

УДК: 629.127

Обзорная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178

EDN: NCBFQL

Способы и технические средства позиционирования и навигации роботов в водной среде

В. Н. Ле¹, А. Л. Ронжин²

¹ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

197045, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, 17/1

²Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр

Российской академии наук

199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39

Аннотация. Обсуждаются проблемы позиционирования и навигации роботов в водной среде с применением традиционных инерциальных систем, гидроакустических подходов, поверхностных GPS-буев, систем технического зрения, позволяющих получить относительные координаты положения робота в водоеме и спланировать маршрут к цели. Сложная и изменчивая окружающая среда накладывает дополнительные ограничения, требующие применения альтернативных методов SLAM, взаимодействия нескольких роботов. Комплексование информации с нескольких датчиков различного типа или роботов повышает точность и надежность их позиционирования, позволяет избежать столкновений и коллизий на маршрутах. Рассмотренные подходы, применяемые технические средства, методы обработки информации представлены в виде оригинальных классификаций.

Ключевые слова: робототехника, навигация, позиционирование, SLAM, техническое зрение, гидроакустика, групповое управление роботами

Поступила 24.11.2023, одобрена после рецензирования 27.11.2023, принята к публикации 29.11.2023

Для цитирования. Ле В. Н., Ронжин А. Л. Способы и технические средства позиционирования и навигации роботов в водной среде // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 167–178. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178

MSC: 68T40; 93C85

Review article

Methods and technical means of positioning and navigation of robots in the aquatic environment

V.N. Le¹, A.L. Ronzhin²

¹Military Research and Educational Center of the Navy "Naval Academy"

197045, Russia, St. Petersburg, 17/1 Ushakovskaya embankment

²St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

199178, Russia, St. Petersburg, 39, 14th line of Vasilyevsky Island

Abstract. The issues of positioning and navigation of robots in the aquatic environment are discussed using traditional inertial and acoustic approaches, surface GPS buoys, technical vision systems allowing for obtaining relative coordinates of the robot's position in the reservoir and planning a route to the target. The complex and changing environment imposes additional constraints, necessitating the use of alternative SLAM methods and the interaction of multiple robots. Fusion of information from multiple sensors of

different types of robots enhances the accuracy and reliability of positioning, allowing avoidance of collisions and conflicts on routes. The discussed approaches, applied technical means, and information processing methods are presented in the form of classifications.

Keywords: robotics, navigation, positioning, SLAM, underwater vision, hydroacoustic, group control of robots

Submitted 24.11.2023,

approved after reviewing 27.11.2023,

accepted for publication 29.11.2023

For citation. Le V.N, Ronzhin A.L. Methods and technical means of positioning and navigation of robots in the aquatic environment. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 167–178. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178

ВВЕДЕНИЕ

Новые сенсорные системы и технологии искусственного интеллекта постепенно находят свое применение в области робототехники при решении задач наблюдения, обнаружения, отбора проб, ремонта технических сооружений, подъема объектов с глубины, в эвакуационных работах. Роботы могут не только решать опасные задачи, которые ранее выполнялись людьми, но и проводить всесторонние исследования на глубинах, которые невозможно изучить другими технологиями, например дистанционного зондирования. Роботы становятся важным инструментом для исследований мирового океана и внутренних пресных водоемов [1].

Задачи позиционирования и навигации являются ключевыми для роботов любой среды базирования. От точности их реализации зависит скорость движения и манипулирования предметами, а также сохранность как робота, так и внешних объектов. Для навигации робота необходимо решить четыре основные задачи: локализация робота, создание карты местности, планирование маршрута, управление движением робота. Локализация или позиционирование связаны с определением координат робота в глобальных или локальных системах посредством доступных бортовых сенсорных, инерциальных систем или внешних данных. Для создания карт могут применяться различные сенсоры, в том числе для уточнения карт и разметки положений новых статических и возникающих динамических препятствий. На основе доступной карты, координат текущего и целевого местоположения строится маршрут движения робота, оптимальный с точки зрения потребляемых временных, энергетических ресурсов или других критериев. Сформированный маршрут используется далее системой управления робота для осуществления движения, анализа окружающей среды и уточнения карты.

Решение перечисленных задач в водной среде затрудняется рядом факторов (рис. 1): высокая плотность среды и как следствие высокое давление на глубине, низкая освещенность, подводные течения и другие негативные факторы, влияющие на качество работы систем технического зрения, скорость беспроводной передачи данных, высокие риски протечек корпуса робота.

В настоящее время для позиционирования и навигации подводных транспортных средств применяются радиобуи на поверхности, подводные маяки, подводный видеомониторинг, комплексирование информации, поступающей от нескольких сенсоров. Каждый тип сенсора и технологий последующей обработки данных имеют свои преимущества и недостатки, поэтому в зависимости от прикладной задачи к роботу и его средствам предъявляются конкретные функциональные требования, влияющие на выбор аппаратных и программных средств позиционирования и навигации.



Рис. 1. Негативные факторы водной среды и способы противодействия им

Fig. 1. Negative factors of the aquatic environment and ways to counter them

Одним из основных преимуществ визуальной навигации является ее относительная простота реализации и значительный объем полезной информации для определения местоположения. Видеокамеры доступны в разных ценовых категориях и могут регистрировать детальные данные об окружающей среде в различных спектральных диапазонах. Современные технологии обеспечивают высокое качество изображений и небольшие габаритные размеры видеокамер, что делает их привлекательными для применения на роботах в водной среде.

Визуальная навигация также имеет преимущество в том, что она не подвержена проблемам, характерным для акустических и электромагнитных методов, таких как регистрация отраженных волн от ложных объектов. Однако для успешной визуальной навигации необходимо иметь прямую видимость между камерой и объектом, который нужно обнаружить или отследить, поэтому в подводной среде основными затруднениями являются низкая освещенность и повышенная мутность, которые необходимо учитывать при проектировании системы визуального позиционирования и навигации. Кроме того, изображения, сделанные в подводной среде, не обладают ярко выраженными признаками и текстурой, что делает визуальную сегментацию и классификацию объектов сложной задачей. Тем не менее это остается одним из наиболее перспективных подходов для роботов в благоприятных условиях видимости.

Развитие электромагнитного позиционирования сдерживает отсутствие достаточного объема имеющейся топографической информации. По мере создания соответствующих карт данный метод получит большее распространение в подводной навигации.

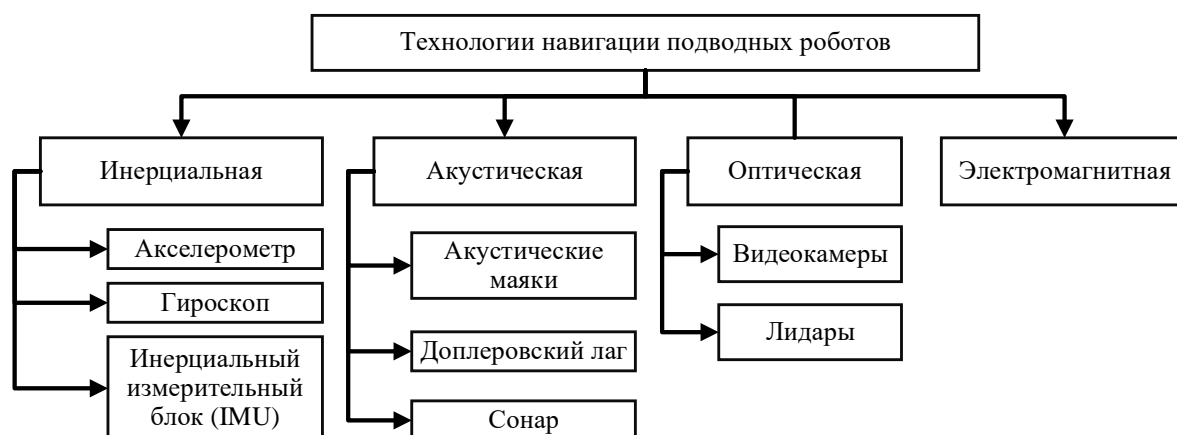


Рис. 2. Классификация технологий позиционирования и навигации роботов в водной среде

Fig. 2. Classification of technologies for positioning and navigation of robots in the aquatic environment

На практике если применяется только один метод, это приводит к погрешностям при определении положения робота под водой. Для повышения точности и надежности позиционирования на практике применяются методы комплексирования информации с применением разных типов технологий и датчиков. Далее в данной статье рассматриваются различные технологии и аппаратные средства навигации роботов, обсуждаются их недостатки и достоинства. Проанализированы существующие методы определения местоположения роботов под водой. Обсуждаются современные технологии навигации роботов и предложена их оригинальная классификация.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РОБОТОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Разработка полностью автономных средств навигации роботов в водной среде представляет собой сложную задачу прежде всего из-за отсутствия фиксированной структуры дна и низкой точности систем глобального позиционирования, поэтому необходимо максимально использовать доступные подводные датчики для сбора локальной информации. Однако на практике одиночные датчики не обеспечивают в подводной среде надежные сведения для навигации, поэтому применяются одновременно несколько гетерогенных датчиков. Интеграция информации от различных типов датчиков позволяет создать карту маркеров и использовать ее для навигации робота [2, 3].

На подводных устройствах есть два основных типа датчиков (рис. 3): 1) для измерения внутренних параметров изменения состояния робота во время его движения; 2) для анализа информации об окружающей среде. К датчикам первого типа относятся инерциальные навигационные устройства, Доплеровские скоростомеры, гироскопы, акселерометры, одометры и другие средства измерения движения устройства (например, скорость, угол, ускорение, пройденное расстояние). Датчики второго типа – инфракрасные датчики, сонары, ультразвуковые датчики, системы технического зрения – применяются для сбора характеристической информации об окружающей среде, например, расстояние до препятствий, их форма и взаимное расположение [4].

При использовании внутренних инерциальных средств их погрешность накапливается в процессе движения, поэтому на длительном временном интервале их точность о местопо-

ложении значительно падает и требуется корректировка на основе данных внешних систем [5]. В то же время применение локальных сенсорных систем в неопределенной среде позволяет оценить положение препятствий и избежать столкновения с ними в процессе навигации [6].



Рис. 3. Тип датчика на подводных устройствах

Fig. 3. Type of sensor on underwater devices

При объединении информации от множества гетерогенных датчиков могут быть применены различные способы комплексирования на разных этапах обработки. Наиболее распространенные методы включают в себя фильтры Калмана, сети Байеса, метод К-средних, статистическую обработку, методы теории Демпстера–Шейфера, кластерный анализ, метод голосования, нейронные сети и теорию нечетких множеств. За счет применения данных методов исключается сбой всей системы вследствие ошибки в работе отдельного датчика, что позволяет при нестабильности входных данных поддерживать стабильность и надежность системы управления роботом. Методы объединения информации разных сред с различными типами датчиков могут быть разделены на три типа: централизованные, децентрализованные и гибридные [7]. В централизованных методах данные, собранные каждым датчиком, направляются непосредственно к центральному вычислителю без какой-либо обработки и объединяются при завершении процесса комплексирования. В децентрализованных методах данные от датчиков собираются через определенные локальные вычислители, выполняющие предобработку, сжатие, а затем передаются на центральный вычислитель, где происходит окончательный процесс принятия решений. В гибридных методах часть данных, собранных датчиками, направляется к центральному вычислителю без обработки, а часть данных проходит предобработку [8].

ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ

Гидроакустическое позиционирование – метод, основанный на оценивании параметров звука, распространяемого в водной среде [9], является востребованным на практике при определении местоположения под водой, поскольку звуковые сигналы под водой распространяются на большие расстояния по сравнению с электромагнитными волнами. Определение местоположения и навигация под водой могут быть разделены на три типа: фиксированные, подвижные и переносные в зависимости от способа установки [10]. В фиксированной навигации устройства обычно закреплены на дне моря. Этот тип навигации дорог и имеет ограниченное применение только в фиксированных зонах. В подвижной навигации все устройства устанавливаются на материнский корабль, и область испытаний может быть легко изменена. Переносная навигация легкая, относительно небольшая по размеру и весу, готова к развертыванию и переработке, ее можно перемещать из одной экспериментальной области в другую с помощью самолета или автомобиля [11]. Типы подводных акустических

систем позиционирования и навигации различаются по структуре, но все они основаны на геометрической акустической локализации в водной среде. Фиксированная подводная акустическая локализация представляет собой высокоточное позиционирование и навигацию без накопления ошибок, что делает ее широко используемой технологией для определения местоположения под водой. Существуют три типа триангуляционных технологий водного звукового позиционирования, основанных на длине приемной антенны (рис 4): длиннобазисные (LBL), короткобазисные (SBL) и ультракороткобазисные (USBL).

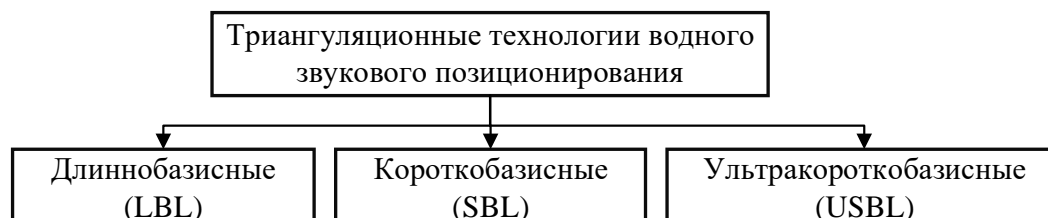


Рис. 4. Типы технологий водного звукового позиционирования

Fig. 4. Types of waterborne sound positioning technologies

Ультракороткобазисное гидроакустическое позиционирование используется в различных областях, таких как разработка месторождений нефти и газа, установка и обслуживание подводных кабелей и исследование морских минеральных ресурсов. Они обеспечивают точное позиционирование для оборудования, такого как телеуправляемые роботы и автономные роботы без кабелей. Высокоточная подводная микротопография также требует использования ультракороткобазисного позиционирования. Однако при использовании таких систем возникает множество источников ошибок, таких как ошибки измерения скорости звука, угла, расстояния, а также ошибки при установке и измерении температуры воды. Для минимизации этих ошибок необходимо использовать алгоритмы и функции коррекции или компенсации ошибок.

Гидроакустическое короткобазисное позиционирование (SBL) обладает высокой точностью и простой структурой системы, что делает ее удобной для перемещения и эксплуатации. Короткобазисная система может быть установлена на базовом судне, не требует коррекции ошибок при калибровке и подходит для позиционирования и выполнения высокоточных задач. Также широко используется на антиторпедных полигонах. Однако она не подходит для позиционирования объектов на дальних расстояниях.

Проектирование и развертывание подводного массива технических средств длиннобазисных систем гидроакустического позиционирования требует значительных усилий. Количество базовых маяков, расстояние между ними должны быть оптимизированы с учетом конкретных требований, разницы в глубине морского дна и других особенностей подводной топографии. Это необходимо для точной настройки системы гидроакустического позиционирования [12].

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НАДВОДНЫХ БУЕВ GPS

Технология подводного гидроакустического позиционирования и навигации решает проблемы кратковременного позиционирования и навигации роботов. Однако она недостаточно эффективна при долгосрочных подводных операциях. В таких случаях применение технологии GPS (глобальной системы позиционирования) играет важную роль, позволяя осуществлять позиционирование и навигацию с высокой точностью и на больших расстояниях. GPS обладает высокой точностью, гибкостью и простотой в эксплуатации, что делает его популярным среди потребителей и широко используемым в повседневной жизни. Однако из-за невозможности передачи сигнала через водную среду GPS не может быть непосредственно применен в подводных приложениях. Для выполнения функции подводной

навигации необходимо использовать другие устройства, такие как буи, которые передают данные GPS далее через водную среду с помощью акустических волн [13].

Для применения гидроакустической системы позиционирования под водой на роботе устанавливаются приемный преобразователь и дополнительные датчики для получения угловых параметров и вычисления расстояния с использованием акустических принципов. Методы позиционирования с тремя или четырьмя точками, также известные как «подводная GPS-система позиционирования», могут быть применены для определения местоположения робота [14]. Это позволяет достичь точного позиционирования и навигации под водой в режиме реального времени [15].

GPS-буй может фиксироваться на роботе, в этом случае данные получаются периодически при всплытии робота на поверхность. Также GPS-буй может иметь положительную плавучесть и закреплен кабелем таким образом, чтобы постоянно оставаться на поверхности воды. В этом случае точные навигационные данные принимаются роботом. Но натяжение кабеля создает определенное сопротивление, что увеличивает потребление энергии роботом и снижает его дальность действия и маскировку. Также может применяться один или несколько буйев для увеличения точности и надежности позиционирования.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Методы технического зрения определяют маркерные точки на изображении для определения местоположения видеокамеры, встроенной в робота. Визуальная информация дает более полное описание внешнего подводного мира по сравнению с другими датчиками, не накапливает ошибки со временем, поэтому может обеспечить стабильную работу и измерения в течение длительного времени [16].

Технология позиционирования и навигации на основе технического зрения имеет два типа на основе: монокулярного зрения и бинокулярного зрения с применением двух или более камер [17]. Позиционирование на основе монокулярного зрения осуществляется на основе анализа геометрических параметров или сопоставления характерных признаков. Изображение, обрабатываемое при монокулярном зрении, представляет собой проекцию целевого объекта в трехмерном пространстве на двумерную плоскость. Информация о дальности объекта восстанавливается в реальном времени при анализе информации о движении самого робота и изменении размеров объекта на изображении. Размеры робота, место установки, фокусное расстояние и другие параметры видеокамеры являются основными источниками собственной ошибки позиционирования робота на основе монокулярного зрения [18].

Бинокулярное стереозрение имитирует способ, которым глаза человека воспринимают сцену, наблюдая за одной и той же меткой с двух точек зрения [19]. Оригинальное изображение получается бинокулярной камерой, после его сегментации и извлечения признаков выполняется распознавание объектов и определение их местоположения. По сравнению с монокулярной системой технического зрения бинокулярная увеличивает зону обзора и снижает слепые зоны [20]. Обработка изображений в бинокулярной стереосистеме робота включает в себя захват изображения, калибровку камеры, извлечение признаков, стереосопоставление, восстановление трехмерной информации и другие компоненты.

ТЕХНОЛОГИЯ ОДНОВРЕМЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ (SLAM)

Популярной технологией навигации роботов является одновременная локализация и построение карты (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM), позволяющая в процессе движения определять свое местоположение в неизвестной среде и строить карту этой среды [21]. Для достижения полностью автономного позиционирования и навигации

роботов необходимо перемещение робота по всей территории функционирования. Водная среда является изменчивой, поэтому использование заранее составленных карт окружающей среды не всегда эффективно для роботов, так как подводные течения меняют рельеф донных отложений. При решении задачи SLAM используются различные датчики, такие как видеокамеры, лидары, гироскопы и акселерометры, необходимые для регистрации данных о среде и движении робота (рис. 5).

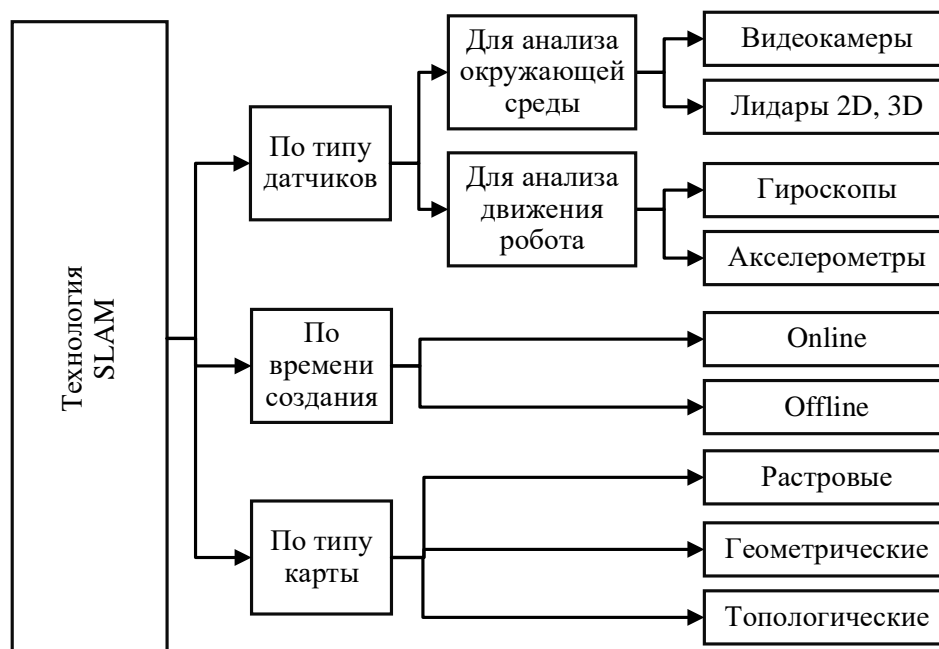


Рис. 5. Классификация средств и карт SLAM

Fig. 5. Classification of SLAM tools and maps

При онлайн-решении задачи SLAM на каждом шаге обновляются только текущее состояние робота и карта, при отсутствии достаточных вычислительных ресурсов или доступа к ним роботом производится запись со всех датчиков в процессе прохождения всей траектории и затем формируется карта [22]. В зависимости от типа данных, собранных сенсорами, карты создаются различных типов: растровые, геометрические и топологические [23].

При создании двумерных растровых карт используют 2D лидары и 3D лидары для пространственных сред [24]. Лидары обладают высокой точностью измерений, обеспечивая точные угловые данные и расстояния в широком диапазоне сканирования, что особенно полезно при планировании маршрутов роботов. Недостатками являются их высокая стоимость, особенности установки и низкая устойчивость к механическим повреждениям [25].

С развитием технологии SLAM на основе технического зрения роботы могут использовать свои собственные видеокамеры в качестве датчиков для создания геометрических карт. Применение видеокамер является более экономичным по сравнению с лидаром. Изображения, получаемые с видеокамер, более информативны и позволяют высоко дифференцировать объекты, что обеспечивает более точное позиционирование робота. Однако для обработки информации в режиме реального времени с видеокамеры требуется мощное вычислительное устройство.

Топологические карты, формируемые при SLAM, представляют собой графоподобное описание окружающей среды, а не точную геометрическую карту. В таком подходе узлы карты соответствуют значимым, легко распознаваемым местам, основываясь на биоинспирированной идее, заключающейся в том, что люди и животные не создают точные карты

окружающей среды, в которой они находятся, а строят упрощенные графические модели, позволяющие им эффективно перемещаться. Топологические карты обычно применяются для навигации в простых средах на небольшой территории [26].

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ И НАВИГАЦИЯ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ГРУППЫ РОБОТОВ

Совместное позиционирование и навигация нескольких роботов позволяет им обмениваться информацией через подводную акустическую связь и улучшать точность своего позиционирования с помощью технологий комплексирования информации, повышая устойчивость к сбоям и обеспечивая возможность реконфигурации сенсорной системы [27]. При групповом управлении в децентрализованном подходе все роботы оснащены одинаковыми датчиками и могут получать информацию от любого другого участника группы. При централизованном подходе роботы-лидеры оснащены датчиками высокой производительности, а остальные оснащены недорогими датчиками для получения информации о своем местоположении от лидера по гидроакустическому каналу через определенные промежутки времени [28]. По сравнению с навигацией одиночного АНПА совместное позиционирование и навигация группы роботов повышают точность, устойчивость системы, позволяют избежать столкновений с препятствиями и между собой [29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлено несколько классических методов и перспективных направлений в области позиционирования и навигации роботов в водной среде. Каждый метод имеет свои особенности, и выбор подходящего зависит от условий среды и целевого назначения робота. Триангуляционные гидроакустические методы являются наиболее распространенными. Инерциальные системы самые простые и высокоточные, но накапливают ошибку со временем движения. Применение лидаров, видеокамер и методов технического зрения требует наличия значительных вычислительных ресурсов. Комбинирование инерциальных технологий подводного позиционирования и навигации на основе надводных буев GPS позволяет избежать накопления ошибок. Использование группы роботов повышает стабильность и надежность всей системы путем нивелирования сбоев и погрешностей показаний отдельных датчиков.

REFERENCES

1. Морозов Р. О., Горелый А. Е., Рыжов В. А. Интеллектуальные системы навигации и планирования МРТК // Морские информационно-управляющие системы. 2021. С. 34–43.
Morozov R.O., Gorely A.E., Ryzhov V.A. Intelligent navigation and planning systems for AUVs. *Morskiye informatsionno-upravlyayushchiye sistemy* [Marine information management systems]. 2021. Pp. 34–43. (In Russian)
2. Nicosevici T., Garcia R., Carreras M., Villanueva M. A review of sensor fusion techniques for underwater vehicle navigation. *Oceans'-04. MTS/IEEE Techno-Ocean '04* (IEEE Cat. No. 04CH37600). 2004. Vol. 3. Pp. 1600–1605. DOI: 10.1109/OCEANS.2004.1406361.
3. Borkowski P. The ship movement trajectory prediction algorithm using navigational data fusion. *Sensors*. 2017. 17(6). P. 1432. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17061432>.
4. Yuan K., Wang H., Zhang H. Robot position realization based on multi-sensor information fusion algorithm. *Fourth International Symposium on Computational Intelligence and Design*. 2011. Pp. 294–297. DOI: 10.1109/ISCID.2011.81.

5. Yang Q., Sun J. An underwater autonomous robot based on multi-sensor data fusion. *In 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Vol. 2. Pp. 9139–9143. DOI: 10.1109/WCICA.2006.1713768
6. Kamil F., Hong T. S., Khaksar W. et al. New robot navigation algorithm for arbitrary unknown dynamic environments based on future prediction and priority behavior. *Expert Systems with Applications*. 2017. Vol. 86. Pp. 274–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.059S>
7. Gravina R., Afinia P., Ghasemzadeh H., Fortino G. Multi-sensor fusion in body sensor networks: state-of-the-art and research challenges. *Information Fusion*. 2017. Vol. 35. Pp. 68–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.09.005>
8. Majumder S., Scheduling S., Durrant-Whyte H. F. Multisensor data fusion for underwater navigation. *Robotics and Autonomous Systems*. 2001. Vol. 35. Pp. 97–108. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(00\)00126-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(00)00126-3)
9. Alcocer A., Oliveira P., Pascoal A. Study and implementation of an EKF GIB-based underwater positioning system. *Control Engineering Practice*. 2007. Vol. 15. Pp. 689–701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2006.04.001>
10. McManus S.J. A method of Navigation using a Modified Ultra Short BaseLine Directional Acoustic Transponder. *Oceans 2007 – Europe*. 2007. DOI: 10.1109/OCEANSE.2007.4302343
11. Thomson D., Elson S. New generation acoustic positioning systems. *Oceans '02 MTS/IEEE*. 2002. Vol. 3. Pp. 1312–1318. DOI: 10.1109/OCEANS.2002.1191828
12. Крестовников К. Д., Ершов А. А., Савельев А. И. Подход к беспроводному заряду аккумуляторной батареи автономных необитаемых подводных аппаратов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4–1(58). С. 144–155. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.036>
- Krestovnikov K.D., Ershov A.A., Savelyev A.I. Approach to wireless charging of the battery for autonomous unmanned underwater vehicles. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii* [Maritime intelligent technologies]. 2022. № 4–1(58). Pp. 144–155. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.58.4.036>. (In Russian)
13. Саватеев Н. Н. Использование спутниковых навигационных систем для определения местоположения объекта под водой // Информационные технологии в образовании. 2021. С. 214–219.
- Savateev N.N. Utilization of satellite navigation systems for determining the location of underwater objects. *Informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii* [Information technologies in education]. 2021. Pp. 214–219. (In Russian)
14. Spiess F.N., Chadwell C.D., Hildebrand J.A. et al. Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1998. Vol. 108. Pp. 101–112. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(98\)00089-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(98)00089-2)
15. Thomas H.G. New advanced underwater navigation techniques based on surface relay buoys. *Proceedings of Oceans'94*. 1994. Vol. 3. Pp. 111–395. DOI: 10.1109/OCEANS.1994.364231
16. Aider O.A., Hoppenot P., Colle E. A model-based method for indoor mobile robot localization using monocular vision and straight-line correspondences. *Robotics and Autonomous Systems*. 2005. Vol. 52. Pp. 229–246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2005.03.002>
17. Carreras M., Ridao P., Garcia R., Nicosevici T. Vision-based localization of an underwater robot in a structured environment. 2003 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*. 2003. Vol. 1. Pp. 971–976. DOI: 10.1109/ROBOT.2003.1241718
18. Liu T., Wan L., Liang X.W. A monocular vision measurement algorithm based on the underwater robot. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 532. Pp. 165–169. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.532.165>

19. Mingjun Z., Shupeng L., Xuan L. Research on technologies of underwater feature extraction and target location based on binocular vision. *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*. IEEE. 2015. Pp. 5778–5784. DOI: 10.1109/CCDC.2015.7161837
20. Jian X., Xiaoyuan C., Xiaoping S., Hang L. Target recognition and location based on binocular vision system of UUV. *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE. 2015. Pp. 3959–3963. DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7260249
21. Вялков И. К., Тимош П. С. Использование SLAM метода для внутренней навигации с применением AR технологий // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2023. С. 331–333.
22. Vyalkov I.K., Timosh P.S. Utilization of SLAM method for indoor navigation using AR technologies. *Nauchno-tekhnicheskoye i ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific-Technical and Economic Cooperation of ATR Countries in the 21st Century]. 2023. Pp. 331–333. (In Russian)
23. Луговской В. В. SLAM как передовой метод навигации и его виды // Инновационная наука. 2023. № 4–2. С. 46–49.
24. Lugovskoy V.V. SLAM as an Advanced Navigation Method and Its Types. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative Science]. 2023. № 4–2. Pp. 46–49. (In Russian)
25. Zhao W., He T., Sani A. Y. M., Yao T. Review of SLAM Techniques For Autonomous Underwater Vehicles. *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence*. 2019. Pp. 384–389. DOI: <https://doi.org/10.1145/3366194.3366262>
26. Hess W., Kohler D., Rapp H., Andor D. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM. 2016 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2016. Pp. 1271–1278. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487258
27. Dubé R., Gawel A., Sommer H. et al. An online multi-robot SLAM system for 3D LiDARs. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2017. Pp. 1004–1011. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202268
28. De Freitas C.M. Autonomous navigation with simultaneous localization and mapping in/outdoor. *CMS de Freitas*. 2020.
29. Paul L., Sot M., Leonard J.J. Decentralized cooperative trajectory estimation for autonomous underwater vehicles. *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2014. Pp. 184–191. DOI: 10.1109/IROS.2014.6942559
30. Li Z., Jiang C., Gu X. et al. Collaborative positioning for swarms: A brief survey of vision, LiDAR and wireless sensors based methods. *Defence Technology*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.05.013>
31. Pan X., Kang F., Wang Y. Cooperative navigation for multi-UUV using relative observations. *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing*. 2010. Vol. 7. Pp. 3191–3194. DOI: 10.1109/CISP.2010.5647971
32. Watson S., Duecker D. A., Groves K. Localization of Unmanned Underwater Vehicles (UUVs) in Complex and Confused Environments: A Review. *Sensors*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20216203>
33. Barsha B., Durant-Whyte H.F. Inertial navigation system for mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation*. 1995. Vol. 11. Pp. 328–342. DOI: 10.1109/70.388775
34. Tan H.P., Diamant R., Seah W.K., Waldmeyer M. A survey of techniques and challenges in underwater localization. *Ocean Engineering*. 2011. Vol. 38. Pp. 1663–1676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.017>

33. Wu Y., Та X., Xiao R. et al. Survey of underwater robot positioning navigation. *Applied Ocean Research*. 2019. Vol. 90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.06.002>

Информация об авторах

Ле Ван Нгиа, специалист, Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия»;

197045, Россия, Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, 17/1;

lenghia18071999@gmail.com

Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, профессор, директор, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук;

199178, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия Васильевского острова, 39;

ronzhin@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>

Information about the authors

Le Van Nghia, Specialist's Degree, Military Research and Educational Center of the Navy “Naval Academy”;

197045, Russia, St. Petersburg, 17/1, Ushakovskaya embankment;

lenghia18071999@gmail.com

Ronzhin Andrey Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences;

199178, Russia, St. Petersburg, 39, 14th line of Vasilyevsky Island;

ronzhin@ias.spb.su, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>