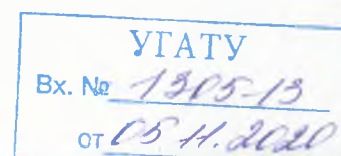


## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на докторскую диссертацию Вохминцева Александра Владиславовича  
«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

### 1. Актуальность темы исследования

В современном мире развитие промышленности характеризуется активным внедрением автономных интеллектуальных роботизированных систем, обладающих собственной системой машинного зрения и навигации в неизвестной окружающей среде. В связи с этим, становится актуальным развитие и совершенствование методов и алгоритмов для реконструкции трехмерных сцен окружающего пространства, визуализации трёхмерных моделей и навигации мобильных платформ в неизвестной среде. В диссертационной работе Вохминцев А.В. определяет наиболее актуальные проблемы в области создания систем одновременной навигации и картографирования (Simultaneous localization and mapping, SLAM). Представленная работа посвящена исследованию одной из перечисленных актуальных проблем в области (SLAM) – разработке интеллектуальных методов навигации на основе семантических свойств окружающей среды. Автор проводит исследование современного состояния проблемы, выделяет известные методологии SLAM и отмечает их недостатки. Для преодоления указанных недостатков в работе разработана новая методология решения проблемы SLAM на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды. Предложенная методология основана на использовании трех типов данных: 1) визуально связанные характеристики окружающей среды, 2) трехмерные облака точек, 3) данные о семантических свойствах окружающей среды. При этом визуальная и семантическая информация о трехмерной сцене используется на всех ключевых шагах решения проблемы SLAM. Решение представленных недостатков известных методологий SLAM позволяет перейти к созданию новых видов роботизированных коллективных систем, с помощью которых возможно решение широкого класса прикладных задач в промышленности.



На основе сказанного выше можно сделать вывод, что в диссертационной работе Вохминцева А.В. представлено решение важной научной проблемы повышения эффективности навигации автономных мобильных платформ (робототехнических комплексов) в неизвестной среде.

## **2. Оценка структуры и содержания работы**

Диссертационная работа Вохминцева А.В. посвящена исследованию и разработке новых методов и алгоритмов для создания систем навигации и машинного зрения в автономных интеллектуальных робототехнических комплексах и системах.

Диссертация Вохминцева А.В. выполнена на кафедре информационных технологий и экономической информатики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет». Общий объем работы 298 страниц, включая 255 страниц основного текста.

Работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка терминов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 248 источников и двух приложений. По каждой главе диссертационной работы сделаны выводы о полученных научных результатах. В приложении А приведены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. В приложении Б представлены акты внедрения результатов диссертационного исследования в практические приложения.

В целом структура диссертационной работы полностью соответствует поставленным цели и задачам исследования, содержание глав работы структурировано и логически связано.

**Во введении** обоснована актуальность решения проблемы SLAM для контекстуально сложных крупномасштабных сцен; сформулированы цель и задачи исследования; представлены положения, выносимые на защиту; изложены краткая характеристика и сведения об апробации работы.

**В первой главе** соискатель исследует современное состояние поставленной в диссертационной работе проблемы, рассматривает известные методологии решения проблемы: визуальная (Visual SLAM), на основе частичного фильтра (FAST SLAM), на основе расширенного фильтра Калмана (EKF SLAM), на основе графов (Graph-Based SLAM). Определены основные проблемы известных методологий применительно к решению задачи SLAM

для контекстуально сложных крупномасштабных сцен, представлена информация об основных конкурентах в данной области.

**Во второй главе** предложена методология для решения проблемы SLAM, основанная на комбинировании визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды.

**В третьей главе** предложен алгоритм сопоставления изображений на основе рекурсивного вычисления гистограмм направленных градиентов (ГНГ) по нескольким круглым скользящим окнам и пирамидальному разложению изображения для обработки визуальных характеристик сцены.

**В четвертой главе** предложены методы решения вариационной подзадачи ICP на основе комбинации данных о визуально связанных характеристиках, трехмерных облаках точек и данных о семантических свойствах окружающей среды, на основе данных методов решается задача реконструкции трехмерной сцены для неизвестной окружающей среды.

**В пятой главе** предложен метод определения динамического положения мобильной платформы (S-EKF SLAM) на основе расширенной Калмановской фильтрации (EKF), истории положений мобильной платформы, семантических ориентиров и совмещении полученных трехмерных карт.

**В шестой главе** представлены методы предварительной обработки данных: сжатие изображений и восстановление изображений от помех различной природы, таких как дефокусировка; размытие сигнала в результате относительного движения камеры и объекта, неравномерного освещения; шум различной природы. В данной главе предложен быстрый рекурсивный алгоритм для локального вычисления дискретного косинусного преобразования (ДКП) в окне, скользящем по сигналу с произвольным шагом, и который обладает меньшей вычислительной сложностью в сравнении с известными рекурсивными и быстрыми алгоритмами ДКП.

**В седьмой главе** предложен подход к оптимизации графа положений мобильной платформы и обнаружению «замыканий цикла» с использованием метода корзина слов и предложенного двумерного дескриптора на основе ГНГ.

**В восьмой главе** рассмотрены практические приложения предложенной методологии для решения проблемы одновременной навигации и картографирования, рассмотрено применение полученных результатов в системах спасения людей.

В заключении представлены основные выводы и результаты по представленной работе, даны направления дальнейшего развития исследований.

### **3. Новизна, степень обоснованности и достоверности научных результатов**

А.В. Вохминцев в диссертационной работе получил результаты, обладающие научной новизной, которые перечислены ниже.

1. Новизна методологии для решения проблемы одновременной навигации и построения карты на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды заключается в том, что: информация о визуально связанных характеристиках окружающей среды используется на всех этапах предлагаемой методологии для улучшения точности и сходимости соответствующих предложенных методов и алгоритмов; информация о визуально связанных характеристиках, трехмерных облаках точек, информация о семантических характеристиках окружающей среды используется для совместного (комбинированного) решения вариационной задачи ICP.

2. Новизна алгоритма поиска особых точек на изображениях в последовательности RGB-D кадров на основе дескриптора локальной гистограммы ориентированных градиентов заключается в том, что: он обладает лучшими характеристиками по точности в сравнении с известными дескрипторами при малых поворотах вне области сцены; может применяться в приложениях при сопоставлении изображений для крупномасштабных сцен в реальном режиме времени за счет использования процедуры дискретизации изображения и процедуры предварительной обработки данных.

3. Новизна комбинированных методов для реконструкции контекстуально сложных крупномасштабных трехмерных сцен для группы аффинных и для группы ортогональных преобразований заключается в том, что: они позволяют решить проблему зависимости результата решения вариационной задачи от правильности выбора начальных значений; используются для регистрации трехмерных облаков точек с произвольным пространственным разрешением и масштабом относительно друг друга и дают точные оценки для сложных крупномасштабных сцен; применение визуально связанных характеристик на основе предложенного дескриптора (ДЛ ГНГ) для решения вариационной задачи алгоритма позволяет получить в

контролируемых и неконтролируемых условиях лучшую сходимость и точность в сравнении с другими дескрипторными методами; решение для группы аффинных преобразований позволяет проводить точную регистрацию структурных элементов сцены и создает основу для применения метода Хорна на случай с не ригидными объектами на сцене.

4. Новизна метода решения задачи навигации и определения положения мобильной платформы на сцене (S-EKF SLAM) заключается в том, что: комбинирование информации происходит на уровне выделенных семантических и мультимодальных визуальных характеристик; в неконтролируемых условиях метод с точки зрения точности выдает лучшие результаты, чем методы определения положения мобильной платформы в известных методологиях Visual SLAM, EKF SLAM, Graph-SLAM.

5. Новизна быстрого рекурсивного алгоритма для вычисления ДКП дискретного сигнала в скользящем окне с произвольным шагом связана с новым способом вычисления рекурсивного соотношения между тремя последовательными локальными спектрами ДКП, которые вычисляются в равноудаленных положениях окна и заключается в том, что алгоритм является более эффективным, чем известные быстрые алгоритмы ДКП, когда шаг скользящего окна меньше, чем граничное значение, равное 8.

6. Новизна подхода к оптимизации графа положений мобильной платформы и обнаружению «замыканий цикла» с использованием метода корзина слов и предложенного двумерного дескриптора (ДЛ ГНГ) заключается в том, что: подход 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; использование предложенного дескриптора (ДЛ ГНГ) вместо известных дескрипторов (SIFT, SURF, ORB) позволяет значительно сократить вычислительную сложность этапа, связанного с определением визуального подобия изображений в двух ключевых последовательных кадрах данных.

Достаточная степень обоснованности результатов диссертации подтверждается корректным использованием известных методов системного анализа и теории автоматического управления, теории искусственного интеллекта, компьютерного когнитивного моделирования.

Результаты диссертационного исследования Вохминцева А.В. опубликованы в 31 рецензируемом научном издании, 12 из которых входят в

перечень ВАК. Полученные научные и практические результаты были апробированы на международных и российских конференциях по тематике исследования.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами теоретических и практических исследований, апробацией и внедрением на предприятиях разработанных методов и алгоритмов для реконструкции трехмерных сцен окружающего пространства, визуализации трёхмерных моделей и навигации мобильных платформ в неизвестной среде на основе комбинирования информации о семантических характеристиках окружающей среды и доступной мультисенсорной информации, получаемой с различных типов датчиков.

Текст автореферата полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

#### **4. Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов**

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

Теоретическую значимость имеют следующие научные результаты в предложенной методологии: алгоритм поиска особых точек на изображениях; комбинированные методы решения вариационной задачи в замкнутой форме; метод решения задачи навигации и определения положения мобильной платформы; метод сжатия изображений; подход к оптимизации графа положений мобильной платформы и обнаружению «замыканий цикла».

Практическую значимость работы составляют прототип комбинированной системы SLAM для решения задачи спасения людей и результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

Актуальность и практическая ценность поставленных задач диссертационного исследования подтверждена актами внедрения научных результатов на предприятиях: АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника», Уральский робототехнический центр «Альфа-Интех», ООО «Научно-производственный центр «Интеллектуальные транспортные системы», а также в Югорском научно-исследовательском институте и учебном процессе ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет». Многие научные результаты в диссертационной работе были получены в ходе

выполнения научно-исследовательских грантов Российского научного фонда, Российского фонда фундаментальных исследований, Министерства образования и науки РФ.

#### **5. Замечания по диссертационной работе:**

1. Решение задачи реконструкции трехмерной сцены в представленной работе основано на концепции итеративных методов регистрации данных. Известно, что данные методы регистрации приобрели большую популярность в робототехнике, вместе с тем, существует альтернативная концепция решения задачи реконструкции сцены на основе не итеративных методов регистрации данных. В работе следовало дать обоснование необходимости разработки нового комбинированного метода регистрации данных, представляющего вариант итеративного метода регистрации.

2. При компьютерном моделировании предложенных методов в диссертации используются входные обучающие выборки в эталонных базах данных. При этом не уточнено, что из себя представляют эти обучающие выборки. Дана лишь общая информация о форматах данных, количестве классов и изображений, названы некоторые классы, которые содержит обучающая выборка.

3. Автору следовало представить материал диссертационной работы в виде 6-ти глав, например, можно было бы объединить содержание главы 2 и главы 6, а также главы 7 и главы 8.

4. Текст диссертационной работы и автореферата в целом написан грамотно и оформлен в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011, но тем не менее содержит незначительное число грамматических ошибок. Так, например, в предложении, где определены задачи диссертационного исследования (стр. 10, строка 19-21 рукописи диссертации и стр. 3. строка 17-18 автореферата не верно согласованы падежи), на стр. 18 автореферата на рисунке 2 б) не правильно задано его положение на странице, в результате чего рисунок 2 б) чуть выше поднят на странице, чем рисунок 2 а). При оформлении разделов в тексте диссертационной работы автору не следовало размещать каждый новый параграф с новой страницы, с новой страницы размещают только новую главу в диссертации.

5. Для повышения степени восприятия материала работы в приложении было бы желательно добавить два документа, разработанных

автором в ходе выполнения НИР для предприятий: 1) программа и методика экспериментальных исследований для группы мобильных робототехнических платформ, 2) детальное описание экспериментального образца.

6. В тексте автореферата диссертации недостаточно подробно описаны результаты компьютерного моделирования и вычислительных экспериментов.

## **6. Заключение**

1. Диссертация Александра Владиславовича Вохминцева «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, в которой решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение: представлено научно-обоснованное решение актуальной проблемы робототехники, связанной с решением проблемы одновременной навигации и картографирования мобильной платформы в неизвестной окружающей среде в контролируемых и неконтролируемых условиях для повышения точности и вычислительной сложности процесса обработки информации при решении задачи реконструкции контекстуально сложных крупномасштабных трехмерных сцен и задачи определения положения мобильной платформы на сцене.

2. Рецензируемая работа соответствует паспорту специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы)».

3. Основные научные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях, из которых: 12 научных статей в научных журналах из перечня ВАК; 14 публикаций в изданиях, индексируемых в БД Web of Science; 20 публикаций в изданиях, индексируемых в БД Scopus.

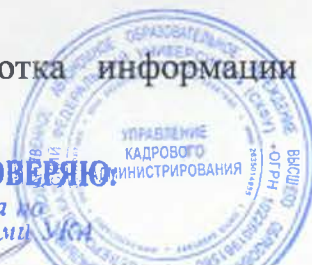
4. Представленная работа обладает научной новизной и практической значимостью, соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук (п.9. «Положение о присуждении ученых степеней»). Считаю, что автор диссертационной работы Вохминцев Александр Владиславович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности



05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы)».

**ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ:**

*начальник отдела по работе с сотрудниками УМН*



**Официальный оппонент:**

Доктор физико-математических наук, доцент

Тебуева Фариза Биляловна

«30» 10 2020 г.

Заведующая кафедрой прикладной математики и компьютерной безопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

Докторская диссертация защищена по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки).

**Адрес места основной работы:** 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д.1

**Рабочий телефон:** +7 (865) 294-41-90

**Адрес эл. почты:** ftebueva@ncfu.ru

Подпись Ф.Б. Тебуевой заверяю