

Исследование интеллектуальных элементов управления мобильным роботом и обеспечение информационной безопасности процесса его функционирования в динамической среде

М. В. Макаров¹ ✉, А. В. Астафьев¹, И. А. Семенов¹

¹ Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
ул. Орловская, д. 23, г. Муром 602224, Российская Федерация

✉ e-mail: nauka-murom@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Представленное в данной статье исследование нацелено на установление и обоснование принципов эффективной инкорпорации интеллектуальных элементов системы управления мобильным роботом, функционирующим в условиях динамической среды существования. В качестве предмета исследования использовалась входящая в состав управления процедура одновременной локализации и картографирования. Критерием эффективности выступали показатели, связанные с обеспечением информационной безопасности процесса функционирования робота в реальных условиях эксплуатации.

Методы. Разработана и реализована методология экспериментального исследования программного исполнения процедуры одновременной локализации и картографирования в рамках задачи управления мобильным роботом. Объектом исследования выступала компьютерная модель абстрактного мобильного робота, выполняющего разведывательные функции в виртуальной динамической среде существования. Инкорпорируемыми элементами интеллектуальной обработки информации в процедуру одновременной локализации и картографирования были сверточные и полносвязные нейросетевые слои, обеспечивающие фильтрацию динамических объектов.

Результаты. При проведении экспериментального исследования выполнена симуляция процесса функционирования компьютерной модели разведывательного мобильного робота в виртуальной среде существования. Аналогичные эксперименты воспроизведены при различных структурно-функциональных конфигурациях процедуры одновременной локализации и картографирования. Получены количественные результаты, демонстрирующие точность позиционирования объекта исследования для каждого из способов организации данной процедуры. Проведен сравнительный анализ вариантов использования элементов интеллектуальной обработки информации внутри данной процедуры.

Заключение. Установлено, что инкорпорация элементов интеллектуальной обработки информации в процедуру одновременной локализации и картографирования имеет влияние на точность позиционирования мобильного робота и надежность его функционирования в динамической среде существования. Это вносит вклад в соблюдение норм информационной безопасности при использовании мобильных роботов в реальных условиях эксплуатации. Также определено, что существует и их избыточное употребление, которое приводит к отклонению от оптимальных качеств, необходимых для эффективного автономного управления мобильным роботом и обеспечения информационной безопасности.

© Макаров М. В., Астафьев А. В., Семенов И. А., 2022

Ключевые слова: информационная безопасность; интеллектуальная обработка информации; автономное управление; мобильные роботы; одновременная локализации и картографирования.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00951.

Для цитирования: Макаров М. В., Астафьев А. В., Семенов И. А. Исследование интеллектуальных элементов управления мобильным роботом и обеспечение информационной безопасности процесса его функционирования в динамической среде // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 72-86. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-72-86>.

Поступила в редакцию 08.06.2022

Подписана в печать 23.06.2022

Опубликована 29.07.2022

The Study of Intelligent Control Elements of a Mobile Robot and Ensuring Information Security of the Process of Its Functioning in a Dynamic Environment

Mikhail V. Makarov ¹ ✉, Alexandr V. Astafiev ¹, Ivan A. Semenov ¹

¹ Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs
23 Orlovkaya str., Murom 602264, Russian Federation

✉ e-mail: nauka-murom@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The study presented in this article is aimed at establishing and substantiating the principles of effective incorporation of intelligent elements of the control system of a mobile robot operating in a dynamic environment. The subject of the study was the procedure of simultaneous localization and mapping involved in the control. Indicators related to ensuring the information security of the process of robot functioning in real operating conditions were used as the performance criterion.

Methods. A methodology for the experimental study of the software procedure execution for simultaneous localization and mapping within the framework of the task of controlling a mobile robot has been developed and implemented. The main focus of the study is a computer model of an abstract mobile robot performing reconnaissance functions in a virtual dynamic environment. The incorporated elements of intelligent information processing into the procedure of simultaneous localization and mapping are convolutional and fully connected neural network layers that provide filtering of dynamic objects.

Results. When conducting this experimental study, a simulation of the process of functioning of a computer model of a reconnaissance mobile robot in a virtual environment has been performed. Similar experiments have been reproduced with various structural and functional configurations of the procedure for simultaneous localization and mapping. Quantitative results have been obtained, demonstrating the accuracy of positioning the subject of the study for each of the methods of organizing this procedure. A comparative analysis of the options for using the elements of intelligent information processing within this procedure has been carried out.

Conclusion. It has been established that incorporation of the elements of intelligent information processing into the procedure of simultaneous localization and mapping has an impact on the positioning accuracy of a mobile robot and

the reliability of its functioning in a dynamic environment. This contributes to the compliance with information security standards when using mobile robots in real operating conditions. It is also determined that there is their excessive use, which leads to a deviation from the optimal qualities necessary for effective autonomous control of a mobile robot and information security provision.

Keywords: *information security; intelligent information processing; autonomous control; mobile robots; simultaneous localization and mapping.*

Conflict of interest. *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

Funding: *The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-07-00951.*

For citation: Makarov M. V., Astafiev A. V., Semenov I. A. The Study of Intelligent Control Elements of a Mobile Robot and Ensuring Information Security of the Process of Its Functioning in a Dynamic Environment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 72-86 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-72-86>.

Received 08.06.2022

Accepted 23.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Применение мобильных роботов для решения большого круга актуальных прикладных задач предполагает их функционирование в реальной обстановке при непосредственном контакте с людьми и другими статическими и динамическими объектами [1, 2]. Одновременно с этим, важным аспектом эффективности решения этих задач является снижение участия человека в управлении данными техническими системами. Появляется необходимость реализации внутри них дополнительных функций, важных для автономного функционирования, с возможностью изучения среды существования и составления своего внутреннего представления о ней. Это значительно усложняет процесс управления, который при использовании строгих алгоритмических методов обработки информации не проявляет в достаточной степени свойства автономности.

Перспективы устранения обозначенной проблемы связаны с применением методов интеллектуальной обработки информации в случае решения трудноформализуемых структурно-функциональных задач, составляющих процесс управления [3-7]. Предполагается, что такой подход внесет существенный вклад в дальнейшее развитие прикладного проблемно-ориентированного искусственного интеллекта и позволит создавать мобильные роботы с автономным управлением, которые будут обладать максимальными техническими характеристиками при функционировании в условиях естественной для человека среды существования.

В частности, при реализации автономного управления мобильным роботом важнейшим этапом является исполнение процедуры одновременной локализации и картографирования (в международном научном сообществе

известная под аббревиатурой SLAM). Как показывает практика, существует трудность решения данной задачи в реальных условиях эксплуатации, что связано со снижением точности позиционирования робота в оперативном пространстве по причине невозможности полного учёта жесткими алгоритмическими методами динамической объектов среды существования робота.

Получившие распространение методы интеллектуальной обработки информации основаны на регрессии множественного прецедентного опыта. Предполагается, что данными средствами возможно точное перестроение SLAM-модели в реальном режиме времени, что способствует воссозданию системной управления поведенческих функций, адекватных условиям высокой вероятности изменения функциональных зависимостей, являющихся основой для работы робота в рамках своих компетенций.

Однако границы применимости этих методов с точки зрения обеспечения информационной безопасности до сих пор в полной мере не определены. Есть вероятность, что обработка информации происходит в условиях недостоверности информации, её неполноты или содержащихся в ней противоречий и какие принципы инкорпорации средств интеллектуальной обработки информации будут оптимальными с точки зрения соблюдения информационной безопасности пока неизвестны.

Исходя из этого, очевидна потребность в проведении экспериментальных исследований, результаты которых могут стать основой для определения принципов инкорпорации в процессы обработки информации интеллектуальных элементов для обеспечения процедуры одновременной локализации и картографирования в рамках автономного управления мобильным роботом в условиях динамической среды существования.

Материалы и методы

В качестве объекта экспериментального исследования использовалась компьютерная модель абстрактного мобильного робота, выполняющего разведывательные функции в виртуальном пространстве, динамическая природа которого заключается в наличие различного типа подвижных объектов. Требуется построение карты окружающей среды для её использования в рамках автономного управления роботом. Перемещение робота определяется двумя основными критериями, первый из которых – это нацеленность на получение максимальной информации о среде существования и встраивание этой информации в существующее представление о среде существования, представленной в системе в виде графической карты. Вторым критерием является недопустимость столкновения с любыми препятствиями.

Разработка алгоритма SLAM в данном случае особенно важна, так как ро-

бот не имеет предварительной информации об окружающей среде. На практике это может быть обусловлено недостаточной точностью спутникового пози-

ционирования. В таком случае место задачи SLAM в рамках автономного управления мобильным роботом представлено на рис. 1.

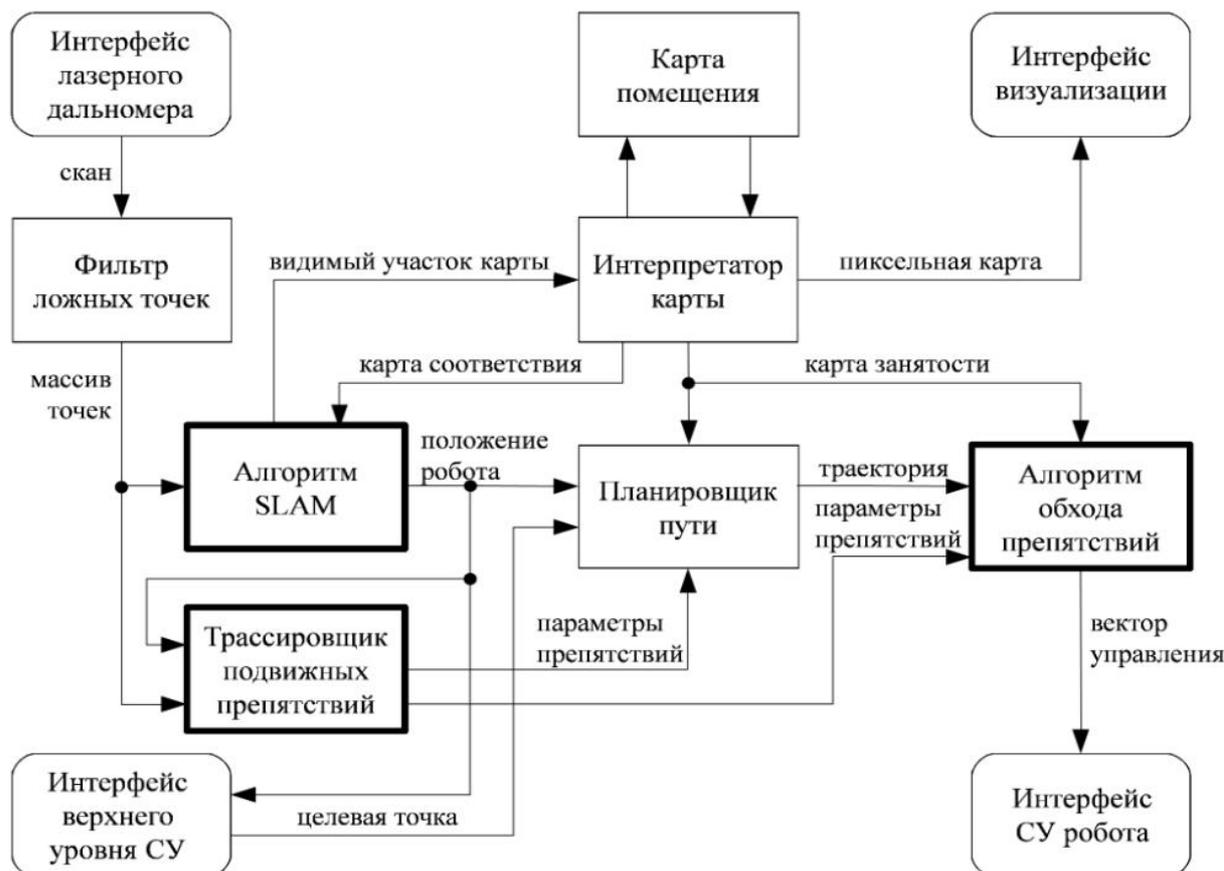


Рис. 1. Место процедуры SLAM в структурно-функциональной схеме процесса автономного управления мобильным роботом [6]

Fig. 1. SLAM procedure in a structural and functional scheme of the mobile robot autonomous control process [6]

Известно множество разновидностей алгоритмов [9, 10], которые могут достаточно эффективно решить задачу SLAM, однако они полагаются на гипотезу об оперативном пространстве, представляющем собой единое твердое тело и, следовательно, ни один объект не может перемещаться внутри него, а робот – единственный движущийся объект. Это положение, которое является ложным в большинстве сцен реаль-

ного мира, ограничивает сценарии, в которых может использоваться подобные алгоритмы. Данное исследование как раз ориентировано на присутствие движущихся объектов в оперативном поле робота, что свойственно большинству ситуаций его потенциального прикладного использования в реальной среде существования. Это создает сложности для классических алгоритмов SLAM и ограничивает их примени-

мость, поскольку они не могут точно оценить положение робота и структуру пространства во многих случаях.

Есть примеры того как в рамках классических методов SLAM [9] пытаются смягчить это предположение, используя оценки, позволяющие им помечать движущиеся объекты как выбросы. Однако, как только количество движущихся точек становится слишком большим, точность определения положения робота критически уменьшается. Это делает такой подход зачастую непригодным. Существуют некоторые примеры систем [11, 12] для обнаружения и маскировки динамических объектов на изображениях, что делает предположение о статической сцене обоснованным, но ожидается, что более выигрышным подходом будет использование методов интеллектуальной обработки информации, способных повысить недостаточную во многих случаях эффективность стандартных алгоритмов SLAM.

В проведенном исследовании базовым подходом к решению задачи SLAM был один из самых распространенных и производительных методов TinySLAM [13]. Однако сам по себе он не решает проблемы нарастания ошибки при наличии динамических объектов. Для устранения представленных недостатков авторами данной работы в состав базового метода были введены дополнительные алгоритмы обнаружения динамических объектов и нейросетевой фильтрации. Предполагалось, что использование выбранного базового ме-

тода позволит за счет оптимизации процесса обработки информации снизить энергоемкость решения задачи и приблизить интеллектуальное управление роботом к реальному времени, а применение фильтрации снизит влияние динамических объектов на результат SLAM.

Базовый алгоритм был реализован на C++ с использованием инструментов из библиотек с открытым исходным кодом: ROS, PCL (библиотека для работы с облаками точек), ndt omp (алгоритм регистрации облака точек), tf2 и Eigen (инструменты преобразования облаков точек и положения робота между различными системами координат) и g2o (для реализации графовой структуры алгоритма SLAM и оптимизации положения узлов после закрытия цикла). Открытый стандарт был использован для распараллеливания программ OpenMP и ускорения предлагаемого алгоритма фильтрации динамических объектов. ROS был выбран для передачи данных между предлагаемым алгоритмом SLAM и другими элементами мобильного робота.

Для реализации интеллектуальных элементов внутри алгоритма SLAM была использована сетка занятости [14]. Карта сетки занятости является хорошо зарекомендовавшей себя и популярной моделью среды из-за простой структуры и отсутствия предположений о моделях или формах объектов. Вместо этого они делят окружающую среду на небольшие ячейки сетки и оценивают свойства ячеек, например, состояние

занятости, на основе данных о дальности действия датчиков. В [15] выполнено расширение этого подхода до карты сетки динамической занятости (DOG), которая дополнительно оценивает скорость отдельных ячеек сетки с помощью фильтра частиц. Учитывая такой метод, решение о наличии движения в ячейке сетки в принципе может быть принято путем сравнения расчетной скорости с пороговым значением. Однако в некоторых случаях DOG ошибочно обнаруживает движение из-за шумных измерений в загроможденных областях пространства.

Ожидалось, что применение нейросетевого подхода позволит реализовать обнаружение движения, принимая во внимание эту пространственную структуру объектов на карте сетки, в дополнение к оценкам скорости на уровне ячеек. Для этого применялась полностью сверточная нейронная сеть (FCN) [16, 17], которая предсказывает, движутся ли отдельные ячейки сетки или нет, основываясь на различных сигналах в их окружении.

Цель интеллектуальной фильтрации динамических объектов – создать пиксельную классификацию карты DOG для поддержки обнаружения движущихся препятствий. Для этого DOG из [15] используется в качестве входных данных компонента классификации объектов.

Карта DOG должна была предварительно обрабатываться для извлечения входного изображения, оптимизированного для сверточного нейросетевого слоя (CNN). Затем эти входные данные передаются в полностью сверточную нейронную сеть (FCN), которая помечает динамические ячейки на карте сетки. Результат, полученный сетью, окончательно уточняется с помощью информации о занятости DOG, чтобы исключить ложные срабатывания.

Целевой набор состоит из двух классов: динамического (движущиеся объекты) и статического (неподвижные объекты), где фон является частью статического класса. Процесс классификации разделен на три этапа, как показано на рис. 2.

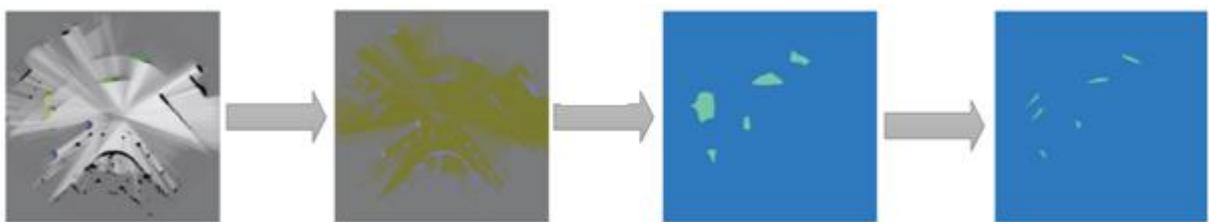


Рис. 2. Этапы нейросетевой обработки информации в разрабатываемом алгоритме SLAM

Fig. 2. Stages of neural network data processing in the developed SLAM algorithm

Сначала DOG подвергается предварительной обработке для получения

изображения, которое легче анализировать для CNN. Основываясь на этом

изображении, CNN делает вывод о классификации по пикселям. Наконец, вычисляется пересечение между сегментированным изображением и изображением занятых ячеек сетки для получения более четких границ маркировки и отклонения ложных срабатываний, которые появляются при маркировке незанятых ячеек сетки как динамических. Для решения задачи классификации на основе изображения карты сетки используются слои FCN, чтобы уменьшить вычислительно сложную задачу скользящих оконных подходов. Основываясь на работе [16], мы преобразуем две сетевые структуры (VGG-net [18] и Alexnet [19]) в FCN путем добавления деконволюционных слоев (также называемых слоями масштабирования). Это создает двумерный вывод сети и создает желаемую классификацию по пикселям, где размер входного и выходного изображения сети идентичен. Для инициализации весов CNN использовались предварительно обученные сети, чтобы сократить время обучения. Эти сети были обучены на общедоступном наборе данных Imagenet [20], который содержит цветные изображения различных категорий. Хотя эти входные данные сильно отличаются от данных нашей карты сетки, эта процедура помогает сократить время обучения и повысить производительность, поскольку фильтры нижних сверточных слоев содержат довольно общие представления форм, которые также отображаются на

картах сетки, т.е. большие двоичные объекты, линии и углы.

Результаты и их обсуждение

С точки зрения информационной безопасности, автономное управление мобильным роботом должно осуществляться с соблюдением требований надежности. В данном случае надежность в первую очередь связана с обеспечением условий успешного и безопасного для всех участников процесса исполнения роботом своих прикладных функций. Это зависит от множества факторов, но ключевым из них является точность обработки информации на всех этапах процесса управления.

В контексте рассматриваемой задачи SLAM подобным критерием надежности может считаться точность позиционирования робота. Именно эта процедура оказывает решающее воздействие на его правильную локализацию и качество описания внешней среды существования.

Разработанная и реализованная в данном исследовании методология была направлена на качественную характеристику принципов инкорпорации методов интеллектуальной обработки информации в процедуру SLAM и количественную оценку степени их влияния на точность решения этой задачи.

Данная методология включала в себя несколько этапов. На первом из них разработанная программная реализация базового (без применения методов ин-

теллектуальной обработки информации) алгоритма SLAM была проанализирована с точки зрения точности позиционирования робота. В качестве показателя точности выступало значение среднего отклонения координат определенной роботом его локализации от координат его реального расположения. После этого данные значения сравнивались с показателями точности, полученными при проведении аналогичного модельного эксперимента с использо-

ванием разработанного комбинированного алгоритма, включающего в себя нейросетевую процедуру фильтрации динамических объектов в оперативном поле функционирования робота. На рис. 3 представлена визуализация отрезка пути робота, который может послужить примером сопоставления истинной траектории (серая линия) перемещения робота, определенной алгоритмически (синяя линия) и определенной комбинированным методом (оранжевая линия).

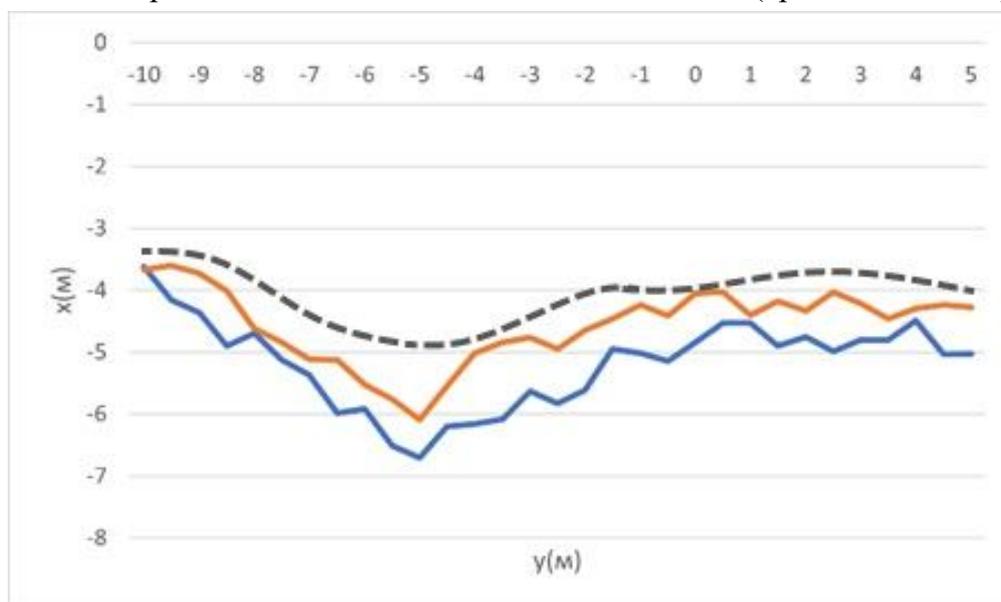


Рис. 3. Сопоставление точности позиционирования робота на отрезке его пути при различных вариантах алгоритмов SLAM

Fig. 3. Comparison of robot positioning accuracy on a segment of its path with different variants of the SLAM algorithms

Из рис. 3 мы можем увидеть, что применение элементов интеллектуальной обработки информации согласно вышеизложенным принципам позволило повысить точность позиционирования робота. Все количественные результаты проведенных множественных экспериментов в различных условиях подтверждают факт увеличения по срав-

нению с базовым алгоритмом SLAM точности позиционирования робота при наличии подвижных объектов в оперативном пространстве объекта исследования.

Что касается рассматриваемого вопроса границ применимости интеллектуальной обработки информации в задаче SLAM, то важным критерием в

данном случае будет оптимальность затрачиваемых вычислительных ресурсов на решение задачи. Был выполнен сравнительный анализ (рис. 4) загрузки процессора (в процентах) при симуляции четырех вариантов алгоритма SLAM: базовый (полностью алгоритмический), базовый без процедуры фильтрации, предлагаемый алгоритм с ограниченным применением нейросетевых технологий для фильтрации динамических объектов (комбинированный) и с расширенным применением интеллектуальной обработки информации (полностью нейросетевой).

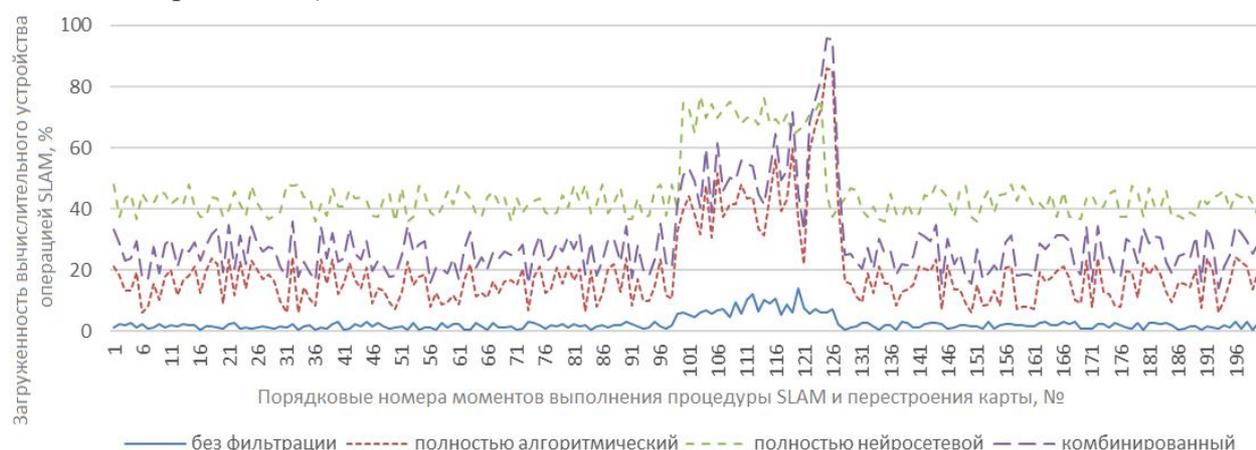


Рис. 4. Результаты исследования ресурсоемкости решения задачи SLAM

Fig. 4. Results of studying resource intensity of solving the SLAM task

Выводы

Таким образом, экспериментально установлено, что инкорпорация элементов интеллектуальной обработки информации в процедуру SLAM имеет влияние на точность позиционирования мобильного робота в динамической среде существования. Благодаря применению предложенного комбинированного алгоритма

Из графика, представленного на рис. 4, видно, что из всех апробированных вариантов применение комбинированного подхода дает выигрыш в производительности по сравнению с неограниченным нейросетевым подходом, позволяя повысить качество результирующей модели среды, успешно нивелируя негативное воздействие динамических объектов. Из этого следует, что необоснованное и излишнее применение нейросетевых вычислений негативно сказывается на ресурсоемкости исполнения процедуры SLAM.

ошибка позиционирования в среднем снизилась с 0.43% до 0.15%. Очевидно, что данное влияние оказывает положительный эффект на формирование основ автономного управления техническими объектами данного типа и способствует обеспечению требований по надежности их функционирования. Это является существенным вкладом в гарантию соблюдения норм информационной безопасно-

сти при использовании мобильных роботов для решения прикладных задач в реальных условиях эксплуатации.

Также определено, что существует и их избыточное употребление, стимулирующее неоправданный рост потребности в вычислительных ресурсах, что приводит к отклонению от оптимальных качеств, необходимых для эффективного автономного управления мобильным роботом. В частности, это стимулирует значительное увеличение энергопотребления и создает риск нарастания времени на обработку одного и того же объема информации, хотя минимизация энергоемкости вычисли-

тельных процессов и возможность функционирования в реальном режиме времени по понятным причинам являются обязательными условиями соблюдения информационной безопасности для автономных мобильных роботов. Применение комбинированного алгоритма SLAM позволяет найти баланс в данном вопросе и получить в среднем на 9-13% меньшую загруженность вычислительного устройства при выполнении процедуры SLAM по сравнению с расширенным применением средств интеллектуальной обработки информации в её составе при сопоставимой точности позиционирования.

Список литературы

1. Кабала А., Гайдук А.Р., Абу Хамдан Н. Управление поворотами мобильного робота, подобного автомобилю // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 134-144. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>.
2. Андронов В.Г., Чуев А.А., Князев А.А. Модель параметров отклонений маршрута полёта беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 145-161. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>.
3. Makarov M., Astafiev A. Synthesis of Special Operating Decisions as Part of Adaptive Control of a Mobile Robot // CEUR Workshop Proceedings. MIP: Computing-V 2022 – Proceedings of the 5th International Scientific Workshop on Modeling, Information Processing and Computing. 2022. 12-17. <https://doi.org/10.47813/dnit-mip5/2022-3091-12-17>.
4. Panov A.I., Yakovlev K. Behavior and Path Planning for the Coalition of Cognitive Robots in Smart Relocation Tasks // Robot Intelligence Technology and Applications. 2015; 4: 3-20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31293-4_1.
5. Daachi B., Madani T. Adaptive Neural Networks and Robot Intelligent Control in Direct or Indirect Interaction with Humans. Amsterdam: Elsevier, 2019.
6. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.
7. Lu H., Xu X. Artificial Intelligence and Robotics. Berlin: Springer; 2018.

8. Rudomanenko A.P., Vorotnikov S.A., Chernyadev N.A. Adaptive Control System for Industrial Robotic Manipulator // *Communications in Computer and Information Science*. 2021; 1426 CCIS: 153-164. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88458-1_12.

9. Mur-Artal R., Tardos J.D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras // *IEEE Trans. on Robotics*. 2017; 33(5): 1255-1262. <https://doi.org/10.1109/tro.2017.2705103>.

10. Engel J., Schops T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM // *Lecture Notes in Computer Science*. 2014; 834-849. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10605-2_54.

11. DynaSLAM: Tracking, mapping, and inpainting in dynamic scenes / B. Bescos, J.M. Facil, J. Civera, J. Neira // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018; 3(4): 4076-4083. <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2860039>.

12. DS-SLAM: A semantic visual SLAM towards dynamic environments / C. Yu, Z. Liu, X.-J. Liu, F. Xie, Y. Yang, Q. Wei, Q. Fei // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018; 1168-1174 <https://doi.org/10.1109/iros.2018.8593691>.

13. Huletski A., Kartashov D., Krinkin K. TinySLAM improvements for indoor navigation // *Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/mfi.2016.7849536>.

14. Elfes A., Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation // *IEEE Computer Magazine*. 1989; 22(6): 46-57. <https://doi.org/10.1109/2.30720>.

15. A Random Finite Set Approach for Dynamic Occupancy Grid Maps with Real-Time Application / D. Nuss, S. Reuter, M. Thom, T. Yuan, G. Krehl, M. Maile, A. Gern, K. Dietmayer // *The International Journal of Robotics Research*. 2018; 37(8): 841-866. <https://doi.org/10.1177/0278364918775523>.

16. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015; 3431-3440. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2015.7298965>.

17. Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs / L.-C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, A.L. Yuille // *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.7062>.

18. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition // *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>.

19. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // *Communications of the ACM*. 2017; 60(6): 84-90. <https://doi.org/10.1145/3065386>.

20. ImageNet: A large-scale hierarchical image database / J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li, L. Fei-Fei // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2009. <https://doi.org/10.1109/cvprw.2009.5206848>.

References

1. Kabalan A., Gaiduk A.R., Hamdan N. Upravlenie povоротами mobil'nogo robota, podobnogo avtomobilyu [Controlling the Turning of a Mobile Car-like Robot]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University* 2021; 25(4): 134-144. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-134-144>

2. Andronov V.G., Chuev A.A., Knyazev A.A. Model' parametrov otklonenii marshruta poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov ot zadannoi traektorii [Model of Parameters of the Flight Route Deviation of Unmanned Aerial Vehicles from a Specified Trajectory]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University* 2021; 25(4): 145-161. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-145-161>

3. Makarov M., Astafiev A. Synthesis of Special Operating Decisions as Part of Adaptive Control of a Mobile Robot. *CEUR Workshop Proceedings. MIP: Computing-V 2022 – Proceedings of the 5th International Scientific Workshop on Modeling, Information Processing and Computing*. 2022. 12-17. <https://doi.org/10.47813/dnit-mip5/2022-3091-12-17>.

4. Panov A.I., Yakovlev K. Behavior and Path Planning for the Coalition of Cognitive Robots in Smart Relocation Tasks. *Robot Intelligence Technology and Applications*. 2015; 4: 3-20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31293-4_1.

5. Daachi B., Madani T. *Adaptive Neural Networks and Robot Intelligent Control in Direct or Indirect Interaction with Humans*. Amsterdam: Elsevier; 2019.

6. Vorotnikov S.A. Informatsionnye ustroystva robototekhnicheskikh sistem [Information devices of robotic systems]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2005.

7. Lu H., Xu X. *Artificial Intelligence and Robotics*. Berlin, Springer; 2018.

8. Rudomanenko A.P., Vorotnikov S.A., Chernyadev N.A. Adaptive Control System for Industrial Robotic Manipulator. *Communications in Computer and Information Science*. 2021; 1426 CCIS: 153-164. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88458-1_12.

9. Mur-Artal R., Tardos J.D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras. *IEEE Trans. on Robotics*. 2017; 33(5): 1255-1262. <https://doi.org/10.1109/tro.2017.2705103>.

10. Engel J., Schops T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM. *Lecture Notes in Computer Science*. 2014; 834-849. [https://doi.org/ 10.1007/978-3-319-10605-2_54](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10605-2_54).
11. Bescos B., Facil J.M., Civera J., Neira J. DynaSLAM: Tracking, mapping, and inpainting in dynamic scenes. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018; 3(4): 4076-4083. <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2860039>.
12. Yu C., Liu Z., Liu X.-J., Xie F., Yang Y., Wei Q., Fei Q. DS-SLAM: A semantic visual SLAM towards dynamic environments. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018; 1168-1174 <https://doi.org/10.1109/iros.2018.8593691>.
13. Huletski A., Kartashov D., Krinkin K. TinySLAM improvements for indoor navigation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/mfi.2016.7849536>.
14. Elfes A., Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation. *IEEE Computer Magazine*. 1989; 22(6): 46-57. <https://doi.org/10.1109/2.30720>.
15. Nuss D., Reuter S., Thom M., Yuan T., Krehl G., Maile M., Gern A., Dietmayer K. A Random Finite Set Approach for Dynamic Occupancy Grid Maps with Real-Time Application. *The International Journal of Robotics Research*. 2018; 37(8): 841-866. <https://doi.org/10.1177/0278364918775523>.
16. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015; 3431-3440. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2015.7298965>.
17. Chen L.-C., Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A.L. Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.7062>.
18. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>.
19. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 2017; 60(6): 84-90. <https://doi.org/10.1145/3065386>.
20. Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Li K., Fei-Fei L. ImageNet: A large-scale hierarchical image database. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2009. <https://doi.org/10.1109/cvprw.2009.5206848>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Макаров Михаил Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых г. Муром, Российская Федерация, e-mail: nauka-murom@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4707-7657>, Researcher ID: M-9100-2015

Mikhail V. Makarov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Physics and Applied Mathematics Department, Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: nauka-murom@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4707-7657>, Researcher ID: M-9100-2015

Астафьев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых г. Муром, Российская Федерация, e-mail: alexandr.astafiev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9095-5788>, Researcher ID: M-8060-2014

Alexandr V. Astafiev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Physics and Applied Mathematics Department, Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: alexandr.astafiev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9095-5788>, Researcher ID: M-8060-2014

Семенов Иван Александрович, магистрант, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых г. Муром, Российская Федерация, e-mail: 79601712352.ru

Ivan A. Semenov, Master's Student, Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: 79601712352@yandex.ru