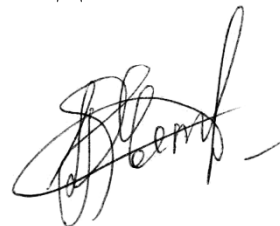


На правах рукописи

УДК 004.896:681.5



Девятериков Егор Анатольевич

**МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ СИСТЕМА АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ
АВТОМАТИЧЕСКОГО ВОЗВРАЩЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ВИЗУАЛЬНОГО ОДОМЕТРА**

Специальность 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в
«Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана»

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

Официальные оппоненты: **Соколов Сергей Михайлович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий сектором, «Институт прикладной
математики им. М.В. Келдыша Российской академии
наук» (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН).

Гришин Владимир Александрович,
кандидат технических наук, доцент, «Институт
космических исследований Российской академии
наук» (ИКИ РАН).

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

Защита состоится «15» ноября 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 МГТУ им. Н.Э. Баумана и на
сайте www.bmstu.ru.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент



И.В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время при выполнении разведывательных работ в опасных для человека условиях обычно используются дистанционно управляемые колесные и гусеничные мобильные роботы, что позволяет разместить специалистов вне опасной зоны и сохранить здоровье людей. Проблемы возникают при потере связи, ухудшении видимости и в других ситуациях, когда невозможно использовать ручное управление. Например, мобильный робот выполняет разведку территории химического завода после пожара. Если, находясь далеко от оператора, робот заедет за массивные металлические конструкции, может произойти потеря связи. То же происходит при радиационном облучении или повреждении приемо-передатчика. Кроме того, при задымлении оператору сложно ориентироваться по изображениям бортовых телекамер. В результате затрудняется оперативный вывод робота из неблагоприятных условий, и как следствие - повреждение или потеря дорогостоящего оборудования.

При отсутствии дистанционного управления применяются системы автоматического возвращения робота к оператору, которые используют средства автономной навигации. В настоящее время для определения собственных координат мобильного робота широко применяются: энкодеры, инерциальные системы, GPS, радиомаяки, дальномеры, оптические системы одновременной локализации и картографирования (SLAM). Однако их применение в данном случае имеет свои недостатки. Точность колесной одометрии снижается при проскальзывании колес. Инерциальная система требует постоянного интегрирования, что ведет к накоплению ошибки. GPS имеет низкую локальную точность при движении вдоль массивных сооружений и в помещениях. Маяки требуют предварительной установки и привязки на карте рабочего пространства, что не всегда приемлемо в экстремальной ситуации. Лазерный дальномер дорогой, ему нужны объекты в зоне видимости и сложный алгоритм привязки к ним. Активно развивающиеся сегодня SLAM системы с применением телекамер и дальномеров чувствительны к изменениям в окружающей среде, стеснены в размерах карты и требуют больших вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение на открытой местности и в недетерминированной среде.

В условиях недетерминированной среды, когда нет точек отсчета, реперов (стационарных маяков) или в изменяющейся среде при отсутствии стационарных объектов, перечисленные средства навигации не всегда обеспечивают достаточно точное измерение текущих координат робота на последнем участке траектории для его автоматического возвращения. Развивающимся методом является визуальная одометрия – способ автономной оценки собственного перемещения робота по изображениям бортовых телекамер путем счисления координат, который не имеет перечисленных недостатков. Визуальная одометрия не требует наличия заранее известных точек отсчета или маяков; позволяет оценить текущее положение робота в изменяющейся среде; нечувствительна к проскальзыванию колес; позволяет ориентироваться по подстилающей поверхности и не требует наличия стационарных объектов. Поэтому визуальная одометрия может компенсировать недостатки традиционных датчиков при совместном использовании с ними. При этом многие вопросы комплексирования показаний

визуального одометра с данными других датчиков и его реального применения в составе систем навигации мобильных роботов остаются непроработанными.

Объектом исследования являются системы автономной локальной навигации и автоматического управления движением наземных мобильных роботов в условиях недетерминированной среды.

Предметом исследования является метод визуальной одометрии и применение его в сочетании с другими традиционно применяемыми навигационными датчиками для решения задачи автоматического возвращения мобильного робота и повышения точности навигации в недетерминированной среде при проскальзывании колес.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка аппаратно-программных средств системы автономной навигации для автоматического возвращения мобильного робота по данным визуального одометра и других датчиков. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

- Разработан визуальный одометр для мобильного робота.
- Разработана система управления мобильным роботом с визуальным одометром в цепи обратной связи.
- Предложены алгоритмы описания траектории и автономного возвращения мобильного робота по ней с использованием данных визуальной одометрии.
- Разработан метод комплексирования показаний визуального одометра и других датчиков автономной навигации.
- Выполнены экспериментальные исследования автоматического возвращения мобильного робота с предложенной системой навигации.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели были использованы методы теории автоматического управления, вероятностные методы, современные способы обработки изображений и математический аппарат цифровой обработки сигналов. Проверка работоспособности алгоритмов и оценка точности навигации и автоматического возвращения осуществлялась путем математического моделирования, проведением экспериментальных исследований и испытанием системы на мобильном роботе. Для обработки полученных результатов применялись методы математической статистики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Предложен новый способ решения задачи автоматического возвращения мобильного робота к оператору в условиях недетерминированной среды с применением визуальной одометрии.
- Предложен новый алгоритм описания пройденной траектории с использованием данных визуальной одометрии.
- Предложен новый способ комплексирования данных визуального одометра и других датчиков автономной навигации на основе оценки точности каждого его показания.

Практическая ценность и внедрение. Применение мультисенсорной системы навигации с использованием визуального одометра позволило выполнять

автоматическое управление движением мобильного робота, в том числе его возвращение на последнем участке траектории в недетерминированной изменяющейся среде без известных точек отсчета и при проскальзывании колес. Применение предложенного алгоритма описания траектории позволило сохранять ее по зашумленным данным визуальной одометрии, избежать повторения замкнутых участков при возвращении. Использование предложенного способа комплексирования данных визуального одометра и других датчиков автономной навигации на основе оценки точности каждого его показания позволило улучшить точность навигации робота в неблагоприятных условиях.

Применение этого способа не ограничивается поставленной задачей. Он позволяет применять визуальный одометр с зашумленными, нестабильными показаниями совместно с другими распространенными датчиками, взаимно компенсировать их недостатки, например, исключить ошибку проскальзывания колес и, напротив, снизить ошибку визуальной одометрии в темноте. Добавление визуального одометра с предложенным алгоритмом оценки позволяет улучшить точность и надежность существующей навигационной системы мобильного робота и расширить возможности ее применения в экстремальных условиях.

На защиту выносятся:

- Решение задачи автономного возвращения мобильного робота к оператору в условиях недетерминированной среды с применением метода визуальной одометрии в сочетании с традиционными способами автономной навигации.

- Результаты исследования способов поиска особых точек на изображении для визуальной одометрии и вариантов оценки перемещения робота.

- Система управления мобильным роботом с визуальным одометром в цепи обратной связи по положению.

- Способы описания пройденной траектории и возвращения по ней с использованием данных визуального одометра.

- Новый метод оценки точности показаний визуального одометра для их комплексирования с информацией других датчиков автономной навигации робота.

- Пакет программ для исследования работоспособности разработанной системы навигации для возвращения, предложенных методов и алгоритмов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на:

- Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2012 г.);

- 7th IARP RISE-ER'2013 «Robotics for Risky Environment – EXTREME ROBOTICS» (Санкт-Петербург, 2013 г.);

- International Scientific and Technological Conference «EXTREME ROBOTICS» (Saint-Petersburg, 2014);

- Научных семинарах НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2012-2015 гг.).

- Международных научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2011 г., 2015 г.);

- Научно-технических конференциях «Техническое зрение в системах управления» (Москва, 2011 г., 2012 г., 2014 г., 2016 г.);

Публикации. Результаты диссертационной работы нашли отражение в 8 научных трудах, в том числе 3 публикации в изданиях из перечня ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6-ти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем работы составляет 159 печатных страниц (включая 9 страниц приложений), 65 рисунков, 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, изложена краткая структура диссертации, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены примеры мобильных роботов, применяемых на них навигационных датчиков и проблемы, возникающие при автоматическом движении и возвращении по их данным, подтверждена актуальность исследования. В обзоре показано, что наиболее распространены сегодня наземные колесные и гусеничные роботы для разведки опасной территории. Исходя из характеристик таких роботов, например: РТК-05, -08, -10 (ЦНИИ РТК); «Скаут», «Пластун» (НУК «Робототехника» МГТУ); роботов полиции (SR-10), определены требования к системе навигации для возвращения: работа в недетерминированной изменяющейся среде при отсутствии стационарных ориентиров, движение на открытых участках рядом с массивными сооружениями и в помещении.

Затем рассмотрены применяемые на подобных роботах комбинации датчиков и способы возвращения по их данным. Глобальные навигационные системы GPS и ГЛОНАСС не накапливают ошибку, но чувствительны к наличию препятствий на пути сигнала. Они не обеспечивают достаточную точность и частоту измерений для обработки локальной траектории при движении вдоль массивных сооружений и в зданиях. Точность навигации по радиомаякам в этих случаях так же снижается, а их установка не всегда приемлема в экстремальной ситуации. Развивающиеся системы одновременной локализации и картографирования (SLAM) по данным телекамер и дальномеров не накапливают ошибку, но не всегда позволяет точно измерять координаты в задачах локальной навигации. Вычислительная сложность вынуждает выбирать между локальной точностью и анализом сцены для ее распознавания. Для ориентирования такой системе нужны узнаваемые объекты, которых может не быть на последнем участке траектории. Метод чувствителен к изменениям в среде и его производительность снижается при увеличении карты.

Средства автономной навигации, такие как колесная одометрия и инерциальные датчики, позволяют оценить положение робота путем счисления координат. Они менее требовательны к окружающей среде и широко используются для локальной навигации, но даже при комплексовании

нескольких датчиков накапливается существенная ошибка измерения координат в неблагоприятных условиях, например, при проскальзывании колес.

Развивающимся сегодня методом является визуальная одометрия - способ автономной оценки собственного перемещения робота по изображениям бортовых телекамер путём счисления координат. Она так же измеряет приращения координат и накапливает ошибку, но не имеет многих недостатков рассмотренных датчиков: нечувствительна к проскальзыванию колес, работает в изменяющейся недетерминированной среде, не требует наличия стационарных объектов и в целом менее требовательна к качеству изображений, чем SLAM. Преимущества «+» и недостатки «-» рассмотренных способов навигации, применяемых для управления движением робота сведены в сравнительную Таблицу 1.

Таблица 1.

Сравнение способов навигации

Особенности средства навигации	GPS	Маяки	SLAM	Колесная и инерциальная одометрия	Визуальная одометрия
Измеряет абсолютные координаты	+	+	+	-	-
Высокая точность на коротких участках	-	-	+/-*	+	+
Работает в недетерминированной среде	+	-	+	+	+
Высокая точность в помещении	-	-	+	+	+
Произвольный размер территории.	+	-	-	+	+
Инвариантна к проскальзыванию колес	+	+	+	-	+
Работает без стационарных объектов	+	-	-	+	+
Инвариантна к изменениям в среде	+	+	-	+	+
* Метод SLAM не всегда точен на последнем новом участке траектории, когда не удастся найти ориентиры или соответствие наблюдаемой сцены и карты.					

Рассмотренные датчики из-за перечисленных недостатков не всегда обеспечивают достаточную точность измерения координат на последнем участке траектории. Визуальная одометрия может компенсировать эти недостатки, поэтому целесообразно решение задачи автономного возвращения с применением визуальной одометрии совместно с традиционными датчиками. В основном в диссертации рассматривается возвращение робота на последнем участке траектории. Заканчивается 1-я глава конкретизацией задач исследования.

Вторая глава посвящена разработке визуального одометра. Необходимость этого обоснована ограниченным доступом к исходным кодам современных реализаций и сложностью анализа источников возникающих в них погрешностей. На Рис. 1 показана последовательность работы визуального одометра. Для его работы периодически вводятся пары изображений со стереокамеры, для которых последовательно выполняются процедуры, показанные на Рис. 1.

Изображения выравниваются таким образом, чтобы точки левого изображения и соответствующие точки правого лежали на одних горизонтальных линиях. Для этого удаляются радиальные и тангенциальные искажения и

применяется эпиполярная геометрия. Конечный перенос каждого пикселя зависит только от его положения и рассчитывается один раз при калибровке. При поступлении нового изображения его пиксели быстро переносятся по таблице.

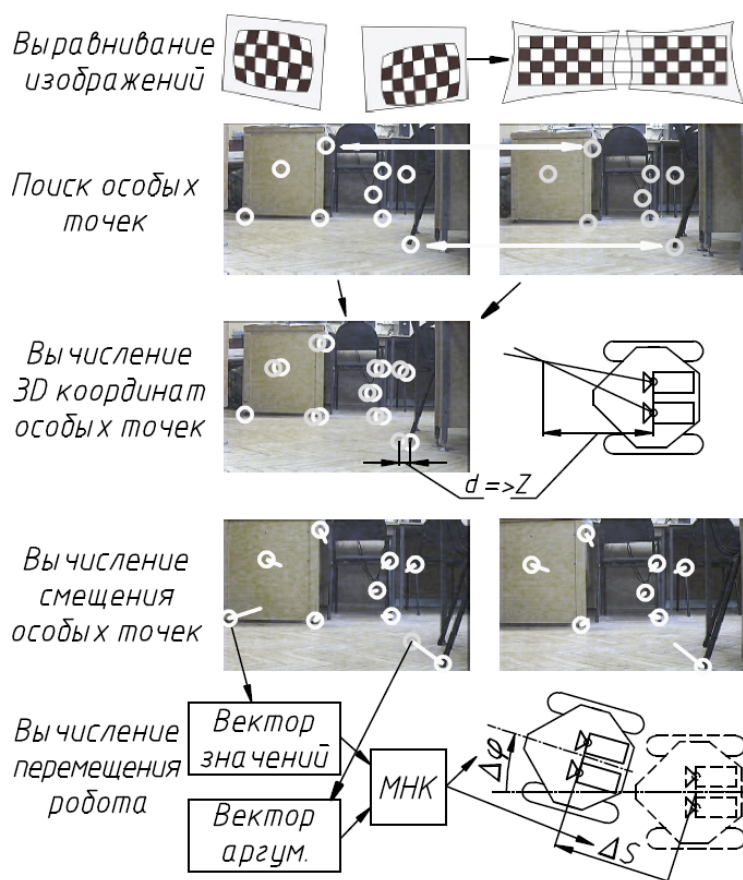


Рис. 1. Последовательность работы визуального одометра.

по разнице ее изображений с двух телекамер. Для поиска соответствующих точек левого и правого изображения применяется метод Люкаса и Кенедэ с широким окном поиска и масштабированием. Так же применяется фильтрация, основанная на допущении о том, что их взаимное положение в пространстве несущественно изменяется за время смены кадров, использованная, например, Хиршмюллером.

Вычисление смещения особых точек. Чтобы вычислять смещение робота, отслеживается изменение положения особых точек на изображении с течением времени. Для этого использован алгоритм Люкаса и Кенедэ и фильтрация Хиршмюллера.

Вычисление перемещения робота осуществляется при анализе смещения особых точек относительно системы координат робота во время движения. Это статистическая задача, точность ее решения достигается за счет большого количества особых точек. На Рис. 2 показано перемещение системы координат робота за время смены кадров. Система координат $O^0 X^0 Y^0 Z^0$ неподвижна. $O^C X^C Y^C Z^C$ – положение системы координат робота в текущий момент времени. $O^P X^P Y^P Z^P$ – в некоторый предыдущий момент времени. M_i – неподвижные особые точки пространства. Пусть координаты i -й особой точки пространства в системе координат робота в текущий момент времени

Поиск особых точек. На левом изображении находятся особые точки, которые можно устойчиво отличать от других, например, углы объектов, пятна, резкие перепады яркости и т. д. На правом изображении находятся соответствующие им точки. В работе рассмотрено 3 метода поиска особых точек: классический метод Гарриса; быстрый FAST (Features from Accelerated Segment Test); надежный SURF (Speeded-Up Robust Features). По результатам моделирования и экспериментов был выбран метод Гарриса, более надежный, чем FAST и более быстрый, чем SURF. Он позволяет достичь высокой точности за счет количества найденных точек.

Пространственные координаты каждой особой точки вычисляются при решении задачи триангуляции

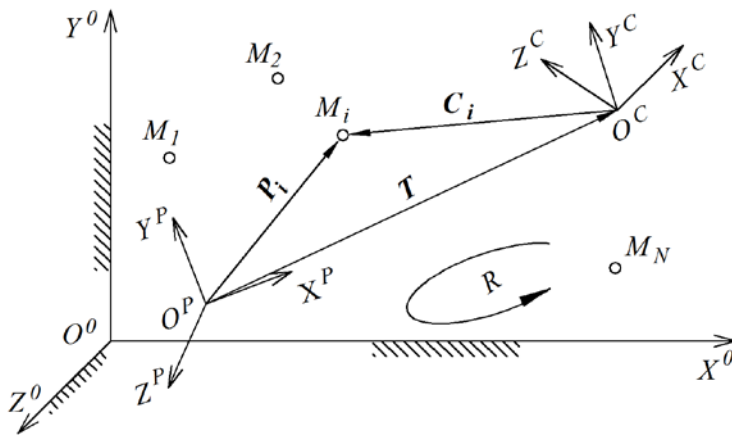


Рис. 2. Перемещение системы координат робота.

$C_i = (X_i^C \ Y_i^C \ Z_i^C)^T$, координаты той же точки пространства в некоторый предыдущий момент времени $P_i = (X_i^P \ Y_i^P \ Z_i^P)^T$, найдено N точек. Изменение положения системы координат робота будем описывать в виде:

$$C_i = RP_i + T, \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где $T = (\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z)^T$ - вектор переноса, R - матрица поворота.

Задача состоит в получении оценки T и R при решении

переопределенной СЛАУ (1) методом наименьших квадратов (МНК). Текущие координаты робота оцениваются при счислении смещений T и R . Чем больше неизвестных приняты постоянными как свойство модели, тем менее решение чувствительно к ошибке определения координат особых точек. В работе рассмотрено 3 способа решения:

- 1) нахождение всех 6-ти координат по данным как минимум о 4-х точках;
- 2) нахождение 2-х координат для 3-х колесного робота ($\Delta Y = 0$, углы крена и тангажа постоянны, боковое смещение отсутствует $\Delta X = 0$) по одной точке;
- 3) Нахождение 3-х координат: линейного и бокового смещений на плоскости (ΔZ и ΔX) и угла курса как минимум по 2-м точкам.

Алгоритм визуальной одометрии был реализован в виде программы. Для ее проверки и отладки была создана трехмерная модель, которая содержала две виртуальные телекамеры и простые объекты. На модели была проверена работоспособность алгоритма и влияние различных факторов на его точность, настроены параметры функций. При программном перемещении телекамер по замкнутой траектории ошибка вычисления координат в исходной точке не превысила 5%, что подтвердило возможность использования алгоритма для вычисления координат робота.

Для экспериментальной проверки был собран и установлен на мобильный робот макет визуального одометра. Изображения записывались, а затем обрабатывались с применением различных методов поиска особых точек и оценки перемещения робота. Для поиска особых точек был выбран метод Гарриса. Для оценки перемещения 3-й способ: расчет пройденного пути, угла курса и бокового смещения. В Таблице 2 представлены полученные характеристики одометра.

Таблица 2.

Характеристики визуального одометра

Характеристика	Обознач.	Величина	Ед. изм.
Время обработки пары изображений	Δt	0.100	с
Погрешность измерения длины пути	δS	7	%
Погрешность измерения угла курса	$\delta \varphi$	10	%

В третьей главе была разработана система управления мобильного робота с визуальным одометром в обратной связи по положению, показанная на Рис. 3.

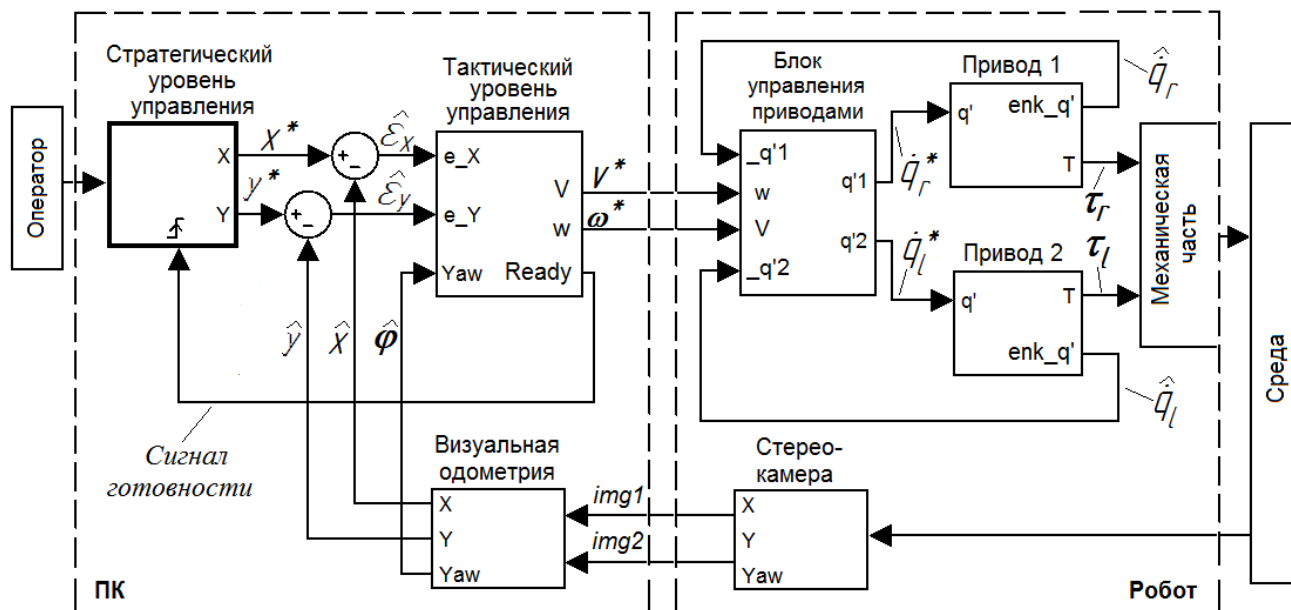


Рис. 3. Система управления мобильного робота с визуальным одометром.

Группа «ПК» была реализована в виде программ на компьютере. Робот автоматически движется по заданным оператором точкам траектории. «Визуальный одометр» оценивает текущие координаты \hat{X} , \hat{Y} и курс робота $\hat{\phi}$. Блок «Стратегического управления» выдает координаты X^* и Y^* очередной точки, а на «Тактическом» уровне на основе ошибок по положению $\hat{\epsilon}_X$, $\hat{\epsilon}_Y$ и оценки текущего угла курса $\hat{\phi}$ формируются сигналы линейной V^* и угловой ω^* скорости.

Система управления была промоделирована с учетом характеристик одометра, полученных в Главе 2. В модели были учтены: квантование по времени, задержка и ошибки измерения координат. С ее помощью выполнено исследование движения робота по данным визуального одометра. Результаты показали, что его использование обеспечивает управление движением робота со скоростью до 1 м/с и точностью около 14% от длины пути.

Для экспериментальной проверки система была установлена на мобильный робот. Он перемещался по замкнутой траектории и оценивалась погрешность выхода в исходную точку. Разброс его конечных положений показан крестами на Рис. 4. Визуальный одометр достаточно точно измерял линейное перемещение, но накапливал ошибку по углу курса.

Эксперимент подтвердил, что он может быть использован для возврата к оператору при наличии дополнительного датчика угла.

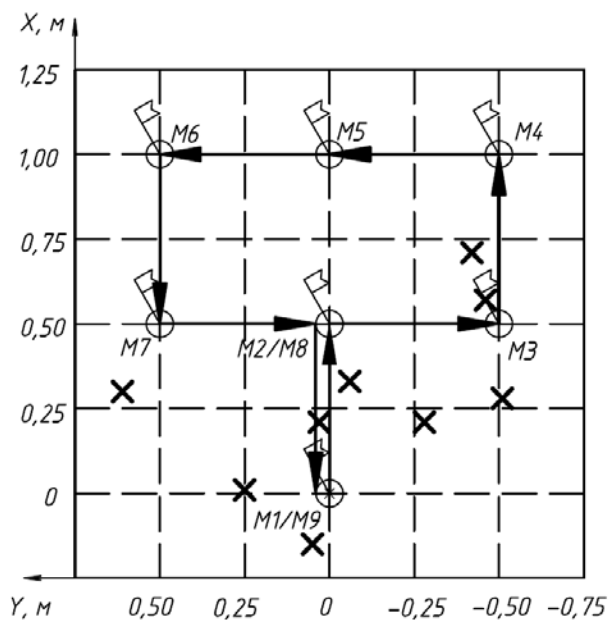


Рис. 4. Разброс конечных положений робота в 9-ти заездах.

В четвертой главе были разработаны алгоритмы описания траектории и автоматического возвращения по ней. Данные визуальной одометрии имеют низкую частоту 10 Гц, высокую дисперсию и нестационарный шум, что не позволяет использовать частотные методы фильтрации применяемые для других датчиков. Поэтому был разработан следующий алгоритм аппроксимация траектории робота кусочно-полиномиальной функцией:

1. Зафиксировать начальные координаты робота $p_0 = (x_0, y_0)$ (Рис. 5).
2. Получить от визуального одометра текущие координаты $d_i = (x_i, y_i)$.
3. Аппроксимировать их кривой $f_{x,y}(t)$ 3-го порядка.
4. Рассчитать отклонение точек $d_i = (x_i, y_i), i = 0..N$ от кривой $f_{x,y}(t)$.
5. Если отклонение меньше заданного E , перейти к п. 2.
6. Выполнить естественную параметризацию кривой $f_{x,y}(t)$.
7. Найти и удалить петли сплайна, перейти к п. 1.

Аппроксимация выполняется полиномами 3-й степени в форме:

$$\begin{cases} x = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 = \sum_{m=0}^3 a_m t^m \\ y = b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0 = \sum_{m=0}^3 b_m t^m \end{cases}$$

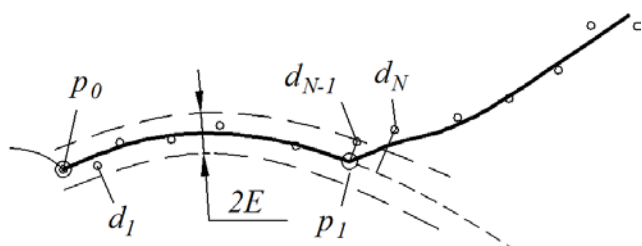


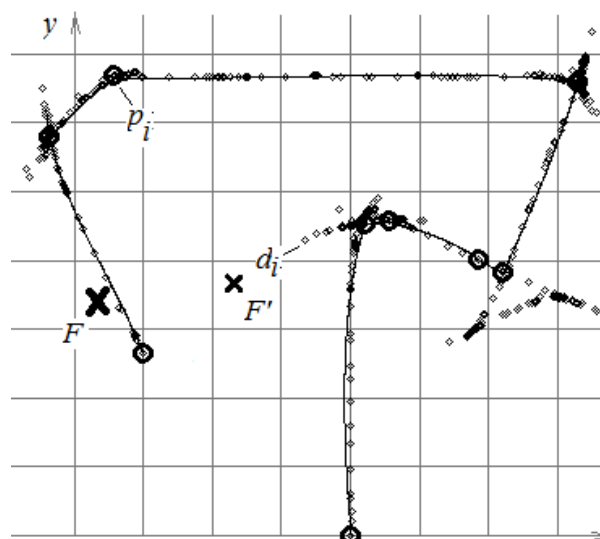
Рис. 5. Схема сплайна.

Обусловленность задачи не зависит от направления движения. Эта форма позволила вводить до 3-х начальных условий: начальную и конечную точки p_0 и p_1 , 1-ю производную в точке p_0 . В качестве искусственного параметра t выбрана длина ломаной $p_0 d_1 d_2 \dots d_i$. $t_i = t_{i-1} + |d_i d_{i-1}|$, $d_i = (x, y, t_i)$.

При потере связи система управления переходит в режим автоматического возвращения робота к оператору, которое выполняется по следующему алгоритму:

1. Найти ближайшую к роботу точку сплайна p_r .
2. Найти точку p_f , отстоящую по длине сплайна к его началу на S_0 .
3. Двигаться в т. p_f , пересчитывая ее положение по п. 1 и 2.

Для проверки алгоритма по данным, записанным с визуального одометра при движении робота в точку F и реальном конечном положении F' , был построен сплайн, показанный на Рис. 6. Алгоритм описывал траекторию в реальном масштабе времени. Отметим, что алгоритм позволил очистить данные от шума и удалить крупные и мелкие замкнутые участки траектории, заломы и петли.



Подставив полученную траекторию в модель системы управления, автор выполнил моделирование возвращения робота из точки F' в точку старта. На Рис. 7 показано множество конечных положений робота после возвращения. Из Рис. 7 видно, что разброс значений ошибки недопустим для решения некоторых задач, например, возвращения вдоль близких препятствий. Результаты моделирования показали, что разработанная система управления с визуальным одометром, используя предложенный алгоритм, обеспечивает возвращение робота в исходную точку. Накопленная при движении туда и обратно курсовая ошибка не позволила сделать это достаточно точно.

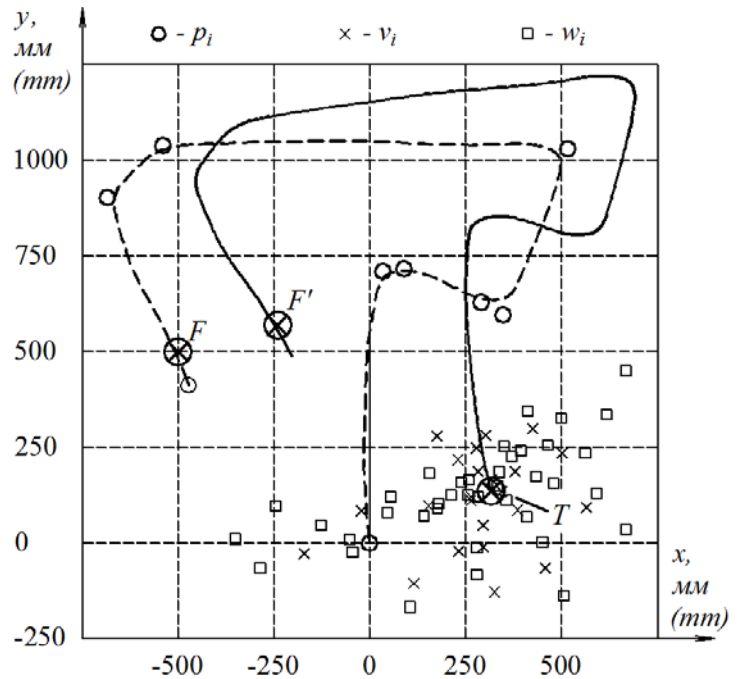


Рис. 7. Разброс конечных положений робота при моделировании возвращения.

Пятая глава посвящена объединению показаний визуального одометра и других датчиков, для чего был предложен новый способ оценки точности его показаний. Тривиальным способом объединения данных нескольких датчиков x_i является использование их среднего взвешенного с учетом их дисперсий σ_i^2 :

$$y = \frac{(\sigma_1^{-2}x_1 + \sigma_2^{-2}x_2 + \dots + \sigma_n^{-2}x_n)}{\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2} + \dots + \sigma_n^{-2}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^{-2} x_i}{\sum_{i=1}^n \sigma_i^{-2}}, \quad (2)$$

Однако точность показаний визуального одометра существенно изменяется от кадра к кадру во время движения, результаты его измерений содержат нестационарный шум. Поэтому, в отличие от других датчиков она не может быть определена заранее. Впервые в данной работе применена оценка точности каждого показания визуального одометра путем анализа ошибок, возникающих на отдельных этапах его работы. Его дисперсия в формуле (2) оценивается в виде:

$$\sigma_{VO}^2 = \sigma_{VO_0}^2 k_\chi k_z k_\omega k_n,$$

где $\sigma_{VO_0}^2$ – базовая дисперсия, $k_\chi, k_z, k_\omega, k_n$ – коэффициенты, учитывающие факторы, наиболее влияющие на его точность: обусловленность СЛАУ (1); расстояние до особых точек; угловую скорость; количество особых точек.

Обусловленность. Переопределенная СЛАУ (1) не всегда хорошо обусловлена. Из проведенного анализа для оценки дисперсии одометра σ_{VO}^2 выбрана следующая оценка границы числа обусловленности $\chi(A)$ задачи МНК:

$$\sigma_{VO}^2 \sim \frac{(\chi(A))^2}{k_{\chi 0}} = \left(\frac{\|r_0\|_2^2}{\|x_0\|_2^2 \sigma_{min}^2} + 1 \right) \left(\frac{\|A\|_F}{\sigma_{min}} \right)^2 / k_{\chi 0} = k_\chi, \quad k_{\chi 0} = const,$$

где $r_0 = b - Ax_0$ – остаток регрессии, x_0 – решение задачи МНК, σ_{min} – наименьшее ненулевое сингулярное число матрицы A , $\|A\|_F$ – норма Фробениуса.

Расстояние до особых точек. Погрешность Δx (Рис. 8 а) изображения точки вносит ошибку определения ее пространственных координат $A'(X + \Delta X, Z + \Delta Z)$.

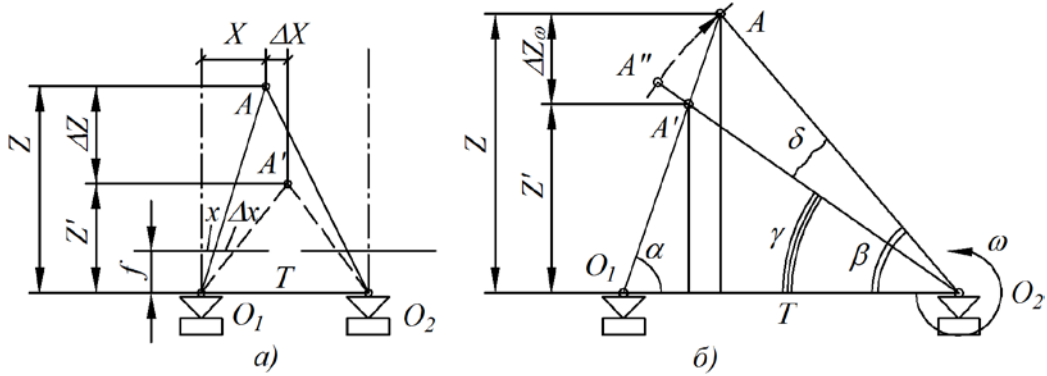


Рис. 8. Погрешность определения координат особых точек в зависимости от
а) расстояния, б) угловой скорости.

Автор вывел выражения, связывающие эти погрешности, подставил их в матрицу возмущения СЛАУ и ввел в оценку дисперсии следующий коэффициент:

$$\sigma_{VO}^2 \sim \|\delta A\|_2^2 \sim \frac{\left(\sum_{i=1}^n Z_i^2 \left(1 + \frac{Z_i^2}{T^2} \right) \right)}{k_{Z0}} = k_Z.$$

Рассогласование работы телекамер по времени вносит ошибку определения расстояния Z до точки A при повороте робота (Рис. 8б). Эта ошибка была оценена при решении треугольников $O_1 O_2 A$ и $O_1 O_2 A'$ и подставлена в матрицу возмущения данных СЛАУ. Так был получен коэффициент, учитывающий угловую скорость:

$$\sigma_{VO}^2 \sim (\Delta Z_\omega / Z)^2 \sim \frac{(\omega + \omega_0)^2}{\omega_0^2} = k_\omega$$

Количество особых точек n учтено как количество независимых экспериментов, которое влияет на дисперсию их среднего значения в соответствии с правилами сложения случайных величин:

$$\sigma_{VO}^2 \sim n_0 / n = k_n, n_0 = const.$$

Предложенный способ комплексирования был использован для навигации в системе автоматического возвращения мобильного робота по данным визуального одометра, инерциального датчика, колесной одометрии и сигналам управления. Ее структура показана на Рис. 9. Система управления выполняет описание траектории по данным визуальной одометрии и автоматическое возвращение по ней. В обычном режиме “*manual*” оператор управляет движением мобильного робота в конечную точку с помощью джойстика J , задавая линейную и угловую скорости v^{**} и ω^{**} . Эти сигналы принимаются через приемопередатчик RF и поступают в систему управления приводами D , где преобразуются в угловым скоростям колес \dot{q}_1 и \dot{q}_2 . Система управления приводами имеет локальную обратную связь по угловой скорости колес \dot{q}_1 и \dot{q}_2 , измеряемыми с помощью энкодеров. Визуальный одометр VO вычисляет линейную и угловую скорости

возврата. На 2-м этапе робот двигался к оператору (в исходную точку) по сохраненному описанию траектории. Оценивалась средняя квадратичная погрешность выхода робота в исходную точку относительно длины траектории.

В каждом эксперименте одновременно регистрировались показания визуальной одометрии VO, инерциального гироскопа G, колесной одометрии W и сигналов управления C. Для определения точности предложенной системы были исследованы различные сочетания этих датчиков при комплексировании. Наиболее точные результаты показали варианты: (VO+G+C), (W+G) и (VO+G+W).

Всего выполнено более 80-ти заездов в помещении и на улице в различных условиях движения. В помещении проверялись основные параметры системы: точность, инвариантность к изменениям среды и проскальзыванию колес, исключение замкнутых участков траектории. Заезды по «S», «Г» и «U» образным и другим траекториям длиной до 15,5 м и углом поворота до 180° показали, что предложенная система позволяет измерять текущие координаты робота достаточно точно для решения задач локальной навигации, в том числе выполнить автоматическое возвращение к оператору со ср. кв. погрешностью 4,2%. Колесная одометрия (W) в сочетании с гироскопом (G) измеряла координаты несколько точнее, с ошибкой 3,1%. Не смотря на то, что сам визуальный одометр показал относительно высокую погрешность – 13,0%, объединение показаний всех датчиков (VO+G+W) позволило практически сохранить общую точность (3,2..3,5% в зависимости от способа использования показаний гироскопа), что подтвердило эффективность алгоритма комплексирования данных.

Были выполнены заезды с полным изменением наблюдаемой сцены. Для этого робот записывал траекторию в одном помещении, а возвращался по ней в другом, наблюдая другую сцену. Так была подтверждена инвариантность работы предложенной системы навигации к изменениям в среде. Было выполнено движение по траекториям, содержащим мелкие поисковые движения оператора и крупные замкнутые участки, например, въезд в дверь с нескольких попыток и объезд колонны. При возвращении робот не повторял их, что подтвердило эффективность предложенного алгоритма описания траектории. Были выполнены заезды с имитацией проскальзывания колес. Для этого на подстилающей поверхности укладывалась полиэтиленовая пленка, которая удерживалась или смещалась вместе с роботом. Эти эксперименты подтвердили, что система с визуальным одометром работоспособна в таких условиях.

На улице оценивалась точность выхода робота в исходную точку на различных подстилающих поверхностях (асфальт, листья, грунт, трава и т. д.) при изменяющейся освещенности. Например, были выполнены заезды по Y-образной траектории в урбанистической сцене (асфальт, здания, автомобили) длиной 25,5 м с замкнутым участком и изменениями в среде; заезды по траве и скользкому грунту с деревьями и кустарниками на расстоянии до 16 м и других сценах, например, по детской площадке. Выполнены заезды в неблагоприятных для визуальной одометрии условиях: в сумерках и темноте, на однотонных подстилающих поверхностях. Предложенный алгоритм комплексирования позволил избежать снижения точности измерения координат и в этом случае.

По результатам всех заездов был оценен радиус области возвращения для 3-х комбинаций датчиков в благоприятных и неблагоприятных для них условиях с вероятностью попадания $p = 90\%$ и $95,5\%$ (2σ). Таблице 3 показаны результаты.

Таблица 3.

Сводная таблица результатов экспериментов

Комбинация датчиков	Обо зн.	Кол-во заездов	СКО	Радиус области возвр.	
				$p = 90\%$	$p = 95,5\% (2\sigma)$
VO+G+C:					
- хорошая видимость	4	47	3,7%	6,1%	7,4%
- все рассмотренные условия	5	60	4,1%	6,7%	8,2%
G+W:					
- без проскальзывания колес	1	26	2,8%	4,6%	5,6%
- все рассмотренные условия	6	60	5,0%	8,2%	10,0%
VO+G+W:					
- благоприятные условия	2	23	3,1%	5,1%	6,2%
- все рассмотренные условия	3	30	3,4%	5,6%	6,8%

Полученные области изображены окружностями на Рис. 10 на примере одной из траекторий длиной 15,5 м (в одну сторону).

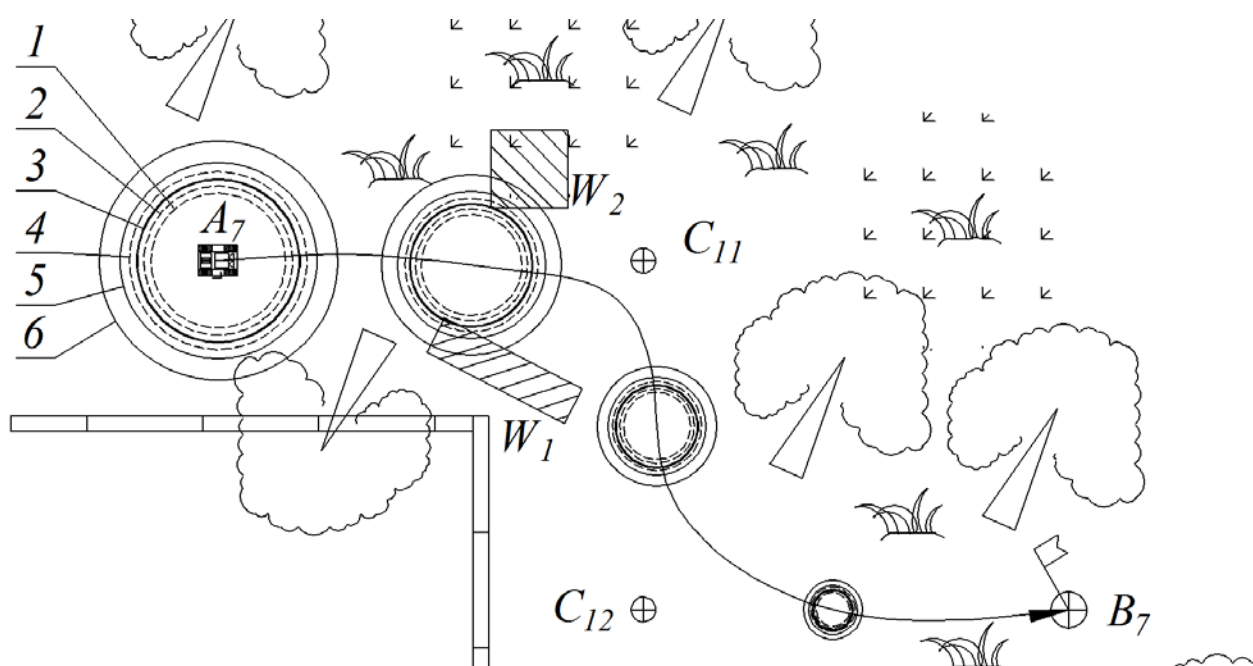


Рис. 10. Области точки возвращения 2σ , $p = 95,5\%$ (1..6 – см. Таблицу 3).

Области, полученные при использовании датчиков в благоприятных условиях, показаны пунктиром, во всех заездах – сплошными линиями. Как видно из Рис. 10 и Таблицы 3, наименьший радиус 5,6% области с вероятностью попадания 95,5% дает колесная одометрия в благоприятных условиях, но результат практически непредсказуем при проскальзывании колес. Сочетание всех датчиков с визуальным одометром дало наиболее стабильный результат 6,2..6,8% в разных условиях движения. Предложенный алгоритм комплексирования

позволил повысить точность навигации робота в неблагоприятных условиях за счет взаимной компенсации ошибок измерения различных датчиков.

Таким образом, результаты эксперимента подтвердили работоспособность предложенной системы навигации и автоматического возвращения, эффективность предложенных алгоритмов и использованных технических решений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Выполнен обзор наземных мобильных роботов, применяемых на них навигационных датчиков и способов возвращения по ним к оператору. Определены основные требования к разрабатываемой системе.
2. Обоснован выбор совместного использования традиционных средств автономной навигации и визуального одометра для решения задачи возвращения на последнем участке траектории.
3. Разработан макетный образец визуального одометра, который позволяет измерять текущие координаты мобильного робота с точностью 7% длине пути и 10% по углу курса. Обоснован выбор метода Гарриса для поиска особых точек и расчет пройденного пути, угла курса и бокового смещения.
4. Разработана система управления мобильным роботом с визуальным одометром в обратной связи по положению, которая обеспечивала движение робота со скоростью до 1 м/с.
5. Разработана система локальной навигации и управления мобильным роботом с использованием данных визуального одометра и описании траектории движения сплайном 3-го порядка, которая обеспечивает возвращение робота без повторения замкнутых участков траектории.
6. Предложен способ комплексирования данных колесной одометрии, инерциального гироскопа, сигналов управления и визуального одометра на основе оценки дисперсии результатов его измерений, позволяющий взаимно компенсировать ошибки этих источников информации.
7. Экспериментально подтверждено, что использование разработанного алгоритма комплексирования и предложенного способа описания траектории позволяет решать задачи локальной навигации и выполнить автоматическое возвращение робота к оператору в недетерминированной среде при неблагоприятных условиях, в том числе при проскальзывании колес и низкой освещенности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Девятериков Е. А. Система технического зрения для измерения пути мобильного робота // Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов. Сб. трудов НТК «Экстремальная робототехника 2011». Спб.: ЦНИИ РТК, 2011. С. 368-376. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
2. Девятериков Е. А. Система технического зрения для измерения пути мобильного робота // Е.А. Девятериков, Б.Б. Михайлов. Сб. трудов НТК

«Техническое зрение в системах управления 2011». М.: Механика, Управление и Информатика, 2012. С. 219-224. (0,3 п.л./0,15 п.л.)

3. Девяттериков Е. А. Система технического стереозрения для измерения координат мобильного робота // Е.А. Девяттериков, Б.Б. Михайлов. Сб. трудов НТК «Техническое зрение в системах управления 2012». М.: Механика, Управление и Информатика, 2012. С. 72-78. (0,3 п.л./0,15 п.л.)
4. Девяттериков Е. А. Использование данных визуального одометра в системе управления мобильного робота // Е.А. Девяттериков, Б.Б. Михайлов. Сб. трудов НТК «Экстремальная робототехника 2012». Спб.: ЦНИИ РТК, 2012. С. 155-163. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
5. Девяттериков Е. А. Визуальный одометр // Е.А. Девяттериков, Б.Б. Михайлов. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. СП №6. М.: 2012. С. 68-82. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
6. Девяттериков Е. А. Система управления движением мобильного робота с визуальным одометром // Е.А. Девяттериков, Б.Б. Михайлов. Информатика. Телекоммуникации. Управление Т5(181). Спб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. С. 103-108. (0,6 п.л./0,3 п.л.)
7. Девяттериков Е. А. Алгоритм описания траектории мобильного робота по данным визуального одометра для автоматического возвращения к оператору // Е.А. Девяттериков. Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. № 12. М.: 2014. С. 705-715. (0,6 п.л.)
8. Девяттериков Е. А. Использование данных визуального одометра для автономного возвращения мобильного робота в среде без фиксированных точек отсчета // Е.А. Девяттериков, Б.Б. Михайлов. Сб. трудов НТК «Экстремальная робототехника 2015». Спб.: ЦНИИ РТК, 2015. С. 351-355. (0,5 п.л./0,25 п.л.)