий может осуществляться как на этапе постобработки (например, для гладкого сопряжения опорных точек глобального пути), так и на этапе предварительных вычислений (offline). Одним из наиболее распространенных подходов последнего типа является планирование на решётке состояний [1, 2, 3]. Данный метод предполагает дискретизацию пространства состояний агента и построение итоговой траектории из набора заранее вычисленных, кинематически-согласованных фрагментов — примитивов движения. В этом контексте генерация примитива сводится к решению двухточечной краевой задачи: для заданных начального и конечного состояний (включающих координаты, ориентацию и кривизну) необходимо найти оптимальную гладкую траекторию, соединяющую их.

### Основная часть

В данной работе мы сосредотачиваемся на велосипедной кинематической модели агента, поскольку она адекватно описывает ключевые ограничения легкового автомобиля, оставаясь при этом достаточно простой для аналитических преобразований. Вектор состояния агента включает координаты, угол ориентации и кривизну траектории. Включение кривизны является принципиальным, так как оно позволяет формировать  $C^1$ -гладкие пути, физически реализуемые без мгновенных скачков угла поворота рулевого колеса. В рамках этой модели траектория традиционно описывается кривой с кубической функцией кривизны [2, 4].

Базовая постановка задачи генерации примитива сводится к поиску коэффициентов этого полинома и длины траектории (с помощью итеративных численных методов, например, многомерного метода Ньютона). Однако параметры в виде коэффициентов полинома имеют низкую интуитивную интерпретацию и сильно взаимосвязаны. Эта избыточность параметризации приводит к плохой обусловленности матрицы Якоби, что на практике выражается в низкой робастности и медленной сходимости численных методов.

Для решения указанной проблемы в работе предлагается новый метод, основанный на альтернативной, физически осмысленной репараметризации

траектории. Вместо поиска абстрактных коэффициентов полинома предлагается использовать значения кривизны в двух узловых точках траектории (на отметках  $1/3$  и  $2/3$  её длины), а также логарифм её полной длины. Использование логарифма преобразует ограниченную переменную длины в неограниченную, что полезно для оптимизационных алгоритмов. Так как кривизна в конечной точке строго задана целевым состоянием, количество искомым параметров сокращается с четырех до трех. Предложенная параметризация полностью и однозначно определяет геометрию примитива, но при этом радикально улучшает устойчивость сходимости метода Ньютона.

### **Выводы**

Эффективность предложенного подхода была всесторонне подтверждена серией вычислительных экспериментов, включающей 2100 уникальных тестовых сценариев. Сравнение проводилось между базовым методом (поиск коэффициентов полинома) и предложенным подходом. Результаты показали, что репараметризация по узловым значениям кривизны позволила значительно увеличить вычислительную робастность: доля успешно сгенерированных траекторий возросла с 64.76% до 85.62%. Кроме того, среднее время генерации одного примитива сократилось примерно на 25% (с 0.1482 до 0.1107 секунд). Анализ областей достижимости также визуально подтвердил, что новый метод способен находить решения для гораздо более широкого спектра целевых состояний. Таким образом, новая параметризация позволяет строить более плотные и связанные графы состояний, что является залогом эффективного нахождения качественных решений в задачах локального планирования для автономных систем.

### **Литература**

1. Pivtoraiko M., Kelly A. Kinodynamic motion planning with state lattice motion primitives // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – San Francisco, CA, USA, 2011. – P. 2172–2179.
2. Pivtoraiko M., Kelly A. Efficient Constrained Path Planning via Search in State Lattices // International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space. – Munich, Germany, 2005. – P. 1–7.
3. González D., Pérez J., Milanés V., Nashashibi F. A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2016. – Vol. 17, no. 4. – P. 1135–1145.
4. Nagy B., Kelly A. Trajectory Generation for Car-Like Robots Using Cubic Curvature Polynomials // Field and Service Robotics. – Finland, 2001.