

20. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Shumskiy A.E. Diagnostirovanie lineynykh dinamicheskikh sistem: podkhod na osnove skol'zyashchikh nablyudateley [Diagnostics of linear dynamic systems: an approach based on sliding observers], *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and telemechanics], 2020, No. 2, pp. 18-35.
21. Zhirabok A.N., Zuev A.V., Shumskiy A.E. Identifikatsiya defektov v datchikakh tekhnicheskikh sistem s ispol'zovaniem skol'zyashchikh nablyudateley [Identification of defects in sensors of technical systems using sliding observers], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology], 2019, No. 10, pp. 21-28.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Д.А. Юхимец.

Зуев Александр Валерьевич – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматки и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: zuev@dvo.ru; г. Владивосток, ул. Радио, 5; тел.: 89149617735; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Жиравок Алексей Нилович – e-mail: zhirabok@mail.ru; тел.: 89242345895; д.т.н.; профессор; в.н.с.

Zuev Aleksander Valer'evich – Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of Russian Academy of Science; e-mail: zuev@dvo.ru; 5, Radio street, Vladivostok, 690041, Russia; phone: +79149617735; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Zhirabok Alexey Nilovich – e-mail: zhirabok@mail.ru; phone: +79242345895; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

УДК 007.52, 519.878, 519.1, 004.942

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-90-98

Д.В. Березников, А.А. Закиев, Е.А. Магид

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО ВОЗВРАЩЕНИЯ КОЛЁСНОГО РОБОТА ПРИ ПОТЕРЕ СВЯЗИ С УДАЛЕННЫМ ОПЕРАТОРОМ*

Данная работа посвящена увеличению уровня автономности мобильных роботов в случаях потери связи с оператором, осуществляющим удаленное управление роботом. Актуальность данной задачи растет, поскольку мобильные роботы находят все больше применений в различных задачах. При работе в опасной для человека среде, например, во время поисково-спасательной операции, требуется надежный способ сохранить робота в случаях потери связи. Разрыв связи с роботом, который используется в недоступной для человека среде, означает потерю робота как функциональной единицы. Причиной возникновения подобных ситуаций становится несовершенство технологий связи, свойства окружающей среды или человеческий фактор. Данная проблема может возникнуть как при проводной, так и беспроводной связи между оператором и роботом. Поэтому робот должен обладать возможностью самостоятельно принимать решения в соответствии с поставленной задачей в случае потери прямого контроля со стороны оператора. Для этого робот должен иметь возможность обнаруживать потерю связи с оператором и возвращаться в начальную точку пути без вмешательства человека. В данной статье мы представляем разработанный алгоритм автоматического обнаружения разрыва сетевого соединения робота и алгоритм автономного возврата робота. В отличие от существующих решений, разработанный алгоритм не требует дополнительного оборудования или настройки программного обеспечения на стороне оператора. Алгоритм обнаружения разрыва сетевого соединения робота использует анализ TCP/IP пакетов, что делает его универсальным для роботов, управляемых по сетям Wi-Fi. Для автономного возвращения робота используются методы одновременной

* Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований проект № 19-58-70002.

локализации и картографирования (SLAM) и алгоритмы планирования пути. В режиме автономного возвращения робот опирается на сенсорные данные, собранные во время движения под контролем телеоператора. Алгоритмы были интегрированы в систему управления реального колесного робота PMB-2 и протестированы в лабораторных условиях, что экспериментально подтвердило их эффективность и практическую применимость.

Мобильный робот; алгоритм; автономное возвращение; обнаружение разрыва соединения; PMB-2.

D.V. Bereznikov, A.A. Zakiev, E.A. Magid

WHEELED ROBOT AUTONOMOUS RETURN SYSTEM AT REMOTE OPERATOR COMMUNICATION BLACKOUT

This work is dedicated to increasing mobile robots autonomy in cases of connection loss with a remote operator. As a number of mobile applications increases, the importance of this task is growing. A reliable way is required to save a robot in cases of communication blackout while operating in a hazardous environment, for example, during a search and rescue operation. Communication blackout means the immediate loss of a robot if it is employed in a dangerous to humans environment. Communication blackouts occur because of communication technologies imperfection, sudden changes in the environment or a human factor. This problem can occur with both wired and wireless communications between an operator and a robot. Therefore, a robot must be able to operate autonomously in cases operator direct control is lost. A robot must be capable to detect a communication loss with an operator and return to its starting point of a path without human intervention. In this paper, we present developed algorithms for automatic detection of a network connection blackout and autonomous return of the robot. Unlike existing solutions, the developed algorithm does not require additional equipment or software on the operator's side. The robot's network connection blackout detection algorithm uses TCP / IP packet analysis, which makes it universal for robots controlled over Wi-Fi networks. Simultaneous localization and mapping (SLAM) methods and path planning algorithms are used for autonomous robot return. In the autonomous return mode, the robot relies on sensory data collected during movement under the operator control. The algorithms were integrated into the control system of a real wheeled robot PMB-2 and tested in laboratory conditions, which experimentally confirmed their effectiveness and practical applicability.

Mobile robot; algorithm; offline return; connection blackout detection; PMB-2.

Введение. Современные мобильные роботы призваны выполнять широкий спектр задач [1], включая такие виды деятельности как доставка грузов [2], картографирование окружающей среды и работа в опасных для человека условиях [3, 4]. Мобильные роботы в большинстве случаев управляются удаленным оператором, который напрямую контролирует движение [5, 6] и отслеживает состояние робота дистанционно, находясь в безопасности. Передача информации между оператором и роботом выполняется при помощи проводных или беспроводных технологий. Оба способа передачи информации несут в себе угрозу потери соединения между роботом и оператором. Оператор может потерять контроль над роботом вследствие физического разрыва проводного подключения или из-за ограничений беспроводной связи: ограниченной дальности покрытия, помех на пути сигнала, недостаточной мощности приемников и передатчиков, и т.д. [7]. Потеря управления может привести к полной потере робота или нанесению ему существенного ущерба [8], поэтому мобильным роботам необходимо обладать определенным уровнем автономности, во избежание нежелательных последствий.

В рамках данной исследовательской работы мы разработали и интегрировали в систему управления мобильного робота PMB-2 [9] (представлен на рис. 1, слева) алгоритм обнаружения разрыва сетевого соединения и обеспечения автономного возврата робота. Задачей было создание независимой от оператора системы возврата, не требующей каких-либо изменений в программном обеспечении на стороне оператора. Так, обнаружение разрыва основано на анализе TCP/IP пакетов, поступающих на радиоприемник робота. Существующие решения обнаружения раз-

рыва соединения не обладают данным свойством и требуют существенной модификации программного обеспечения (ПО) на стороне оператора или использования специального дополнительного оборудования. Например, алгоритм Алишева и др. [10] требует настройки ПО как на стороне робота, так и на стороне оператора. Другие решения [11, 12] используют специальное оборудование для измерения силы получаемого сигнала. Смежные исследования [13, 14] нацелены на обнаружение потери соединения между множеством роботов. Метод, представленный нами в рамках этого исследования, требует модификации ПО только на стороне робота. Разработанный подход был успешно протестирован в экспериментах на реальном роботе в лабораторной окружающей среде.

Используемое оборудование. PMB-2 (рис. 1, слева) представляет собой мобильный колесный робот от компании PAL Robotics [15], оборудованный лазерным сканнером Sick TiM 571 и инерциальным датчиками, используемыми для задач навигации и работы методов одновременной локализации и картографирования (SLAM, от англ. *Simultaneous Localization and Mapping*). Робот имеет цилиндрическую форму с диаметром 54 см и высотой 30 см. Встроенный литий-ионный аккумулятор на 20000 мАч позволяет роботу функционировать без подзарядки продолжительное время (около 10 часов в активном режиме). Робот имеет в своем распоряжении Wi-Fi интерфейс стандарта 802.11b/g/n/ac, что позволяет ему развертывать собственную беспроводную точку доступа. Производитель робота, компания PAL Robotics, также предоставляет док-станцию, благодаря которой робот способен самостоятельно выполнять зарядку бортового аккумулятора (рис. 1, справа).



Рис. 1. Робот PMB-2 во время движения (слева); робот PMB-2 подключен к док-станции и находится в процессе зарядки, вид сверху (справа)

Используемое программное обеспечение. Робот PMB-2 работает под управлением модифицированной операционной системы Ubuntu 16.04 и фреймворка ROS (англ. *Robot Operating System, робототехническая операционная система*) версии Kinetic. Программное обеспечение робота включает в себя комплект пакетов картографирования, локализации и SLAM. Требования к управляющему ПО на стороне оператора отсутствуют, требуется только подключение к роботу по протоколу TCP/IP.

Фреймворк ROS объединяет различные исполняемые файлы в одну среду, позволяя разным процессам передавать информацию друг другу. Исполняемые файлы, использующие ROS, называются нодами (англ. *nodes*), а потоки данных между ними – топики (англ. *topics*). Это означает, что ноды ROS, запущенные на роботе, видимы и открыты для взаимодействия также и для нод ROS запущенных на устройстве оператора. Аналогично, ноды ROS, запущенные на устройстве оператора, доступны для нод ROS робота. Таким образом, разные устройства под управлением ROS объединяются в единую систему. Данные инкапсулируются в топики ROS. Это позволяет унифицировано отправлять их через Wi-Fi, Ethernet, Bluetooth и Zigbee сети [16].

Алгоритм обнаружения разрыва соединения. В режиме удаленного управления (телеоперации) работа с роботом ведется в следующей последовательности шагов:

1. РМВ-2 активирует интерфейс Wi-Fi и создает точку доступа.
2. Оператор подключается к активной точке доступа РМВ-2.
3. Оператор передает команды по сетевому адресу робота и контролирует движение робота.

Робот и компьютер оператора объединены в общую сеть, и ROS обеспечивает их полную программную совместимость. Инкапсуляция сообщений в топике (поток данных) ROS унифицирует процесс передачи и приема сообщения, однако, скрывает источник данных. По этой причине, если в топике ROS нет сообщений, то невозможно программно определить: 1) были ли сообщения отправлены, но не доставлены, или 2) сообщения не были отправлены. Поэтому нами был разработан инструмент, позволяющий определять состояние соединения робота с оператором. Инструмент основан на утилите *ping* [17], идущей в стандартном комплекте с современными операционными системами.

Если на роботе присутствует разработанная ROS нода с алгоритмом определения разрыва соединения, она запускается автоматически при запуске робота. В начале своей работы нода ждет подключения оператора. Если телеоперация не используется, и робот движется автономно, то алгоритм определения разрыва связи не используется. Это снижает нагрузки на сеть в случае автономного движения. Если оператор подключился к роботу, то алгоритм определения разрыва связи начинает свою работу. Если в течение 10 секунд от оператора не поступает новых команд, нода автоматически с помощью программы *ping* и проверяет присутствие оператора в сети. В случае, если оператор находится в сети, это означает, что соединение с ним активно и робот должен ожидать команд.

В противном случае, если оператор не найден в сети, робот переходит в режим автономного возврата. В этом режиме робот движется к начальной точке своего маршрута и одновременно осуществляет поиск док-станции. Док-станция позволяет роботу автономно начать зарядку бортового аккумулятора и дожидаться переподключения оператора. Поиск док-станции производится с помощью данных лазерного сканирования: док-станция имеет специальную форму, которая формирует узнаваемую на данных лазерного сканирования структуру. После обнаружения док-станции, робот производит маневр стыковки и ждет переподключения оператора. Данный подход позволяет оператору приступить к выполнению новой задачи в режиме телеоперации сразу же после восстановления подключения.

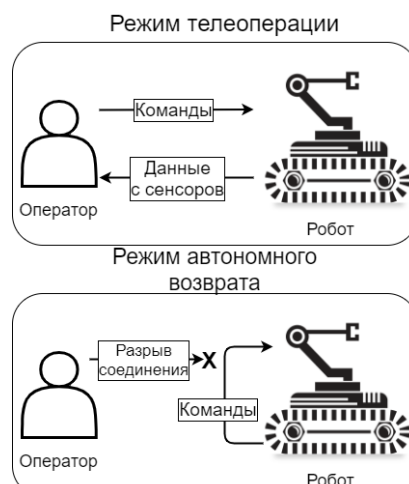


Рис. 2. Принципиальные схемы режимов телеоперации и автономного возврата

Во время автономного возврата робот постоянно проверяет доступность оператора в сети. В случае восстановления соединения с оператором, робот переходит в режим телеоперации, передавая полный контроль оператору. Автономная навигация и перемещение к безопасной точке приостанавливаются; кроме того, если робот уже подключен к док-станции, он автоматически отсоединяется от нее и ожидает дальнейших управляющих команд оператора в полностью рабочем состоянии. Таким образом, робот выполняет все шаги алгоритма восстановления работоспособности без вмешательства со стороны человека.

Режим автономного возврата. Автономное передвижение мобильного робота полностью имплементировано в рамках фреймворка ROS. Как только обнаруживается сбой соединения, запускаются ноды, отвечающие за автономное планирование пути робота к начальной точке. Нода *global_planner* [18] отвечает за построение глобального маршрута к начальной (стартовой) точке на основе карты, которая была создана роботом во время телеоперации. Нода *local_planner* отвечает за локальный маршрут робота, который строится на основе глобального маршрута и информации о динамических препятствиях, которые не были нанесены на карту при ее создании. Ноды планирования пути опираются на карту, созданную в процессе телеоперации [19]. Карта формируется на основе данных лазерного сканирования нодой ROS *slam_gmapping* [20]. В режиме автономного возврата робот локализует себя на этой карте с помощью ноды *amcl* [21], в котором используется метод адаптивной локализации Монте-Карло (англ. *AMCL*, Adaptive Monte-Carlo Localization). Построенный маршрут преобразуется в команды для сервомоторов робота и происходит автономное движение к цели, которая является стартовой точкой маршрута робота.

Постановка экспериментов. Для определения практической применимости имплементированных методов был разработан дизайн экспериментов с использованием робота PMB2. Эксперименты проводились в лабораторных условиях, по единому сценарию:

1. Робот двигается в режиме телеоперации под управлением оператора; направление движения выбирается оператором произвольно.
2. Имитируется потеря связи с оператором (выключается пульт, используемый для телеоперации).
3. Робот обнаруживает потерю связи с оператором.
4. Робот переходит в режим автономного возвращения и начинает движение к начальной (стартовой) точке маршрута.
5. Робот стыкуется с док-станцией. Эксперимент завершается.

Важно отметить, что только пункты 1 и 2 требуют участия человека. Пункты 3–5 выполняются в автономном режиме. Каждый эксперимент включал в себя измерения для оценки эффективности разработанных алгоритмов, которые представлены в табл. 1:

- ◆ Расстояние, которое робот преодолел в режиме автономного возвращения (второй столбец).
- ◆ Время между моментом потери соединения и переходом робота в режим автономного возвращения (третий столбец).
- ◆ Время, затраченное роботом на автономное возвращение в исходную позицию (четвертый столбец).

Приведенные в табл. 1 результаты показывают, что существует задержка между отправкой последней команды роботу и переходом робота в режим автономного возвращения. Длительность этих задержек не постоянна и находится в диапазоне от 12 до 16 секунд. Задержки не представляют опасности для работоспособности робота, так как в отсутствие команд оператора робот прекращает движение. Более

того, путем настраивания временных параметров в конфигурационном файле разработанного нами ПО, время задержки можно сократить или же, наоборот, увеличить в зависимости от выполняемой роботом задачи под требования пользователя.

Таблица 1

Результаты тестирования алгоритма

Номер эксперимента	Преодоленная дистанция (метры)	Время между обрывом соединения и обнаружением обрыва роботом (секунды)	Время, затраченное роботом на обратный путь (секунды)	Иллюстрация эксперимента
1	4	13	10	Рис. 3
2	4	16	12	
3	4	14	18	
4	4	13	20	
5	4	12	11	
6	24	15	50	Рис. 4
7	40	15	60	---

Данные в таблице свидетельствуют об ожидаемом увеличении времени автономного возвращения в случае увеличения расстояния до начальной точки. Однако, эта зависимость не является линейной, что связано с характером лабораторной среды. Такая среда насыщена объектами и препятствиями (пример такой среды из эксперимента №4 представлен на рис. 3), объезд которых требует замедленного движения и большого количества поворотов. При этом, на свободных участках пространства (например, в протяженном свободном коридоре; рис. 4) робот может развивать высокую скорость, что сокращает время возвращения.

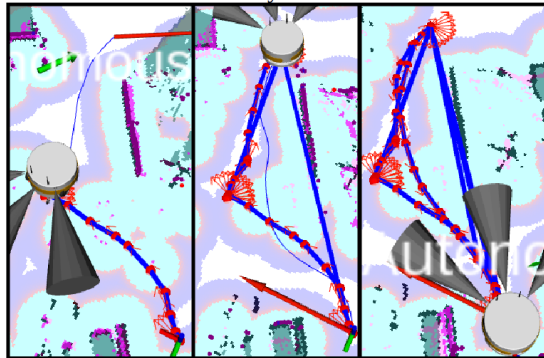


Рис. 3. Стадии экспериментов на примере эксперимента №4, показанного в симуляторе RViz: телеоперация (слева); обнаружение разрыва соединения (в центре); автономное возвращение в точку начала движения (справа). Белым цветом обозначены свободные области, темно-зеленым – препятствия. Робот показан в виде серо-оранжевого цилиндра. Темно-серые конусы показывают получаемые бортовыми сонарами данные. Синими линиями показаны предложенные глобальным планировщиком маршруты движения робота. Красными точками показаны локации, в которых робот менял ориентацию (осуществлял поворот), красными стрелками – направление движения робота

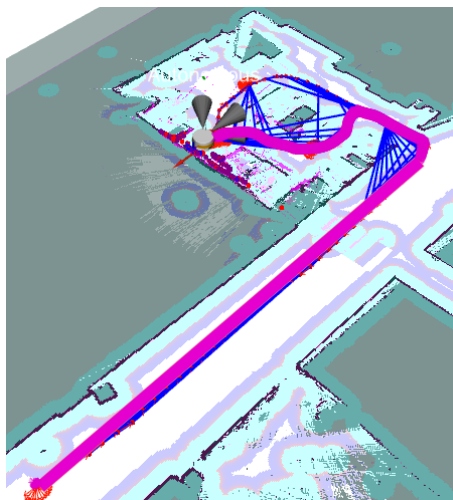


Рис. 4. Схема движения в эксперименте №6. Широкая фиолетовая линия показывает траекторию автономного возвращения робота на стартовую позицию. Белым цветом обозначены свободные области, черным – препятствия

Все эксперименты завершились успешно. Алгоритм в каждом случае обнаруживал разрыв соединения с оператором, после чего переводил робота в режим автономного возврата. В конце автономной навигации робот достигает стартовой точки, находит док-станцию и подключался к ней для зарядки бортового аккумулятора.

Заключение. В статье представлен алгоритм определения разрыва соединения и его использование в задаче автономного возврата. Данный алгоритм имеет полную совместимость с ROS, и не требует установки дополнительного аппаратного или программного обеспечения на устройство оператора, а также может быть обобщен для применения на любом TCP/IP соединении. Эффективность и практическая применимость были экспериментально подтверждены на примере мобильного колесного робота РМВ-2, что доказало возможность практического применения алгоритма.

Алгоритмы такого типа могут быть успешно развернуты на роботах, используемых в условиях нестабильной работы систем связи. Развертывание представленного в статье ПО не требует использования специфического оборудования или конкретной программной архитектуры, что облегчает его имплементацию на различных робототехнических системах. Правильная имплементация представленного алгоритма и его интеграция в системы управления роботами, не обладающими функционалом автономного движения, позволяет предотвратить неконтролируемое движение робота после обрыва связи или полную потерю работающего в режиме удаленного управления робота. В случае с роботами, способными выполнять задачи навигации автономно (например, роботы-аналоги представленного в статье мобильного робота РМВ-2), удастся добиться интеллектуального поведения робота для его успешного возвращением к оператору после обрыва связи. Такое поведение критически необходимо в случае работы робота в опасных для человека условиях: в зонах радиоактивного и химического загрязнений местности или в условиях поисково-спасательной операции. Наличие ПО для определения разрыва связи и автономного возвращения в таких случаях позволит не только не подвергать жизнь людей опасности при эвакуации робота, но и предотвратит потерю дорогостоящего аппаратного комплекса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shabalina K. [et al.]*. Comparative Analysis of Mobile Robot Wheels Design, *Int. Conf. on Developments in eSystems Engineering, IEEE*, 2018, pp. 175-179.
2. *Shimchik I. [et al.]*. Golf cart prototype development and navigation simulation using ROS and Gazebo, *MATEC Web of Conf., EDP Sciences*, 2016, Vol. 75, pp. 09005.
3. *Magid E., Lavrenov R., Afanasyev I.* Voronoi-based trajectory optimization for UGV path planning, *Int. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering, IEEE*, 2017, pp. 383-387.
4. *Sokolov M. [et al.]*. Modelling a crawler-type UGV for urban search and rescue in Gazebo environment, *Int. Conf. on Artificial Life and Robotics*, 2017, pp. 360-362.
5. *Farkhatdinov I., Ryu J.H. and Poduraev J.* A user study of command strategies for mobile robot teleoperation, *Intel Serv Robotics*, 2009, Vol. 2, pp. 95-104.
6. *Wang M., James N.K. Liu.* Interactive control for Internet-based mobile robot teleoperation, *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, Vol. 52 (2-3), pp. 160-179.
7. *Magid E. [et al.]*. Artificial Intelligence Based Framework for Robotic Search and Rescue Operations Conducted Jointly by International Teams, *Int. Conf. on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*, 2019, pp. 15-26.
8. *Nagatani K. [et al.]*. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots, *J. of Field Robotics*, 2013, Vol. 30 (1), pp. 44-63.
9. *Jordi P., Marchionni L., Ferro F.* Tiago: the modular robot that adapts to different research needs, *Int. workshop on robot modularity IEEE IROS*, 2016.
10. *Alishev N. [et al.]*. Network Failure Detection and Autonomous Return Algorithms for a Crawler Mobile Robot Navigation, *Int. Conf. on Developments in eSystems Engineering, IEEE*, 2018, pp. 169-174.
11. *Tardioli D. [et al.]*. Enforcing network connectivity in robot team missions, *Int. J. of Robotics Research*, 2010, Vol. 29 (4), pp. 460-480.
12. *Mong-ying A.H. [et al.]*. Towards the deployment of a mobile robot network with end-to-end performance guarantees, *Robotics and Automation, IEEE*, 2006, pp. 2085-2090.
13. *Derbakova A., Correll N., Rus D.* Decentralized self-repair to maintain connectivity and coverage in networked multi-robot systems, *Int. Conf. Robotics and Automation, IEEE*, 2011, pp. 3863-3868.
14. *Hsieh M.A. [et al.]*. Maintaining network connectivity and performance in robot teams, *J. of field robotics*, 2008, Vol. 25 (1-2), pp. 111-131.
15. PAL Robotics // <http://pal-robotics.com>. Available at: <http://pal-robotics.com> (accessed 02 March 2020).
16. *Fernandes A.* Ad hoc communication in teams of mobile robots using zigbee technology, *Computer Applications in Engineering Education*, 2015, Vol. 23.5, pp. 733-745.
17. Ping utility, Ubuntu xenial package. Available at: <https://packages.ubuntu.com/xenial>. Available at: <https://packages.ubuntu.com/xenial/iputils-ping> (accessed 02 March 2020).
18. *global_planner, ROS package* // <http://wiki.ros.org>. Available at: http://wiki.ros.org/global_planner (accessed 02 March 2020).
19. *Zakiev A. [et al.]*. Path planning for Indoor Partially Unknown Environment Exploration and Mapping, *Int. Conf. on Artificial Life and Robotics*, 2018, p. 399-402.
20. *Quigley M. [et al.]*. Sub-meter indoor localization in unmodified environments with inexpensive sensors, *IROS, IEEE*, 2010, pp. 2039-2046.
21. *Fox D.* Adapting the sample size in particle filters through KLD-sampling, *Int. J. of robotics research*, 2003, Vol. 22, pp. 985-1003.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.М. Афанасьев.

Березников Дмитрий Владимирович – Казанский федеральный университет, Высшая школа информационных технологий и интеллектуальных систем; e-mail: bereznikovdmitry@gmail.com; 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 35; тел.: 2213433; студент.

Закиев Ауфар Азатович – e-mail: zaufar@it.kfu.ru; кафедра интеллектуальной робототехники; ассистент.

Магид Евгений Аркадьевич – e-mail: magid@it.kfu.ru; кафедра интеллектуальной робототехники; профессор; кафедра интеллектуальной робототехники; зав. кафедрой.

Bereznikov Dmitry Vladimirovich – Kazan Federal University, Higher Institute of Information Technology and Intelligent Systems; e-mail: bereznikovdmitry@gmail.com; 35, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russia; phone: +72213433; student.

Zakiev AUFAR Azatovich – e-mail: zaufar@it.kfu.ru; assistant.

Magid Evgeni Arkad'evich – e-mail: magid@it.kfu.ru; the department of intelligent robotics professor, head of department.

УДК 007.51:623.4.074

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-98-108

**В.А. Шурыгин, В.А. Серов, С.А. Устинов, А.В. Леонард, С.Е. Червонцев,
В.Н. Платонов, С.С. Мазлов**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДОСЫЛА Артиллерийского снаряда в камору орудия

Целью работы является разработка и исследование метода контроля досыла артиллерийского снаряда в камору орудия и интеллектуальной системы контроля досыла по акустическому портрету. Существующий метод контроля досыла артиллерийского боеприпаса в камору орудия при раздельном способе заряжания основан на измерении скорости одного из элементов досылателя. Такой подход к контролю досыла не дает гарантированной надежности ввиду невозможности измерения скорости на конечном отрезке движения снаряда по инерции. Суть предложенного в статье метода заключается в возбуждении акустических колебаний в системе «снаряд – камора орудия» и выделении характерных акустических портретов (сигнатур) с их последующем анализом. Для исследования данного метода разработан экспериментальный стенд, имитирующий ствол орудия с камерой, и имитатор снаряда с различными обтюраторными поясками. Удар снаряда в момент заклинивания в конусе камеры или нанесенный извне возбуждает характерные акустические колебания, которые различаются для случаев надежного и недостаточного досыла. Для однозначной классификации событий надежного заклинивания и недостаточного досыла необходим выбор оптимального вектора признаков акустического портрета полученных аудиозаписей. Обычное спектральное преобразование позволяет выделить характерные частоты, однако использование набора таких спектральных составляющих в качестве классификационных признаков выбраны мел-частотные кепстральные коэффициенты. На основании набора таких коэффициентов с использованием искусственной нейронной сети осуществляется классификация степени заклинивания имитатора снаряда в стенде на три категории: «снаряд не заклинен», «недостаточный досыл снаряда», «снаряд заклинен». В результате обучения нейронной сети на значительной выборке аудиозаписей была достигнута точность классификации более 90%. Разработанный метод может быть применен в робототехнических комплексах, оснащенных артиллерийским вооружением, а также в других отраслях, например, в нефтегазовой промышленности для контроля стыковки сочленяемых труб.

Контроль досыла снаряда; виброакустический анализ; акустический портрет; искусственная нейронная сеть; мел-частотные кепстральные коэффициенты.

**V.A. Shurygin, V.A. Serov, S.A. Ustinov, A.V. Leonard, S.E. Chervoncev,
V.N. Platonov, S.S. Mazlov**

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF THE PROJECTILE FIXATION INSIDE THE GUN'S CHAMBER

The aim of the study is to develop a method for controlling the sending of an artillery shell to the gun's chamber using an acoustic portrait. The existing method for controlling the delivery of artillery ammunition to the gun's chamber with a separate loading method is based on measuring the speed of one of the elements of the rammer. Such an approach to the control didn't provide