

ДВИЖЕНИЕ АВТОНОМНОГО РОБОТА ВДОЛЬ ПРОТЯЖЁННЫХ ВИЗУАЛЬНЫХ ОРИЕНТИРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАВИГАЦИОННОГО СТЕКА СИСТЕМЫ ROS

Д. И. Поярков (*dmitriypoyarkov@gmail.com*)

Московский физико-технический университет, Москва
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

А. Д. Московский (*moscowskyad@gmail.com*)

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Аннотация. В работе рассматривается важная для мобильной робототехники задача автономной навигации. Описан способ навигации и движения робота по цепочкам визуальных ориентиров (следам, дорожной разметке, тропинкам и т. п.) с препятствиями и развилками. Одной из особенностей предложенного метода является отсутствие определения роботом своего местоположения — это определяет специфику задачи. Разработанная в результате работы программа интегрирована в систему ROS и использует наработки навигационного стека системы для расширения функционала (в т. ч. возможность обхода препятствий), созданный прототип протестирован в симуляционной среде Gazebo.

Ключевые слова: робототехника, навигация, ROS, локализация, распознавание, компьютерное зрение

1. Введение

Большинство подходов к навигации, независимо от конкретной постановки задачи, опирается на локализацию - определение глобального местоположения робота. В лабораторных условиях осуществить локализацию достаточно просто: можно использовать визуальные маркеры, GPS-RTK либо подготовить карту местности заранее. В условиях неисследованной местности также можно произвести локализацию, используя SLAM-методологию [Olvera, Orozco-Rosas, Picos, 2020]. Но в приведённой работе, как и в большинстве подходов к этой задаче, для этого используется предварительное построение карты местности. Этот этап может быть затруднителен либо излишен для многих задач.

Иногда в визуальной навигации применяется альтернативный подход – локализация без построения карты. Данный подход, применённый для движения робота к цели, описан в работах [Guzel, Bicker, 2012; Tsai, Nisar, Hu, 2021]. Существуют также подходы, не использующие локализацию.

Они применены в работах [Ma, Liu, Chen, 2019; Wortsman и др., 2019] для движения к предварительно заданной визуальной цели.

Однако, в ряде задач возникает необходимость двигаться, не имея при этом заранее заданной цели движения. Представляет интерес осуществить навигацию для движения вдоль цепочки последовательных ориентиров, таких как следы, тропинка либо дорожная разметка, используя визуальные данные и не прибегая к построению карты местности и глобальной локализации робота.

Часть этой задачи – движение вдоль сплошной линии – в некотором виде многократно решалась с помощью классических подходов к управлению, например, PID и других регуляторов [Balaji и др., 2015]. В последнее время для того же активно применяются методы с обучением, в т.ч. в беспилотном транспорте [Kendall и др., 2018]. Кроме того, похожая задача - движение вдоль различных визуальных ориентиров с визуальным запоминанием пути – рассмотрена в работе [Карпова И.П., 2021].

В данной работе предлагается применить к задаче движения вдоль цепочки визуальных ориентиров наработки из области навигации с планированием [Marder-Eppstein и др., 2010], а также учесть возможность наличия развилок и препятствий на маршруте.

2. Основная часть

2.1 Постановка задачи

Предлагается выполнить следующую задачу: двигаться вдоль визуальных ориентиров, образующих путь (примеры: тропинка, следы, разметка), в одном направлении, распознавая элементы пути (ориентиры) на изображении с камеры, установленной на роботе. При этом:

- допускается как заданный вручную, так и автоматически определенный системой тип ориентиров для следования. Тип определяется перед началом процесса навигации;
- если на построенном по ориентирам пути имеются заграждающие препятствия, необходимо предпринять попытку объезда;
- если путь содержит развилки, необходимо на каждой выбрать направление и следовать вдоль него. Способ выбора может зависеть от конкретной задачи;
- при отсутствии ориентиров и пути для следования необходимо попытаться обнаружить ориентиры, меняя направление «взгляда» камеры;
- необходимо предотвратить возможность следования по маршруту в обратную сторону;

- необходимо обеспечить работу системы независимо от остальной сенсорики робота и особенностей ходовой части.

2.2. Предлагаемый подход

2.2.1 Предпосылки

Ряд задач требует от робота ориентироваться в различных условиях среды. Специфика предлагаемого подхода базируется в основном на особенностях местности, в которых планируется использование системы. Такая местность обладает следующими характеристиками:

- отсутствие заданной карты местности (неисследованная местность);
- отсутствие ориентиров, для которых известно точное положение на местности (например, специально подготовленных маркеров);
- невозможность предварительного построения карты местности роботом в автоматическом режиме.

В таких условиях затруднительно определить точное местоположение робота на местности, то есть осуществить **глобальную локализацию**. В предлагаемом подходе решено отказаться от глобальной локализации робота.

Также, ввиду принципиальных ограничений подхода, представляется возможным найти решение с использованием небольшого и доступного набора оборудования для робота.

2.2.2 Требования к оборудованию

Набор оборудования, установленный на робота, должен содержать следующие устройства:

- видеокамеру: необходима для получения визуальной информации;
- средство обнаружения препятствий, если требуется их динамический обход (набор лучевых дальнометров, сканирующие дальнометры, стереокамеры и т.п.);
- одометр любого вида (ходовой, инерциальный, визуальный).

2.2.3 Описание подхода

Решение поставленной задачи можно разбить на две основные части:

1. Построение маршрута движения
2. Следование вдоль построенного маршрута

Результатом работы первой части является маршрут – упорядоченная последовательность точек в мировой системе координат, также именуемая **глобальным планом**, строится она **глобальным планировщиком**. Первая точка в последовательности соответствует началу пути, по которому двигается робот, каждая следующая точка — это промежуточный пункт на пути к последней точке – цели.

Для того, чтобы двигаться вдоль глобального плана, необходимо учитывать особенности ходовой части конкретного робота. Глобальный план, построенный для разных роботов, может быть один и тот же, но точный путь, по которому роботы следуют вдоль глобального плана, может отличаться: дифференциальный привод ходовой части может развернуться на месте и этим обеспечить очень точное следование плану, а рулевой привод поворачивает по дуге и вынужден время от времени отклоняться от маршрута.

Таким образом, для каждого типа ходовой части необходим модуль, который будет отвечать за движение робота вдоль глобального плана. Этот модуль именуется **локальным планировщиком** и строит **локальный план**.

Локальный планировщик управляет ходовой частью, скоростью движения и поворотами, а также может отвечать за обход препятствий на пути. Система является модульной: локальный и глобальный планировщики работают параллельно и независимо друг от друга.

Вспомогательным этапом в данном подходе является одометрия – определение перемещения робота по данным, полученным с ходовой части (для колёсного робота: количество вращения колёс, угол их поворота и т. п.). Одометрию легко внедрить в конструкцию ходовой части, однако нельзя полагаться на точность её данных.

Подход предполагает, что процесс построения глобального плана происходит итеративно. На каждой итерации робот:

1. Получает данные об ориентирах, используя камеру.
2. Преобразует полученные данные в участок пути.
3. Сравнивает полученный участок пути с данными в памяти.
4. Обновляет (корректирует/доставляет) глобальный план с учётом новых данных, записывает новые данные в память.

Параллельно с этим (в том числе и между итерациями) робот движется под управлением локального планировщика.

2.2.4 Использование системы ROS

Навигационный стек системы ROS [Marder-Eppstein, 2010] содержит различные средства для осуществления навигации мобильных роботов. Среди прочего, в системе есть эффективные локальные планировщики с функцией обхода препятствий для некоторых типов ходовых приводов (например дифференциального, голономного и рулевого).

По умолчанию локальные планировщики в ROS работают со стандартным глобальным планировщиком. Стандартный глобальный планировщик строит план движения из точки в точку, используя карту местности. Так как локальный планировщик работает независимо от глобального, в качестве последнего можно использовать собственную

разработку, которая будет решать поставленную задачу: следование вдоль визуальных ориентиров.

Таким образом, для решения задачи достаточно разработать глобальный планировщик и встроить его в систему ROS, чтобы иметь возможность использовать уже имеющиеся локальные планировщики. В данной работе реализован этот вариант.

Построение плана происходит перед началом движения по видимым ориентирам, далее план обновляется (дотраивается, корректируется) по новым изображениям с камеры. Обновление плана происходит итеративно с некоторым периодом (порядка десятых долей секунд).

Каждая итерация состоит из трёх независимых этапов (Рис. 1):

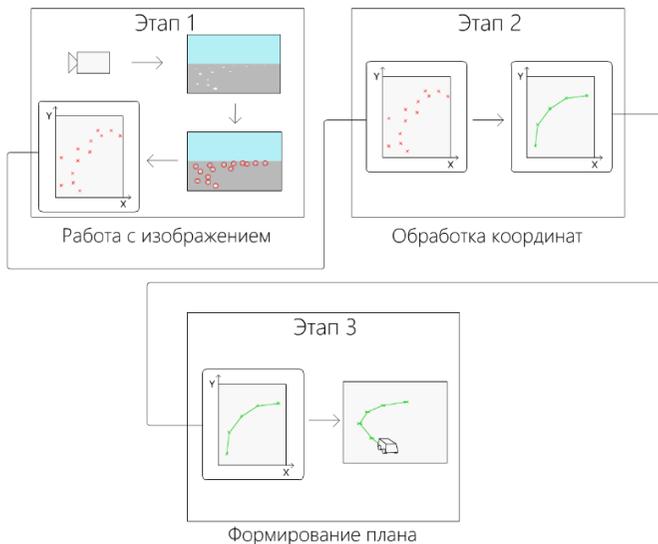


Рис. 1. Этапы реализованного подхода

1. Работа с изображением: результатом этапа являются координаты выявленных ориентиров на изображении с камеры.

2. Работа с координатами: результатом этапа является путь с развилками, представленный в виде графа.

3. Работа с планом: хранение и обновление имеющегося маршрута, выбор развилки, внедрение плана в систему ROS.

2.3. Реализация

2.3.1 Этап 1: Работа с изображением

Входные данные для этапа – изображение с камеры. Концептуально распознавание ориентиров может быть реализовано любыми подходящими средствами (например, SimpleBlobDetector из библиотеки OpenCV: модуль способен распознавать одноцветные пятна различных размеров).

Модуль распознавания получает координаты ориентиров на изображении и преобразует их в глобальные. Предполагается, что:

- робот движется по плоскости (в некоторой своей окрестности);
- ориентиры находятся на плоскости движения робота;
- известно местоположение и ориентация камеры относительно робота;
- известны оптические параметры камеры: фокусное расстояние (f_x, f_y) и координата оптического центра (c_x, c_y) .

На основании этих предположений преобразование точки происходит в три шага:

1. Вычисление вектора v в мировых координатах в направлении объекта по его координате на изображении:

$$v = ((p_x - c_x)/f_x, (p_y - c_y)/f_y, 1),$$

где (p_x, p_y) – координата объекта на изображении в пикселях, (c_x, c_y) – координата оптического центра камеры, (f_x, f_y) – фокусное расстояние камеры (Рис. 2).

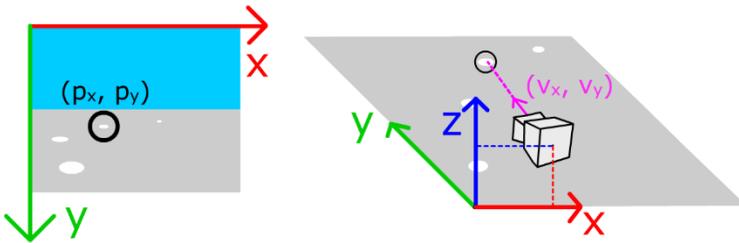


Рис. 2. Проекция ориентиров на плоскость

2. Построение промежуточного вектора w , сонаправленного v и с y -компонентой, равной h , где h – высота камеры над горизонтом:

$$w = h * v / v_y,$$

3. Нахождение точки пересечения q направляющей вектора v (которая совпадает с направляющей вектора w) с горизонтальной плоскостью. Её x - и y -компоненты будут равны соответственно x - и z -компонентам вектора w :

$q = (w_x, w_z)$, где q – искомая точка преобразования. Преобразование происходит для каждой точки, массив точек – выходные данные этапа.

2.3.2 Этап 2: Работа с координатами

Для того, чтобы по полученным координатам сформировать путь, необходимо отфильтровать массив координат и связать точки пути между собой (построить граф).

В алгоритме фильтрации (Рис. 3) на каждой итерации точка усредняется со всеми точками в некотором радиусе; в алгоритме построения графа (Рис. 4) на каждой итерации точка соединяется ребром со всеми точками в некотором радиусе.

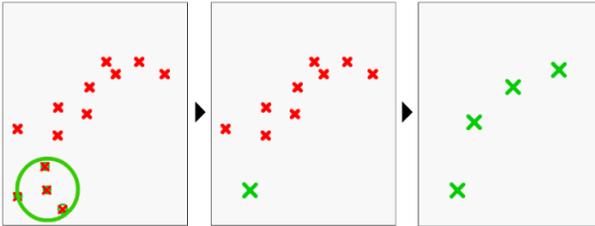


Рис. 3. Фильтрация

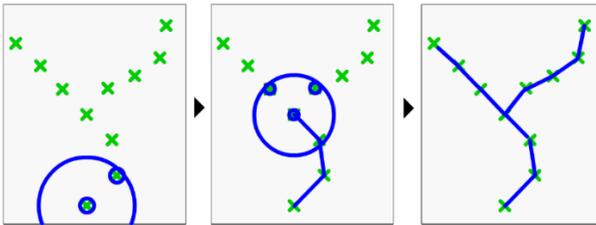


Рис. 4. Построение пути

Необходимым для данного этапа свойством полученного пути является то, что каждый угол, образованный двумя **последовательными** рёбрами, не **острее 60°** – это следует из алгоритма построения графа: если точки образуют угол 60° градусов или меньше – они образуют развилку.

2.3.3 Этап 3: Работа с планом

Работа с планом, в свою очередь, состоит из следующих этапов:

1. Выбор и сохранение направления на развилках.
2. Преобразование пути для достижения попарной равноудаленности точек (это свойство будет использовано впоследствии).
3. Обновление (коррекция, дополнение) имеющегося пути.
4. Выбор из имеющегося пути участка, образующего глобальный план.
5. Подача глобального плана на вход локального планировщика.

Подробнее про некоторые этапы:

Промежуточное («равноудалённое») преобразование: результатом работы алгоритма является путь с попарно равноудалёнными точками (Рис. 5). Для сохранения точности последняя точка может не удовлетворять этому свойству.

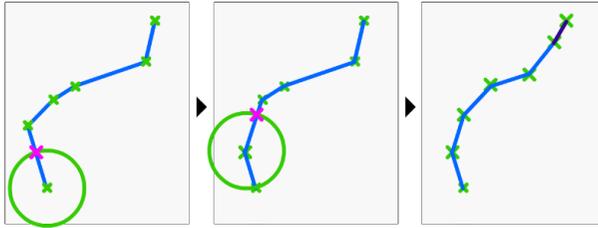


Рис. 5. «Равноудалённое» преобразование

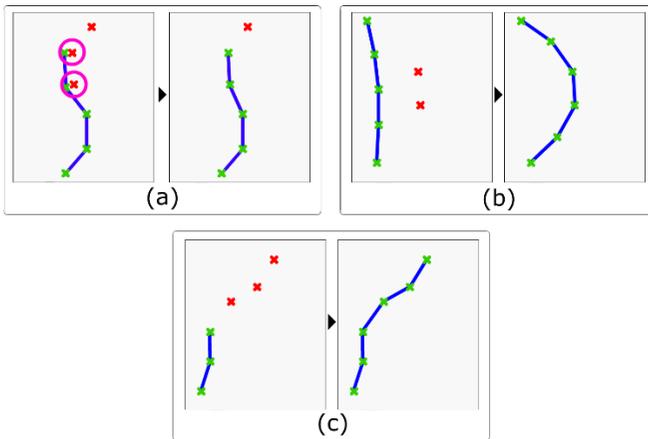


Рис. 6. Обновление плана: (а) – «идентичными» точками, (б) – «боковыми» точками, (с) – «дистраивание» плана

Если алгоритм привёл к образованию углов острее 60° , взятое расстояние уменьшается и итерация повторяется. Так как на вход этапа подаётся путь без углов острее 60° , число таких итераций ограничено.

Обновление и коррекция состоит из подэтапов:

- Нахождение «идентичных» точек (**Error! Reference source not found.**, (a))
- Вставка «боковых» точек (**Error! Reference source not found.**, (b))

- c. «Достраивание» плана (**Error! Reference source not found., (c)**)
- d. «Равноудалённое преобразование» для результата

Если в результате одного из этапов образовался угол острее 60° , происходит удаление смежных точек плана до тех пор, пока это свойство сохраняется. Здесь используется ранее полученное свойство плана: равноудалённость точек. Достаточно мелкое для отсутствия углов острее 60° разбиение плана позволяет сохранить все изгибы исходного пути, не нарушая последовательности построения.

Выбор участка для глобального плана: из обновлённого пути выбираются только непройденные роботом точки, и в начало заносится текущее положение робота. Этот набор и будет глобальным планом.

Далее, следуя установленной процедуре навигационного стека ROS, глобальный план подаётся локальному планировщику для следования.

2.4. Результаты

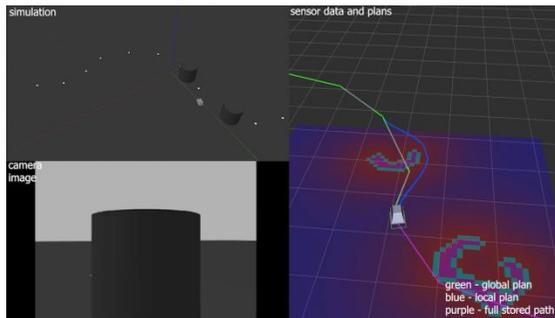


Рис. 7. Симуляция (кадр из видео)

Первичная проверка работоспособности предложенного подхода проверялась в симуляционной среде Gazebo. Колесный робот с рулевым приводом двигается вдоль пути, представленного цепочкой белых пятен на темном фоне. Текущая система состоит из двух модулей: единого модуля распознавания и обработки данных и плагина глобального планировщика для навигационного стека ROS. Первый модуль распознаёт белые пятна, проецирует их на плоскость, отсеивает шумы и строит план с развилками. Плагин глобального планировщика интегрирует полученный план в навигационный стек.

В симуляции успешно протестирована способность робота распознавать указанные ориентиры, строить и следовать плану, обходя при этом препятствия. Видео с демонстрацией имеется в свободном доступе [Path Finder, 2021].

3. Заключение

В работе описан метод навигации автономного робота вдоль протяжённых визуальных ориентиров и сформулированы критерии, которым разработанная система должна удовлетворять. Разработанный прототип на основе навигационного стека системы ROS показал первичную работоспособность в симуляции. В дальнейшем, для полного решения поставленных задач, необходимо:

- разработать обработку развилок;
- расширить набор распознаваемых ориентиров;
- доработать и протестировать фильтрацию;
- разработать функцию поиска ориентиров;
- оценить качество подхода на некотором ряде типовых задач.

Список литературы

- [Карпова И.П., 2021] Карпова И.П. Организация маршрута анимата на основе визуальных ориентиров и распознавания сцен // Девятнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2021. Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2021. С. 205–218.
- [Balaji и др., 2015] Balaji V. и др. Optimization of PID Control for High Speed Line Tracking Robots // Procedia Computer Science. 2015. Т. 76. С. 147–154.
- [Guzel, Bicker, 2012; Tsai, Nisar, Hu, 2021] Guzel M. S., Bicker R. A Behaviour-Based Architecture for Mapless Navigation Using Vision // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2012. Т. 9. № 1. С. 18.
- [Kendall и др., 2018] Kendall A. и др. Learning to Drive in a Day // 2018.
- [Ma, Liu, Chen, 2019; Wortsman и др., 2019] Ma L., Liu Y., Chen J. Using RGB Image as Visual Input for Mapless Robot Navigation // 2019.
- [Marder-Eppstein и др., 2010] Marder-Eppstein E. и др. The Office Marathon: Robust Navigation in an Indoor Office Environment // International Conference on Robotics and Automation. 2010.
- [Marder-Eppstein, 2010] Marder-Eppstein E. ROS1 Navigation [Электронный ресурс]. URL: <http://wiki.ros.org/navigation>.
- [Olvera, Orozco-Rosas, Picos, 2020] Olvera T., Orozco-Rosas U., Picos K. Mapping and navigation in an unknown environment using LiDAR for mobile service robots // Optics and Photonics for Information Processing XIV / под ред. А. А. S. Awwal и др. : SPIE, 2020. С. 31 – 45.
- [Path Finder, 2021] Path Finder. Simple path following [demonstration] [Электронный ресурс]. URL: <https://youtu.be/ck4YBheyqXE> (дата обращения: 12.11.2021).
- [Tsai C.-Y. и др.] Tsai C.-Y., Nisar H., Hu Y.-C. Mapless LiDAR Navigation Control of Wheeled Mobile Robots Based on Deep Imitation Learning // IEEE Access. 2021. Т. 9. С. 117527–117541.
- [Wortsman M. и др.] Wortsman M. и др. Learning to Learn How to Learn: Self-Adaptive Visual Navigation Using Meta-Learning // 2019.