

Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук»
(ФИЦ ИУ РАН)

Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2
Тел. 8(499) 135-62-60, факс 8(495) 930-45-05
E-mail: freesc@freesc.ru <http://www.freesc.ru>

От 25.09.2020 № 115/ИСА-04/62

На № _____

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального
государственного учреждения
«Федеральный исследовательский
центр «Информатика и управление»
Российской академии наук»,

Академик РАН И.А. Соколов

«25» сентября 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Вохминцева Александра Владиславовича
«Методология решения проблемы одновременной навигации и построения
карты на основе комбинирования визуальных и семантических
характеристик окружающей среды»,
представленную на соискание ученой степени доктора
технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ,
управление и обработка информации (информационные и технические
системы)

Актуальность темы исследования

Диссертационное исследование Вохминцева А.В. посвящено вопросам повышения эффективности процессов обработки информации в методах и алгоритмах 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.

Одновременная навигация и картографирование относятся к проблеме, в которой данные кадра используются в качестве единственного источника внешней информации для того, чтобы установить положение движущейся мобильной платформы (робота) в пространстве, и в то же время построить карту зоны исследования. На сегодняшний день эта проблема считается решенной для построения двумерных карт небольших статических сцен с использованием датчиков дальности. Однако для динамичных, сложных и крупномасштабных сцен построение точной трехмерной карты окружающего пространства и навигация на ней являются активной областью научных

УТВЕРЖДАЮ
Вх. № 1155-13
от 13.10.2020

исследований. Принято различать следующие методологии SLAM: визуальная (Visual SLAM), на основе частичного фильтра (Particle Filter SLAM), на основе расширенного фильтра Калмана (Extended Kalman Filter, EKF SLAM), на основе графов (Graph-based SLAM). В работе проведен сравнительный анализ известных методологий решения проблемы SLAM и обозначены свойственные им недостатки. Для преодоления указанных недостатков в работе предложена новая методология решения проблемы SLAM на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды. Предложенная в работе методология основана на использовании трех типов данных: визуально связанные характеристики окружающей среды, трехмерные облака точек, данные о семантических свойствах окружающей среды, при этом визуальная и семантическая информация о трехмерной сцене использована на всех ключевых шагах решения проблемы SLAM.

Таким образом, на основе вышесказанного можно сделать вывод об актуальности темы диссертационного исследования для решения задачи автономной навигации робототехнических систем в частности и в целом для цифровой обработки информации и развития различных приложений робототехники.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 298 страниц машинописного текста, включая библиографический список из 248 наименований и 2 приложения.

В первой главе рассмотрено современное состояние исследований по проблеме одновременной навигации и картографирования.

В второй главе представлена предлагаемая в работе комбинированная методология для решения проблемы одновременной навигации и построения карты на основе слияния визуальных и семантических характеристик неизвестной окружающей среды.

В третьей главе представлены методы поиска и сопоставления особых точек на изображениях на основе двумерных дескрипторов с использованием дескриптора с рекурсивным вычислением гистограмм направленных градиентов.

В четвертой главе рассмотрено решение задачи реконструкции трехмерной сцены на основе точных решений вариационной задачи регистрации метода Iterative Closest Point (ICP).

В пятой главе предложен метод решения задачи навигации и определения положения мобильной платформы на основе расширенного фильтра Калмана и семантических ориентиров.

В шестой главе представлены методы восстановления и сжатия изображений и сигналов: рекурсивный алгоритм для вычисления скользящего ДКП с произвольным шагом, вариационный метод восстановления сигналов, искаженных линейным оператором.

В седьмой главе предложено решение проблемы замыкания цикла и метод поиска изображений по визуальному подобию.

В восьмой главе рассмотрены результаты применения комбинированной методологии решения проблемы одновременной навигации и картографирования в задаче спасения людей.

В заключении представлены основные выводы и результаты, приведены направления дальнейших исследований по представленной работе.

Содержание и структура работы находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. Автореферат докторской диссертации соответствует ее содержанию.

Содержание диссертации соответствует п.2, п.4, п. 5, п. 6 и п. 12 паспорта специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы).

Соискателем лично получены все основные результаты, выносимые на защиту.

По объему и структуре работа соответствует требованиям «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842.

Материалы диссертации Вохминцева А.В. полно изложены в опубликованных статьях в рецензируемых научных изданиях: в ведущих научных журналах из списка ВАК и в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Публикации по теме работы опубликованы в научных журналах: «Доклады академии наук», «Труды института системного анализа РАН», «Информатика и ее применения», «Искусственный интеллект и принятие решений», «Информационные технологии и вычислительные системы», «Procedia Engineering» и «Communications in Computer and Information Science. Результаты интеллектуальной деятельности отражены в пяти свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ.

Научная новизна результатов

На основе анализа текста рукописи диссертационной работы Вохминцева А.В. и раздела научная новизна во введении можно отметить следующие наиболее важные научные результаты данной работы:

– Предложена новая методология для 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. Предложенная методология основана на визуальной методологии SLAM и отличается от известных методологий тем, что:

- информация о визуально связанных характеристиках окружающей среды используется на всех этапах предлагаемой методологии для улучшения точности и сходимости соответствующих предложенных методов и алгоритмов, а не только на этапе сопоставления данных об особых точках на изображении;

- информация о визуально связанных характеристиках, трехмерных облаках точек, информация о семантических характеристиках окружающей среды используется для совместного (комбинированного) решения вариационной задачи ICP;

- информация о семантических характеристиках окружающей среды используется при решении вариационной задача точка-плоскость для класса ортогональных преобразований, при решении вариационной задача точка-точка для класса аффинных преобразований, при определении положения мобильной платформы в неизвестном пространстве: семантические маркеры учитываются при расчете матрицы перехода состояний и вектора управлений;

- позволяет решать проблему SLAM для контекстуально сложных крупномасштабных сцен в реальном масштабе времени в контролируемых и неконтролируемых условиях, связанных с условиями равномерного или неравномерного освещения на сцене.

– Разработан алгоритм поиска особых точек на изображениях последовательности кадров на основе дескриптора локальной гистограммы ориентированных градиентов (ДЛ ГНГ) с рекурсивной процедурой вычисления, который отличается тем, что:

- 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 в виде пирамидального разложения на несколько связанных квантованных уровней и процедуры предварительной обработки данных, связанной с вычислением значения нормализованных центрированных ГНГ и преобразований Фурье.

– 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 и 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;
- применение визуально связанных характеристик на основе предложенного дескриптора (ДЛ ГНГ) для решения вариационной задачи алгоритма ИСР для аффинных преобразований позволяет получить в неконтролируемых условиях лучшую сходимость и точность в сравнении с другими дескрипторными методами: метод регистрации сходится уже после 11 итераций, тогда как при использовании дескриптора ORB предложенный метод сходится только после 16 итераций;
- применение визуально связанных характеристик на основе предложенного дескриптора (ДЛ ГНГ) для решения вариационной задачи алгоритма ИСР для ортогональных преобразований позволяет получить в неконтролируемых условиях лучшую сходимость и точность в сравнении с другими дескрипторными методами: предложенный метод регистрации сходится уже после 10 итераций, тогда как при использовании дескриптора ORB предложенный метод регистрации сходится только после 14 итераций;
- 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.

В работе установлено, что точность реконструкции зависит от количества особых точек в кадре нелинейным образом – в виде функции с одним ярко выраженным пиком для всех типов дескрипторов.

– 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 отличается тем, что:

- в контролируемых условиях метод с точки зрения точности выдает результаты подобные Visual SLAM, но при этом предложенный метод имеет лучшую сходимость;

- 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.

– Разработан быстрый рекурсивный алгоритм для вычисления ДКП дискретного сигнала в скользящем окне с произвольным шагом. Алгоритм основан на рекурсивном соотношении между тремя последовательными локальными спектрами ДКП, которые вычисляются в равноудаленных положениях окна. Алгоритм является более эффективным, чем известные быстрые алгоритмы ДКП, когда шаг скользящего окна меньше, чем граничное значение, равное 8. Предложенный алгоритм используется для сжатия изображений, получаемых с множества датчиков, установленных на мобильной платформе.

– Предложен подход к оптимизации графа положений мобильной платформы и обнаружению замыканий цикла с использованием метода «корзина слов» и предложенного двумерного дескриптора (ДЛ ГНГ), который отличается тем, что:

- позволяет проводить корректировку движения мобильной платформы и уточнения трехмерной карты окружающей среды, при этом точность локализации для коротких циклов увеличивается в пределах диапазона от 15% до 25% для разных серий тестов, тогда как для длинных циклов различие в точности локализации может существенно отличаться (в несколько раз);

- использование предложенного дескриптора (ДЛ ГНГ) вместо известных дескрипторов (SUFT, SURF, ORB) позволяет значительно сократить вычислительную сложность этапа, связанного с определением визуального подобия изображений в двух ключевых последовательных кадрах данных;

- предложенная эффективная процедура поиска изображений по визуальному подобию на основе инвертированного индекса позволяет использовать подход на основе «корзины слов» в реальном масштабе времени.

Степень достоверности результатов исследования

Обоснованность полученных в диссертационной работе результатов основана на использовании апробированных методов исследования, корректном применении математического аппарата теории системного анализа и теории автоматического управления, методов цифровой обработки

информации и искусственного интеллекта, согласовании полученных результатов с известными теоретическими положениями в области SLAM и трехмерной реконструкции сцен. Адекватность и достоверность предложенных методов и алгоритмов подтверждается результатами компьютерного моделирования для эталонных баз данных, а также экспериментами с реальными данными. Точность и сходимость предложенных методов была оценена на эталонных базах данных NYU Depth Dataset и ASL DataSet. В работе представлены результаты сравнительного анализа в серии экспериментов в терминах точности и вычислительной сложности для разработанной системы SLAM и известных открытых систем (SLAM HOGMan, ORB-SLAM, TORO-SLAM, RGBDSlam, EKFMonoSLAM).

Достоверность выводов подтверждает 31 научная работа, из которых 12 опубликованы в изданиях из перечня, утвержденного ВАК России, 14 работ опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science и 20 работ опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. Теоретические и практические результаты диссертационного исследования докладывались на международных и всероссийских научных конференциях, апробированы при выполнении научно-исследовательских работ, которые были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки РФ (государственное задание, проектная часть). В целом, можно сделать вывод о высокой степени достоверности основных научных и практических результатов, полученных в диссертации.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Теоретическую значимость исследования представляет методология решения проблемы одновременной навигации и трехмерного картографирования на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды.

Предложенные в диссертационной работе методы, алгоритмы и программно-технические решения позволили создать прототип системы одновременной навигации и построения карты лучшего качества, чем известные системы на основе визуальной методологии SLAM и методологии на основе EKF, работающие в аналогичных условиях.

Разработанный прототип системы апробирован при решении задачи спасения людей и может быть использован для решения широкого спектра задач: 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 и динамических препятствий. Исследование направлено на реализацию приоритетных направлений

развития РФ в части перехода к роботизированным системам, создания систем машинного обучения и искусственного интеллекта, в том числе в сфере обеспечения общественной безопасности.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Данное исследование направлено на создание точных интеллектуальных методов одновременной навигации и картографирования на основе визуальных и семантических свойств окружающей среды для контекстуально сложных крупномасштабных сцен. Решение поставленных в работе задач диссертационного исследования позволяет перейти к созданию новых видов роботизированных коллективных систем, с помощью которых будет решаться широкий спектр прикладных задач в различных отраслях.

Созданная на основе предложенных в работе методов и алгоритмов система SLAM может быть применена: в системах спасения людей; в системах идентификации личности и интеллектуального наблюдения; в системах автономной навигации робототехнических комплексов в неизвестном пространстве, в том числе в системах автономной навигации автомобилей; в системах мониторинга за окружающим пространством в опасных или труднодоступных для человека объектах.

Важным направлением применения результатов диссертационного исследования является коллаборативная робототехника, основное направление развития в которой связано с созданием комплексов, оснащенных собственной системой машинного зрения и системой SLAM. Перспективным направлением применения результатов исследования является антропоморфная робототехника и связанные с ней области исследований.

Результаты работы рекомендуются к использованию в организациях, занимающихся проектированием и разработкой информационных систем с применением методов реконструкции окружающего пространства, машинного зрения, навигации и планирования траектории автономных объектов в окружающем пространстве. Также полученные результаты могут использоваться в учебном процессе в высших учебных заведениях при обучении студентов в области робототехники.

Замечания по диссертационной работе:

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 ИСР 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 не итерационных 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 не достаточно 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.

Заключение:

1. Диссертационная работа Вохминцева Александра Владиславовича на соискание ученой степени доктора технических наук является завершенной 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».

2. Автором работы предложена методология для решения проблемы одновременной навигации и построения карты на основе комбинирования визуальных и семантических характеристик окружающей среды, которая может быть использована для создания систем навигации и машинного зрения в современных автономных интеллектуальных робототехнических комплексах и системах.

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

4. Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы).

5. Все основные научные результаты отражены в опубликованных работах в рецензируемых научных изданиях: из которых 12 научных статей опубликованы в научных журналах из перечня ВАК, 14 публикаций опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science и 20 публикаций в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. Результаты интеллектуальной деятельности отражены в пяти свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ.

6. Диссертация соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», 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 «Информатика и Управление» РАН 22.09.2020 г., протокол № 12.

Академик РАН, д.т.н., проф.
г.н.с. ФИЦ ИУ РАН



Попков Ю.С.

«22» сентября 2020 г.

Подпись  заверяю

Начальник отдела кадров

05 20 20

