

## ОТЗЫВ

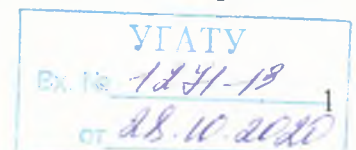
### официального оппонента на докторскую диссертацию

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) на соискание ученой степени доктора технических наук.

#### Актуальность темы исследования

Разработка динамической системы для решения проблемы одновременной навигации и построения карты окружающей среды (Simultaneous localization and mapping, SLAM) в реальном масштабе времени является одной из ключевых проблем в современной робототехнике, на ее решении основано создание автономных интеллектуальных робототехнических комплексов и систем. Научная проблема, на решение которой направлено диссертационное исследование Вохминцева А.В., – разработка точных методов для реконструкции трехмерной карты доступной окружающей среды для контекстуально сложных крупномасштабных сцен и определение положения мобильной платформы в неизвестной среде. В работе соискатель проводит обзор известных способов решения данной проблемы и их недостатков, определяет основные тренды и актуальные задачи, стоящие перед исследователями и разработчиками в области SLAM. Автор определяет место своей работы в сложившейся структуре исследований по данному направлению робототехники: в исследовании рассматривается задача создания интеллектуальных методов картографирования и навигации на основе семантических свойств окружающей среды. Входной информацией для решения данной задачи являются данные, получаемые с различных мультисенсорных датчиков, выходной информацией для данной задачи являются реконструкция сцены и траектория движения мобильной платформы на сцене. Современные методологии SLAM для крупномасштабных сцен основаны на визуальной методологии SLAM или ее комбинации с методологией на основе EKF SLAM. Методологию SLAM в данном случае можно описать в виде следующей схемы: локальное построение карты с использованием метрик для оценки траектории и создания локальных карт; распознавание положений на карте для



решения проблемы «замыкания цикла», либо для решения задачи повторной локализации; оптимизация построенной карты и глобальная оптимизация.

В работе предложена комбинированная методология для решения проблемы SLAM, которая в отличие от перечисленных методологий основана на комбинировании мультимодальных визуальных и семантических характеристик неизвестной контекстуально сложной окружающей среды и в отличие от известных методологий использует мультисенсорную и семантическую информацию на всех ключевых этапах методологии SLAM для улучшения точности и сходимости соответствующих предложенных методов и алгоритмов.

Полученные научные и практические результаты исследования могут быть применены при решении различных задач:

- навигация мобильной платформы на сцене в реальном масштабе времени;
- планирование траектории движения мобильной платформы на сцене со статическими и динамическими препятствиями;
- слежение за динамическими объектами на сцене;
- реконструкция трехмерных сцен с семантической разметкой объектов на анализируемой сцене.

Вышеизложенное подчеркивает актуальность темы диссертационного исследования и значимость решаемой проблемы для различных приложений робототехники и цифровой обработки информации.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Структура диссертационной работы соответствует цели и задачам исследования, включает в себя введение, восемь глав, заключение, список литературы и приложения.

**В первой главе** диссертации исследовано современное состояние поставленной в работе проблемы и рассмотрены известные методологии SLAM. Определены основные проблемы известных методологий применительно к решению проблемы SLAM для контекстуально сложных крупномасштабных сцен, приведено сравнение ожидаемых результатов с мировым уровнем, представлена информация об основных конкурентах в данной области, проведен патентный поиск по базе ЦИТИС по тематике диссертации.

**Во второй главе** предложена комбинированная методология для решения проблемы одновременной навигации и построения карты, использующая визуально связанные характеристики окружающей среды и информацию о глубине для сопоставления изображений, регистрации 3D облаков точек, а также построения

глобальных последовательных 3D карт окружающего пространства. Производительность и вычислительная сложность предлагаемой комбинированной методологии решения проблемы SLAM представлены и обсуждены на примере эталонных баз данных.

**В третьей главе** предложен метод представления окрестности особых точек в виде вектора признаков с высокими характеристиками с точки зрения вычислительной сложности алгоритма на основе вычисления гистограмм направленных градиентов, который применим для изображений, имеющих геометрические искажения (поворот, перенос, масштаб). Разработан алгоритм поиска особых точек на изображениях последовательности кадров на основе дескриптора локальной гистограммы ориентированных градиентов с рекурсивной процедурой вычисления.

**В четвертой главе** рассматриваются комбинированные методы для реконструкции контекстуально сложных крупномасштабных трехмерных сцен для группы аффинных и для группы ортогональных преобразований на основе решения вариационной задачи ICP в замкнутой форме с использованием метрики точка-точка и точка-плоскость соответственно с использованием визуально связанных и семантических характеристик окружающей среды. Предложенные комбинированные методы улучшают качество работы двух ключевых шагов метода ICP: определение соответствующих точек между парой трехмерных облаков точек и решение вариационной задачи

**В пятой главе** рассмотрен метод определения динамического положения мобильной платформы в неизвестном пространстве на основе расширенной Калмановской фильтрации и комбинировании визуальной и семантической информации о трехмерной сцене. В данной главе предложен метод семантической маркировки неизвестного окружающего пространства на основе Байесовского слияния метода классовой трехмерной сегментации 3DEF и комбинации метода семантической сегментации Grabcut и детектора объектов YOLOv3. Результаты семантической маркировки были применены при решении задачи регистрации трехмерных данных на основе решения вариационной задачи с метриками точка-плоскость и точка-точка.

**В шестой главе** рассмотрена задача предварительной обработки данных, связанная с восстановлением изображений от различных помех и сжатием изображений. Предложен быстрый рекурсивный алгоритм для вычисления дискретного косинусного преобразования (ДКП) для решения задачи сжатия изображений.



**В седьмой главе** предложен подход к оптимизации графа положений мобильной платформы и обнаружению «замыканий цикла» на основе метода корзина слов и комбинировании визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды.

**В восьмой главе** рассмотрено практическое приложение комбинированной методологии SLAM при решении задачи спасения людей.

В заключении представлены основные выводы и результаты по диссертационной работе.

Текст автореферата полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

#### **Достоверность и новизна полученных результатов:**

Полученные в диссертационной работе Вохминцева А.В. результаты обладают научной новизной, которая заключается в следующем:

- была предложена новая методология решения проблемы одновременной навигации и построения карты, основанная на комбинировании визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды. Разработанная методология позволяет осуществлять реконструкцию трехмерной карты неизвестной окружающей среды с использованием семантических характеристик объектов на сцене и доступной мультисенсорной информации, поступающей с датчиков при произвольном изменении их положения в трехмерном пространстве;

- был разработан алгоритм поиска особых точек на изображениях на основе дескриптора локальной гистограммы ориентированных градиентов (ДЛ ГНГ) с рекурсивной процедурой вычисления, который обладает лучшими характеристиками по точности в сравнении с известными дескрипторами при малых поворотах вне области сцены и используется для сопоставления изображений с произвольным пространственным разрешением и небольшим изменением масштаба относительно друг друга, дает точные оценки для сложных крупномасштабных сцен;

- были разработаны комбинированные методы для реконструкции контекстуально сложных крупномасштабных трехмерных сцен для группы аффинных и для группы ортогональных преобразований на основе решения вариационной задачи ИСР в замкнутой форме с использованием метрики точка-точка и точка-плоскость соответственно с использованием визуально связанных и семантических характеристик окружающей среды. Предложенные комбинированные методы улучшают качество работы двух ключевых шагов метода ИСР: определение

соответствующих точек между парой трехмерных облаков точек и решение вариационной задачи; позволяют решить проблему зависимости результата решения вариационной задачи от правильности выбора начальных значений; дают точные оценки для сложных крупномасштабных сцен; позволяют проводить точную регистрацию структурных элементов сцены и создают основу для применения метода Хорна на случай с не ригидными объектами на сцене;

- был предложен метод решения задачи навигации и определения положения мобильной платформы на сцене (S-EKF SLAM), основанный на комбинировании визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды и расширенной Калмановской фильтрации (EKF), получены формулы для оценки вектора состояния при движении мобильной платформы по серии зашумленных измерений и семантических меток. Метод S-EKF SLAM в неконтролируемых с точки зрения точности локализации выдает лучшие результаты, чем известные методы (Visual SLAM, EKF SLAM, Graph-SLAM); имеет хорошую сходимость и может использоваться в приложениях, работающих в реальном масштабе времени;

- был разработан быстрый рекурсивный алгоритм для вычисления ДКП дискретного сигнала в скользящем окне с произвольным шагом, который основан на рекурсивном соотношении между тремя последовательными локальными спектрами ДКП. Предложенный метод является более эффективным, чем известные быстрые алгоритмы ДКП, когда шаг скользящего окна меньше, чем граничное значение, равное 8;

- был предложен подход к оптимизации графа положений мобильной платформы и решению проблемы «замыкания цикла», который позволяет проводить корректировку движения мобильной платформы и уточнения трехмерной карты окружающей среды, при этом точность локализации для длинных циклов может увеличиваться в несколько раз для разных серий тестов.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается использованием принятых подходов к оценке качества методов и алгоритмов для реконструкции трехмерных сцен окружающего пространства, визуализации трёхмерных моделей и навигации мобильных платформ в неизвестной среде. Полученные результаты диссертационной работы были опубликованы автором в рецензируемых научных изданиях, 12 из которых входят в перечень ВАК, 14 работ опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science и 20 работ – в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. Кроме того, четыре статьи из них опубликованы в научных журналах из кварталей Q2 и Q3. Полученные научные и

практические результаты прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях.

### **Степень обоснованности научных положений и выводов**

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов диссертации подтверждается правильным применением методов исследования диссертационной работы: системный анализ, теория автоматического управления и теория искусственного интеллекта. Адекватность и достоверность предложенных методов и алгоритмов подтверждается результатами компьютерного моделирования для эталонных баз данных, а также экспериментами с реальными данными.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы**

В диссертационной работе представлены результаты, имеющие теоретическую и практическую значимость.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в разработке новых методов, алгоритмов и подходов, которые повышают эффективность процессов обработки информации для реконструкции трехмерных сцен окружающего пространства, визуализации трехмерных моделей и навигации мобильных платформ в неизвестной среде. Совокупность предложенных методов, алгоритмов и подходов составляет предложенную методологию для решения проблемы одновременной навигации и построения карты, основанную на комбинировании визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды.

Разработанная методология позволяет преодолевать недостатки известных методологий (Visual SLAM, Particle Filter SLAM, Extended Kalman Filter, Graph-Based SLAM), такие как: ограничения по применению в окружающей среде, искаженной различными естественными помехами; высокая вычислительная и алгоритмическая сложность; оценка трехмерной карты и определение положения навигационных ориентиров на сцене осуществляются без использования данных о форме реконструируемой поверхности объекта; зависимость результата реконструкции сцены от выбора начального приближения для решения вариационной задачи; невозможность проводить точную регистрацию структурных элементов сцены на основе визуальной методологии; равнозначность всех особых точек в двумерных и трехмерных данных при решении вариационной задачи и другие.



Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в создании прототипа системы одновременной навигации и картографирования для решения задачи спасения людей и подтверждается результатами апробации и актами внедрения научных результатов на предприятиях: АО «Научно-производственное объединение Андроидная техника», УРТЦ «Альфа-Интех», ООО «Научно-производственный центр Интеллектуальные транспортные системы», в Югорском научно-исследовательском институте информационных технологий, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет».

Значимость результатов также подтверждается поддержкой научных исследований, проведенных в диссертационной работе, со стороны Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки (государственное задание), а также Благотворительного фонда В. Потанина при внедрении полученных результатов в учебный процесс.

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

1. В работе в параграфе 5.1 недостаточно полно описана функциональность подсистемы семантической маркировки неизвестного окружающего пространства, было бы целесообразно посвятить данному вопросу отдельную главу диссертационной работы. Кроме того, представленные в параграфе 5.3 результаты компьютерного моделирования для семантической маркировки пространства с использованием эталонной базы NYU Depth Dataset недостаточно полны. Автор представил в результатах моделирования данные для 13 классов сцены, которые соответствуют различным структурным элементам сцены и элементам обстановки помещения, в том время как эталонная база NYU DD содержит размеченный набор данных (RGB-D кадров) с сегментацией: свыше 200 тыс. изображений и 80 классов объектов.

2. В параграфе 5.4 представлены результаты сравнительного анализа алгоритмов планирования траектории с использованием компьютерного моделирования. Автор работы производит сравнение предложенного метода планирования траектории на основе МТ-графа и динамического алгоритма  $A^*$ . Вместе с тем, автору хорошо известны и другие методы планирования траектории: в параграфе 1.1 автор называет такие алгоритмы как, алгоритм  $A^*$ , динамический  $A^*$ ,  $FD^*$  (фокусированный динамический  $A^*$ ),  $D^*$  Lite, алгоритмы, основанные на графах видимости и вероятностных схемах местности, алгоритмы, основанные на регулярной декомпозиции (ГРД) и метрическом топологическом графе. В работе автор берет один

из лучших алгоритмов для решения задачи планирования траектории и сравнивает его с динамическим алгоритмом  $A^*$ , который не показывает выдающихся результатов с точки зрения выбора (построения) оптимального пути на сцене. Хотелось бы получить результаты сравнительного анализа с другими перечисленными алгоритмами.

3. Структура диссертационной работы не сбалансирована: глава 3 содержит 10 стр., в то время как, глава 4 — 50 стр., а глава 5 – 40 страниц.

4. Различные научные результаты и соответствующие им положения, выносимые на защиту, имеют разную научную значимость. Судя по анализу современного состояния проблемы, полученные в главах 2-6 научные результаты соответствуют мировому уровню исследований в этой области и имеют существенное значение для робототехники и цифровой обработки данных в целом, так и в частности для создания систем навигации и машинного зрения в современных автономных интеллектуальных робототехнических комплексах и системах. В то время как, в главах 7 и 8 представлены научные результаты, которые содержат элементы новизны в постановке проблемы или методологии ее изучения.

5. Из текста диссертационной работы (стр. 115, стр. 116, стр.142) не ясно, как определяется  $T_{kt}$  – значение геометрического преобразования метода ICP на основе оценки, полученной с использованием кинематической модели движения датчика.

Отмеченные выше недостатки не влияют на общую положительную оценку представленной работы и могут быть приняты во внимание в качестве рекомендаций по дальнейшему развитию данного научного исследования.

### **Заключение**

Диссертация Вохминцева А.В. «Методология решения проблемы одновременной навигации и построения карты на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук является завершённой научно-квалификационной работой. Полученные в работе результаты обеспечивают решение важной научной проблемы – повышение эффективности систем обработки информации для навигации автономных робототехнических комплексов в неизвестной среде и имеет важное хозяйственное значение.

В работе представлено научно-обоснованное решение актуальной задачи робототехники, связанной с решением проблемы одновременной навигации и картографирования мобильной платформы в неизвестной окружающей среде в контролируемых и неконтролируемых условиях, которое позволяет повысить точность



процессов обработки информации при решении задачи реконструкции контекстуально сложных крупномасштабных трехмерных сцен и задачи определения положения мобильной платформы на сцене.

Все основные результаты и выводы диссертации получены автором лично, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, апробированы на международных и всероссийских научных конференциях и внедрены в ряде организаций.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы).

Представленная диссертационная работа обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью, соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук (п.9. «Положение о присуждении ученых степеней»). Автор диссертационной работы, 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, профессор  
главный научный сотрудник  
лаборатории 80 киберфизических систем

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН»

Докторская диссертация защищена по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

Адрес места основной работы: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

Рабочий телефон: +7 (495) 336-71-05

Адрес эл. почты: [mgv@ipu.ru](mailto:mgv@ipu.ru)

Мещеряков Роман Валерьевич,

19.10.2020

