На правах рукописи

УДК 004.896:681.525

Герасимов Владимир Николаевич

СИСТЕМА НАВИГАЦИИ СЕРВИСНОГО РОБОТА В СРЕДЕ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Специальность 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Научный руководитель: **Михайлов Борис Борисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Андреев Виктор Павлович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник (ВАК), профессор кафедры «Сенсорные и управляющие системы» МГТУ «СТАНКИН»

Кучерский Роман Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры проблем управления Московского технологического университета (МИРЭА)

Ведущая организация: ГНЦ РФ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт «Робототехники и технической кибернетики», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 5 апреля 2016 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д. 10, ауд. 613м

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» февраля 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент И.В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Сегодня робототехника находит свое применение в сфере услуг. По всему миру сервисные роботы стали использоваться в музеях, аэропортах, магазинах, больницах и в других учреждениях, где требуются операции обслуживания, такие как: перемещение предметов (товаров, лекарств, и т.п.), патрулирование или уборка помещений, предоставление информационных ресурсов, и т.д. В сегменте роботов для населения становятся все более популярными машины, оказывающие непосредственную поддержку человеку. Например, роботы для телеприсутствия, позволяющие удаленно находиться в помещении и двигаться по нему, наблюдая происходящее с помощью бортовой видеокамеры. Подобные роботы могут использоваться в образовательных целях: в школах и ВУЗах, на различных выставках и форумах. В век информационных технологий сервисные роботы просто незаменимы, когда аудио- и видеосвязи недостаточно, поскольку робот позволяет не только перемещаться в пространстве, но и взаимодействовать с объектами.

Существующие сервисные роботы, в основном, функционируют в режиме телеуправления, который мало автоматизирован. Датчики на борту робота – инфракрасные и ультразвуковые дальномеры – позволяют избежать столкновений со статическими препятствиями, однако в динамической среде данный подход не обеспечивает безопасность движения. Для полноценного выполнения своих задач робот должен построить карту помещения, определять собственные координаты на ней, двигаться по заданному маршруту и при этом соблюдать меры безопасности. Данную проблему решает автоматическое движение робота с использованием навигационной системы, оставляя оператору только функцию целеуказания.

Во всем мире ведутся интенсивные исследования по технологиям навигации роботов с использованием сканирующего лазерного дальномера, с помощью беспроводных сетей, ориентиров, карты местности, в т.ч. трехмерной. Использование лазерного дальномера позволяет достичь наиболее высокой точности локализации.

Существующие системы навигации достаточно хорошо проработаны для применения в индустриальной сфере, которая полностью детерминирована и статична. В сфере услуг обстановка в корне отличается: помещение, в котором находится робот, наполнено подвижными препятствиями (людьми, другие роботами, животными). Поэтому автоматическое управление сервисным мобильным роботом в среде, содержащей подвижные препятствия, является актуальной научно-технической задачей.

В диссертации рассмотрены вопросы, связанные с разработкой навигационной системы сервисного мобильного робота на основе сканирующего лазерного дальномера, в состав которой входят алгоритмы одновременной локализации и построения карты (SLAM), планирования маршрута и система управления движением робота. При разработке навигационной системы были использованы методы преобразования нормальных распределений (NDT), сеточных функций, A* (A-звезда), эффективного пути и динамического окна.

К достоинствам системы можно отнести высокую точность локализации мобильного робота в помещении при эффективном использовании бортовых вычислительных ресурсов, а также оптимальное по времени движение к цели в условиях динамической среды.

Разработки навигационных систем ведутся в различных организациях как в нашей стране, так и за рубежом. Ключевыми в данном вопросе являются: университет Карнеги-Меллон (США), Стэнфордский университет (США), Боннский университет (Германия). В нашей стране это: НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, НУЦ «Робототехника», ЦНИИ РТК, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГТУ «Станкин», МИРЭА.

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является разработка и исследование навигационной системы мобильного робота на основе сканирующего лазерного дальномера для управления движением в среде с динамическими препятствиями. Для достижения цели в работе были поставлены и решены следующие задачи.

1. Разработать метод одновременной локализации и построения карты помещения (SLAM) по данным от сканирующего лазерного дальномера.
2. Предложить способ управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями.
3. Разработать программное обеспечение навигационной системы.
4. Провести математическое моделирование системы управления мобильного робота, оснащенного навигационной системой.
5. Провести экспериментальные исследования движения мобильного робота в среде с динамическими препятствиями.

Методы исследования

Для решения поставленных задач были привлечены классические методы теории автоматического управления, оптимального управления, теории вероятности, методы глобальной оптимизации, теории графов, современные способы фильтрации и математический аппарат цифровой обработки сигналов. Проверка работоспособности алгоритмов и оценка точности осуществлялась путем математического моделирования, проведением экспериментальных исследований в лабораторных условиях и испытаний системы на мобильном роботе.

Научная новизна

1. Разработан новый метод сеточных функций для одновременной локализации мобильного робота и построения карты помещения.
2. Предложен эффективный способ минимизации кросс-корреляционной функции для метода преобразования нормальных распределений.
3. Разработан новый способ управления движением сервисного робота в среде с динамическими препятствиями с использованием нового метода сеточных функций.
4. Предложен критерий оптимизации метода динамического окна для управления роботом при наличии динамических препятствий.

Практическая ценность

Разработан пакет программ для бортового компьютера, реализующий алгоритмы навигации мобильного робота, оснащенного сканирующим лазерным дальномером, для автономной работы в условиях среды с динамическими препятствиями. Предложенный алгоритм навигации позволяет эффективно решать задачи доставки грузов, патрулирования помещения и т. д. без участия человека в процессе управления.

Защищаемые положения

1. Новый метод одновременной локализации и построения карты помещения (SLAM) по данным сканирующего лазерного дальномера, позволяющий увеличить скорость движения робота.
2. Метод скользящей точки для минимизации кросс-корреляционной функции метода преобразования нормальных распределений, который улучшает его сходимость.
3. Способ управления движением мобильного робота с использованием разработанной навигационной системы, обеспечивающий движение в среде с динамическими препятствиями.
4. Способ определения параметров (трассировки) подвижных препятствий на основе данных от лазерного дальномера.
5. Модифицированный метод динамического окна (DW) для управления движением робота в среде с динамическими препятствиями, учитывающий вероятностный характер их движения.
6. Математическая модель навигационной системы сервисного робота, которая решает задачи обхода динамических препятствий.
7. Программная среда моделирования, позволяющая определить параметры навигационной системы и визуализировать процесс управления роботом.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на:

- Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2011);
- Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2012);
- 4-й научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления» (Москва, 2013);
- 7th International Workshop on Robotics for Risky Environment – Extreme Robotics «7th IARP RISE-ER'2013» (Saint-Petersburg, 2013);
- 5-й научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления» (Москва, 2014);
- 25-й, юбилейной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника (ЭР-2014)» (Санкт-Петербург, 2014);
- Научных семинарах кафедры «Роботы и робототехнические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011–2015 гг.

Публикации.

Результаты диссертационной работы отражены в 8 научных трудах, среди которых 2 публикации в изданиях из перечня ВАК РФ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 186 печатных страниц, 119 рисунков, 11 таблиц. Библиография содержит 59 наименований, из них 43 иностранных источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, представлена структура работы, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе рассмотрены примеры, подтверждающие актуальность исследования и разработки навигационной системы мобильного робота. Проведен обзор существующих законченных продуктов для решения задач навигации, а также основных алгоритмов их работы.

К современным решениям в области навигации мобильных роботов можно отнести продукты ARNL, CARMEN, KARTO, ROS – разработки фирмы Mobile Robots Inc. (США), университета Карнеги-Меллон, центра искусственного интеллекта Стэнфордского исследовательского института, команды Willow Garage (США), соответственно. На основе анализа этих работ была предложена следующая структура навигационной системы (Рис. 1).

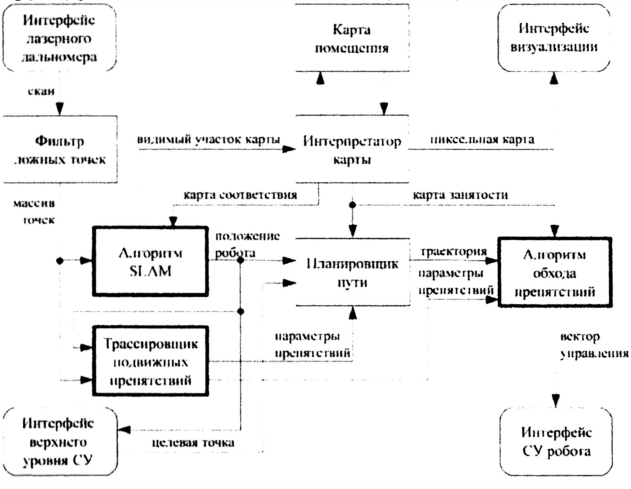

Рис. 1. Структура навигационной системы

Особенностью предложенной структуры является ее независимость от типа шасси мобильного робота, а также наличия датчиков одометрии, что позволяет использовать разрабатываемую навигационную систему на разных типах мобильных роботов. В свою очередь, это предъявляет высокие требования к алгоритму SLAM по точности, устойчивости и быстродействию.

В результате анализа сравнительных характеристик разных алгоритмов (Таблица 1), было выявлено, что наибольшей точностью при максимальном быстродействии обладают алгоритмы на основе минимизации кросс-корреляционной функции, а именно, метод преобразования нормальных распределений (NDT). Суть данного метода заключается в поиске максимального совпадения скана, взятого в текущем положении робота, с картой, которая накапливается в процессе его движения.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики алгоритмов SLAM

Алгоритм SLAM	ICP	IDC	Gmapping	Hector	NDT
Использование карты	нет	нет	да	да	да
Точность локализации, см	1,1	1,0	2,2	1,2	1,7
Границы устойчивости, см	12	20	н/д	10	3,5
Время решения SLAM, мс	1,9	3,7	7,1	6,1	2,2

Далее в диссертационной работе проведен обзор методов планирования пути. Были рассмотрены такие методы, как A* (A-звезда), D* (динамический A*), FD* (фокусированный динамический A*), Phi* (всенаправленный A*).

После этого автор рассмотрел существующие классические методы управления движением мобильного робота: управление с использованием линейных регуляторов, оптимальное управление, нечетко-логическое; а также специальные методы: эффективного пути и динамического окна. Последние особенно эффективны при работе в среде с динамическими препятствиями, поэтому они были выбраны для дальнейшего исследования.

Заканчивается первая глава конкретизацией задачи навигации сервисного мобильного робота, определением области исследования и обоснованием необходимости его проведения.

Вторая глава посвящена разработке алгоритма одновременной локализации и построения карты в следующих условиях. Имеется некоторое помещение с плоской подстилающей поверхностью, план которого неизвестен. В нем находится мобильный робот, статические и подвижные препятствия. Робот оснащен сканирующим лазерным дальномером, а данные одометрии недоступны. Необходимо определять положение мобильного робота в системе координат, связанной с помещением, в режиме реального времени и одновременно построить его карту, которая описывает неподвижные объекты.

В процессе решения поставленной задачи автор разбил ее на подзадачи:

1) фильтрация ложных измерений скана;
2) формирование участка карты из скана;
3) определение смещения текущего скана;
4) вычисление оценки перемещения мобильного робота;
5) обновление состояния карты, по данным текущего скана.

На первом этапе была решена задача фильтрации скана. При сканировании лазерным дальномером, в случае резкого перепада дальности, либо при измерении под «скользящим» углом имеют место ложные измерения. Их

эффективно удаляет предложенный фильтр, и полученный массив точек $s = \{\mathbf{x}_i\}$ пригоден для использования в алгоритме локализации.

Для решения задачи SLAM автор рассмотрел два подхода: метод нормальных распределений (NDT) и новый метод сеточных функций.

Особенностью первого метода является компактное описание модели рабочей среды робота – карты помещения. Она представляет собой совокупность квадратных ячеек, каждая из которых содержит параметры распределения точек, попавших внутрь нее в процессе сканирования (Рис. 2). В оригинальной работе предполагается, что положения точек скана в декартовой системе координат, связанной с помещением, порождаются двумерным случайным процессом. Тогда вероятность нахождения препятствия в точке $\mathbf{x}$ определяется функцией нормального распределения:

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Sigma|}} \exp\left(-\frac{(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}} \Sigma^{-1} (\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})}{2} \right),$$

где $\boldsymbol{\mu}$ и Σ – вектор матожидания и матрица ковариации распределения точек скана внутри ячейки, где находится точка $\mathbf{x}$. На Рис. 2,б темные области соответствуют наиболее высокой плотности вероятности.

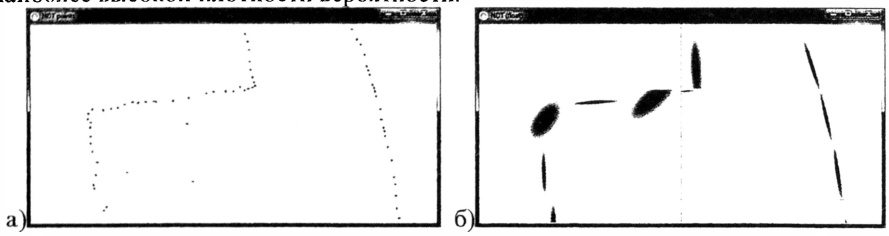

Рис 2. а) массив точек; б) плотность вероятности распределения точек в ячейках

Для эффективного наполнения карты автор предложил использовать рекуррентный фильтр, связанный с каждой ячейкой. Он обновляет параметры распределения точек по мере их добавления.

$$m_{k+1} = m_k + 1,$$

$$\boldsymbol{\mu}_{k+1} = \frac{\boldsymbol{\mu}_k \cdot m_k + \mathbf{x}}{m_{k+1}},$$

$$\Sigma_{k+1} = \frac{m_k}{m_{k+1}} \left[\Sigma_k + \frac{(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu}_{k+1})(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu}_{k+1})^{\mathrm{T}}}{m_{k+1}} \right],$$

где m_k – число точек в ячейке на k-й итерации.

Чтобы определить положение $\mathbf{p}$, из которого получен скан, необходимо найти такое преобразование координат текущего положения робота в систему координат помещения, при котором достигается наилучшее совпадение скана и карты, что соответствует их максимальной взаимной корреляции. Опуская промежуточные выводы, определим кросс-корреляционную функцию следующим образом:

$$\Psi(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N} \exp\left(-\frac{(\mathbf{T}(\mathbf{p})\tilde{\mathbf{x}}_i - \boldsymbol{\mu}_i)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} (\mathbf{T}(\mathbf{p})\tilde{\mathbf{x}}_i - \boldsymbol{\mu}_i)}{2} \right),$$

где N – число точек скана, $\mathbf{T}(\mathbf{p})$ – преобразование координат на плоскости, вычисленное в положении $\mathbf{p}$, $\tilde{\mathbf{x}}_i = \begin{pmatrix} x_i & y_i & 1 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$ – i-я точка скана в обобщенных координатах на плоскости.

Ввиду того, что карта помещения представлена суммой гладких двумерных функций, можно аналитически вычислить ее производные и использовать градиентные методы оптимизации. В диссертационной работе приведены выражения для их вычисления.

Для минимизации полученной функции автор предложил и исследовал два подхода: метод Ньютона и новый метод скользящей точки. Метод Ньютона является классическим, однако, ввиду дискретности и наличия локальных экстремумов, он не всегда сходится. Поэтому автор предложил другой подход: свести задачу минимизации функции к задаче интегрирования. Пусть по поверхности $-\Psi(\mathbf{p})$ движется материальная точка (Рис. 3). Движение определяется рельефом, свойствами поверхности (трение) и внутренним свойством точки – ее массой. Начальное положение точки находится методом перебора из некоторого множества. Координаты точки, по сути, представляют собой искомое положение робота $\mathbf{p}$.

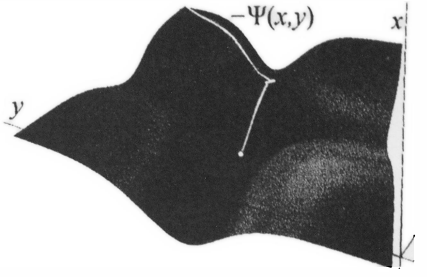

Рис. 3. Графическая интерпретация метода скользящей точки для двумерного случая

Движение материальной точки по поверхности описывается набором уравнений динамики:

$$\mathbf{F} = -\nabla\Psi(\mathbf{p}),$$

$$\dot{\mathbf{v}} = -\frac{1}{k_r}\mathbf{v} + \frac{\mathbf{F}}{m},$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{v}.$$

Здесь $\mathbf{F}$ – сила, действующая на материальную точку со стороны поверхности, ∇ – оператор градиента, $\mathbf{v}$ – скорость точки, m – ее масса, k_r – коэффициент сопротивления движению. Данный метод можно сравнить с методом градиентного спуска, но в отличие от него, «скользящая точка» обладает инерционностью, что позволяет преодолевать локальные минимумы. Наиболее эффективные значения параметров m, k_r зависят от свойств поверхности; в диссертации их выбор осуществляется путем математического моделирования.

Обновление карты в методе NDT проводится путем последовательного внесения информации об отсутствии препятствий в зоне видимости лазерного дальномера (очистка), а затем добавления точек текущего скана в ячейки карты, используя рекуррентные выражения, представленные выше.

Предложенный метод локализации был проверен при помощи моделирования. Полученные результаты не полностью удовлетворили поставленным требованиям, а, в частности, его недостаточная область сходимости приводит к ограничению скорости движения мобильного робота. Поэтому автор разработал новый метод SLAM.

Метод сеточных функций основан на сопоставлении скана и карты при помощи кросс-корреляционной функции. Однако для описания модели рабочей среды робота был предложен новый подход: преобразование скана в сеточную функцию. Для этого каждая точка скана преобразуется в некоторую непрерывную функцию, затем они объединяются при помощи выбранного принципа суперпозиции и накладываются на карту-сетку, тем самым образуя сеточную функцию.

При добавлении N точек скана s_k на карту $M(\mathbf{x})$, осуществляется их преобразование в двумерную функцию, которую можно представить как сумму двумерных дельта-функций Дирака с нулями в точках скана:

$$S_k(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{\delta}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i).$$

При обновлении карты функция скана преобразуется в некоторую гладкую функцию с помощью оператора $\Phi : \mathbf{x}_i \to f_i(\mathbf{x})$, которая затем накладывается на уже имеющуюся функцию на карте, с применением заданного принципа суперпозиции. В итоге получается следующее рекуррентное выражение добавления скана на карту:

$$M_k(\mathbf{x}) = M_{k-1}(\mathbf{x}) \oplus \Phi S_k(\mathbf{T}(\hat{\mathbf{p}}_k) \cdot \tilde{\mathbf{x}}).$$

Здесь $\tilde{\mathbf{x}}$ – точка на плоскости в обобщенных координатах, а символом $\oplus$ обозначен оператор суперпозиции, которым может быть арифметическое сложение, умножение, а также другие операторы, в т.ч. нелинейные.

На Рис. 4 показана графическая интерпретация описания участка некоторого помещения в виде карты-сетки с бинарным представлением (а), вероятностным (б) и с помощью суперпозиции сеточных функций (в).

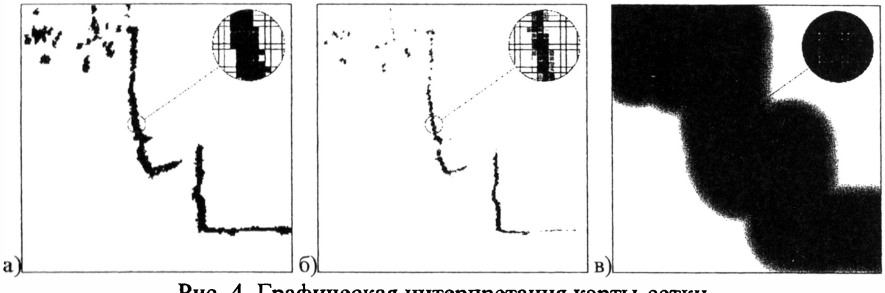

Рис. 4. Графическая интерпретация карты-сетки

Взаимная корреляция Ψ между текущим сканом s_k и картой – функцией рельефа помещения $M_{k-1}(\mathbf{x})$, накопленной преобразованием предыдущих сканов, находится стандартным способом при помощи выражения:

$$\Psi = \iint_D S_k(x,y) \cdot M_{k-1}(x,y)\,dxdy\,,$$

где D – область определения функции M (размер карты). Учитывая вид выражения функции скана, упростим вычисление взаимной корреляции:

$$\Psi = \sum_{i=1}^{N} M_{k-1}(\mathbf{x}_i)\,.$$

Кросс-корреляционная функция строится путем вычисления взаимной корреляции при различных значениях положения **p** мобильного робота, которое соответствует положению, откуда получен текущий скан.

$$\Psi(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{N} M_{k-1}(\mathbf{T}(\mathbf{p}) \cdot \tilde{\mathbf{x}}_i)\,.$$

В диссертационной работе подробно исследован вид $\Psi(\mathbf{p})$ в зависимости от вида порождающей функции и сделан вывод, что наилучшим образом подходит квадратичная. Для минимизации функции был использован модифицированный метод Ньютона, который отличается от классического наличием коэффициента K_c, влияющего на шаг приближения:

$$\Delta\mathbf{p}_k = -K_c \cdot \mathbf{H}\left(-\Psi(\mathbf{p}_{k-1})\right)^{-1} \cdot \nabla\left(-\Psi(\mathbf{p}_{k-1})\right).$$

Обновление карты помещения проводится аналогично рассмотренному ранее. Следует уточнить, что в качестве принципа суперпозиции автор использовал выражение $\max(M, \Phi S_k)$, поскольку оператор определения максимума является симметричным и непрерывным. Для очистки карты строится эквидистанта к многоугольнику, вершинами которого являются точки скана, и внутри области, ограниченной эквидистантой, значения функции обнуляются.

В конце главы автор приводит способ определения положения робота на карте, с использованием преобразования из системы координат лазерного дальномера в систему координат мобильного робота.

Сравнительный анализ двух рассмотренных методов локализации: NDT и сеточных функций – показал, что оба метода работоспособны и показали примерно одинаковые результаты, однако преимущество нового метода сеточных функций заключается в расширенной области сходимости, что позволило существенно увеличить скорость движения мобильного робота.

В третьей главе рассмотрены вопросы управления движением сервисного мобильного робота. Это планирование маршрута на карте, алгоритмы поиска и оценки параметров подвижных препятствий, способы управления роботом в динамической среде. В качестве объекта управления автор использовал трехколесный мобильный робот.

Для решения задачи управления в динамической среде в диссертационной работе предложен следующий алгоритм (Рис. 5).

На первом этапе решается задача планирования маршрута по построенной карте помещения. Для этого используется карта сеточных функций и алгоритм A*. Проверив различные эвристические функции, автор выбрал метод «укороченной диагонали» как наиболее эффективный по быстродействию.

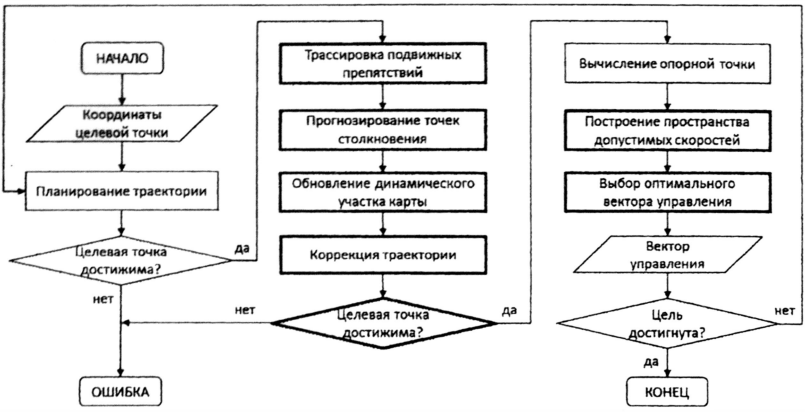

Рис. 5. Алгоритм управления сервисным роботом в динамической среде

Далее решается задача трассировки подвижных препятствий – определяется текущий вектор состояния каждого препятствия синхронно с получением нового скана. При этом полагается, что подвижные препятствия:

1) являются твердыми телами;
2) находятся на достаточном удалении от неподвижных объектов;
3) подчиняются уравнениям движения трехколесного мобильного робота;
4) могут быть описаны габаритной окружностью;
5) ориентированы вдоль вектора линейной скорости;
6) считаются статическими, если скорость их перемещения невелика.

Для построения списка препятствий, сначала проводится классификация и кластеризация точек скана. Затем для каждого объекта списка вычисляются параметры габаритной окружности. Для этого автор рассмотрел два способа: геометрический и с помощью МНК. Первый метод определяет окружность по крайним точкам выборки, и устойчив при малом числе точек в кластере. МНК позволяет более точно оценить положение центра окружности и ее радиус, но решение становится неустойчиво, если число точек мало.

Определение геометрических параметров позволило получить оценку полного вектора состояния препятствия (Рис. 6). В основе подхода автор использовал комплементарный фильтр, который позволяет объединить измеренное и предсказанное положение.

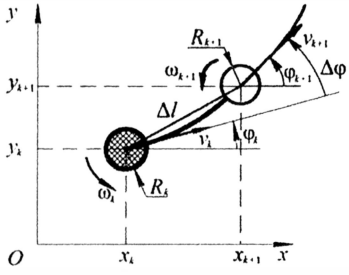

Рис. 6. Расчетная схема оценки вектора состояния препятствия

Сначала алгоритм предсказывает новое положение препятствия, интегрируя уравнения его кинематики. Затем, на основе предсказанного положения и параметров окружности, с помощью комплементарного фильтра рассчитывается (k+1)-я оценка положения объекта:

$$x_{k+1} = K \cdot x_{ku} + (1-K) \cdot x_{kp}, \qquad y_{k+1} = K \cdot y_{ku} + (1-K) \cdot y_{kp},$$

где x_{ku}, y_{ku} – измеренное, x_{kp}, y_{kp} – предсказанное положение препятствия, K – коэффициент фильтрации. Далее определяется длина перемещения и направление, вдоль которого оно было совершено:

$$\Delta l = \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}, \qquad \varphi_{ku} = 2\,\mathrm{arctg}\left(\frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k}\right) - \varphi_k.$$

Курсовой угол также проходит через комплементарный фильтр. Следует обратить внимание, что коэффициент в данном случае зависит от длины перемещения: чем больше длина, тем выше надежность измерения.

$$\varphi_{k+1} = K_\varphi \cdot \varphi_{ku} + (1-K_\varphi) \cdot \varphi_{kp}.$$

Линейная и угловая скорости находятся путем дискретного дифференцирования длины пройденного пути и приращения курсового угла:

$$v_{ku} = \frac{\Delta l}{h} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\varphi^2}{24}\right), \qquad \omega_{ku} = \frac{\varphi_{k+1} - \varphi_k}{h}.$$

Учитывая инерционность препятствия, полученные скорости и радиус габаритной окружности пропускаются через фильтр нижних частот, чтобы снизить шум после дифференцирования.

Для решения задачи следования вдоль спланированного маршрута и обхода подвижных препятствий автор рассмотрел два подхода: метод эффективного пути с линейными регуляторами и метод динамического окна.

Суть метода эффективного пути заключается в определении текущей опорной точки, к которой должен стремиться робот. Взяв за основу второй излом кусочно-линейной траектории, дополнительно вводятся ограничения на длину вектора эффективного пути: сверху – максимально возможное время беспрепятственного движения, и снизу – минимальный тормозной путь. Таким образом, длина эффективного пути адаптивно увеличивается при повышении скорости робота, и наоборот. Координаты опорной точки выдаются в качестве задающего сигнала в систему управления положением мобильного робота.

Данный подход позволяет двигаться в среде с подвижными препятствиями, рассматривая их как статические в каждый отдельный момент времени. Очевидно, что он не гарантирует эффективное маневрирование в динамической среде без столкновений. Поэтому автор модифицировал его так, чтобы изменять положение опорной точки в зависимости от наличия препятствий и параметров их движения. Ключевой момент модификации: сдвинуть опорную точку в зону, свободную от столкновений.

Несмотря на работоспособность алгоритма, автор отмечает недостаток данного подхода: при обходе препятствий маневр выполняется локально, что приводит к увеличению времени прохождения маршрута. Поэтому в

диссертационной работе отдельно рассмотрен алгоритм прогнозирования столкновений. Он работает следующим образом:

1. Экстраполировать траектории движения мобильного робота и препятствий по оценкам вектора состояния.
2. На динамическом участке карты очистить клетки, описывающие препятствия в их текущих положениях.
3. Рассчитать координаты точек и минимальное время пересечения траекторий мобильного робота и препятствий.
4. Добавить на динамический участок карты клетки, описывающие препятствия в точках пересечения траекторий.

Результаты моделирования подтвердили эффективность предложенного алгоритма, однако реальная траектория препятствия в общем случае не совпадает с экстраполированной, поэтому автор рассмотрел вероятностную модель прогноза (Рис. 7) и привел выражение для оценки плотности вероятности нахождения препятствия в некоторой точке в заданный момент времени.

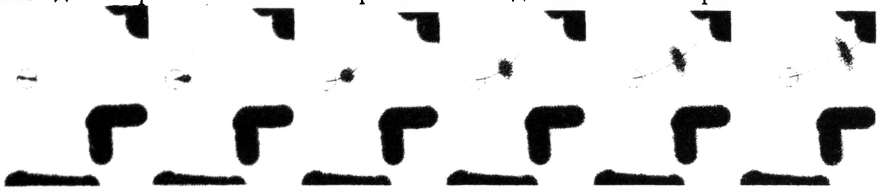

Рис. 7. Эволюция распределения положения препятствия во времени

Полученную оценку удобно использовать совместно с методом динамического окна. Он позволяет подобрать наиболее подходящее управление в текущий момент времени по заданному критерию. Суть метода заключается в выборе оптимального вектора скорости из допустимой области пространства скоростей, которая получила название «динамическое окно»:

$$V_r = V_s \cap V_a \cap V_d .$$

Здесь V_s – допустимые скорости; V_a – безопасные скорости, движение с которыми не приводит к столкновению; V_d – ограничения по ускорениям. В основе решения лежит поиск экстремума функционала в динамическом окне:

$$\left(v^* \quad \omega^*\right)^{\mathrm{T}} = \arg\operatorname{extr}\left(G(v,\omega)\right),$$

где $G(v, \omega)$ – критерий оптимальности – функционал, учитывающий степень совпадения траектории мобильного робота со спланированным маршрутом, а также расположение и траектории движения препятствий.

Выбор функционала является сложной задачей, требующей как логических, так и эвристических приемов. В диссертационной работе автор предложил использовать комплексный критерий следующего вида:

$$G(v,\omega) = \alpha \cdot G_L(v,\omega) + \beta \cdot G_P(v,\omega) + \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \lambda_k \cdot G_{D_k}(v,\omega).$$

Здесь $G_L(v, \omega)$ – критерий длины пути, свободного от статических препятствий, $G_P(v, \omega)$ – критерий близости траектории, $G_{Dk}(v, \omega)$ – критерий вероятности столкновения с k-м препятствием, α, β – весовые коэффициенты

соответствующих функционалов, λ_k – весовой коэффициент функционала k-го препятствия. Выражения для расчета критериев приведены в разделе 3.4.2.

Далее модифицируется пространство допустимых скоростей: траектории, которые приводят к столкновению с подвижными препятствиями, убираются из рассмотрения. Процедура минимизации критерия в данном случае выполняется методом перебора из дискретного пространства возможных скоростей. Полученный вектор скорости задается на вход приводного уровня СУ мобильного робота.

Проведя сравнительный анализ рассмотренных методов, автор отмечает эффективность работы метода динамического окна при большом числе подвижных препятствий. Таким образом, в третьей главе диссертации решена задача управления мобильным роботом в динамической среде.

Четвертая глава посвящена разработке ПО, математическому моделированию и экспериментальному исследованию разработанной навигационной системы.

Основное внимание при разработке ПО было уделено модульной структуре с распределением функций, что позволило выполнять сложные вычисления на стационарном компьютере, обмениваясь с бортовым вычислителем робота через TCP-соединение.

Для проверки работоспособности предложенных методов и оценки их параметров было проведено математическое моделирование. В качестве объекта управления использовалась классическая динамическая модель трехколесного мобильного робота. Чтобы визуализировать процессы, протекающие при моделировании, а также реализовать выбор параметров мобильного робота, помещения, лазерного дальномера, числа и поведения препятствий, автор разработал специальное ПО – среду моделирования. Пример проведения моделирования показан на Рис. 8.

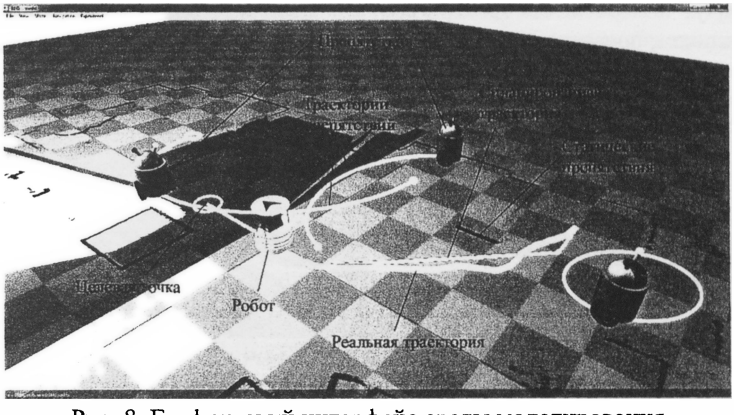

Рис. 8. Графический интерфейс среды моделирования

С помощью разработанного ПО были определены точность и границы применимости метода SLAM навигационной системы (Таблица 2), а также проведена оценка качества управления движением модели мобильного робота.

Таблица 2.

Результаты работы алгоритма SLAM при моделировании

Параметр	Значение
Погрешность оценки линейного перемещения, см	0,064±1,770
Погрешность оценки угла поворота	-0,015°±0,225°
Радиус сходимости по линейному перемещению, см	39,3
Радиус сходимости по углу поворота	12,8°
Время локализации, мс	0,54
Время обновления карты, мс	7,92
Максимальное отклонение карты от эталона, см	5
Использование памяти для хранения карты, КБ	64000

Для подтверждения результатов моделирования был проведен ряд экспериментов. В диссертационной работе приведены типовые эксперименты: построение карты помещения, определение точности локализации и оценка качества управления роботом при наличии динамических препятствий. В экспериментах было использовано следующее оборудование:

Эксперимент	Построение карты	Движение
Помещение	учебная лаборатория, 44 м^2	учебная лаборатория, 72 м^2
Макет робота	платформа iRobot Create	мобильная платформа МРК
Дальномер	SICK LMS-200	Hokuyo URG-04LX
Вычислитель	Intel Core i3, 2,3 ГГц, ОЗУ: 2 ГБ.	

В первом эксперименте автор, управляя роботом в ручном режиме, построил карту помещения (Рис. 9,а), чем доказал работоспособность предложенного алгоритма SLAM. При этом максимальное отклонение от плана помещения составило 5 см. Измеренная точность локализации робота составила 0,68 ± 0,45° по углу поворота и 0,4 ± 0,8 см по положению, что является хорошим результатом, превышающим существующие аналоги (Таблица 1).

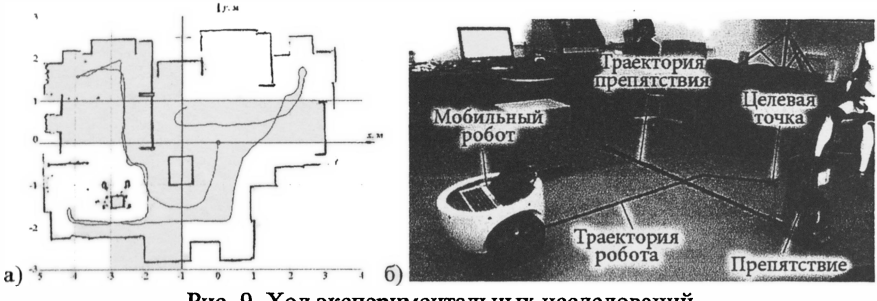

Рис. 9. Ход экспериментальных исследований

Цель второго эксперимента – проверить возможность автоматического движения робота в условиях динамичной среды. Начальное расположение мобильного робота и препятствия показано на Рис. 9,б. Робот спланировал траекторию и начал двигаться к целевой точке. Одновременно по команде оператора начал движение второй робот, который имитировал динамическое препятствие, поскольку траектория его движения пересекала спланированную. Как видно из графиков (Рис. 10,а), алгоритм трассировки позволил оценить

параметры подвижного препятствия, и навигационная система обеспечила движение робота к целевой точке, с выполнением маневра обхода этого препятствия, что видно по графикам скоростей робота на Рис. 10,б.

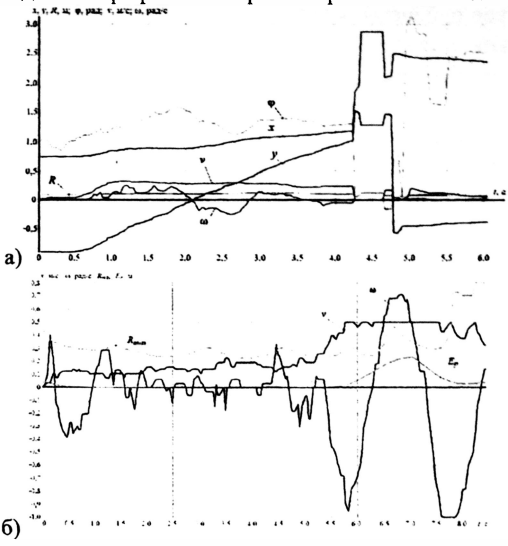

Рис. 10. а) вектор состояния препятствия; б) профиль скоростей робота.

Результаты эксперимента подтвердили работоспособность алгоритма управления движением робота со следующими показателями качества: длина пройденного пути $L_{path} = 2{,}4 \pm 0{,}6$ м, время прохождения маршрута $T_{path} = 6{,}8 \pm 1{,}3$ с, максимальное отклонение от спланированной траектории $D_{max} = 0{,}5 \pm 0{,}2$ м.

Разработанная навигационная система была использована в реальном сервисном роботе МРК, разработанном в ООО «Нейроботикс». Он предназначен для патрулирования помещений с целью поиска лиц с измененным психоэмоциональным состоянием. Область применения робота: вокзалы, аэропорты, торговые центры и другие места массового скопления людей.

По результатам испытаний можно сделать вывод о работоспособности созданной навигационной системы. Задачи, поставленные в первой главе, решены успешно. Полученная навигационная система может быть установлена на любой мобильный робот, оснащенный сканирующим лазерным дальномером, где для выполнения задач верхнего уровня необходимо автоматическое движение робота в помещении с динамическими препятствиями.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен обзор существующих методов и алгоритмов навигации мобильного робота, выбраны наиболее эффективные из них, отмечены их недостатки.

2. Разработан новый метод одновременной локализации и построения карты помещения по информации от сканирующего лазерного дальномера.

3. Выбран и исследован способ планирования траектории.

4. Предложен способ определения параметров динамических препятствий.

5. Предложен метод управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями по информации от лазерного дальномера.

6. Разработано программное обеспечение, реализующее алгоритмы навигационной системы.

7. Проведено моделирование навигационной системы сервисного робота, исследована ее работоспособность и получены основные параметры.

8. Проведены экспериментальные исследования разработанной навигационной системы на различных мобильных роботах, результаты которых подтвердили ее работоспособность в реальных условиях при наличии динамических препятствий.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Герасимов, В.Н. Алгоритм SLAM на основе корреляционной функции // Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. СПб: Изд-во «Политехника-сервис». 2015. С. 101–106. (0,35 п. л.)
2. Герасимов, В.Н. К вопросу управления движением мобильного робота в динамической среде // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1(2). С. 44–51. (0,5 п. л.)
3. Герасимов, В.Н. Решение задачи локализации мобильного робота в помещении / В.Н. Герасимов, Б.Б. Михайлов // Труды XXII международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб: Изд-во «Политехника-сервис». 2011. С. 441–449. (0,5 п. л. / 0,25 п. л.)
4. Герасимов, В.Н. Решение задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий / В.Н. Герасимов, Б.Б. Михайлов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". М. 2012. Спец. выпуск № 6 "Робототехнические системы". С. 83–92. (0,6 п. л. / 0,3 п. л.)
5. Герасимов, В.Н. Система управления движением мобильного робота в среде с динамическими препятствиями // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2013. №5(181). С. 94–102. (0,5 п. л.)
6. Герасимов, В.Н. Способ обхода динамических препятствий при управлении мобильным роботом / В.Н. Герасимов, Б.Б. Михайлов // Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. СПб.: Изд-во «Политехника-сервис». 2012. С. 126–133. (0,5 п. л. / 0,25 п. л.)
7. Герасимов, В.Н. Способ определения параметров динамических препятствий по данным лазерного дальномера // 21 век: фундаментальная наука и технологии: Материалы III международной научно-практической конференции. М. 2014. Т.3. С. 155–157. (0,15 п. л.)
8. Gerasimov, V.N. To the problem of mobile robot motion control in the dynamic environment // Proceedings of the 7th International Workshop IARP RISE-ER'2013. СПб.: Изд-во «Политехника-сервис». 2014. С. 320–327. (0,5 п. л.)