

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.224.01

на базе федерального государственного учреждения
«Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН) по диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 16 июня 2022 № 6

О присуждении Боковому Андрею Валерьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование методов и разработка алгоритмов одновременного картирования и локализации по видеопотоку единственной камеры» по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 11 апреля 2022 г., протокол №4, диссертационным советом 24.1.224.01 на базе федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 747/нк от 22 июня 2016 г.

Соискатель Боковой Андрей Валерьевич, 1993 года рождения, в 2014 году окончил факультет Физико-математических и естественных наук Российского университета дружбы народов по специальности «Прикладная математика и информатика». В 2016 году окончил факультет Физико-математических и естественных наук Российского университета дружбы народов по специальности «Фундаментальная информатика и информационные технологии». С 2015 года по настоящее время работает в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук (с марта 2022 по совместительству) в должности младшего научного сотрудника. С 2016 по 2020 г.

обучался в очной аспирантуре Российского университета дружбы народов и сдал кандидатские экзамены по специальности 05.13.17 – «Теоретические основы информатики». В 2021 году был прикреплен к заочной аспирантуре Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук и сдал кандидатские экзамены по специальности 1.2.2 (05.13.18) – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана Федеральным государственным учреждением Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель Боковой Андрей Валерьевич работал в Федеральном исследовательском центре «Информатика и управление» Российской академии наук в отделе 71 в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена на кафедре информационных технологий Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов».

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук Яковлев Константин Сергеевич, ведущий научный сотрудник отдела 71 ФИЦ ИУ РАН.

Официальные оппоненты:

1. Вохминцев Александр Владиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Интеллектуальные информационные технологии и системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет».

Отзыв оппонента положительный, имеются замечания по диссертации:

- 1) В главе 3.3 не совсем понятно насколько предложенная функция потерь $a\text{VerHu}$ влияет на скорость обучения искусственной нейронной сети. Также в таблице 6 для полной картины сравнения не хватает данных об

архитектурах нейронных сетей, обученных с помощью разработанной автором функции aVerHu.

- 2) В работе не определены четкие критерии для оценки быстродействия алгоритмов картирования и локализации. Данные алгоритмы имеют в своем составе блоки, которые решают различные подзадачи, например, такие как определение позиции, совмещение кадров, оптимизация карты и траектории, поэтому представляется важным производить оценку влияния предложенных в диссертационной работе подходов в контексте производимых улучшений отдельной для каждого блока.
- 3) Во второй главе при проведении оценки качества предложенного алгоритма замыканий траектории автором использовались известные базы данных Malaga Dataset 2009, Malaga Dataset 2013, LSD-SLAM Dataset, KITTI Dataset, которые содержат как длинные, так и короткие циклы. Известно, что одни и те же методы для решения проблемы замыкания цикла могут показывать разные качественные результаты в зависимости от длины исследуемой траектории. Было бы интересно посмотреть на изменение абсолютной ошибки траектории в зависимости от количества особых точек K и длины анализируемой траектории. Также представляется полезным получить количественные и качественные оценки работы предложенного эвристического алгоритма поиска замыканий траекторий для экспериментов с реальными данными, полученным при движении колесного робототехнического устройства в пространстве.
- 4) Автор в третьей главе утверждает, что известные методы восстановления карт глубин изображений в подходе к картированию и локализации на основе RGBD-SLAM опираются только на использование нейросетевых моделей. С одной стороны, верно, что методы восстановления карт глубины с использованием нейронных сетей получили широкое распространение в цифровой обработке информации и робототехнике, но с другой стороны, известно множество других методов решения поставленной задачи,

например, с использованием дескрипторов, нелинейных фильтров (порядковые статистики), локальных шаблонов, и.т.д. В плане продолжения дальнейших работ по научной задаче, поставленной в данной диссертации, было бы интересно сравнить предложенный метод восстановления карт не только с аналогичными известными методами решения задачи на основе нейронных сетей, но и с методами восстановления карт глубин, использующими другую парадигму.

- 5) При обзоре современного состояния анализируемой научной проблемы автору следовало бы уделить больше внимания изучению научных рецензируемых изданий за последние 5 лет, в представленном автором работы списке литературы преобладают работы за период с 2008 по 2018 гг.
- 6) Следует отметить наличие ошибок при оформлении текста рукописи диссертации, связанных как с отклонением от действующего ГОСТ, так и с неправильной версткой рукописи - подписи для рисунков и таблиц расположены на разных страницах с их содержанием, например, стр. 50-51, 53-54, и.т.д.

2. Степанов Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник Исследовательского центра мультипроцессорных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт программных систем им. А.К. Айламазяна» Российской академии наук (ИПС им. А.К. Айламазяна РАН).

Отзыв оппонента положительный, имеются замечания по диссертации:

- 1) В списке сформулированных задач, первая задача звучит так: «Разработать эвристический алгоритм обнаружения замыкания траектории для повышения точности и вычислительной эффективности методов решения задачи картирования и локализации по видеопотоку». На мой взгляд, формулировку следовало бы несколько преобразовать, поскольку подобные эвристические алгоритмы уже существуют.

- 2) В первой главе говорится об использовании восьмиточечного алгоритма и его вариаций для вычисления фундаментальной матрицы по восьми и более точкам в задаче сопоставления изображений. В данной задаче предпочтительнее использовать 5-точечный алгоритм, поскольку он быстрее, а 8-точечный алгоритм некорректно работает в тех случаях, когда все точки располагаются на одной плоскости. Подобные ситуации могут возникать при движении мобильного робота внутри помещений, в которых плоские поверхности встречаются часто.
- 3) Список источников, описывающих существующие подходы к обнаружению замыканий траектории, видится несколько сжатым. Было бы целесообразным расширить обзор, что позволило бы лучше показать новизну разработанного алгоритма, основанного на использовании геометрических ограничений.
- 4) Разработанный алгоритм поиска замыканий отличается также тем, что на этапе сопоставления изображений, при отборе ключевых точек на изображениях выбираются те точки, у которых суммы компонентов ее дескрипторов являются максимальными, по сравнению с остальными точками. Есть предположение, что улучшение в плане скорости достигается за счет использования геометрических ограничений в процессе поиска замыканий, а улучшение в плане точности построения траектории - за счет предложенного критерия при выборе ключевых точек. На мой взгляд, использование геометрических ограничений улучшает именно время работы, а результат поиска замыканий, вероятно, не меняется. Из текста работы непонятно, затрагивался ли данный вопрос в ходе исследований.
- 5) Во второй главе сказано, что разработанный алгоритм поиска замыканий встраивался в SLAM-алгоритмы ORB-SLAM2 и LSD-SLAM. В третьей главе сказано, что разработанный нейросетевой алгоритм восстановления карты глубины тестировался совместно с другим существующим SLAM-алгоритмом - RTABMAP. Из текста работы непонятно, почему

разработанные решения не тестировались на одном и том же SLAM-алгоритме.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук – в своем положительном заключении, подписанном Олегом Петровичем Кузнецовым, доктором технических наук, главным научным сотрудником лаборатории №11, указала, что «диссертационная работа Бокового Андрея Валерьевича является завершенным научным исследованием, содержащим научно обоснованные программно-алгоритмические решения задачи картирования и локализации по видеопотоку единственной камеры.

Содержание диссертационной работы А.В. Бокового соответствует паспорту специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» п.3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий» и п.6 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента».

Диссертация полностью соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Боковой Андрей Валерьевич заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2- «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден на семинаре лаборатории № 11 Института проблем управления РАН, протокол № 1 от «24» мая 2022 г.

Замечания:

1. Не раскрыто влияние внутренней калибровки камеры на результаты сравнения результатов картирования с использованием разработанной функции сопоставления изображений.

2. Отсутствует комплексное сравнение методов mvSLAM с учетом всех улучшений, полученных в разработанных алгоритмах и моделях.
3. Есть ряд замечаний к оформлению текста диссертации. Местами текст читается тяжело и требует пояснений в виде схем и рисунков.
4. На стр.9 диссертации указано, что диссертация состоит из трех глав, хотя в действительности она содержит четыре главы, что и указано в содержании диссертации (стр.3).
5. Об алгоритме поиска замыканий: на стр.58 (выводы к гл.2) сказано: «Эксперимент показал, что разработанный алгоритм позволил улучшить качество построения траектории на 8,42% и производительность (скорость работы) на 43,53% по сравнению с оригинальными алгоритмами, использующимися в методах для картирования и локализации по видеопотоку». Однако на стр. 100-101 (Заключение) сказано: «Исследование показало, что удалось добиться повышения точности локализации и построения карты на 8% и 7%, соответственно, при уменьшении времени поиска замыкания траектории на 33%». Непонятно, какие из этих данных верны.

Соискатель имеет 17 опубликованных научных работ по теме диссертации, в том числе: 2 изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 9 - в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science и 6 - в сборниках трудах конференций. Недостоверных сведений об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, не обнаружено.

Наиболее значимые работы:

1. Боковой А.В., Муравьев К.Ф., Яковлев К.С. Система одновременного картирования, локализации и исследования неизвестной местности по видеопотоку // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2020. – №. 2. – С. 51-61.

2. Muravyev K., Bokovoy A., Yakovlev K. tx2_fcnn_node: An open-source ROS compatible tool for monocular depth reconstruction // SoftwareX. – 2022. – P. 1-6.
3. Muravyev K., Bokovoy A., Yakovlev K. Enhancing exploration algorithms for navigation with visual SLAM // Russian Conference on Artificial Intelligence. – Springer, Cham, 2021. – P. 197-212.
4. Bokovoy A., Muraviev K. Assessment of Map Construction in vSLAM // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, 2021. – P. 1-6.
5. Bokovoy A., Muravyev K., Yakovlev K. Real-time Vision-based Depth Reconstruction with NVidia Jetson // 2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR). – IEEE. 2019. P. 1-6.
6. Bokovoy A., Yakovlev K. Sparse 3D Point-Cloud Map Upsampling and Noise Removal as a vSLAM Post-Processing Step: Experimental Evaluation // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Springer, Cham. 2018. P. 23-33.
7. Bokovoy A., Yakovlev K. Enhancing semi-dense monocular vSLAM used for multi-rotor UAV navigation in indoor environment by fusing IMU data // The 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2018). 2018. P. 391-394.

На автореферат поступило четыре положительных отзыва, которые подписали:

1. Борисов Вадим Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники филиала федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске.

Замечания:

- 1) На рис. 2 (и пояснении к нему) не вполне ясно, каким образом осуществляется ограничение области поиска замыканий траекторий.

- 2) Следовало бы больше внимания уделить описанию предложенной функции потерь $aVerNu$ и процедуре ее оценки.

2. Бондунков Николай Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры 704 «Информационно-управляющие комплексы ЛА» Московского авиационного института (Национального исследовательского университета).

Замечания:

- 1) Следует уделить больше внимания постановке и объяснению задачи замыкания поиска замыканий на траектории, а также сопутствующей ей задаче - глобальной оптимизации карты и траектории.

3. Карпов Валерий Эдуардович, кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории робототехники Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Замечания:

- 1) В тексте автореферата отсутствуют оценки асимптотической сложности разработанных алгоритмов. Не ясно, проводился ли анализ такой сложности в диссертационной работе.
- 2) В подписи к рис. 5 следует дать более подробную информацию о том, что изображено на рисунке.

4. Королёва Мария Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры РК-9 «Компьютерные системы автоматизации производства» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Замечания:

- 1) В описании главы 3 не хватает оценки времени работы реализованных операций чередования и сверточного повышения дискретизации.

- 2) В описании главы 4 следует более подробно пояснить, почему первые три варианты выбора параметра t чувствительны к расстоянию, поскольку из текста автореферата четкого пояснения не следует.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области компьютерного зрения, методов одновременного картирования и локализации, робототехники и искусственного интеллекта, что подтверждается их исследованиями и публикациями в высокорейтинговых научных журналах.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: **Разработан** новый алгоритм обнаружения замыканий траекторий на основе эвристического ограничения области поиска визуального сходства изображений, позволяющий повысить точность локализации и вычислительную эффективность работы методов, решающих задачу одновременного картирования и локализации по видеопотоку единственной камеры. **Разработаны** новые модели искусственных нейронных сетей для восстановления карт глубин изображений на основе автокодировщика с ускорением отдельных операций с помощью алгоритма совмещения матриц на графическом процессоре, позволяющая значительно повысить производительность восстановления глубины изображений при сохранении высокой точности восстановления, достаточной для эффективного решения задачи одновременного картирования и локализации по видеопотоку единственной камеры. **Разработана** новая модель сопоставления карт, полученных методами картирования и локализации по видеопотоку, основанная на сопоставлении точек двух множеств (эталонного и построенного) с учетом позиций камеры, которые были вычислены в ходе реконструкции трехмерной карты из двумерного изображения. Полученные алгоритмы и модели экспериментально **исследованы** на открытых коллекциях данных.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- разработанные алгоритмы и математические модели построены на известных, проверяемых данных и фактах, согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации, полученными на открытых коллекциях данных и реальных робототехнических системах;
- показана воспроизводимость результатов экспериментов;
- установлено качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике;
- результаты работы прошли апробацию на профильных научных конференциях и семинарах.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- впервые **предложено** использование геометрических ограничений на движение робота для минимизации множества сопоставления изображений в алгоритме поиска замыканий траектории;
- впервые **применены** операция чередования для ускорения искусственных нейросетевых моделей в задаче восстановления глубины изображений. Также **разработана** адаптивная функция потерь;
- теоретически **обосновано** применение разработанной модели оценки трехмерных облаков точек для качественного исследования результатов картирования методов картирования и локализации по видеопотоку.

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

- **создана** программная система картирования и локализации мобильного робота;
- **повышена** автономность и расширен список решаемых робототехнической системой задач.

Личный вклад соискателя состоит в:

- разработке моделей и алгоритмов;

- проведении численных экспериментов и обработке результатов;
- подготовке научных статей по полученным результатам;
- апробации результатов исследования.

На заседании «16» июня 2022 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013г., и принял решение присудить Боковому А.В. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 36 человек, из них 6 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 45 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени 34, против присуждения ученой степени 1, недействительных бюллетеней 1.

Заместитель Председателя диссертационного
совета 24.1.224.01

д.т.н.



О.Г. Григорьев

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.1.224.01

к.ф.-м.н.

И.В. Смирнов

«16» июня 2022 г.