

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.288.12,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15.12.2020 № 15

О присуждении Вохминцеву Александру Владиславовичу, гражданину РФ, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «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) принята к защите 11.09.2020 г. (протокол заседания № 8) диссертационным советом Д 212.288.12 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, созданного приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 43/нк от 30.01.2019 г.

Соискатель Вохминцев Александр Владиславович 1978 года рождения, работает заведующим научно-исследовательской лаборатории в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Челябинский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. **Диссертацию** на соискание ученой степени кандидата технических наук «Методика извлечения структурных знаний из естественных текстов на основе нечетких семантических гиперсетей» защитил в 2002 году, в диссертационном совете, созданном на базе государственного

образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет». **Диссертация** выполнена на кафедре информационных технологий и экономической информатики ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Мельников Андрей Витальевич, директор Автономного учреждения «Югорский НИИ информационных технологий», профессор кафедры информационных технологий и экономической информатики ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет».

Официальные оппоненты:

1. Мещеряков Роман Валерьевич, доктор технических наук, профессор РАН, ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН», главный научный сотрудник,

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

3. Тебуева Фариза Биляловна, доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», заведующий кафедрой прикладной математики и компьютерной безопасности,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном Попковым Юрием Соломоновичем, Академиком Российской академии наук, доктором технических наук, профессором, главным научным сотрудником, и утвержденном Соколовым Игорем Анатольевичем, Академиком Российской академии наук, доктором технических наук, профессором, директором, ФИЦ ИУ РАН указала, что диссертация Вохминцева Александра Владиславовича на соискание ученой степени доктора технических наук является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором работы исследований решена научная проблема

повышения эффективности автономной навигации мобильных платформ (робототехнических комплексов) в неизвестной среде, имеющая важное хозяйственное значение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней».

Рецензируемая работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, имеет практическую значимость.

Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы), а автор работы, Вохминцев А.В., заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы).

Диссертация и отзыв ведущей организации обсуждены на заседании семинара Отделения 9 ФИЦ ИУ РАН, 22.09.2020 г., протокол № 12.

Соискатель имеет 58 опубликованных работы, из них по теме диссертации 31 работу, в том числе 12 статей, опубликованных в рецензируемых центральных журналах, входящих в список ВАК, 14 публикаций в журналах и изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Web of Science, 20 публикаций в журналах и изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 5 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ. 2 работы выполнены соискателем единолично, остальные – при непосредственном участии соискателя.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Sochenkov, I. Visual duplicates image search for a non-cooperative person recognition at a distance / I. Sochenkov, A. Vokhmintsev // Procedia Engineering. – 2015. – Vol.129. – P.440-445.
2. Makovetskii, A. Frequency analysis of gradient descent method and accuracy of iterative image restoration/ A. Makovetskii, A. Vokhmintsev, V. Kober, V. Kuznetsov // Communications in Computer and Information Science. – 2015. – Vol. 542. P. 109-118.
3. Kober, V. Recursive calculation of discrete cosine transform for low resolution signal processing / V. Kober, A.

- Vokhmintsev, A. Melnikov // *Doklady Mathematics*. – 2015. – Vol. 461 (3). – P. 257–260. **4.** Соченков И.В., Поиск изображений по визуальному подобию с применением инвертированных индексов цветовых гистограмм / И. В. Соченков, А. В. Вохминцев, В.В. Кузнецов, Н. А. Хромов, К.С. Григорьева // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2015. – № 4. – С. 86-94. **5.** Ручай, А.Н. Разработка централизованной системы избирательной мультибиометрической аутентификации / А.Н. Ручай, В.В. Кузнецов, А.В. Мельников, А.В. Вохминцев // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2016. – №.1. – С. 106-116. **6.** Vokhmintsev, A. A Real-time Algorithm for Mobile Robot Mapping Based on Rotation-invariant Descriptors and ICP / A. Vokhmintsev, K. Yakovlev // *Communications in Computer and Information Science*. – 2016. – Vol. 661. – P. 338-350. **7.** Vokhmintsev, A.V. Face recognition based on matching algorithm with recursive calculation of local oriented gradient histogram / A.V. Vokhmintsev, I.V. Sochenkov, V.V. Kuznetsov, D.V. Tikhonkikh // *Doklady Mathematics*. – 2016. – Vol. 466 (3). – P. 453–459. **8.** Соченков, И. Метод обратной индексации для поиска лиц по эталону / И. Соченков, А. Соченкова, А. Вохминцев // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2017. – №.1. – С.50-58. **9.** Царегородцев, А.Л. Подход к хранению и обработке первичной слабоструктурированной геолого-геофизической информации / А.Л. Царегородцев, С.С. Слободенюк, С.В. Волошин, А.В. Вохминцев // *Труды института системного анализа РАН*. – 2019. – Т.69 (4). – С. 3-12. **10.** Vokhmintsev, A.V. Reconstruction of three-dimensional map based on closed form solution of variational problem of multi-sensor data registration / A.V. Vokhmintsev, A.V. Melnikov, K.V. Mironov, V.V. Burlutskiy // *Doklady Mathematics*. – 2019. – Vol. 99 (1). – P. 1–5. **11.** Вохминцев, А.В. Метод навигации и составления карты в трехмерном пространстве на основе комбинированного решения вариационной подзадачи точка-точка ICP для аффинных преобразований / А.В. Вохминцев, Мельников А.В., С.В. Пачганов // *Информатика и ее применения*. – 2020. – Т.14 (1). – С. 101-112. **12.** Вохминцев, А.В. Решение вариационной задачи точка-плоскость ICP на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик трехмерной сцены / А.В. Вохминцев // *Труды института системного анализа РАН*. – 2020. – Т.70 (1). – С. 3-14. **13.** Vokhmintsev, A. A fusion algorithm for building three-dimensional maps /

A. Vokhmintsev, A. Makovetskii, V. Kober, I. Sochenkov, V. Kuznetsov // Proceedings of the XXXVIII SPIE's Annual Meeting: Applications of Digital Image Processing (San Diego, USA, August 2015). – 2015. – Vol. 9599. – P. 959929-1. **14.** Vokhmintsev, A. Robot mapping algorithm based on Kalman filtering and symbolic tags / A. Vokhmintsev, T. Botova, I. Sochenkov, A. Sochenkova, A. Makovetskii // Proceedings SPIE of the XL Applications of Digital Image Processing (San Diego, USA, August 2017). – Vol. 10396. – P. 103962I-7. **15.** Vokhmintsev, A. / A. Vokhmintsev, M. Timchenko, A. Melnikov, A. Kozko, A. Makovetskii // Robot path planning algorithm based on symbolic tags in dynamic environment // Proceedings of the XL SPIE Applications of Digital Image Processing (San Diego, USA, August 2017). – 2017. Vol. 10396. – P. 103962E1-9. **16.** Vokhmintsev, A. Real-Time visual loop-closure detection using fused iterative close point algorithm and extended Kalman –filter / A. Vokhmintsev, M. Timchenko, A. Karyakina // IEEE Proceedings of the 3rd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, (Saint-Petersburg, Russia, May 2017). – 2017. – P. 1-6. **17.** Vokhmintsev, A. Development of a method for constructing a 3D accurate map of the surrounding environment / A. Vokhmintsev, M. Timchenko, T. Botova, K. Mironov, A. Makovetskii, A. Kober // Proceedings SPIE of the XLI Applications of Digital Image Processing (San Diego, USA, August- September 2018). –2018. – Vol. 10752. – P. 107521X-1.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их достижениями в данной отрасли наук, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили **положительные** отзывы:

– **ведущей организации**, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), г. Москва. *Замечания:*

1) В главе 3 при проведении компьютерного моделирования представлены результаты сравнительного анализа для дескрипторных методов сопоставления изображений, тогда как было бы интересно также провести сравнение с методами, основанными на других подходах, например, на основе

локальных бинарных шаблонов или сверточных нейронных сетей. 2) В главе 4 при описании комбинированного метода регистрации для ортогональных преобразований многие определения сформулированы покомпонентно, тогда как запись в матричной форме была бы предпочтительней. 3) В диссертационном исследовании в главе 4 для решения задачи реконструкции трехмерной сцены используются итерационные методы регистрации. Данный выбор во многом обусловлен требованиями к входным данным и объектам сцены, указанным в параграфе 5.2 работы. Автор исследования показывает, что при реконструкции крупномасштабных сцен в реальном масштабе времени применение метрики точка-плоскость при решении вариационной задачи ICP позволяет добиться как лучшей сходимости, так и более высокой точности при сопоставлении трехмерных облаков точек в классе итерационных методов регистрации, при этом в работе не представлены результаты компьютерного моделирования и сравнительного анализа в классе неитерационных методов регистрации трехмерных данных, которые позволили бы оценить преимущества или недостатки предложенного метода регистрации данных для всех известных подходов к решению проблемы регистрации данных. 4) Результаты компьютерного моделирования в главе 8 «Практические приложения» могли быть усилены большим количеством сравнений с использованием известных эталонных баз данных для множества тестов с различными условиями, количественными и качественными ограничениями, входными данными. 5) Выбор методов для семантической маркировки окружающего пространства, таких как 3DEF, YOLOv3, Grabcut недостаточно обоснован. Было бы интересно исследовать точность названных выше методов для семантической маркировки объектов на трехмерной сцене в сравнении с другими известными методами семантической сегментации и маркировки пространства. 6) В рукописи диссертации не представлена информация о характеристиках алгоритмов машинного обучения, которые используются для семантической разметки наборов данных в эталонных базах данных NYU Depth Dataset и ASL DataSet.

Перечисленные замечания не снижают значимость полученных в диссертационной работе научных и практических результатов, а также положительной оценки работы в целом. Отмеченные замечания могут быть

использованы автором работы при продолжении научных исследований по представленной тематике.

– **официального оппонента**, д.т.н, профессора Мещерякова Романа Валерьевича, главного научного сотрудника лаборатории 80 киберфизических систем ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН», г. Москва. *Замечания:* 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 то 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_{km} – значение геометрического преобразования метода ИСР на основе оценки, полученной с использованием кинематической модели движения датчика.

– **официального оппонента**, д.т.н, доцента Даринцева Олега Владимировича, профессора кафедры автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г Уфа. *Замечания:* 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 4×4 , 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 $Y = T * X$, 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 подрисовочная подпись оформлена неверно (рис. 1.2, 1,3, 2,3, 2.10 и т.д.).

– **официального оппонента**, д.ф.-м.н., доцента, Тебуевой Фаризы Биляловны, заведующего кафедрой прикладной математики и компьютерной безопасности ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г.

Ставрополь. *Замечания:* 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 неитеративных 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.

– получено 9 положительных **отзывов на автореферат:**

1. Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук – обособленного подразделения ФГБУН Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук (г. Самара), (глав. науч. сотр. лаборатории анализа и моделирования сложных систем, заместитель директора по научной работе, д.т.н., доцент **Смирнов С. В.**) *Замечания:* 1) Из текста автореферата не совсем понятно, каким образом модель предметной области в эталонных базах данных (NYU Depth Dataset и ASL DataSet) используется для семантической маркировки трехмерной сцены с использованием конвейера методов 3DEF+ YOLOv3 + Grabcut. Ничего не сообщается о результатах уместного здесь компьютерного моделирования преобразований информации. 2) Не представлена информация о количественной оценке вычислительной сложности комбинированных методов решения вариационной задачи «точка-точка» и «точка-плоскость» в замкнутой форме для группы аффинных преобразований и для группы ортогональных преобразований. 3) Не ясно, какие требуются временные и вычислительные ресурсы для обучения нейросетевых моделей в эталонных БД, и возможно ли динамическое пополнение коллекции RGB-D кадров в этих БД.

2. ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск), (профессор Отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники, д.т.н., профессор **Гергет О. М.**) *Замечания:* 1) Считаю, что выбор динамического алгоритма A^* для проведения сравнительного анализа алгоритмов планирования траектории не очень обоснованным: известно, что для многих задач данный алгоритм уступает алгоритму планирования траектории на основе метрико-топологического графа, одна из вариаций которого используется в диссертационной работе. 2) Для обработки изображений в RGD-кадре автор использует дескрипторные методы, предложенный метод сопоставления изображений соответственно сравнивается с другими известными дескрипторными методами (Sift, Surf, ORB). В связи с этим возникает вопрос – как изменится точность и сходимость комбинированного метода регистрации при

использовании другого способа обработки изображений, например, на основе локальных бинарных шаблонов (Local Binary Patterns, LBP)?

3. ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный институт МИФИ (НИЯУ МИФИ)» (г. Москва), (профессор отделения интеллектуальных кибернетических систем офиса образовательных программ Института интеллектуальных кибернетических систем, д.т.н., профессор **Вольфенгаген В.Э.**) *Замечания:* 1) Описание алгоритма для решения проблемы «замыкания цикла» на основе метода корзина слов и инвертированного индекса в тексте автореферата представлено не в полной мере. 2) В автореферате не указано, каким способом находится решение комбинированной вариационной задачи для ортогональных преобразований в матричной форме (стр. 20, система уравнений формула 31). 3) Описание метода семантической сегментации пространства дано в виде тезисов, тогда как представленный научный результат очень важен для данной работы. 4) Выбор динамического метода планирования траектории A^* для сравнения с предложенным автором методом на основе HGA^* недостаточно обоснован, автору следовало произвести сравнение с методами, основанными на метрико-топологических графах или графах видимости.

4. ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск), (заместитель первого проректора по учебной работе, д.т.н., доцент **Захарова А. А.**) *Замечания:* 1) В автореферате диссертации не показано, в чем заключается отличие метода ICP, использующего метрику point-to-point, от метода ICP, использующего метрику point-to-plane для минимизации функционала в вариационной задаче. 2) В тексте автореферата не представлены формулы, на основе которых можно сделать вывод о количественных характеристиках вычислительной сложности предложенных методов и алгоритмов. 3) В работе недостаточно внимания уделено вопросу визуализации трехмерных моделей исследуемых сцен. Внимание автора работы сосредоточено на решении проблемы реконструкции окружающего пространства и получению решений комбинированной вариационной задачи метода ICP в аналитическом виде. Было бы интересно получить результаты интеграции предложенных методов регистрации данных и известных методов визуализации данных, например, с использованием методов МакМиллана и Оливейры.

5. ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск), (заведующий кафедрой «Системы автоматического управления», д.т.н., профессор **Ширяев В. И.**) *Замечания:* 1) Из текста автореферата не ясно, каковы должны быть условия освещенности на сцене, чтобы получить заявленные в главе 4 и главе 5 результаты по точности и сходимости? Какой вид должна иметь функция освещенности и в каком диапазоне должны находиться ее значения? 2) В тексте автореферата недостаточно внимания уделено результатам экспериментальных исследований, автор уделяет больше внимания представлению полученных теоретических результатов исследований. Содержание главы 8 в автореферате представлено в виде тезисов. 3) Из текста автореферата не ясно, для какого класса задач применим предложенный алгоритм планирования траектории: можно ли его распространить на сцены с динамическими препятствиями?

6. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (г. Москва), (профессор Департамента программной инженерии Факультета компьютерных наук, д.т.н., доцент **Зыков С.В.**) *Замечания:* 1) В автореферате следовало больше внимания уделить представлению данных о результатах компьютерного моделирования и вычислительных экспериментов, проведенных в работе. Кроме того, описание главы 8 (практические приложения) в автореферате дано в виде тезисов. 2) В автореферате не представлена информация о решении задачи планирования траектории, не приведена схема алгоритма решения задачи сопоставления изображений и результаты компьютерного моделирования для данного алгоритма. Аналогично, преимущества алгоритма сопоставления изображений приведены автором в виде тезисов.

7. ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» СО РАН (г. Иркутск), (глав. науч. сотр., зав. отделом «Системы искусственного интеллекта в энергетике», профессор Института информационных технологий и анализа данных ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», д.т.н. профессор **Массель Л. В.**) *Замечания:* 1) В тексте автореферата не показано, каким образом определяется расположение объектов-препятствий на сцене. Решение задачи планирования траектории мобильной

платформы не представлено в автореферате. С одной стороны, понятно, что автор использует известный алгоритм планирования траектории HGA* и вносит в него определенные изменения, а также не претендует на научную новизну в данном вопросе, но в методологических целях данный раздел должен присутствовать в тексте автореферата. 2) Из текста автореферата не ясно, как работает функция dist (формула 35 на стр.35), которая формирует вектор навигационных ориентиров из векторов визуальных и семантических ориентиров. Требуется пояснение. 3) В главе 5 представлены результаты только одного эксперимента, в котором мобильная платформа в автономном режиме передвигается в коридоре здания. Результаты другого эксперимента, в котором человек управлял мобильной платформой с установленными на ней камерами, не представлены.

8. ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления» Дальневосточного отделения РАН (г. Владивосток), (заместитель директора по научной работе, профессор ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», вице-президент Российской ассоциации искусственного интеллекта, д.т.н., профессор **Грибова В. В.**) *Замечания:* 1) В работе не представлена модель предметной области, которая используется для семантической маркировки неизвестного окружающего пространства. Автор работы приводит лишь общее описание эталонной базы данных NYU Depth dataset NYUv2, которая используется для проведения компьютерного моделирования. Было бы полезно представить структуру используемых классов объектов, обозначить объекты каких классов могут быть семантическими ориентирами на сцене. 2) В работе не хватает сравнения с уже известными методами трехмерной реконструкции, основанными на итеративной концепции решения задачи регистрации данных. Можно было бы привести результаты сравнительного анализа точности и скорости сходимости для методов регистрации с ограничениями в виде сферы или треугольника (об этом упоминается в работе), для итеративных методов регистрации, таких как, Oriented Gaussian Mixture Model (OGMM, N. Baka et al) и Near-Optimal Joint Object Matching via Convex Relaxation (Chen, L. J. Guibas и Q.-X. Huang).

9. ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» (г. Тюмень), (заведующий базовой кафедрой «Безопасные информационные технологии

умного города», д.т.н., профессор **Захаров А. А.**) *Замечания:* 1) Предложенная автором методология при решении задачи определения собственного положения и ориентации на сцене не использует спутниковые данные (GNSS) и одометрические данные (IMU). Полагаю, что комбинирование этих данных с визуальными и семантическими данными о сцене позволило бы получить еще более лучшие результаты с точки зрения точности и сходимости методов и алгоритмов в системе SLAM. 2) Набор существующих классов в эталонной базе NYU Depth dataset NYUv2 не в полной мере использован при проведении компьютерного моделирования на синтетических данных: Нью-Йоркский набор данных содержит порядка 80 различных классов, тогда как в работе используется порядка 20 различных классов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны: 1) методология решения проблемы одновременной навигации и построения карты (Simultaneous localization and mapping, SLAM), применение которой позволяет осуществлять реконструкцию трехмерной карты окружающей среды с использованием семантических характеристик объектов на сцене и доступной мультисенсорной информации, поступающей с датчиков при произвольном изменении их положения в трехмерном пространстве, а также решать проблему SLAM для контекстуально сложных крупномасштабных сцен в реальном масштабе времени в контролируемых и неконтролируемых условиях, включая равномерное или неравномерное освещение на сцене; 2) алгоритм поиска особых точек на изображениях в последовательности кадров на основе дескриптора локальных гистограмм ориентированных градиентов (ДЛ ГНГ) с рекурсивной процедурой вычисления; 3) комбинированные методы реконструкции контекстуально сложных крупномасштабных трехмерных сцен для группы аффинных и группы ортогональных преобразований на основе решения вариационной задачи ICP (Iterative Closest Point) в замкнутой форме с использованием метрик точка-точка и точка-плоскость, визуально связанных (ВЗХ) и семантических характеристик окружающей среды соответственно. Комбинированные методы улучшают качество работы двух ключевых шагов метода ICP: определение соответствующих точек между парой трехмерных

облаков точек и решение вариационной задачи; 4) метод решения задачи навигации и определения положения мобильной платформы на сцене (S-EKF SLAM), основанный на комбинировании визуальных и семантических характеристик неопределенной окружающей среды и расширенной Калмановской фильтрации (EKF), формулы для оценки вектора состояния при движении мобильной платформы по серии зашумленных измерений и семантических меток; 5) быстрый рекурсивный алгоритм вычисления дискретного косинусного преобразования (ДКП) дискретного сигнала в скользящем окне с произвольным шагом, основанный на рекурсивном соотношении между тремя последовательными локальными спектрами ДКП, вычисляемыми в равноудаленных положениях окна; 6) подход к оптимизации графа положений мобильной платформы и обнаружению «замыканий цикла» с использованием метода «мешок слов» и предложенного двухмерного дескриптора (ДЛ ГНГ); 7) программное обеспечение для решения проблемы автономной навигации робототехнических комплексов (мобильных платформ) в неопределенной среде, базирующееся на предложенной методологии;

предложены: 1) формальная трехмерная модель окружающей среды, которая основана на использовании трех типов информации: визуально связанных характеристик окружающей среды (данные о цвете), трехмерном облаке точек (данные о глубине сцены), данных о семантических свойствах окружающей среды; 2) формальная модель системы семантической маркировки окружающего пространства, отражающая характерные особенности предметной области; 3) эвристический алгоритм планирования траектории мобильной платформы, обладающий теоретически обоснованными оценками вычислительной сложности на основе метрико-топологического графа, содержащего семантическую информацию о свойствах окружающей среды; 4) непараметрический метод фильтрации и восстановления изображений, искаженных аддитивным фоновым шумом, импульсными помехами и мультипликативными интерференциями, из последовательности пяти наблюдаемых изображений, полученных микросканированием камеры; 5) метод дистанционного распознавания личности по изображению лица с использованием автокодировщика и эффективный метод поиска изображений-кандидатов на основе инвертированного индекса;

доказана эффективность применения разработанной методологии решения проблемы одновременной навигации и построения карты при навигации автономных роботизированных мобильных платформ в неопределенной среде в условиях неравномерного освещения на сцене на основе анализа результатов экспериментов с реальными данными и компьютерного моделирования на эталонных базах данных;

введены понятия визуальных и семантических характеристик окружающей среды, которые используются для совместного (комбинированного) решения задачи реконструкции трехмерной сцены и локализации мобильной платформы на трехмерной сцене в каждый момент времени.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны: 1) положения, которые вносят вклад в решение важной проблемы цифровой обработки информации, связанной с реконструкцией точных трехмерных моделей окружающего пространства во время движения автономного интеллектуального объекта управления при разработке различных приложений для робототехники; 2) возможность применения предложенной комбинированной методологии одновременной навигации и картографирования для контекстуально сложных крупномасштабных сцен в реальном масштабе времени; 3) возможность применения разработанной методологии для широкого спектра задач, таких как: распознавание и слежение за динамическими объектами в заданном пространстве, предсказание траектории их перемещения, согласованное и оптимизированное планирование движений мобильных платформ в заданном пространстве с учетом возможных статических препятствий;

применительно к проблематике диссертации результативно использована интеграция методов системного анализа, теории искусственного интеллекта, теории автоматического управления, компьютерного когнитивного моделирования для повышения степени автономности управления роботизированным комплексом;

изложено содержание основных этапов разработанной методологии одновременной навигации и построения карты, основанной на системном сочетании визуальных и семантических характеристик окружающего пространства, при решении задачи навигации мобильной платформы для

контекстуально сложных крупномасштабных сцен в реальном масштабе времени в контролируемых и неконтролируемых условиях;

раскрыты возможности эффективного применения методов и алгоритмов для реконструкции трехмерных сцен окружающего пространства, визуализации трёхмерных моделей и навигации мобильных платформ в неопределенной среде, базирующихся на комбинировании информации о семантических характеристиках окружающей среды и доступной мультисенсорной информации, получаемой с различных типов датчиков;

изучены преимущества и недостатки известных методологий (EKF-SLAM, Visual SLAM) применительно к решению задачи SLAM для контекстуально сложных крупномасштабных сцен; установлено, что: 1) эти методологии имеют ограничения по применению в окружающей среде, искаженной различными естественными помехами, характеризуются высокой вычислительной и алгоритмической сложностью; 2) методология EKF-SLAM не учитывает при решении поставленной задачи визуальную информацию об окружающей среде, поэтому точность получаемых оценок положения мобильной платформы на карте относительно навигационных ориентиров невысока; 3) в методологии Visual SLAM результат реконструкции сцены с точки зрения точности и сходимости обусловлен выбором начального приближения для решения вариационной задачи; 4) визуальные методы для решения проблемы SLAM, основанные на итеративном алгоритме ICP для группы аффинных преобразований, не позволяют проводить точную регистрацию структурных элементов сцены; 5) в методологии Visual SLAM не используется информация о семантических характеристиках окружающей среды, вследствие чего все особые точки в двумерных и трехмерных данных имеют одинаковую значимость; при этом информация об особых точках на изображении используется только на этапе сопоставления данных;

проведена модификация известной постановки задачи решения проблемы одновременной навигации и картографирования, что позволяет осуществлять реконструкцию трехмерной модели окружающего пространства для контекстуально сложных крупномасштабных сцен и определение своего положения на этой карте в реальном масштабе времени в условиях различных

помех в окружающей среде с использованием информации о визуальных и семантических характеристиках окружающей среды.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены: 1) система SLAM для решения задачи спасения людей в опасных и труднодоступных инфраструктурных объектах, Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (г. Москва); 2) программно-аппаратная платформа для дистанционного управления и программирования роботизированных комплексов различного назначения, Уральский робототехнологический центр «Альфа-Интех» (г. Челябинск); 3) система машинного зрения робототехнических комплексов, Уральский робототехнологический центр «Альфа-Интех» (г. Челябинск); 4) методы визуализации информации в геоинформационной системе ITSGIS, которая предназначена для автоматизации работ, выполняющих функции учета объектов городской и транспортной инфраструктуры, «Научно-производственный центр Интеллектуальные транспортные системы» (г. Самара); 5) методы автоматизации выделения зон трещиноватости, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий (г. Ханты-Мансийск);

определены перспективы практического применения разработанной методологии и возможности ее дальнейшего развития в системах спасения людей; системах идентификации личности и интеллектуального наблюдения; системах автономной навигации робототехнических комплексов в неопределенном пространстве; системах мониторинга за окружающим пространством в опасных или труднодоступных для человека объектах. Перспективным направлением применения результатов диссертационного исследования является коллаборативная робототехника и антропоморфная робототехника и связанные с ней области исследований.

созданы: 1) прототип программной системы одновременной навигации и построения карты, базирующейся на предложенной методологии; 2) макетный образец интеграции разрабатываемой системы одновременной навигации и построения карты с мобильной платформой; 3) алгоритмы управления

пространственно-распределённой группой мобильных платформ и их программная реализация;

представлены программа и методика экспериментальных исследований для макетного образца.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

проведенное компьютерное моделирование на эталонных базах данных и **экспериментальное исследование** комбинированной методологии навигации на контекстуально сложных крупномасштабных сценах в реальном масштабе времени в условиях различных помех в окружающей среде показали эффективность предложенных методологических основ, комплекса моделей, методов, алгоритмов и подходов, что подтверждается актами внедрения, а именно: 1) для задачи поиска и сопоставления особых точек на двумерных изображениях предложенный алгоритм на основе ДЛ ГНГ обладает лучшими характеристиками по точности в сравнении с известными дескрипторами при малых поворотах вне области сцены; используется для сопоставления изображений с произвольным пространственным разрешением и небольшим изменением масштаба относительно друг друга, дает точные оценки для сложных крупномасштабных сцен; может применяться в приложениях при сопоставлении изображений для крупномасштабных сцен в реальном режиме времени; 2) в задаче реконструкции контекстуально сложных крупномасштабных трехмерных сцен предложенные комбинированные методы отличаются тем, что: 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; в неконтролируемых условиях позволяют получить лучшую сходимость и точность в сравнении с другими дескрипторными методами: для аффинных преобразований метод регистрации сходится уже после 11 итераций, а для ортогональных преобразований сходится уже после 10 итераций; решение для группы аффинных преобразований позволяет проводить точную регистрацию структурных элементов сцены и создает основу для применения метода Хорна на случай с неригидными объектами на сцене; 3) для

задачи навигации и определения положения мобильной платформы на сцене предложенный метод S-EKF SLAM: в контролируемых условиях с точки зрения точности выдает результаты, подобные Visual SLAM, но предложенный метод имеет лучшую сходимость; в неконтролируемых условиях с точки зрения точности выдает лучшие результаты, чем методы определения положения мобильной платформы в известных методологиях Visual SLAM, EKF SLAM, Graph-SLAM; имеет хорошую сходимость и может использоваться в приложениях, работающих в реальном масштабе времени; 4) для задачи предварительной обработки данных, связанной с восстановлением изображений от различных помех и сжатием изображений, предложенный быстрый рекурсивный алгоритм вычисления ДКП является более эффективным, чем известные быстрые алгоритмы ДКП, когда шаг скользящего окна меньше, чем граничное значение, равное 8; 5) для задачи обнаружения «замыканий цикла» предложенный подход к оптимизации графа положений мобильной платформы позволяет: проводить корректировку движения мобильной платформы, при этом точность локализации для коротких циклов увеличивается в диапазоне от 15% до 25% для разных серий тестов, тогда как для длинных циклов различие в точности локализации отличается в несколько раз; значительно сократить вычислительную сложность этапа, связанного с определением визуального подобия изображений;

теория построена на известных положениях системного анализа, теории автоматического управления, теории цифровой обработки информации, теории искусственного интеллекта и когнитивного моделирования и создания на основе такой интеграции системы SLAM нового поколения; теория согласуется с результатами проведенных автором и известных ранее опубликованных экспериментальных исследований; адекватность и достоверность предложенных методов и алгоритмов подтверждается результатами компьютерного моделирования для эталонных баз данных, а также экспериментами с реальными данными; был проведен сравнительный анализ методов SLAM в серии экспериментов с точки зрения точности и вычислительной сложности с известными открытыми системами SLAM: HOGMan, ORB-SLAM, TORO-SLAM, RGBDSlam, EKFMonoSLAM, используя мобильные платформы Odyssey 6 Robotics и Husky UGV;

идея базируется на совместном использовании мультисенсорной динамической информации и семантической информации об объектах на трехмерной сцене при решении задачи пространственного совмещения последовательных кадров данных, задачи локализации положения мобильной платформы на сцене и задачи обнаружении «замыканий цикла»;

использованы результаты сравнения авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике;

установлено, что проведенные автором исследования подтверждают эффективность предложенной методологии решения задачи одновременной навигации и построения карты, а также разработанных методов, алгоритмов и подходов для реконструкции трехмерной сцены и для локализации мобильной платформы в неопределенной окружающей среде в сравнении с известными методологиями SLAM;

использованы современные методы обработки информации и компьютерного моделирования с последующим сравнением результатов компьютерного моделирования и реальных вычислительных экспериментов с данными, полученными для известных методов и алгоритмов по данной тематике; точность и сходимость предложенных методов была оценена на эталонных базах данных NYU Depth Dataset и ASL DataSet.

Личный вклад соискателя состоит в разработке: методологии решения задачи одновременной навигации и построения карты, основанной на комбинировании визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды; алгоритма поиска особых точек на изображениях на основе дескриптора локальной гистограммы ориентированных градиентов с рекурсивной процедурой вычисления, методов решения вариационной задачи точка-точка и точка-плоскость в замкнутой форме для группы аффинных преобразований и для группы ортогональных преобразований; метода решения задачи навигации и определения положения мобильной платформы, основанном на комбинировании визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды и расширенной Калмановской фильтрации; быстрого рекурсивного алгоритма вычисления ДКП дискретного сигнала; подхода к оптимизации графа положений мобильной платформы и обнаружению «замыканий цикла»;

участии в программной реализации системы, созданной на основе комбинированной методологии SLAM для решения задачи спасения людей; в проведении компьютерного моделирования и экспериментальных исследований для разработанных методов, алгоритмов и подходов, обработке экспериментальных данных; в исследованиях по данной тематике в рамках НИР и грантов РФФИ, РНФ, Министерства науки и высшего образования РФ (Министерство образования и науки РФ); в подготовке публикаций в рецензируемых научных изданиях по выполненной работе, в апробации результатов научных исследований в форме выступлений с пленарными и секционными докладами на международных и всероссийских научных конференциях.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что в диссертации:

- соблюдены установленные положением о присуждении ученых степеней критерии, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени;
- отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты;
- соискатель адекватно использует ссылки на авторов и источники заимствования;
- диссертация является оригинальной работой (доля фрагментов текста составляет более 85 %).

Диссертационная работа Вохминцева Александра Владиславовича «Методология решения проблемы одновременной навигации и построения карты на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды» соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, в редакции с изменениями, утв. Постановлением Правительства РФ от 1 октября 2018 года № 1168), предъявляемых к докторским диссертациям.

Тема работы и содержание исследований соответствуют паспорту научной специальности ВАК 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы): п 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия

решений и обработки информации; п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; п. 5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; п. 6. Методы идентификации систем управления на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации; п. 12. Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.

Диссертация Вохминцева А.В. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема повышения эффективности автономной навигации мобильных платформ (робототехнических комплексов) в неопределенной динамической окружающей среде.

На заседании 15.12.2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Вохминцеву А.В. ученую степень доктора технических наук по специальности 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы).

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 20, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета



Юсупова Нафиса Исламовна

Сметанина Ольга Николаевна

15 декабря 2020 года