



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 45 за 2015 г.



Давыдов О.И., [Платонов А.К.](#)

Метод определения позиции
и ориентации мобильного
робота с лазерным
сканером

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Давыдов О.И., Платонов А.К. Метод определения позиции и ориентации мобильного робота с лазерным сканером // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 45. 20 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-45>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

О.И. Давыдов, А.К. Платонов

**Метод определения позиции и ориентации
мобильного робота с лазерным сканером**

Москва — 2015

Давыдов О.И., Платонов А.К.

**Метод определения позиции и ориентации
мобильного робота с лазерным сканером**

В работе представлен алгоритм определения неизвестной позиции мобильного робота, находящегося в помещении. Алгоритм основан на специальном выборе признаков для распознавания ориентиров в окружении робота. Исходными данными являются измерения горизонтальных дальностей в поле зрения лазерного сканера робота. По этим данным строится рабочая модель видимой части окружения робота, в которой специальным образом выделяются признаки, характеризующие метрические особенности, наблюдаемые в сенсорных данных. В базе данных системы управления робота имеется карта среды передвижения робота с выделенными таким же образом отличительными признаками. На этой карте ищется зона, отличительные признаки которой наиболее похожи на отличительные признаки рабочей модели. По взаимному положению найденных пар похожих признаков оценивается ориентация робота и его позиция. Эксперименты показывают, что предлагаемый метод отличается высокой скоростью и позволяет при включении робота оценивать его положение с точностью, достаточной для формирования параметров начала движения.

Ключевые слова: мобильный робот, лазерный сканер, модель операционной среды, карта, отличительные признаки, ориентиры.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-06431

Oleg Izmailovich Davydov, Alexander Konstantinovich Platonov

**A Method for Position and Orientation Determination of a Mobile Robot
Equipped With Laser Scanner**

This paper presents an algorithm for determination unknown position and orientation of a mobile robot indoors. The algorithm is based on a selected set of features for landmarks in robot's environment. Initial data are comprised of horizontal distance measurements performed by the robot's laser scanner. The data is used to create a current state model for the visible surroundings of the robot, from which metric characteristics of the features are extracted by a special procedure. Robot's control system database contains a map of the environment with features extracted by a similar procedure. Within this map a zone is chosen which closely matches a set of features for the current state model. Robot's position and orientation are then evaluated based on the relative position of pairs of similar features. Experiments show that proposed algorithm is fast enough to evaluate robot's position with sufficient precision to start movement upon turning on the robot.

Keywords: mobile robot, laser scanner, environment model, map, features, landmarks.

Введение

Предлагаемая работа проводится в рамках исследований в интересах разработки недорогих, но эффективных алгоритмов безопасного управления автономными и полуавтономными сервисными мобильными роботами. Для этой цели создается мобильный робот РБ-2 (рис.1), который предназначен для работы внутри помещений в среде обитания человека. В такой среде – в городских квартирах, в больницах, в офисах, в музеях, в магазинах, или в учебных заведениях – в окружении передвигающиеся людей, робот РБ-2 должен быть способен, выполняя различные команды человека, автономно и безопасно перемещаться внутри помещений.

Робот РБ-2 представляет собой подвижную платформу длиной 60 см, шириной 53 см, с двумя передними ведущими колесами, на осях которых установлены одометры, и двумя задними поддерживающими омни-колесами.

Робот оборудован контактными датчиками препятствий, инфракрасными и ультразвуковыми датчиками расстояний. На передней части корпуса робота установлен лазерный сканер, который является основным источником данных для системы управления робота.

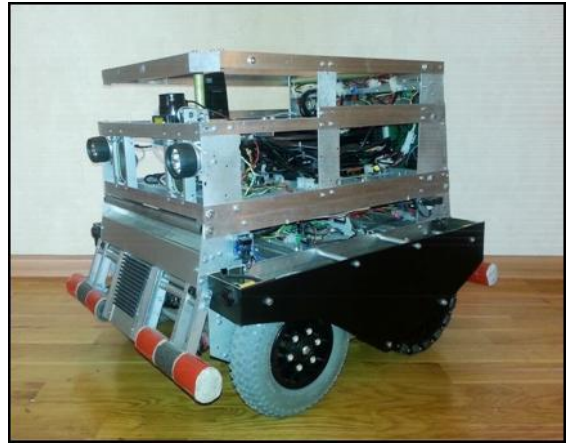


Рис.1. Робот РБ-2

Программное обеспечение системы управления функционирует на бортовом компьютере с процессором Intel, тактовой частотой 1.8ГГц, работающим под управлением операционной системы Windows 7 Embedded. Бортовой компьютер имеет оперативную память 4Гб, внешнюю флеш-память 16Гб, сенсорный монитор с диагональю 7 дюймов. Связь бортового компьютера с контроллерами нижнего уровня осуществляется по каналам USB. Программное обеспечение робота РБ-2 написано на языке VisualBasic.Net. Весь массив постоянной информации, необходимой для управления роботом, хранится в базе данных на платформе Access 2007.

Мобильный робот при выполнении функциональных задач должен обладать возможностью определения своего положения и ориентации в окружающей его операционной среде. Эта задача особенно актуальна в момент включения робота, когда его позиция заранее не известна. В этот момент достоверную информацию можно извлечь только из анализа окружающей среды. Подобная задача является стандартной задачей *определения начального положения* [1] путём поиска и распознавания локальных ориентиров в окружении робота. Ориентиром может служить любой наблюдаемый элемент окружения, вычислимое описание которого можно сопоставить с аналогичным описанием, хранимым в системе управления робота. Этой задаче, начиная с 80-х годов прошлого века, было посвящено большое число работ (подробную библиографию см. в [2]).

На ранних этапах развития робототехники программная и аппаратная сложности использования систем технического зрения для решения задачи автономной навигации робота породили методы обработки и интерпретации сигналов сканирующих дальномеров [3], [4]. Однако низкая точность измерителей дальности на некоторое время затормозила развитие этого направления. Оно получило новый импульс в развитии только в последнее десятилетие в связи созданием и широким применением лазерных сканеров нового поколения. Например, в работах [5], [6] и [7] успешно используются современные дальномеры, которые позволяют эффективно с хорошей точностью решать задачи путевой навигации.

С другой стороны, низкая точность измерителей дальности привела к возникновению методов *интерпретирующей* [8], *качественной* [9] навигации, которая основана на распознавании видимых ориентиров в окружении робота и сравнении их информационной эквивалентности. Теоретические основы методов интерпретирующей навигации внутри помещений применительно к задачам управления движения по сигналам дальномера были развиты в работах [10, 11]. В них подробно исследованы свойства среды с линейными границами препятствий и строго доказана важность выделения из дальномерных измерений угловых точек предметов в окружении робота. Показано, что для решения задач позиционной привязки необходимо и достаточно распознавание только 5 типов локальных ориентиров: "*выпуклый угол*", "*вогнутый угол*", "*скачок к*", "*скачок от*" и "*стена*".

Описываемое ниже решение задачи определения начального положения робота РБ-2 также базируется на методе позиционной привязки по локальным ориентирам упомянутых выше 5 типов.

Здесь данные, поступающие от лазерного сканера, обрабатываются и преобразуются в специфицированную модель видимой части окружения робота. Такая модель далее будет называться **Рабочей Моделью**. Из этой Рабочей Модели выделяются ориентиры, которыми являются образы угловых точек предметов, окружающих робота. Эти ориентиры далее будут называться **Базовыми Точками**. Отрезки прямых линий, соединяющих Базовые точки, являются **Отличительными Признаками** видимой части окружения робота. Для всей совокупности Отличительных признаков формируется **Таблица параметров** этих признаков, которая содержит набор величин, определяющих геометрические особенности ориентиров. В такой таблице концентрированно содержатся отличительные параметры текущего состояния видимого окружения робота.

С другой стороны, в базе данных робота РБ-2 содержится математическое описание всей операционной среды робота, которое далее будет называться **Картой** среды. В структуре информации, составляющей Карту среды, также содержатся аналогичные Таблицы параметров Отличительных признаков, сформированные в процессе построения Карты.

Задача определения положения робота решается сопоставлением Таблиц параметров, Отличительных признаков, Рабочей Модели и Карты. Ищется соответствие между параметрами Отличительных признаков, определяющее схожесть или отличие каждой пары угловых признаков. На карте находится участок, который по совокупности Отличительных признаков наиболее похож на Рабочую Модель. По взаимному положению найденных пар похожих признаков в текущей Рабочей Модели и в Карте оценивается ориентация робота и его позиция.

Метод сравнения наблюдений с картой обычен для решения навигационных задач. Вопрос обычно состоит в выборе эффективных параметров сравнения, иными словами, – в построении параметров описания искомых ориентиров и методов их определения. Используемый в данной работе и подробно описываемый ниже способ формирования отличительных признаков видимого окружения робота оказался удобным и эффективным с точки зрения реализуемости автономного построения Рабочей Модели и с позиций простоты алгоритмов для формирования Карты операционной среды и её дальнейшего использования в процессах определения положения робота.

1. Карта операционной среды

Карта операционной среды для мобильного робота – это модель геометрических образов помещения, в котором робот движется, вместе с совокупностью геометрических свойств, которые доступны системе управления и могут быть использованы для реализации двигательных и рабочих функций робота.

В системе управления робота РБ-2 Карта его операционной среды хранится в базе данных бортового компьютера в виде двудольной сети (графа с двумя типами помеченных вершин) отдельных её фрагментов. Каждый фрагмент является геометрическим образом замкнутого пространства комнаты или коридора или образом дверей и проходов между ними. Геометрические особенности отдельных зон на этих фрагментах Карты используются для определения позиции и ориентации робота.

Все фрагменты связаны между собой геометрическими образами дверей или проходов, образуя упомянутый двудольный граф. Все фрагменты Карты снабжены уникальными именами – идентификаторами, которые используются для описания соответствующих связей между элементами сети. Фрагменты Карты являются узловыми точками сети, а двери и проходы являются помеченными дугами узловых точек-фрагментов.

Каждый фрагмент Карты представляет собой массив ориентированных отрезков прямых линий – векторов, которые формируют многоугольник на горизонтальной плоскости движения робота. Векторы-отрезки являются образами препятствий, окружающих робота, а внутреннее пространство многоугольника – область, свободная от препятствий. Последовательность векторов в массиве такова, что они обходят область, свободную от

препятствий, против часовой стрелки. Векторы задаются начальной и конечной Точками. Все векторы в пределах одной Карты перенумерованы. Номер вектора является его идентификатором в рамках данной Карты.

Каждый фрагмент Карты имеет свою систему координат, привязанную к конкретной Точке одного из векторов фрагмента. Дуги узлов сети содержат информацию о взаимном положении отдельных фрагментов. Таким образом, в данной структуре Карты операционной среды положение робота однозначно определяется идентификатором фрагмента Карты, а в пределах данного фрагмента – координатами и ориентацией робота относительно координат и ориентации векторов фрагмента.

На рисунке 2 изображен пример фрагмента Карты операционной среды. Здесь черным цветом обозначены векторы, ограничивающую область, свободную от препятствий, а зеленой линией обозначен проход, ведущий в соседнее помещение. Это фрагмент является образом реальной комнаты, и он в виде последовательности векторов хранится в базе данных робота РБ-2 [12]. В дальнейшем в данной публикации во всех ее примерах будет использоваться именно этот фрагмент Карты.

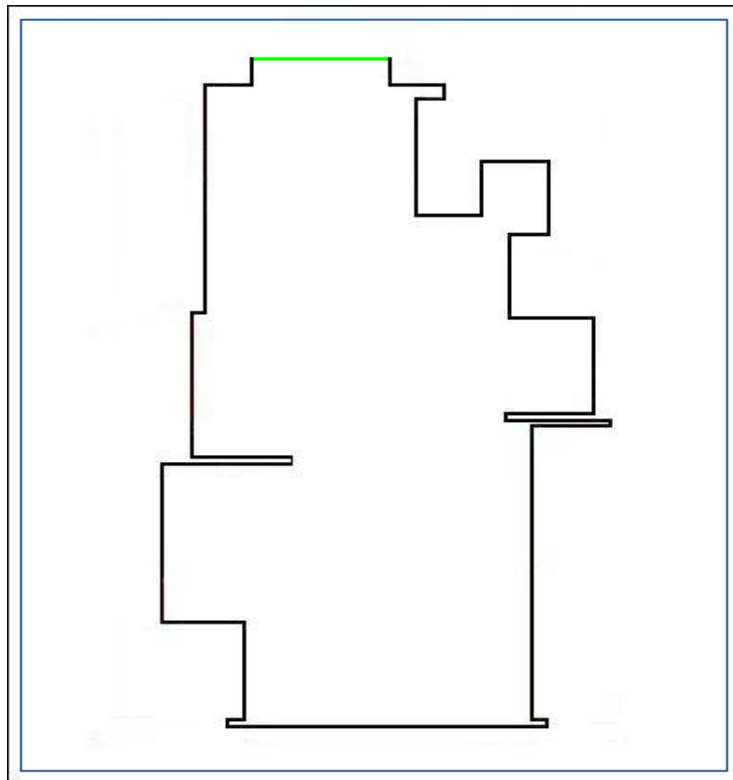


Рис.2. Фрагмент Карты операционной среды

Карта, хранящаяся в базе данных робота РБ-2, не является абсолютно точным образом реальной операционной среды. Типичные помещения среды обитания человека имеют не абсолютно ровные стены и не идеально прямые углы. Мебель обычно расставляется на глазок, часто не вплотную к стенам. Карта, используемая роботом, – это идеализированный, упрощенный, стилизованный геометрический образ операционной среды. На ней углы прямые, стены ровные и мебель выставлена идеально вдоль стен.

Использование стилизованных карт подобного типа имеет большой смысл, так как такие карты, с одной стороны, легче воспринимаются человеком, с другой стороны, имея меньше деталей, чем реальность, они требуют меньшего объема памяти для хранения. Совершенно не обязательно хранить в Базе Данных образ шкафа с неплотно прикрытой дверцей или слегка выдвинутого ящика, образ шторы, ниспадающей складками вдоль окна, или образ наличника на проеме двери. Не обязательно иметь точное положение стула, который может быть передвинут в любой момент.

Вместе с этим и точное определение координат начального положения робота не имеет большого значения. Практическое значение имеют относительные расстояния до целевой позиции и до препятствий, окружающих робота, которые постоянно контролируются системой управления движением робота на каждом цикле работы сканера. Поэтому точность определения начального положения робота должна быть достаточной только для построения плана начала движения робота с целью успешного выполнения задания.

2. Построение Рабочей Модели

Для решения задачи определения позиции и ориентации в операционной среде ищутся геометрические особенности препятствий, окружающих робота, которые сравниваются с геометрическими особенностями отдельных зон на Карте, хранящейся в базе данных бортового компьютера. Для этого строится геометрическая Модель окружающей среды.

Основным источником данных для построения такой Модели являются данные лазерного сканера *Nokeyo URG-04LX-UG01*, установленного в передней части робота. Данные сканера предварительно обрабатываются и фильтруются. Предварительная обработка проводится драйвером сканера, который создает массив действительных чисел – расстояний (в сантиметрах) от сканера до поверхности препятствий, находящихся в области видимости сканера. Массив получаемых расстояний упорядочен в порядке возрастания угла сканирования, который меняется от -120° до $+120^\circ$ с шагом $0,35^\circ$. Всего в массиве 683 измерения. Максимальная дальность измерений (граница видимости сканера) составляет 560 см.

Из-за шума измерений дальностей и наблюдаемых их выбросов в разработанной системе управления РБ-2 получаемые данные фильтруются медианным фильтром. Медианная фильтрация – эффективная процедура обработки данных, уничтожающая подавляющее большинство импульсных помех. Для этого сигнальные значения дальностей внутри окна фильтра сортируются в порядке возрастания (убывания), и значение, находящееся в середине этого упорядоченного списка, поступает на выход фильтра. Окно перемещается вдоль фильтруемого массива, и такие операции повторяются.

В результате предварительной обработки и фильтрации исходных данных формируется массив точек, который представляет образ поверхности

препятствий, окружающих робота. Этот массив является исходной информацией для построения набора векторов – образов препятствий, окружающих робота. Этот набор векторов мы и называем Рабочей Моделью операционной среды.

В современной научной литературе описаны несколько алгоритмов аппроксимации результатов сканирования отрезками прямых. Программное обеспечение робота РБ-2 использует алгоритм, описанный в работе [14]. Он состоит из следующих двух этапов.

На первом этапе строится массив семантически помеченных точек. Для этого в массиве точек идентифицируются скачки дальности и углы–изломы, на основании чего каждой точке этого массива ставится в соответствие семантический маркер, который определяет тип точки.

На втором этапе из всех точек скана выделяются последовательности стоящих подряд точек, отделенные друг от друга точками, которые имеют маркеры скачков дальности и углов. Координаты крайних точек каждой последовательности и запоминаются в качестве начальных и конечных точек отрезков-векторов.

На рис. 3 приводится пример результата работы этого алгоритма. Изображение построено системой управления робота РБ-2, который находится в помещении, фрагмент Карты которого приведен на рис. 2. Здесь черным цветом изображены точки, полученные после фильтрации данных с лазерного сканера, а красным цветом представлены отрезки прямых – вектора, которые аппроксимируют эти точки.

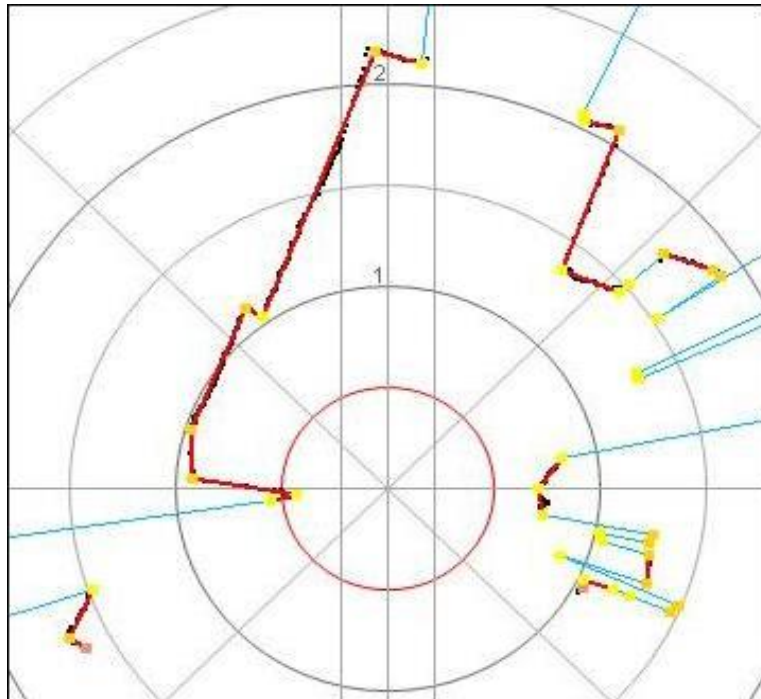


Рис.3. Аппроксимация результатов сканирования

Этот алгоритм был создан для подсистемы формирования маршрута движения робота РБ-2. Его универсальность, простота и эффективность

позволяет использовать его и для других задач робототехники. В частности, здесь он использован для построения первого варианта Рабочей Модели, который уточняется на следующем этапе.

Ошибки измерения дальности лазерного дальномера Nokuuo URG-04LX-UG01 по паспорту не превышают 1% , что в условиях операционной среды робота РБ-2 составляет 0.5-4 см. Соответственно, ошибка положения в пространстве векторов, опирающихся только на координаты двух крайних точек, может быть достаточно велика. Поэтому для задачи определения начального положения робота алгоритм формирования Рабочей Модели дополнен этапом, на котором уточняется положение всех видимых векторов Рабочей Модели. Для каждого такого вектора методом наименьших квадратов оцениваются коэффициенты уравнения базовой прямой линии, на которой этот вектор находится. С помощью этого уравнения уточняются координаты начальной и конечной точек вектора.

На этом же этапе оценивается величина среднеквадратичного отклонения точек, формирующих вектор, от построенной базовой линии. Полученная величина является параметром, характеризующим степень достоверности вектора, и если она превышает некоторое пороговое значение, то соответствующий вектор из Рабочей Модели удаляется как недостоверный. Кроме того, часть векторов даже с допустимой величиной среднеквадратичного отклонения также удаляется из Рабочей Модели как недостоверные. Этими векторами являются короткие векторы, имеющие длину менее 20 см, и векторы, у которых количество точек, их формирующих, меньше шести.

На рис. 4 изображена Рабочая Модель, представленная на рис. 3, полученная после удаления из нее недостоверных векторов. Как указано выше, эта Рабочая Модель построена роботом, который находился в помещении, изображенном на рис. 2.

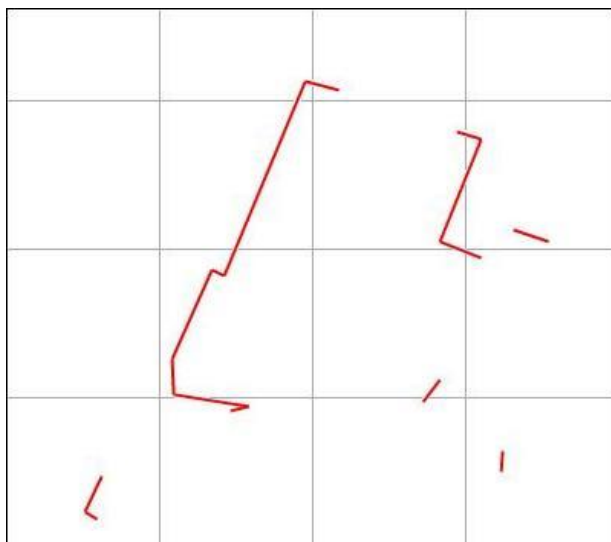


Рис.4. Рабочая Модель видимой роботом операционной среды

Как и на фрагментах Карты, последовательность векторов в Рабочей Модели такова, что они обходят область, свободную от препятствий, против часовой стрелки. Векторы задаются начальной и конечной Точками, координаты которых представлены в системе координат робота. Система координат робота – это подвижная система, связанная с положением лазерного сканера на роботе, ее ось абсцисс направлена вперед по ходу движения.

Задача определения позиции робота теперь сводится к решению задачи зрительной привязки робота к карте путём сопоставления Рабочей Модели со всеми фрагментами Карты операционной среды и идентификации той зоны на одном из фрагментов Карты, которая наилучшим образом соответствует рабочей Модели.

3. Общее описание алгоритма

После построения Рабочей Модели среды определение ориентации робота и его положения заключается в определении величин сдвига-поворота, которые позволили бы совместить систему координат робота с системой координат Карты операционной среды. Для этого необходимо на каком-либо фрагменте Карты операционной среды найти совокупность векторов, наиболее близкую набору векторов рабочей Модели среды. Эта задача решается в несколько этапов.

1. Для Рабочей Модели формируются объекты, которые могут являться уникальными (неповторимыми в другом месте) Отличительными Признаками среды, окружающей робота. Предполагается, что такие же объекты Карты – её Характерные Признаки – уже сформированы для всех фрагментов Карты операционной среды и хранятся в базе данных на бортовом компьютере робота.
2. Для каждого сформированного Отличительного Признака Рабочей Модели ищется наиболее похожий Характерный Признак на очередном фрагменте Карты. Если ни для одного Отличительного Признака Рабочей Модели не найден ни один похожий Характерный Признак на данном фрагменте Карты, переходим к следующему фрагменту. Если находится хотя бы одна пара похожих Признаков, то эта информация запоминается вместе с идентификатором фрагмента Карты.
3. Среди всех фрагментов Карты операционной среды, для которых найдены пары похожих Отличительных и Характерных Признаков, выбирается тот фрагмент, который демонстрирует наибольшее сходство по совокупности похожих Признаков.
4. По рассогласованию взаимных положений всех найденных пар похожих Признаков оценивается ориентация и положение робота путём определения требуемого сдвига-поворота системы координат Рабочей Модели относительно системы координат выбранного фрагмента Карты.

Алгоритмы всех представленных выше этапов детально описываются ниже.

4. Формирование Отличительных Признаков

Отличительные Признаки операционной среды, используемые для определения положения и ориентации робота, должны соответствовать ряду требований, часто упоминаемых в работах, посвященных визуальной навигации (см., например, [11], [13], [14], [15]). С одной стороны, совокупность Отличительных Признаков должна, по возможности, быть уникальна для данного окружения робота. С другой стороны, Отличительные Признаки должны описываться набором параметров, которые инвариантны относительно положения робота и его ориентации. Важным требованием к параметрам, описывающим Отличительные Признаки, является их степень точности. Точность значений их параметров не должна быть хуже точности параметров векторов, образующих Рабочую Модель среды. Выбор Отличительных Признаков должен основываться на наиболее достоверных данных, а определение их параметров не должно вносить дополнительных ошибок. Описываемый ниже способ формирования отличительных признаков удовлетворяет перечисленным требованиям.

Как правило, несколько пар векторов, формирующих Рабочую Модель, связаны друг с другом и формируют углы. Эти углы сами по себе, как было сказано, и являются искомыми ориентирами в окружающей среде, образами реальных углов на препятствиях, окружающих робота. Важно отметить, что координаты углов определяются с лучшей точностью, чем другие точки в наборе отрезков, например, концы векторов, не формирующие углы с другими отрезками-векторами. В описываемом здесь алгоритме координаты углов используются в качестве ориентиров – Базовых Точек для построения Отличительных Признаков. Это обстоятельство убедительно показали эксперименты с обработкой данных лазерного сканера и построением Рабочих Моделей. Из двух векторов, формирующих угловую Базовую Точку, первый мы называем входящим, а второй – исходящим.

Не каждый угол в Рабочей Модели можно использовать как Базовую Точку. Практика показала, что значения и координаты углов, составленных из коротких векторов, обычно не достаточно точны. Не достаточно точно определяются и углы, значения которых близки 0° или 180° . Поэтому в процессе выделения Базовых Точек используются специальные процедуры, отсекающие такие углы как недостоверные.

Вместе с тем, сами Базовые Точки не удовлетворяют требованию их уникальности, предъявляемому к Отличительным Признакам. Единственным параметром Базовой Точки, инвариантным относительно системы координат, является само значение величины угла. Однако операционная среда, как правило, содержит преимущественно прямые углы, поэтому значение угла тоже не уникально и не может являться Отличительным Признаком среды. А вот параметры *взаимного положения* Базовых Точек чаще всего уникальны.

В качестве Отличительных Признаков в описываемом здесь алгоритме выбраны отрезки прямых, соединяющие Базовые Точки в Рабочей Модели.

На рис. 5 представлен пример такого набора Признаков, соединяющих четыре Базовые Точки на Рабочей Модели, изображенной выше на рис. 4. Здесь векторы, формирующие Рабочую Модель операционной среды, изображены линиями красного цвета, а отрезки–Отличительные Признаки изображены линиями синего цвета.

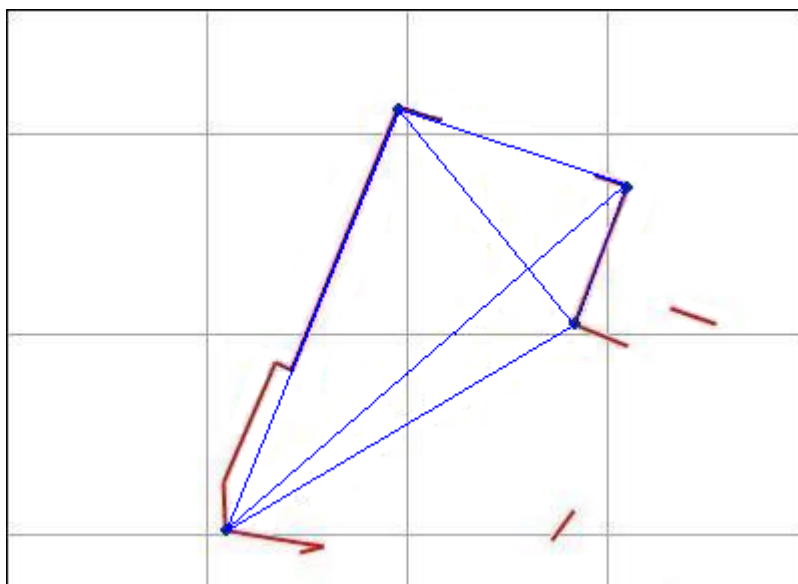


Рис.5. Признаки, сформированные для Рабочей Модели

В качестве характеристик для каждого Отличительного Признака формируется пять параметров. Эти параметры изображены на рис. 6. Здесь:

L – расстояние между Базовыми Точками, т. е. длина Отрезка–Признака;

α_1 и α_2 – углы в Базовых Точках, на концах Отрезка–Признака;

β_1 и β_2 – углы между Отрезком–Признаком и входящими векторами, формирующими углы, Базовые Точки.

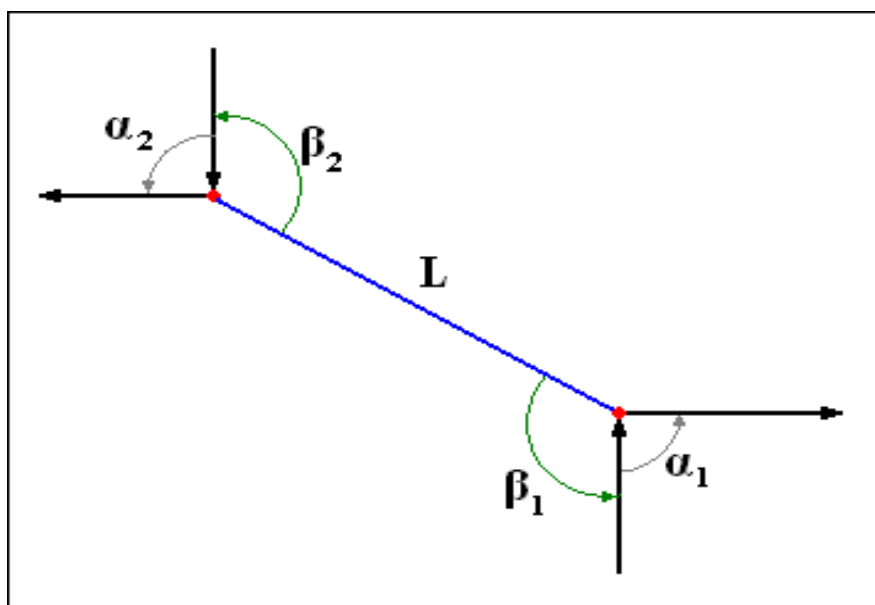


Рис.6. Параметры Отличительного Признака

Совокупность этих параметров, сформированная по всем парам Базовых Точек, в достаточной мере уникальна для данного окружения робота. Все эти параметры инвариантны относительно системы координат, а их точность значений не ниже, чем точность параметров в Рабочей Модели.

Все эти параметры выбранных Отличительных Признаков вместе с идентификаторами входящих векторов Базовых Точек заносятся в Таблицу Параметров. При этом для простоты способа формирования этой таблицы простым обходом углов Рабочей Модели в ней оставлены парные Признаки, возникающие для каждой пары углов. Это допустимо, поскольку длина Таблиц Параметров, как правило, не велика. Действительно, для Рабочей Модели операционной среды робота РБ-2, извлекается, в среднем, 4-5 Базовых Точек, максимум 8. Поскольку длина Таблицы, составленной из n углов, равна $n*(n-1)$ строк, то длина Таблицы, как правило, не более 56 строк, а в среднем ее длина составляет 12–20 строк. Практика показала, что ускорение работы программы от сокращения длины таблиц просто не заметно. Даже небольшое усложнение алгоритма не имеет практического смысла, поэтому в данном подходе используется именно такое содержание Таблиц признаков - по две строки на один признак.

В Таблице 1 приведены параметры Отличительных Признаков, построенной для рабочей Модели, изображенной на рис. 4.

Таблица 1. Параметры Отличительных Признаков Рабочей Модели

№ п.п.	Инд. 1	Инд. 2	L	α_1	β_1	α_2	β_2
1	3	4	73.6	-88.3	88.3	92.8	0.0
2	3	8	139.5	-88.3	27.8	84.2	34.7
3	3	12	202.2	-88.3	-53.7	77.9	61.6
4	4	3	73.6	92.8	-180.0	-88.3	-91.7
5	4	8	121.5	92.8	-92.3	84.2	2.8
6	4	12	264.1	92.8	-151.9	77.9	51.7
7	8	3	139.5	84.2	-145.3	-88.3	-152.2
8	8	4	121.5	84.2	-177.2	92.8	87.7
9	8	12	228.0	84.2	-84.0	77.9	24.4
10	12	3	202.2	77.9	-118.4	-88.3	126.3
11	12	4	264.1	77.9	-128.3	92.8	28.1
12	12	8	228.0	77.9	-155.6	84.2	96.0

В свою очередь, каждый фрагмент Карты операционной среды должен содержать Таблицу Параметров аналогичных Характерных Признаков, которая должна формироваться в ходе построения Карты и хранится в базе данных вместе с фрагментом Карты. Обычно в одном фрагменте Карты содержится 8-10, всего до 15 Базовых Точек, т.е. Таблица параметров Отличительных Признаков обычно не должна превышать 210 строк.

Построенные таким способом Таблицы параметров Отличительных и Характерных Признаков используются для оценки сходства Рабочей Модели

с очередным фрагментом Карты операционной среды. По этим Таблицам для каждого Отличительного Признака Рабочей Модели на фрагменте Карты ищется наиболее похожий Характерный Признак.

5. Оценка сходства Рабочей Модели и Карты среды

Оценка сходства Отличительных и Характерных Признаков проводится следующим образом. Сначала отбрасываются все пары Признаков, которые очевидно не похожи друг на друга. Критериями при этом является разница между соответствующими парами параметрами Признаков. Если абсолютная величина разницы между параметрами превышает некую максимально допустимую величину, то соответствующая пара Признаков квалифицируется как Признаки Рабочей Модели и Карты, не похожие друг на друга.

В первую очередь сравниваются длины отрезков–Признаков Рабочей Модели и фрагмента Карты:

$$\Delta L = \text{abs}(L_R - L_F) < K_1 \quad (1)$$

где:

- индексы **R** и **F** относятся к Рабочей Модели и к фрагменту Карты;
- коэффициент **K₁** подбирается эмпирически и принят равным 8 см.

Следует отметить, что в реальной операционной среде работа РБ-2 при оценке разницы длин отбрасывается, в среднем, до 85% пар Признаков, как не похожих друг на друга.

Далее, сравниваются углы на концах отрезков – Отличительных и Характерных Признаков:

$$\begin{aligned} \Delta \alpha_1 &= \text{abs}(\alpha_{1R} - \alpha_{1F}) < K_2 \\ \Delta \alpha_2 &= \text{abs}(\alpha_{2R} - \alpha_{2F}) < K_2 \\ \Delta \beta_1 &= \text{abs}(\beta_{1R} - \beta_{1F}) < K_2 \\ \Delta \beta_2 &= \text{abs}(\beta_{2R} - \beta_{2F}) < K_2 \end{aligned} \quad (2)$$

где:

- индексы **R** и **F** относятся к Рабочей Модели и к фрагменту Карты;
- коэффициент **K₂** подбирается эмпирически и принят равным 15 град.

Как правило, для каждого Отличительного Признака Рабочей Модели сравнение параметров в соответствии с условиями (1) и (2) выявляет только один похожий Характерный Признак на текущем фрагменте Карты или не выявляет ни одного. Иногда, очень редко, находится 2 или 3 похожих Признаков. В этом случае предпочтение отдается тому из претендентов, для которого следующая функция различия **Z** минимальна:

$$Z = C_1 \cdot \Delta L + C_2 \cdot (\Delta \alpha_1 + \Delta \alpha_2 + \Delta \beta_1 + \Delta \beta_2) \quad (3)$$

Здесь C_1 и C_2 – весовые коэффициенты, которые приняты $C_1 = 4$, $C_2 = 1$.

Оценка сходства Рабочей Модели производится со всеми фрагментами Карты операционной среды. Среди всех фрагментов Карты операционной среды, для которых найдены пары похожих Признаков, выбирается тот фрагмент, для которого следующая функция различия D минимальна:

$$D = \frac{1}{N_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_j} Z_i \quad (4)$$

Здесь:

N_j – число найденных пар похожих Отличительных и Характерных Признаков на j -ом фрагменте Карты операционной среды;

Z_i – рассчитываемое по формуле (3) значение функции различия между i -ым Признаком Рабочей Модели и похожим Признаком на j -ом фрагменте Карты.

6. Оценка положения робота

Теперь, после того как найден фрагмент Карты, у которого определен набор Признаков имеет наибольшее сходство с Отличительными Признаками Рабочей Модели, оценивается положение робота в пределах данного фрагмента.

Для этого, во-первых, определяется усредненная разность углов $\Delta\varphi$ между Отрезками–Признаками:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (\varphi_R - \varphi_F)_i \quad (5)$$

Здесь:

i – номер пары похожих Отличительного Признака Рабочей Модели и Характерного Признака выбранного фрагмента Карты операционной среды;

N – число пар похожих Признаков Рабочей Модели и выбранного фрагмента Карты операционной среды;

φ_R – угол наклона к оси X Отрезка-Признака Рабочей Модели в системе координат робота;

φ_F – угол наклона к оси X Отрезка-Признака фрагмента Карты в системе координат этого фрагмента.

Усредненная разность углов $\Delta\varphi$ является оценкой угла требуемого поворота системы координат Рабочей Модели относительно системы координат выбранного фрагмента Карты операционной среды. Если пересчитать с учетом $\Delta\varphi$ координаты соответствующих Базовых Точек рабочей Модели:

$$\begin{aligned} X_R &= x_R \cdot \cos \Delta\varphi + y_R \cdot \sin \Delta\varphi \\ Y_R &= y_R \cdot \cos \Delta\varphi - x_R \cdot \sin \Delta\varphi \end{aligned} \quad (6)$$

то можно оценить и сдвиг системы координат Рабочей Модели относительно системы координат выбранного фрагмента Карты:

$$\Delta X = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (X_R - X_F)_i$$

$$\Delta Y = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (Y_R - Y_F)_i$$
(7)

В выражениях (6) и (7):

X_R, Y_R – координаты Базовых Точек Рабочей Модели в системе координат робота;

X_R, Y_R – координаты Базовых Точек Рабочей Модели в системе координат выбранного фрагмента Карты;

X_F, Y_F – координаты Базовых Точек выбранного фрагмента Карты.

На рис. 7 представлена Рабочая Модель, изображенная на рис. 4, которая совмещена с фрагментом Карты операционной среды, изображенным на рис. 2.

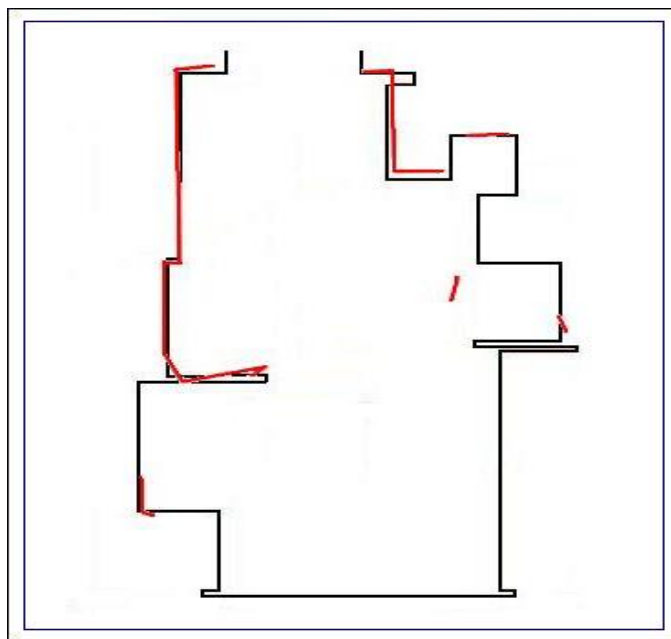


Рис.7. Рабочая Модель, совмещенная с фрагментом Карты

Сдвиг–поворот рабочей Модели производился в соответствии с величинами $\Delta\phi$, ΔX и ΔY , рассчитанными по формулам (5)–(7).

Заключение

Основными преимуществами данного алгоритма являются простота и скорость вычислений. Эксперименты показали, что бортовой компьютер робота РБ-2 тратит на этот алгоритм в среднем 3-7 мсек на один фрагмент Карты. Обычная городская квартира хорошо описывается картой, состоящей из 5–10 фрагментов, офисное помещение для 100 сотрудников фирмы описывается картой, состоящей из 50–80 фрагментов. Очевидно, что полный перебор всех фрагментов и поиск начального положения робота в таком помещении будет занимать не более 0.5 секунды.

Для оценки точности определения положения робота по описанному выше алгоритму была проведена серия экспериментов. Они показали, что данный метод позволяет по единственному скану дальномера определять угол положения робота со средней ошибкой в 5-10°, а координаты положения – со средней ошибкой 8-10 см. Для подавляющего большинства задач начальной навигации робота РБ-2 такой точности вполне достаточно.

Как показали эксперименты, точность определения положения робота зависит от нескольких факторов. В первую очередь, зависит от положения самого робота и от ракурса сканирования. Если сканер расположен таким образом, что Рабочая Модель состоит в основном из коротких отрезков или большая часть длинных отрезков ориентирована почти параллельно лучу сканирования, то в этих случаях результаты работы описываемого здесь алгоритма дают наибольшую погрешность. В этих условиях ошибка позиционирования может достигать 15° по углу и 20 см по координатам.

В данной работе точность определения ориентации и позиции робота оценивается относительно реальных препятствий в окружающей среде, в которой находится робот, а алгоритм определяет ориентацию и позицию робота относительно фрагмента Карты операционной среды. Как было указано выше, Карта, хранимая в базе данных робота, является упрощенным, стилизованным геометрическим образом операционной среды. Точность самой Карты составляет до 8° по углу и до 10 см по координатам. Можно утверждать, что точность получаемого этим способом определения положения робота соизмерима с точностью самой Карты.

Редко появляются такие неудачные ракурсы, что на Рабочей Модели невозможно выделить даже пару достоверных Базовых Точек и описываемый алгоритм просто невозможно применить. Выход из такого положения оказался достаточно простым. Роботу необходимо в любую сторону повернуться на 15–20 градусов и сдвинуться на 10–15 см. Как правило, такой маневр, меняет ракурс сканирования, а новый ракурс оказывается вполне пригодным для определения положения робота.

Область применимости предлагаемого в настоящей работе алгоритма ограничена помещениями с непериодической структурой геометрии окружения робота. В противном случае нет возможности получения искомым значений для всех параметров начального положения робота. Примерами таких "неудобных" помещений являются коридоры с дверьми, расположенными на равном расстоянии друг от друга, или читальные залы библиотек, где мебель расставлена рядами с почти равными промежутками. В помещениях такого рода, как правило, можно оценить лишь ориентацию робота и одну из координат его положения.

И следует также отметить, что область применимости этого алгоритма ограничена размерами помещений – их характерные размеры не должны заметно превышать дальность измерений лазерного сканера робота.

Список литературы

1. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Кугушев Е.И. Использование локальных ориентиров для определения положения мобильного робота. // Проблемы машинного зрения в робототехнике, М.: Ин-т прикл. матем. АН СССР, 1981, С. 31-47.
2. Кирильченко А.А., Зуева Е.Ю., Платонов А.К., Соколов С.М. Формальные подходы к проектированию алгоритмов информационного обеспечения мобильных систем (выбор пути, навигация, надежность) // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2008. № 19. 32 с.
3. Платонов А.К., Карпов И.И. Синтез и Моделирование на ЭВМ информационной системы шагающего аппарата. // Препринт ИПМ АН СССР, № 66, Москва, 1974, 49 с.
4. Герхен-Губанов Г.В., Кузнецов В.Г. Дальномерная обзорно-информационная система для распознавания трёхмерных объектов. //В сб.: VI Всесоюзный симпозиум по теории и принципам устройства роботов-манипуляторов . г.Тольятти, 1976, Секция II, С. 40-48.
5. Носков А.В., Носков В.П. Распознавание ориентиров в дальнометрических изображениях. // Материалы научной школы-конференции "Мобильные роботы и мехатронные системы" М.: Из-во МГУ, 2001. С.179-192.
6. Носков В.П., Носков А.В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №12. – С. 16-21.
7. Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П. Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ. // Мехатроника, автоматизация, управление. №8, 2014 С. 62—68
8. Кирильченко А.А. Интерпретация локальных относительных описаний среды подвижным роботом. // Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, 1983, № 149, 28 с.

9. Levitt T.S., Lawton D.T. Qualitative navigation for mobile robots. //Artif. Intell., 1990, v. 44, pp.305-360.
- 10.Кирильченко А.А. О представлении информационно-двигательного взаимодействия мобильного робота со средой на основе отношения видимости. // Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, 1987, №235, 28 с.
- 11.Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М. Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота. // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. 2002. № 5. 40 с.
- 12.Давыдов О.И., Платонов А.К. Сеть Пассфреймов – комбинированная Модель операционной среды мобильного робота. // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша, 2015, № 46. 28 с.
- 13.Masahiro Tomono. A Scan Matching Method using Euclidean Invariant Signature for Global Localization and Map Building, //Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, LA, USA. April 2004, pp. 866 - 871.
- 14.David Filliat, Jean-Arcady Meyer. Map-based navigation in mobile robots:A review of localization strategies. //Cognitive Systems Research 4 (2003), pp. 243–282.
- 15.M.Bosse, R.Zlot. Keypoint design and evaluation for place recognition in 2D lidar maps. In Robotics: Science and Systems Conference, // “Inside Data Association” Workshop, 2008.

Оглавление

Введение.....	2
1. Карта операционной среды.....	5
2. Построение рабочей модели.....	7
3. Общее описание алгоритма.....	10
4. Формирование отличительных признаков.....	11
5. Оценка сходства рабочей модели и карты среды.....	14
6. Оценка положения робота.....	15
Заключение.....	17
Список литературы.....	18