

Е. А. Магид

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ
И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ***

Казанский федеральный университет
magid@it.kfu.ru

Рассмотрены типы мобильных роботов, наиболее часто используемых в поисково-спасательных операциях при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС), и описаны возможности их моделирования в симуляторе Gazebo. Приведены примеры моделирования отдельных роботов и их взаимодействия в Gazebo.

Ключевые слова: поисково-спасательная робототехника, мобильный робот, моделирование, робототехническая операционная система ROS, Gazebo.

Е. А. Magid

**MODELLING SEARCH AND RESCUE MOBILE ROBOTS AND THEIR
INTERACTION IN EMERGENCY SITUATION ELIMINATION TASKS**

Kazan Federal University

The paper considers mobile robots that are typically involved in search and rescue operations to eliminate consequences of emergencies, and possibilities of their modeling in the Gazebo simulator. Examples of single robots and their interactions modelling are demonstrated.

Keywords: search and rescue robotics, mobile robot, modelling, ROS, Gazebo.

© Магид. Е. А., 2025.

* Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Введение

Вопрос практического применения роботов в поисково-спасательных операциях (ПСО) при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС), включая землетрясения и наводнения, привлек внимание на государственном уровне после разрушительного землетрясения 1995 года в городе Кобе (Япония), которое вызвало существенные разрушения в густонаселенном районе, а поиск многочисленных жертв традиционными подходами спасательными службами в условиях масштабных разрушений оказался затруднительным [1]. С 1995 года поисково-спасательная робототехника (ПСР) трансформировалась из теоретической концепции в отдельную область исследований, охватывающую фундаментальные и прикладные аспекты механики, навигации, картографирования, сенсорики и других классических задач робототехники, рассматриваемых теперь уже через призму роботизации операций по ликвидации последствий ЧС.

ПСР занимается разработкой и внедрением робототехнических систем (РТС), предназначенных для выполнения ПСО при ЧС, и значительный акцент делается на ЧС в урбанистических средах, которые, ввиду структурной сложности, высокой динамики, разнообразия и насыщенности, существенно усложняют задачи роботов [2]. Функции РТС в сценарии ликвидации последствий ЧС включают в себя проверку конструкций на предмет повреждений, поиск пострадавших и потенциальных опасностей (например, открытый огонь или радиационное загрязнение), картографирование, уборку завалов, оказание выжившим медицинской помощи перед эвакуацией, транспортировку выживших в безопасную зону, обеспечение логистики грузов и другие [3].

Сценарии ЧС трудно воспроизводимы в лабораторных условиях, поэтому проведение натурных экспериментов для ПСР является сложным, требует много времени и ресурсов. Соответственно, для проверки новых подходов на первых этапах научных исследований условия ЧС реального мира могут быть аппроксимированы через качественное моделирование в симуляторе [4]. Симулятор позволяет создавать широкий спектр виртуальных моделей роботов и сред [5], стремясь достичь относительно реалистичного поведения, удешевляет первые эта-

пы разработки, повышает безопасность разработчиков, помогает обнаруживать концептуальные ошибки в алгоритмах до их переноса на натурных роботов. Существует широкий спектр робототехнических симуляторов [6], среди которого наша научная группа выделяет симулятор Gazebo [7]. Последний был разработан специально для моделирования РТС и полностью совместим с робототехнической операционной системой ROS, что позволяет создавать и использовать модели РТС с системами управления на основе ROS. В большинстве случаев Gazebo используется совместно с RViz [8], обеспечивающим дополнительный уровень сенсорики и визуализации.

1. Типовые поисково-спасательные роботы и их моделирование

В ПСО используются РТС трех основных категорий: морские, воздушные и наземные. Роботы разных типов могут применяться по отдельности [9], однородными [10] или разнородными группами [11; 12] и используются в телеуправляемом или беспилотном режиме. Понимание ролей, которые эти роботы играют в ПСО, имеет решающее значение для использования их полного потенциала в сценариях ликвидации ЧС.

Морские РТС делятся на надводные и подводные. В ПСО они могут использоваться для поиска пострадавших в водных средах и осмотра повреждения подводной инфраструктуры [13]. На официальном сайте ROS [14] указана поддержка трех РТС: Clearpath Heron USV (виртуальная модель только для морально устаревшей ROS Kinetic), Kingfisher (модель для Gazebo отсутствует) и BlueROV (ROS Melodic). В целом, Gazebo редко используется для моделирования работы морских РТС, так как в симуляторе отсутствует качественная реализация воды: возможно создавать водные среды, настраивать динамику движения поверхности воды и плавучесть объектов на ней, но при этом в официальных плагинах отсутствует что-либо под этой тонкой пленкой поверхности воды – когда объект перестает касаться пленки поверхности, он полностью погружается. Например, водный мир (рис. 1) позволяет тестировать только виртуальные модели надводных роботов и алгоритмы работы (на основе компьютерного зрения) беспилотных летательных аппаратов при ПСО в водных средах.

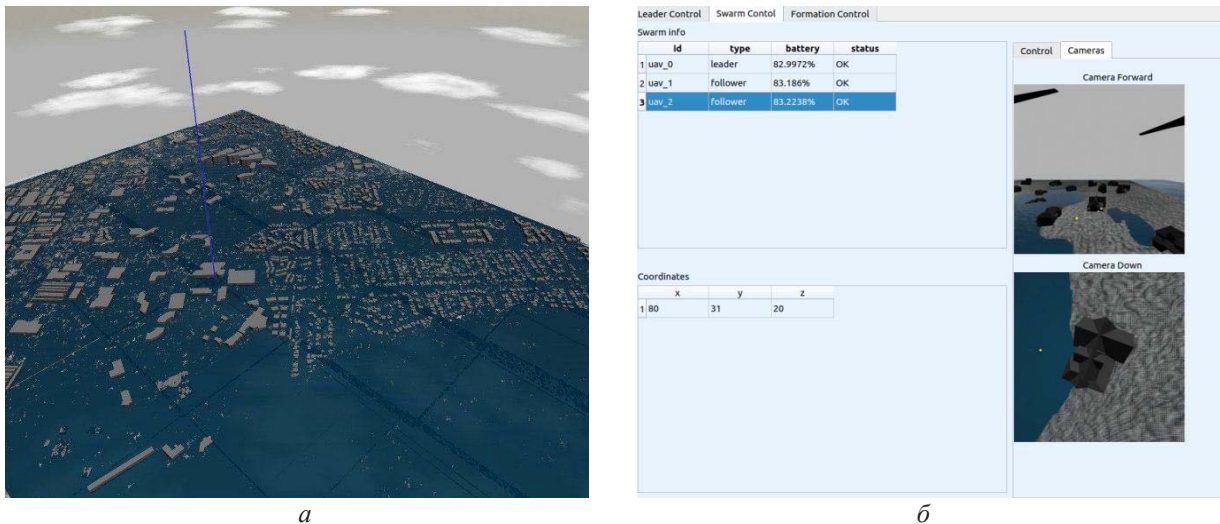


Рис. 1. Виртуальный мир с затопленным городом (а); графический интерфейс управления группой БЛА в Gazebo, тестируемый в водном мире (б)

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) могут сканировать обширные территории и передавать собранную информацию в реальном времени для обнаружения жертв [15] и построения трехмерных моделей территории ЧС, что позволяет командам спасателей планировать операции с учетом особенностей ландшафта [16]. ROS указывает поддержку пяти БЛА [14]: COEX Clover и Crazyflie (обе модели для ROS Noetic; вторая – нерабочая), Erle-Copter (только для морально устаревшей ROS

Indigo), Erle-Hexa Copter и Erle-Plane (обе модели нерабочие); при этом не упомянута наиболее популярная среди исследователей абстрактная модель БЛА с открытым кодом *hector_quadrotor* (рис. 2, а). Отдельные исследовательские группы создают собственные модели БЛА, которые соответствуют их натурным моделям, не делая код общедоступными; например, для натурального кастомного БЛА PX4-LIRS была разработана модель [17] для Gazebo под ROS Melodic и Noetic (рис. 2, б).

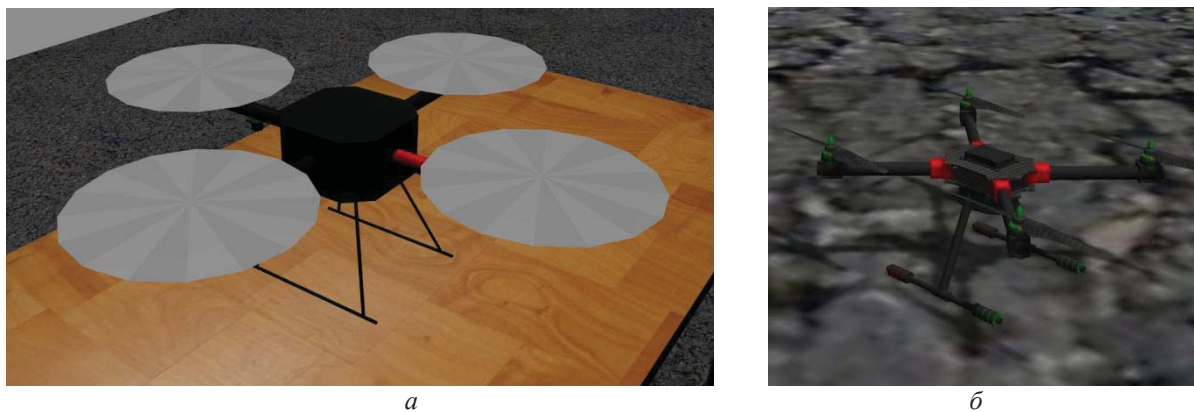


Рис. 2. Модель БЛА *hector_quadrotor* (а) и PX4-LIRS (б)

Наземные мобильные роботы (НМР) в различных исполнениях (колесные, гусеничные, шагающие, ползающие, гибридные) наиболее массово используются в ПСО [18; 19]. Широкая линейка ходовых частей и габаритов НМР позволяет разбирать завалы, доставлять грузы и проникать в узкие проходы, недоступные для людей и поисковых собак, а вариативность бортовых датчиков и программного обес-

печения – выполнять практически все возможные задачи в рамках ПСО. На сайте ROS [14] указано 72 поддерживаемые модели НМР, из которых 68 могут быть задействованы для решения каких-либо задач в ПСО. Учитывая, что каждая ведущая в области мобильной робототехники лаборатория разрабатывает собственных кастомных роботов, и многие из них создают виртуальные модели – общее количество мо-

делей НМР для ПСО оценивается в несколько сотен. Модели могут быть достаточно абстрактными (например, как состоящие из геометрических примитивов модели дифференциальных роботов [20–22]), базовыми (состоит из более сложных блоков, но лишена качественной визуализации; например, модель гусеничного робота [23]), простыми (например, всенаправленный четырехколесный робот MARIO 2016 года [24]) или полноценными, с учетом динамики и визуализации (например, продвинутая версия робота MARIO 2018 года [25]).

2. Разработка собственных моделей для Gazebo

Кафедрой интеллектуальной робототехники КФУ было разработано несколько полноценных моделей для симулятора Gazebo, которые могут быть использованы при моделировании концепций и алгоритмов ПСО.

Модели (рис. 3) соответствуют имеющимся натурным роботам: российским роботам «Сервосила Инженер» и «Аврора Юниор», и кас- томной модели всенаправленного колесного робота «ArtBul-2».



Рис. 3. Натурные РТС (1) и их виртуальные модели для Gazebo (2): «Сервосила Инженер» (а), «Аврора Юниор» (б), «ArtBul-2» (в)

Натурные РТС «Сервосила Инженер» и «Аврора Юниор» появились у кафедры в 2017 году, и для возможности предварительной проверки алгоритмов без потенциального повреждения роботов было необходимо создать соответствующие модели в Gazebo. От производителей РТС были получены CAD-модели, позволившие обеспечить приемлемый уровень визуализации внешнего вида РТС, а сотрудниками и студентами в 2016–2023 гг. в несколько итераций были реализованы URDF-файлы, физические и программные составляющие моделей [26; 27]; тестирование движения и сенсорики моделей в Gazebo относительно натуральных моделей показало достаточный уровень корреляции. Для РТС «ArtBul-2», наоборот, сначала была разработана конструкторская документация и виртуальная модель, а затем был собран натуральный прототип робота [28]; виртуальная модель итеративно дорабатывалась параллельно с тестированием натурной РТС с целью отразить внесенные при сборке конструктивные изменения и полученные физические характеристики.

Результаты тестирования в виртуальном и реальном мире показали, что «Сервосила Инженер» может выполнять типовые задачи ПСО для НМР практически без ограничений по качеству подстилающей поверхности и размерам рабочего пространства; «Аврора Юниор» ограничен задачами логистики в условиях небольших неровностей подстилающей поверхности и широких рабочих пространствах; «ArtBul-2» может выполнять функции разведки и логистики только в условиях ровной подстилающей поверхности, но является наиболее маневренным даже в узких пространствах благодаря всенаправленной ходовой части.

Необходимо подчеркнуть, что разработка собственной модели РТС для симулятора Gazebo – это не моделирование в реальном времени, а достаточно кропотливая и трудоемкая задача, требующая понимания основ физики и некоторого минимального уровня владения необходимым программным обеспечением [29]. Например, первая абстрактная модель РТС «Сервосила Инженер» для Gazebo была создана нашей научной группой в 2016 г. [30]; первая визуально реалистичная модель (поддерживающая физическое взаимодействие с подстилающей поверхностью) – в 2019 г., после получения CAD-моделей отдельных деталей РТС от производителя, внесения в них ряда исправлений и сборки в единую модель робота [31]; в 2020 г., по результатам вычислительных экс-

периментов, гусеницы модели были перестроены для улучшения реалистичности взаимодействия с подстилающей поверхностью [32]; затем в 2020 г. была упрощена визуальная составляющая относительно оригинальных CAD-моделей с целью повышения производительности модели (загрузка CPU и обеспечиваемый фактор реального времени RTF) [33]; в 2021 г. было доработано программное обеспечение (модуль *Navigationstack*) [34]; в 2022 г. был предложен принципиально новый подход к моделированию гусениц, который позволил привести проходимость модели в соответствие с проходимостью натурального робота и снизить RTF [35]; в 2023 г. модель была перенесена с ROSMelodic на более современную ROSNoetic и добавлен ряд модулей, повышающих уровень соответствия модели и натурального робота – интегрирован функционирующий фонарь, введены ограничения на зависимое движение двух суставов манипулятора [36].

Эффективность использования разработанных детальных моделей роботов в виртуальной среде доказана на практике. В работе [37] модель РТС «Сервосила Инженер» использовалась в Gazebo для отработки процедуры обнаружения и открывания ручек дверей; затем уже отработанные алгоритмы и полностью готовый для использования код были перенесены на натурального робота, который продемонстрировал успешное открывание двери в ходе серии экспериментов [38]. В [39] модель РТС PMB-2 (TIAGoBase) использовалась в Gazebo для оценки работы нового алгоритма определения человека по мультимодальным данным (камера и лазерный дальномер) и следования за ним; затем готовые алгоритмы и код были перенесены на натурального робота, который продемонстрировал успешное следование за человеком в серии экспериментов в офисной среде [40].

3. Примеры моделирования алгоритмов и взаимодействия РТС

Наиболее часто симулятор Gazebo при моделировании задач ПСР используется для оценки алгоритмов одновременной локализации и картографирования (SLAM) и для апробации методов координации групп РТС между собой; при этом исследователи стараются максимально использовать уже готовые модули ROS для ряда типовых алгоритмов, что существенно упрощает разработку. Например, в [41] X. Chen и другие вручную построили модель офисного помещения и, добавив в него восемь

шароподобных препятствий для примитивного моделирования ПСО, протестировали систему, состоящую из набора готовых модулей ROS – *GmappingSLAM*, глобального планировщика на основе алгоритма Дейкстры, алгоритма локализации *AMCL* и локального планировщика *TEB*. М. R. Mirzae и другие [42] при подготовке к соревнованиям RoboCup провели в Gazebo виртуальное тестирование комбинации алгоритма полуавтономной навигации и SLAM для гусеничной PTC, используя готовые модули ROS – *Hector SLAM*, локальный планировщик *DWA* и колесный робот TurtleBot.

Для оценки алгоритмов SLAM могут применяться различные количественные метрики, включая длину пути, время выполнения алгоритма, плавность траектории, процент успеха в достижении целевой точки, количество столкновений с объектами, потребление CPU и RAM. При использовании готовых датасетов или натуральных роботов для оценки точности определения положения PTC и траектории движения чаще всего используются абсолютная ошибка траектории (AbsoluteTrajectoryError, ATE), относительная ошибка положения (RelativePoseError, RPE) и среднеквадратическая ошибка (Root-MeanSquareError, RMSE) [43]. В отличие от натуральных экспериментов, в симуляторе Gazebo все

эталонные данные доступны для сравнения с результатами вычислительных экспериментов, что позволяет прогнозировать поведение алгоритмов в натуральных экспериментах и существенно сузить выбор алгоритмов для последних.

Р. Сафин, Р. Лавренов и Е. А. Мартинез-Гарсиа сравнили расчетные ошибки траектории HMP Husky, полученной двумя популярными алгоритмами SLAM в Gazebo – *RTAB-Map* и *ORB-SLAM2* [44]. *ORB-SLAM2* продемонстрировал хорошие результаты как для ровных (RMSE 0,15 м), так и для неровных ландшафтов (RMSE 0,19 м); *RTAB-Map* показал лучшую точность по сравнению с *ORB-SLAM2*: RMSE 0,019 м для плоской подстилающей поверхности и 0,03 м – для пересеченной местности. В работе [45] в Gazebo сравнивались *CORB-SLAM* и *CCM-SLAM* – два наиболее часто применяемых метода коллаборативного визуального SLAM с использованием монокулярной камеры и двух БЛА *hector_quadrotor* в условиях ПСО. Вычислительные эксперименты показали, что средняя медианная ATE для алгоритма *CCM-SLAM* в 2–3 раза превышает ошибку *CORB-SLAM*. На рис. 4, а показан созданный для виртуального тестирования мир ПСО, на рис. 4, б – построенные БЛА траектории и карта в виде трехмерного облака точек.

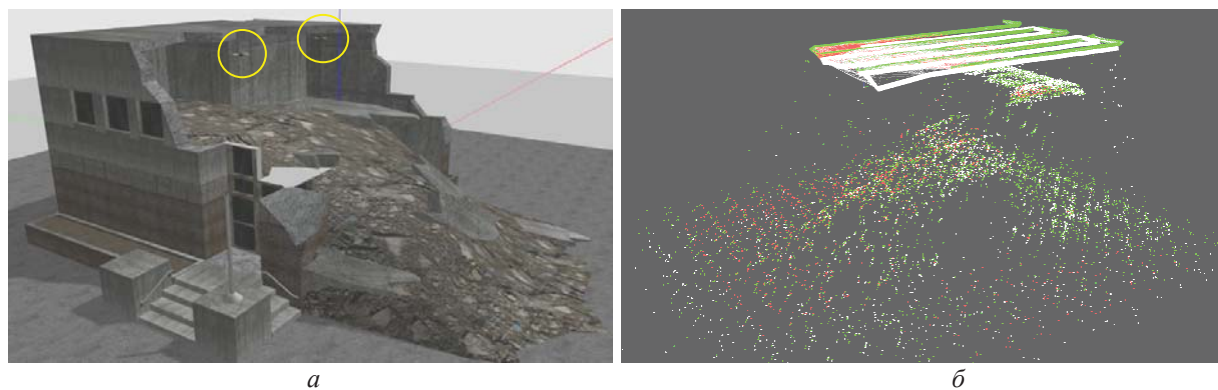


Рис. 4. Виртуальный мир в симуляторе Gazebo; разрушенное здание патрулируется парой БЛА *hector_quadrotor*, выделенной окружностями (а). 3D облако точек, полученное алгоритмом *CCM-SLAM*; линии в верхней части рисунка показывают траектории правого и левого БЛА соответственно (б)

Автономная навигационная система для координации работы нескольких БЛА в задаче обнаружения людей при ПСО в частично затопленном мире представлена в [46] и использует модели БЛА *hector_quadrotor*. В работе [47] Gazebo использовался для тестирования графического интерфейса и алгоритма управления

роем БЛА. На рис. 5 показана схема строя из 5 БЛА (а) и полет роя из 10 БЛА (б) в Gazebo в шахматном построении. Разработанный интерфейс (рис. 1, б) поддерживает построение в 14 видов строя, управление отдельным БЛА и всем роем. Интерфейс тестировался в средах для ПСО.

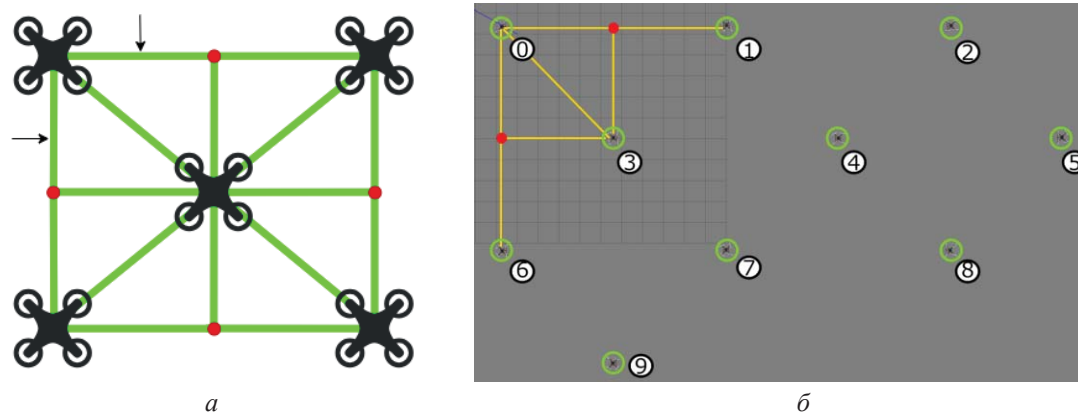


Рис. 5. Рой БЛА в шахматном построении: схема строя для 5 БЛА (а) и построение в Gazebo (вид сверху) из 10 БЛА PX4-LIRS, которые выделены зелеными окружностями с нумерацией от 0 до 9 (б)

Заключение

Использование робототехники в поисково-спасательных операциях (ПСО) демонстрирует важность интеграции новых технологий в процессы реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС). В статье рассмотрены три основные категории мобильных роботов, используемых в ПСО: морские, воздушные и наземные. Описаны возможности их моделирования в симуляторе Gazebo, представлены примеры успешного моделирования роботов и тестирования типовых задач роботов в ПСО, включая SLAM и координацию РТС между собой при выполнении совместной задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kawata, Y. The great Hanshin-Awaji earthquake disaster: damage, social response, and recovery / Y. Kawata // Journal of natural disaster science. – 1995. – Т. 17. – № 2. – С. 1–12.
2. Murphy, R. R. Disaster robotics // R. R. Murphy, S. Tadokoro, A. Kleiner // Springer Handbook of Robotics. – Cham: Springer, 2016. – С. 1577–1604.
3. Artificial Intelligence Based Framework for Robotic Search and Rescue Operations Conducted Jointly by International Teams / E. Magid [и др.] // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2019. – Т. 154. – С. 15–26.
4. Michel, O. Webots: Symbiosis Between Virtual and Real Mobile Robots / O. Michel // International Conference on Virtual Worlds. – 1998. – С. 254–263.
5. A Survey on Open-Source Simulation Platforms for Multi-Copter UAV Swarms / Z. Chen [и др.] // Robotics. – 2023. – Т. 12. – № 2. – С. 53.
6. Robots Saving Lives: A Literature Review About Search and Rescue (SAR) in Harsh Environments / K. Tong [и др.] // 2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – IEEE, 2024. – С. 953–960.
7. Gazebo simulator official site [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gazebosim.org/> (дата обращения: 17.02.2025 г.).
8. Pütz, S. Tools for Visualizing, Annotating and Storing Triangle Meshes in ROS and RViz / S. Pütz, T. Wiemann,

J. Hertzberg // European Conference on Mobile Robots. – IEEE, 2019. – С. 1–6.

9. Development of a search and rescue robot system for the underground building environment / G. Wang [и др.] // Journal of Field Robotics. – 2023. – Т. 40. – № 3. – С. 655–683.

10. Pallin, M. Formulation and Solution of the Multi-agent Concurrent Search and Rescue Problem / M. Pallin, J. Rashid, P. Ögren // 2021 IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR). – IEEE, 2021. – С. 27–33.

11. Klimenko, A. A Technique of Distributed Missions Assignment Problem Solving in Heterogeneous Groups of Aerial Rescue Robots / A. Klimenko, A. Barinov // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – С. 392–406.

12. A heterogeneous robots collaboration for safety, security, and rescue robotics: e-ASIA joint research program for disaster risk and reduction management / B.M. Pillai [и др.] // Advanced Robotics. – 2024. – Т. 38. – № 3. – С. 129–151.

13. Sparrow, R. Naval robots and rescue / R. Sparrow, R. McLaughlin, M. Howard // International Review of the Red Cross. – 2017. – Т. 99. – № 906. – С. 1139–1159.

14. ROS Robots [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robots.ros.org/> (дата обращения: 17.02.2025 г.).

15. Grogan, S. The use of unmanned aerial vehicles and drones in search and rescue operations—a survey / S. Grogan, R. Pellerin, M. Gamache // Proceedings of the PROLOG. – 2018. – С. 1–13.

16. Construction of 3D models of buildings damaged by earthquakes using UAV aerial images / F. Yamazaki [и др.] // Proceedings of the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Pacific. – 2015. – Т. 204.

17. Embedded ArUco: a novel approach for high precision UAV landing / A. Khazetdinov [и др.] // Siberian Conference on Control and Communication. – 2021. – № 9438855.

18. Pillai, B. M. Challenges for Novice Developers in Rough Terrain Rescue Robots: A Survey on Motion Control Systems / B. M. Pillai, J. Suthakorn // Journal of Control Science and Engineering. – 2019. – № 2135914.

19. The current state and future outlook of rescue robotics / J. Delmerico [и др.] // Journal of Field Robotics. – 2019. – Т. 36. – № 7. – С. 1171–1191.

20. Chikurtev, D. Mobile Robot Simulation and Navigation in ROS and Gazebo / D. Chikurtev // 2020 International Conference Automatics and Informatics (ICAI). – IEEE, 2020. – С. 1–6.

21. Yilmaz, Z. Simulation of Lidar-Based Robot Detection Task using ROS and Gazebo / Z. Yilmaz, L. Bayindir // *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. – 2019. – С. 513–529.
22. Rivera, Z. B. Unmanned Ground Vehicle Modelling in Gazebo/ROS-Based Environments / Z. B. Rivera, M. C. De Simone, D. Guida // *Machines*. – 2019. – Т. 7. – № 2. – С. 42.
23. Pecka, M. Fast Simulation of Vehicles with Non-deformable Tracks / M. Pecka, K. Zimmermann, T. Svoboda // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – IEEE, 2017. – С. 6414–6419.
24. Mechatronic design and development of a non-holonomic omnidirectional mobile robot for automation of primary production / M. Sharifi [и др.] // *Cogent Engineering*. – 2016. – Т. 3. – № 1.
25. Modelling and simulation of a non-holonomic omnidirectional mobile robot for offline programming and system performance analysis / M. Sharifi [и др.] // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2018. – Т. 87. – С. 155–169.
26. Gear Wheels based Simulation of Crawlers for Mobile Robot Servosila Engineer / R. Gabdrahmanov [и др.] // The 19th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2022). – 2022. – С. 565–572.
27. Aurora Unior Car-like Robot in Gazebo Environment / K. Shabalina [и др.] // *International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2019)*. – 2019. – С. 116–119.
28. LIRS-ArtBul: Design, modelling and construction of an omnidirectional chassis for a modular multipurpose robotic platform / A. Apurin [и др.] // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2022. – № 13719. – С. 70–80.
29. How to Create a New Model of a Mobile Robot in ROS/Gazebo Environment: An Extended Tutorial / A. Dobrokvashina [и др.] // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. – 2023. – Т. 12. – № 4. – С. 192–199.
30. Modelling a crawler-type UGV for urban search and rescue in Gazebo environment / M. Sokolov [и др.] // *Proceedings of the 2017 International Conference on Artificial Life and Robotics*. – 2017. – С. 360–363.
31. Moskvina, I. Modeling Tracks and Controller for Servosila Engineer Robot / I. Moskvina, R. Lavrenov // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. – 2019. – Т. 154. – С. 411–422.
32. Moskvina, I. Modelling a Crawler Robot Using Wheels as Pseudo-Tracks: Model Complexity vs Performance / I. Moskvina, R. Lavrenov, E. Magid, M. Svinin // *IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2020)*. – 2020. – С. 235–239.
33. Dobrokvashina, A. Improving model of crawler robot Servosila "Engineer" for simulation in ROS/Gazebo / A. Dobrokvashina, R. Lavrenov, E. A. Martinez-Garcia, Y. Bai // *Proceedings of 13th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE) (Wuhan, China; 14-17 December 2020)*. – 2020. – С. 212–217.
34. Navigation stack for the crawler robot Servosila Engineer / A. Dobrokvashina [и др.] // *Proceedings of the IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) (Chengdu, China; 01-02 August 2021)*. – 2021. – С. 1907–1912.
35. Gear Wheels based Simulation of Crawlers for Mobile Robot Servosila Engineer / R. Gabdrahmanov [и др.] // *The 19th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2022)*. – 2022. – С. 565–572.
36. New Features Implementation for Servosila Engineer Model in Gazebo Simulator for ROS Noetic / A. Dobrokvashina [и др.] // *The 2023 International Conference on Artificial Life and Robotics (online, 9-12 February 2023)*. – 2023. – С. 154–157.
37. Door handle detection modelling for Servosila Engineer robot in Gazebo simulator / R. Abdulganeev [и др.] // *Siberian Conference on Control and Communications, (SIBCON 2022)*. – 2022. – С. 1–4.
38. Autonomous door opening with a rescue robot / R. Abdulganeev [и др.] // *The 10th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA 2024)*. – 2024. – С. 7–11.
39. Chebotareva, E. Laser Rangefinder and Monocular Camera Data Fusion for Human-Following Algorithm by PMB-2 Mobile Robot in Simulated Gazebo Environment / E. Chebotareva, K.-H. Hsia, K. Yakovlev, E. Magid // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. – 2020. – Т. 187. – С. 357–369.
40. Person-Following Algorithm Based on Laser Range Finder and Monocular Camera Data Fusion for a Wheeled Autonomous Mobile Robot / E. Chebotareva [и др.] // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2020. – № 12336. – С. 21–33.
41. SLAM-based Navigation Technology for Rescue Robots in Post-disaster Scenarios / X. Chen [и др.] // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. – 2023. – Т. 52. – С. 33–39.
42. Mirzaei, M. R. ROS-based motion planner for Gazebo-simulated rescue robots in RoboCup / M. R. Mirzaei, N. Karimi, E. Najafi // *21st International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*. – IEEE, 2020. – С. 1–5.
43. Comparison of monocular ROS-based Visual SLAM methods / L. Safarova [и др.] // *Lecture notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2022. – С. 81–92.
44. Safin, R. Evaluation of Visual SLAM Methods in USAR Applications Using ROS/Gazebo Simulation / R. Safin, R. Lavrenov, E. A. Martinez-Garcia // *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. – Singapore: Springer Singapore, 2020. – С. 371–382.
45. Comparative analysis of ROS-based centralized methods for conducting collaborative monocular visual SLAM using a pair of UAVs / B. Abbyasov [и др.] // *Proceedings of the 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2020)*. – 2020. – С. 113–120.
46. Dsouza, J. M. Autonomous Navigation System for Multi-Quadrotor Coordination and Human Detection in Search and Rescue / J. M. Dsouza, R. M. Rafikh, V. G. Nair // *Journal of Robotics and Mechatronics*. – 2023. – Т. 35. – № 4. – С. 1084–1091.
47. UAV Swarm Formation Control for Outdoor Surveillance Tasks / O. Frolov [и др.] // *8th International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering 2024 (CCIE)*. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – Singapore: Springer, 2024. – Т. 1252. – С. 364–372.