

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе

на соискание ученой степени доктора технических наук

**Вохминцева Александра Владиславовича**

на тему «Методология решения проблемы одновременной навигации и построения карты на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды»

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы)

**Актуальность темы.** Если для промышленной робототехники, действующей в детерминированных производственных пространствах, задача навигации решена, то для мобильных платформ спецназначения требуется разработка специализированных методик и алгоритмов, учитывающих специфику применения роботов в недетерминированной обстановке. В диссертации разрабатываются методы и алгоритмы, необходимые для реконструкции трехмерных сцен окружающего пространства, последующей визуализации трёхмерных моделей при навигации мобильных платформ в неизвестной среде. Проведенный автором работы анализ известных методов решения проблемы *SLAM* доказал необходимость комбинирования информации о визуальных и семантических характеристиках окружающей среды. Недостатки текущих вариантов решений обозначенной выше проблемы, ориентированных в основном для работы в условно статичных пространствах, определяют актуальность научных исследований для динамических, контекстуально сложных и крупномасштабных сцен. Сложность решения значительно возрастает при функционировании мобильных роботов в окружении, информация о котором искажена помехами различной природы: недостаточная освещенность, поверхности с различным альбедо и т.д. Для решения поставленной задачи в диссертационной работе предложена новая методология решения проблемы *SLAM* на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды.

Предлагаемые в работе методы и алгоритмы могут стать базой для синтеза систем одновременной навигации и картографирования, реализуемой мобильными робототехническими платформами в реальном масштабе

времени. Методология ориентирована на перспективные направления развития робототехники (в настоящее время – это автономные мобильные комплексы и коллективы роботов для нетипичных применений), что может служить еще одним подтверждением актуальности темы диссертационной работы.

#### **Оценка структуры и содержания работы, автореферата.**

Диссертация Вохминцева А.В. состоит из введения, восьми глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. Общий объем работы - 298 страниц, включает 58 рисунков и 16 таблиц, которые грамотно раскрывают текстовый материал. В приложениях приведены копии 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, полученных соискателем в соавторстве, а также акты о внедрении результатов диссертационного исследования на различных предприятиях и в учебный процесс.

Структура диссертационной работы в целом соответствует поставленной цели и задачам исследования, стиль изложения последователен, содержание глав структурировано и логически связано. Автореферат соответствует содержанию диссертации: в краткой форме излагаются основные сведения о предлагаемых решениях, полученных теоретических и практических результатах.

*Первая глава* диссертации содержит результаты анализа научной проблемы, достаточно подробно исследованы современные способы решения *SLAM*, проведен сравнительный анализ методов автоматической трехмерной реконструкции сцен. Представлены результаты поиска близких проектных решений. Выполнен прогноз по возможному практическому применению предлагаемой методологии в смежной области - задачи спасения людей, для решения которой проанализированы известные методы и алгоритмы некооперативного дистанционного распознавания личности по лицу.

*Вторая глава* содержит авторскую концепцию решения проблемы *SLAM*, базирующуюся на комбинировании визуальных и семантических характеристик окружающей среды. Методология излагается последовательно: описание начинается с постановки задачи, затем рассматриваются ключевые этапы реализации с учетом комбинированного способа регистрации данных и заканчивается результатами сравнительного анализа методов регистрации данных. При этом рассмотрен частный случай

решения комбинированной вариационной задачи *ICP*, когда точки в трехмерных облаках находятся в одной плоскости сцены. На основе результатов компьютерного моделирования и вычислительного эксперимента обоснован вывод о лучшей сходимости предлагаемого метода по сравнению с известными методами. Новый метод показывает близкие по точности результаты с более затратным методом, использующим метрику точка-плоскость. В финальной части главы показана перспективность использования предложенного метода решения комбинированной вариационной задачи *ICP* для решения проблемы *SLAM* в контекстуально сложных крупномасштабных сценах.

В третьей главе разработаны методы поиска и сопоставления особых точек на изображениях; синтезированы алгоритм извлечения особых точек на основе дескриптора с рекурсивным вычислением гистограмм направленных градиентов и алгоритм быстрого сопоставления изображений; представлены результаты компьютерного моделирования.

Четвертая глава содержит описание методики решения задачи реконструкции трехмерных сцен, которая строится на основе точных решений вариационной задачи регистрации метода *ICP*. Рассмотрены следующие варианты: точное решение вариационной задачи *ICP* для аффинных преобразований, комбинированное решение задачи точка-точка для аффинных преобразований в трехмерном пространстве, точное решение вариационной задачи *ICP* для ортогональных преобразований, комбинированное решение вариационной задачи *ICP* для ортогональных преобразований и точное решение комбинированной вариационной задачи *ICP* для ортогональных преобразований. Для каждого из предлагаемых вариантов решения проведено компьютерное моделирование и представлены результаты сравнения с известными методами регистрации данных.

В пятой главе представлен метод решения задачи навигации и определения положения мобильной платформы на основе комбинированной методологии *SLAM*. Для получения результата разработан метод семантической маркировки неизвестного окружающего пространства на основе Байесовского слияния метода *3D Entangled Forest (3DEF)* и комбинации метода семантической сегментации *Grabcut* с детектором объектов *YOLO*. Разработанные методы идентификации семантических маркеров на сцене и решения задачи локализации и навигации *S-EKF SLAM*

были проверены с помощью компьютерного моделирования и экспериментов на реальных данных. Рассмотрена процедура синтеза алгоритма планирования траектории мобильной платформы в неизвестном пространстве на основе метрико-топологического графа и семантических маркеров. Итогом проведенных исследований стал прототип системы на основе комбинированной методологии *SLAM*.

В главе шесть представлены результаты исследования методов восстановления и сжатия изображений (сигналов), представлены рекурсивное вычисление дискретного косинусного преобразования при обработке данных с пониженным разрешением и рекурсивный алгоритм для вычисления скользящего ДКП при произвольном шаге. Исследована точность вариационных методов восстановления сигналов, искаженных линейным оператором. Представлен непараметрический метод фильтрации и восстановления изображений, содержащих аддитивный фоновый шум, импульсные помехи и мультипликативные интерференции.

Глава семь содержит описание подхода к оптимизации графа положений мобильной платформы и обнаружению «замыканий цикла» на основе метода «корзина слов», комбинировании визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды. Представлен метод поиска изображений по визуальному подобию с применением инвертированных индексов цветовых гистограмм. Приведены результаты компьютерного моделирования с использованием эталонных баз данных и экспериментов с реальными данными.

В восьмой главе автор оценивает перспективы применения предлагаемой комбинированной методологии для различных практических приложений в робототехнике. Для этого предлагаются методы распознавания личности: метод дистанционного распознавания личности по лицу с использованием автокодировщика и метод обратной индексации для поиска лиц по эталону в задаче спасения людей.

*Заключение* содержит основные выводы и результаты диссертационной работы.

**Новизна полученных результатов.** Следующие результаты диссертационной работы Вохминцева А.В. обладают научной новизной:

1. *Методология решения проблемы одновременной навигации и построения карты*, которая, в отличие от известных методов, использует

мультисенсорную визуальную и семантическую информации на всех этапах решения проблемы *SLAM*, что в итоге позволяет повысить точность и сходимость решения для сложных крупномасштабных сцен в реальном масштабе времени. Комбинированная методология может быть использована для создания систем навигации и машинного зрения в современных автономных интеллектуальных робототехнических комплексах и системах.

2. *Алгоритм представления окрестности особых точек* в виде вектора признаков на основе рекурсивного вычисления гистограмм направленных градиентов по нескольким круглым скользящим окнам и пирамидальному разложению изображения, позволяющий выполнять быстрое сопоставление изображений, инвариантное к повороту и небольшому изменению масштаба для крупномасштабных сцен.

3. *Комбинированные методы решения вариационной задачи с метриками точка-точка и точка-плоскость на основе метода ICP* для аффинных и ортогональных преобразований, точность и сходимость которых повышена за счет применения визуально связанных характеристик. В ходе проведенного исследования также были предложены решения вариационной задачи точка-точка для вырожденных случаев, позволяющие проводить точную регистрацию структурных элементов сцены.

4. *Метод решения задачи навигации и определения положения мобильной платформы*, использующий комбинирование визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды совместно с расширенной Калмановской фильтрацией (*EKF*). Метод обладает хорошей сходимостью за счет использования семантических ориентиров в структуре расширенного фильтра Калмана и адаптирован для использования в приложениях реального времени.

5. *Быстрый рекурсивный алгоритм для вычисления ДКП дискретного сигнала* в скользящем окне с произвольным шагом, а также граничные значения шага скользящего окна, при которых предлагаемый алгоритм более эффективен, чем быстрые алгоритмы ДКП.

6. *Способ оптимизации графа положений мобильной платформы и обнаружения «замыканий цикла»* с использованием метода «корзина слов» и двумерного дескриптора на основе гистограммы ориентированных градиентов, позволяющий повысить сходимость предлагаемого алгоритма для длинных циклов.

**Степень обоснованности и достоверности положений диссертации.** Обоснованность и достоверность научных положений работы, выводов и результатов основана на корректном применении методов системного анализа, теории автоматического управления и теории искусственного интеллекта, в том числе методов машинного обучения, методов реконструкции пространства и методов визуализации трехмерных данных. Адекватность и достоверность предложенных методов и алгоритмов подтверждается результатами компьютерного моделирования для эталонных баз данных, а также экспериментами с реальными прототипами мобильных роботов.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается детальным описанием методик проведения компьютерного моделирования и вычислительных экспериментов. Разработанный на основе предложенных методов, алгоритмов и подходов прототип системы одновременной навигации и картографирования прошел апробацию на ряде предприятий.

Полученные в ходе выполнения диссертационной работы научные и практические результаты докладывались на международных и всероссийских научных конференциях и были опубликованы автором в рецензируемых научных изданиях, которые входят в наукометрические базы данных *Web of Science* и *Scopus*, в ведущих научных журналах из списка ВАК.

**Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы.** Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в создании комбинированной методологии решения проблемы *SLAM*, базирующейся на предложенном автором способе решения задачи реконструкции трехмерной карты окружающей среды. Так, при решении вариационной задачи *ICP* в замкнутой форме используется функционал, позволяющий находить решение на основе комбинации данных об особых точках, данных в виде трехмерного облака точек и данных в виде семантических характеристик окружающей среды.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в разработанной системе одновременной навигации и построения карты, которая может использоваться для решения различных прикладных задач в робототехнике. Ценность с практической точки зрения имеют также

алгоритмы и специализированное программное обеспечение, имеющие более широкий спектр применения.

Практическая значимость результатов подтверждена актами внедрения научных результатов, полученными автором в АО «Научно-производственное объединение Андроидная техника», УРПЦ «Альфа-Интех», ООО «Научно-производственный центр Интеллектуальные транспортные системы», ФГБОУ ВО ЧелГУ, АУ «Югорский НИИ информационных технологий».

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Структура работы построена несколько некорректно, так, по какой-то причине, для описания метода распознавания выделена 3 глава, имеющая объем всего 10 страниц, при этом другие основные разделы диссертации имеют объем от 40 до 50 страниц. А результат исследования 3-ей главы является промежуточным этапом решения основной цели. Может быть автору следовало бы сократить количество глав до 5-6? Подраздел 1.4 необходимо было назвать «результаты информационного поиска», так как он содержит название только НИР, а не патентов.

2. Автор несколько вольно использует математические выражения и предметную терминологию. В автореферате на стр. 15 при описании вариационной задачи используется переменная  $R$  для матрицы поворота, а на стр. 18  $R$  - это уже матрица аффинного преобразования. В формулах 5 (автореферат) и 2.1, 2.2 (стр. 67 и 68 диссертации) отсутствует переменная, в которую должен быть помещен результат и даже знак равенства. К тому же в работе (стр.67)  $R$  – это не просто матрица поворота, а матрица, содержащая «компоненты преобразования поворот». В робототехнике для описания преобразований систем координат принято использовать однородные матрицы  $T$  размерностью  $4 \times 4$ , составленные из матрицы поворота, вектора смещения и вектора масштабирования. Тогда отпала бы необходимость использовать формулы типа 2.2 и можно было бы записать решение в виде  $Y = T \cdot X$ , которое было бы верно и для варианта с преобразованием масштаба.

В этой же главе приведена формула 2.15 (стр. 71), которая определяет новые координаты  $x_{ki}$  через старые координаты  $x_{ki}$ . А как определить какие из них новые, если написание переменных совпадает?

3. Автором используется аббревиатура ДЛ ГНГ для дескриптора локальной гистограммы ориентированных градиентов при этом в списке сокращений (стр.254) ГНГ расшифровывается как гистограмма

направленных градиентов. Какая из аббревиатур верная? В русскоязычной литературе в основном используется термин направленные градиенты, а ориентированные градиенты – это калька с англоязычного термина.

4. В работе проводятся компьютерное моделирование и даже эксперименты на реальных роботах, но не все исходные данные раскрыты в тексте. И также несколько смущает тот факт, что диссертация представлена на соискание степени доктора технических наук, но не содержит ни одной количественной характеристики, подтверждающей эффективность предлагаемой методики по сравнению с анализируемыми методами. В разделах, где записаны выводы по главам и работе целом, только качественные оценки – лучше, быстрее, выше сходимость и т.д.

5. Глава 8 имеет название «Практические приложения», но после ее прочтения остается еще больше вопросов. Где требования к аппаратной базе мобильной платформы, способной реализовать предложенную методику *SLAM* в реальном масштабе времени? Где планируется проводить операцию спасения, в офисах как на тестовых примерах при компьютерном моделировании? Тогда почему в главе нет описания производственной сцены? Когда и кем задача распознавания лиц была включена в проблему *SLAM*, проблему одновременной навигации и построения карты?

6. Текст диссертации и автореферата оформлен в целом верно, но даже финальный вариант содержит грамматические и стилистические ошибки; рисунки, имеющие альбомную ориентацию, вставлены в «портретную» страницу, поэтому подрисуночная подпись оформлена неверно (рис. 1.2, 1.3, 2.3, 2.10 и т.д.)

Указанные выше недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация Вохминцева А.В. на соискание ученой степени доктора технических наук является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема повышения эффективности навигации интеллектуальных робототехнических комплексов в неизвестном окружающем пространстве, имеющая важное хозяйственное значение.

Представленная диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы). Основные научные результаты,



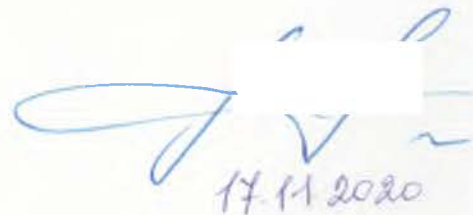
полученные в ходе диссертационного исследования, опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью, соответствует требованиям, предъявляем ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук (п. 9. «Положение о присуждении ученых степеней»), а ее автор, Вохминцев Александр Владиславович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы).

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент  
Даринцев Олег Владимирович,  
профессор кафедры автоматизации  
технологических процессов  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»,  
Докторская диссертация защищена

по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации



Handwritten signature and date: 17.11.2020

Адрес места основной работы: 450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К.Маркса, д. 12

Рабочий телефон: +7 (347) 273-09-55

Адрес эл. почты: oleg\_sam@mail.ru

