

29. Bouloubasis A.K., McKee G. VOLA Multitasking Surface Exploration Rover System, *Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots*. IntechOpen, 2007.
30. Zhu B. [et al.]. Probabilistic path planning for wheel-legged rover in dense environment based on extended MDP and configuration topology analysis, *IEEE Transactions on Robotics*, 2025.
31. Halme A. [et al.]. WorkPartner: interactive human-like service robot for outdoor applications, *The international journal of robotics Research*, 2003, Vol. 22, No. 7-8, pp. 627-640.
32. Bjelonic M. Planning and control for hybrid locomotion of wheeled-legged robots: diss. ETH Zurich, 2021.

Васильев Андрей Викторович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: andrey@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125526093; к.т.н.; с.н.с.

Шардыко Игорь Вячеславович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: i.shardyko@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125526093; н.с.

Жуков Юрий Александрович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: yu.zhukov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125524700; ведущий программист.

Vasiliev Andrey Viktorovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: andrey@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125526093; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Shardyko Igor Vyacheslavovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: i.shardyko@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125526093; researcher.

Zhukov Yuriy Alexandrovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: yu.zhukov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125524700; leading programmer.

УДК 629.584

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-120-135

А.Ю. Коноплин, А.П. Юрманов, А.Ю. Родионов, Р.П. Василенко, М.О. Панчук
МЕТОД ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА И АНПА,
ОСНАЩЕННОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ СВЯЗИ,
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Выполнение автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) инспекционных и манипуляционных операций под контролем оператора ограничено низкой пропускной способностью гидроакустического канала связи, не позволяющей передавать видеопоток и качественные фотоизображения в реальном времени. В то же время существующие методы автоматического распознавания целевых объектов бортовыми системами технического зрения АНПА не гарантируют точного определения местоположения и формы объекта при наличии на нем дефектов (заиливание, биологические обрастания, механические повреждения). Для решения указанной проблемы в статье ставится задача разработки метода, обеспечивающего посредством низкопропускного гидроакустического канала связи информационное взаимодействие оператора с АНПА для оценки оператором качества распознавания целевых объектов с последующим формированием целеуказаний для аппарата и его бортового манипулятора. В основе метода используется алгоритм идентификации объектов с дефектами, использующий модифицированное ИСР-совмещение облаков точек с исключением дефектных областей и характерных особенностей (ХО). Выявленные ХО и области дефектов преобразуются в компактный набор геометрических примитивов, передаваемый оператору по гидроакустическому каналу связи с АНПА. На основе полученной информации, поступающей от АНПА телеметрии, а также эталонной трёхмерной модели объекта графический интерфейс визуализирует сканируемую сцену, позволяя оператору оценить точность распознавания. Натурные испытания метода проводились с использованием гидроакустического модема производства ИПМТ ДВО РАН и бортового вычислителя NVIDIA Jetson TX2. Передаваемый в

течение минуты информационный пакет содержал тип объекта, его положение, карту дефектов и описание ХО при объеме данных, на три порядка меньшем по сравнению с передачей полного облака точек сканируемого объекта. На основе полученной информации оператор подтверждал успешность идентификации объекта, до 30% площади поверхности которого были покрыты дефектами. Практическая значимость метода заключается в возможности выполнения ответственных миссий под контролем оператора в условиях неопределенности окружающей среды.

Автономный необитаемый подводный аппарат; многозвенный манипулятор; система технического зрения; идентификация объектов; подводные операции; гидроакустический канал связи; облака точек; алгоритм ICP; передача данных.

A.Yu. Konoplin, A.P. Yurmanov, A.Yu. Rodionov, R.P. Vasilenko, M.O. Panchuk

**METHOD FOR INFORMATION INTERACTION BETWEEN AN OPERATOR
AND AN AUV EQUIPPED WITH A HYDROACOUSTIC COMMUNICATION
CHANNEL FOR TARGET OBJECT IDENTIFICATION**

The execution of inspection and manipulation operations by autonomous unmanned underwater vehicles (AUVs) under operator supervision is limited by the low bandwidth of the hydroacoustic communication channel, which does not allow the transmission of video streams and high-quality photographic images in real time. At the same time, existing methods for automatic recognition of target objects by onboard machine vision systems of AUVs do not guarantee accurate determination of the object's position and shape when defects are present on its surface (siltation, biofouling, mechanical damage). To address this problem, the paper formulates the task of developing a method that enables information interaction between the operator and the AUV via a low-bandwidth hydroacoustic communication channel. This interaction allows the operator to evaluate the quality of target object recognition and subsequently generate target designations for the vehicle and its onboard manipulator. The proposed method is based on an algorithm for identifying objects with defects, which employs a modified ICP point cloud registration approach with the exclusion of defective regions and characteristic features (CFs). The detected CFs and defect regions are transformed into a compact set of geometric primitives transmitted to the operator through the hydroacoustic communication channel with the AUV. Based on the received information, incoming telemetry from the AUV, and a reference three-dimensional model of the object, the graphical interface visualizes the scanned scene, allowing the operator to assess the recognition accuracy. Full-scale experimental tests of the method were conducted using a hydroacoustic modem manufactured by the Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMTP FEB RAS) and an onboard computer NVIDIA Jetson TX2. The information packet transmitted within 1 minute contained the object type, its position, a defect map, and the coordinates of the characteristic features, with a data volume three orders of magnitude smaller than that required for transmitting the full point cloud of the scanned object. Based on the received information, the operator confirmed successful object identification even when up to 30% of the surface area was covered by defects. The practical significance of the proposed method lies in enabling the execution of critical missions under operator supervision in conditions of environmental uncertainty.

Autonomous unmanned underwater vehicle; multi-link manipulator; machine vision system; object identification; underwater operations; hydroacoustic communication channel; point clouds; ICP algorithm; data transmission.

Введение. Выполнение поисковых, инспекционных и технологических операций в глубинах Мирового океана на сегодняшний день невозможно без применения робототехнических комплексов. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), оснащенные многозвенными манипуляторами (ММ) и системами технического зрения (СТЗ), имеют большой потенциал для значительного повышения эффективности, скорости и безопасности подводных миссий при одновременном снижении их стоимости [1, 2]. Для реализации этого потенциала разрабатываются системы управления и обработки сенсорной информации для автоматического выполнения подводных операций, позволяющие аппаратам самостоятельно обнаруживать объекты и осуществлять с ними манипуляционные действия [3–5].

Однако такие системы не позволяют полноценно решать сложные задачи в условиях неопределенности окружающей водной среды, когда целевые объекты часто подвержены заиливанию, биологическому обрастанию и механическим деформациям, что при-

водит к появлению дефектов на их поверхностях. Существующие системы автоматической идентификации объектов, как правило, основанные на алгоритмах ИСР, имеют существенные ограничения [6]. Их точность критически зависит от качества предварительного совмещения облаков точек отсканированного с помощью СТЗ объекта и его эталонной модели, а также наличия выбросов, вызванных шумами или посторонними объектами [7]. В работах [8, 9] предложены алгоритмы идентификации объектов с дефектами, однако их применение лишь частично решает проблему, так как форма объекта все еще может существенно отличаться от эталонной модели. Это ведет к ошибкам идентификации и делает невозможным полностью автономное выполнение АНПА ответственных операций, требующих гарантированной достоверности распознавания объекта работ и точного позиционирования рабочего инструмента бортового ММ относительно этого объекта.

Наиболее перспективным решением обозначенной проблемы являются гибридные системы, сочетающие автономность АНПА с возможностью контроля со стороны человека-оператора. Оператор, в отличие от автоматических систем, способен гарантировать достоверность идентификации, оценить степень расхождения эталонной модели с реальной формой объекта и, при необходимости, скорректировать процесс распознавания и сформировать дальнейшие целеуказания для аппарата, что особенно важно на ответственных этапах подводной миссии. В мировой практике известны успешные примеры реализации такого подхода. Один из них реализован для подводного аппарата SAUVIM [10], архитектура системы управления которого организована по трехуровневому принципу (планирование, контроль, исполнение), а оператор формирует лишь команды высокого уровня в виде последовательности целевых подзадач, после чего их детальная проработка и исполнение возлагаются на бортовую интеллектуальную систему.

Другой подход демонстрирует система TRIDENT, реализованная на базе аппарата Girona-500, где для анализа оператором подводной обстановки и формирования целеуказаний требуется всплытие аппарата для обеспечения высокоскоростного канала связи [11]. Однако рассмотренные системы разрабатывались для подводных аппаратов, имеющих возможность использования высокоскоростных каналов связи. Большинство же типовых АНПА оснащены исключительно гидроакустическим каналом, принципиальными ограничениями которого являются низкая пропускная способность и значительные задержки при передаче данных [12].

Постановка задачи. Для решения указанной проблемы в статье ставится задача разработки метода, обеспечивающего посредством низкопропускного гидроакустического канала связи информационное взаимодействие оператора с АНПА для оценки оператором качества распознавания целевых объектов с последующим формированием целеуказаний для аппарата и его бортового манипулятора.

Поскольку по гидроакустическому каналу связи невозможно передать весь объем получаемой от бортовых СТЗ сенсорной информации, в частности видеопотока или плотных облаков точек, предлагается осуществлять обработку этой информации на борту АНПА. Аппарат должен самостоятельно выполнять идентификацию целевых объектов и выделение их характерных особенностей (ХО) и дефектов, а оператору передавать только компактные результаты этой обработки данных – структурированный информационный пакет, содержащий сведения о типе объекта, его положении, наличии дефектов и ХО.

Предлагаемый метод состоит из двух взаимосвязанных этапов. На первом этапе реализуется алгоритм идентификации, основанный на модифицированном алгоритме ИСР, позволяющий точно определять положение и ориентацию объекта с дефектами путем исключения дефектных точек из процесса сопоставления с эталонной моделью. На этом же этапе определяются заранее заданные ХО объекта, по которым оператор может однозначно удостовериться в правильности идентификации. На втором этапе реализуется алгоритм формирования данных для передачи оператору, преобразующий информацию о выявленных дефектах и ХО в компактный набор параметрических геометрических примитивов, который может быть передан по низкопропускному каналу связи. На основе полученной информации, поступающей от АНПА телеметрии, а также эталонной трёхмерной модели объекта графический интерфейс должен динамически визуализи-

зировать сканируемую сцену, отображая подводную обстановку: текущее пространственное положение АНПА, целевой объект и выявленные расхождения этого объекта с эталонной моделью. Это позволит оператору визуально оценить корректность выполненной идентификации и сформировать последующие целеуказания.

Идентификация характерных особенностей и дефектов. Как отмечалось во введении, точное определение пространственного положения и ориентации подводного объекта является одним из основных требований для успешного выполнения с помощью АНПА подводных манипуляционных и инспекционных миссий. В основе известных систем идентификации целевого объекта для выполнения манипуляционных операций [13, 14] был заложен классический алгоритм ICP, который успешно справляется с задачей совмещения эталонной модели с данными, получаемыми от СТЗ, после их предварительной фильтрации и сегментации [15]. Данный подход демонстрировал высокую эффективность для объектов, находящихся в идеальном или близком к идеальному состоянию, а также высокую точность достоверности угловых и линейных смещений реального объекта относительно эталонной модели.

Однако, как подтвердили натурные эксперименты в водной среде, а также исследования других авторов [15, 16], наличие на объекте дефектов (заиливание, биологические обрастания, механические повреждения) может приводить как к ошибкам при определении положения объекта, так и к его ошибочной идентификации, когда алгоритм сопоставляет эталонное облако точек с другим, схожим по форме отсканированным объектом.

Для разработки алгоритма, лишенного вышеуказанных недостатков, предлагается находить ХО, гарантированно идентифицирующие объект, а также выявлять дефекты на его поверхности. Найденные ХО предварительно исключаются из эталонной модели. Для выполнения этого процесса целесообразно разделить алгоритм идентификации на два этапа: предварительное или «грубое» совмещение, позволяющее получить начальную оценку позиции объекта [14], и последующую «точечную» итерацию, выполняемую после удаления точек, принадлежащих ХО или дефектным областям. Обобщенная схема предлагаемого алгоритма представлена на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная схема алгоритма поиска характерных особенностей и дефектов

После сближения АНПА с целевым объектом бортовая СТЗ в связанной с аппаратом правой прямоугольной системе координат (СК) формирует облако, состоящее из m принадлежащих поверхности объекта точек $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$. Далее, используя известные системы идентификации объектов [13, 14], определяются вектор $\vec{p} \in R^3$ и матрица $M \in R^{3 \times 3}$, описывающие линейное смещение и поворот облака точек эталонной модели объекта относительно осей СК АНПА, необходимые для совмещения этого облака с облаком точек P .

После этапа предварительного совмещения облаков вычисляется среднеквадратичное отклонение r_{ICP} (СКО) между соответствующими точками реального и эталонного (целевого) облаков точек. Если величина СКО превышает заданный пороговый уровень $r_{ICP}^{\max}$, то это служит индикатором наличия значительных расхождений, вызванных дефектами или наличием ХО. В этом случае начинается процедура идентификации и исключения точек дефекта или особенностей, после чего происходит повторное совмещение облаков точек целевого объекта.

Таким образом, предлагаемый алгоритм поиска состоит из следующих шагов:

1. Определение области пространственного поиска. При соблюдении условия $r_{ICP} > r_{ICP}^{\max}$ на основе полученного значения СКО r_{ICP} вычисляется радиус R сферы, в которой выполняется поиск ближайших точек:

$$R = K_R \sqrt{r_{ICP}},$$

где $K_R \geq 1$ – коэффициент, задающий отклонение порогового значения радиуса R , что обеспечивает учет СКО r_{ICP} . Данный подход позволяет адаптивно задавать область поиска в зависимости от степени общего несоответствия облаков, вычисляемого согласно рассчитанному значению СКО r_{ICP} .

2. Оценка плотности эталонного облака. Рассчитывается средняя плотность d целевого облака точек для сферы полученного радиуса. Для этого для каждой точки целевого облака определяется количество ближайших точек в этом же облаке в сфере указанного радиуса R , и определяется величина $\tilde{d}$:

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n {}^t N_i^R}{n},$$

где n – количество точек в целевом облаке; ${}^t N_i^R$ – количество ближайших соседних точек для i -ой точки целевого облака ($i = \overline{1, n}$) в этом же облаке, рассчитываемое стандартными методами программной библиотеки PCL [17]. Тогда среднюю плотность d можно задать следующим образом:

$$d = \tilde{d} - k,$$

где k – целое положительное число, задающее возможное отклонение от величины $\tilde{d}$ и обусловленное неточностью предварительного совмещения облаков точек, а также разной плотностью совмещаемых облаков.

3. Идентификация точек-выбросов в сканированном облаке. На следующем шаге работы алгоритма для каждой точки P_j ($j = \overline{1, m}$) определяется количество ${}^r N_j^R$ ближайших точек целевого облака в сфере радиуса R . Если ${}^r N_j^R < d$, то точка P_j помечается как принадлежащая области дефекта или ХО.

4. Итеративное уточнение. Все найденные точки записываются в облако точек D и исключаются из сканированного облака. С оставшимся подмножеством точек выполняется повторное – финальное совмещение с эталонной моделью с помощью алгоритма ИСР, и определяются новый вектор $\vec{p}_d \in R^3$ и матрица $M_d \in R^{3 \times 3}$, описывающие линейное смещение и поворот облака точек модели. Если после этого совмещения значение r_{ICP} все еще превышает $r_{ICP}^{\max}$, то процедура идентификации дефектов (шаги 1-3) повторяется для дальнейшего исключения дефектов и ХО из данных.

Наглядная иллюстрация работы алгоритма для двумерного случая представлена на рис. 2. Зеленым цветом обозначены точки эталонной модели, синим – точки сканированного объекта, имеющие достаточное количество соответствий в эталонном облаке, а красным – выбросы, которые будут исключены из процедуры финального совмещения.

Важным преимуществом предложенного метода является его способность работать с облаками точек, имеющими значительные различия в плотности, что типично для подводных СТЗ, где данные часто носят разреженный и зашумленный характер.

На основе финального вектора $\vec{p}_d$ и матрицы M_d определяется СК целевого объекта, привязанная к его геометрическому центру. Это позволяет в свою очередь представить координаты дефектов и ХО в локальной СК объекта, что существенно снижает раз-

мерность передаваемых данных. Данная информация является основной для формирования целеуказаний манипулятору, так как по выделенным ХО может быть перестроена траектория движения рабочего инструмента ММ с целью выполнения операции очистки объекта [3].

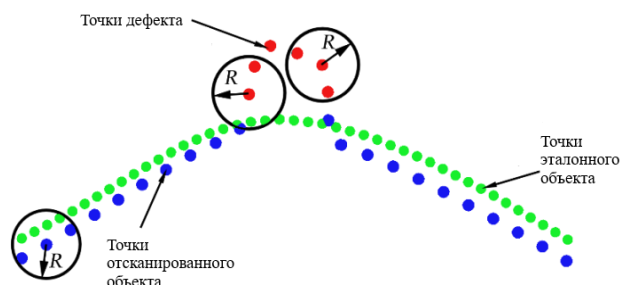


Рис. 2. Визуализация поиска точек ХО и дефекта

Формирование данных для отправки оператору. Успешная идентификация объекта и точное определение зон его дефектов и ХО, описанные в предыдущей части статьи, решают лишь первую часть общей задачи. Полученное облако D дефектов и ХО содержит плотное множество точек, которое невозможно быстро передать оператору по гидроакустическому каналу связи, пропускная способность которого в реальных условиях составляет 80–350 бит/с. Для решения этой проблемы предлагается иерархическая многоэтапная передача дополнительно преобразованных данных. На каждом следующем этапе детализация информации возрастает, а решение о запросе следующего этапа данных для конкретного дефекта и ХО оператор принимает на основе информации, полученной на предыдущем этапе. Такой подход позволяет минимизировать избыточность передаваемой информации и адаптировать процесс коммуникации под реальные условия канала связи.

Исходными данными для рассматриваемого алгоритма является облако точек D , сформированное на этапе идентификации как множество точек, исключенных из исходного облака точек объекта работ из-за их несоответствия эталонной модели. Это облако представляет собой неоднородный массив, который может содержать как единичные выбросы, так и скопления точек, соответствующие реальным физическим дефектам и ХО.

Для выделения отдельных дефектов в подмножества (рис. 3) $G_k \subset D$, $k \in [1, N_d]$, где N_d – количество дефектов и ХО, используется алгоритм Euclidean Cluster Extraction [18], который выполняет разделение исходного облака на кластеры (отдельные сегменты) на основе вычисления евклидовой нормы между парами точек, входящих в множество D .

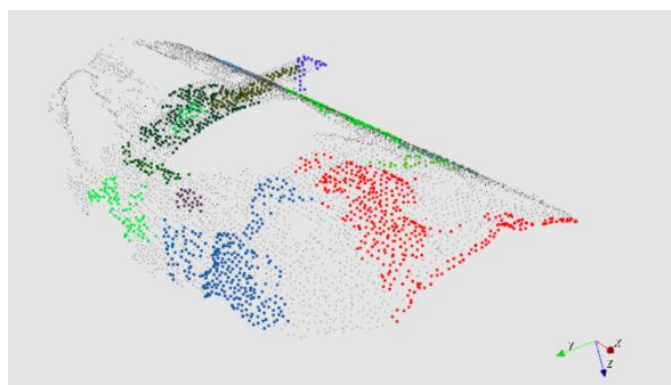


Рис. 3. Сегментированные облака точек дефектов и ХО

Для того, чтобы определить положение дефектов и ХО относительно СК объекта для каждого G_k определяются центроиды (центр масс) $X_{C_k} = [x_{C_k}, y_{C_k}, z_{C_k}]^T$:

$$\bar{X}_{C_k} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N g_h^k,$$

где $g_h^k \in G_k$ – h -я точка k -го дефекта или ХО, $h \in [1, N]$, N – количество точек k -го дефекта или ХО.

Помимо центроидов дефектов на этом этапе также необходима информация об его объеме. Вычисление объема отдельного дефекта и ХО может осуществляться двумя способами в зависимости от требуемой точности и от вычислительных возможностей бортового компьютера. Первый способ – вычисление объема геометрического примитива, аппроксимирующего поверхность дефекта. Например, может вычисляться объем ограничивающего эллипсоида или объем ограничивающего параллелепипеда (ОП) дефекта. Во втором случае строится воксельная сетка облака точек дефекта и находится сумма объемов всех вокселей.

Для построения аппроксимирующего геометрического примитива или воксельной сетки k -го дефекта необходимо определить его ориентацию относительно СК объекта. Для этого сначала вычисляется ковариационная матрица C_k :

$$C_k = \frac{1}{N-1} \sum_{h=1}^N (\bar{p}_h^k - \bar{X}_{C_k})(\bar{p}_h^k - \bar{X}_{C_k})^T.$$

Зная ковариационную матрицу каждого дефекта, можно определить собственные векторы $\bar{v}_{maj_k} = [v_{maj_k}^x, v_{maj_k}^y, v_{maj_k}^z]^T$, $\bar{v}_{mid_k} = [v_{mid_k}^x, v_{mid_k}^y, v_{mid_k}^z]^T$, $\bar{v}_{min_k} = [v_{min_k}^x, v_{min_k}^y, v_{min_k}^z]^T$ облака точек G_k , которые задают главные оси облака точек дефекта и, следовательно, его ориентацию (поворот) относительно СК объекта. Для нахождения собственных векторов используется алгоритм, в основе которого лежит разложение Шура [19]. Матрица поворота дефекта относительно СК объекта будет иметь следующий вид:

$$R_k = \begin{bmatrix} v_{maj_k}^x & v_{mid_k}^x & v_{min_k}^x \\ v_{maj_k}^y & v_{mid_k}^y & v_{min_k}^y \\ v_{maj_k}^z & v_{mid_k}^z & v_{min_k}^z \end{bmatrix}.$$

Матрица R_k используется для выравнивания облака точек дефекта с СК объекта. Перенесенные точки задаются следующим выражением:

$$\tilde{g}_h^k = R_k \bar{g}_h^k - \bar{X}_{C_k}.$$

Далее определяются наибольшие $\tilde{g}_{max}^k = [\tilde{g}_{max}^{x_k}, \tilde{g}_{max}^{y_k}, \tilde{g}_{max}^{z_k}]^T$ и наименьшие $\tilde{g}_{min}^k = [\tilde{g}_{min}^{x_k}, \tilde{g}_{min}^{y_k}, \tilde{g}_{min}^{z_k}]^T$ координаты точек облака дефекта по трём осям. Разница векторов $\tilde{g}_{max}^k - \tilde{g}_{min}^k$ позволяет определить линейные размеры w, d, h ОП по трём осям или длины осей аппроксимирующего эллипсоида и, следовательно, объем выбранного аппроксимирующего примитива.

В случае, когда строится воксельная сетка дефекта, определяется количество вокселей вдоль каждой из координатных осей:

$$n_v^{a_k} = \frac{\tilde{g}_{max}^{a_k} - \tilde{g}_{min}^{a_k}}{s_v^{a_k}},$$

где $a_k \in [x_k, y_k, z_k]$, $n_v^{a_k}$ – количество вокселей вдоль оси a_k , $s_v^{a_k}$ – размерность вокселя вдоль оси a_k , которая задаётся оператором (рассчитывается исходя из плотности облака точек).

После этого строится предварительная воксельная сетка B_k , из которой затем удаляются воксели, в которые попадает менее чем ρ_k точек. Величина ρ_k задаётся оператором (рассчитывается исходя из плотности облака точек). Для определения «пустых» вокселей используется алгоритм поиска по kd-tree [16]. В результате работы алгоритма поиска в сетке k -го дефекта остается b_k – вокселей, тогда объем k -го дефекта будет задаваться следующим выражением:

$$V_k = b_k s_v^{x_k} s_v^{y_k} s_v^{z_k}.$$

После расчета координат центроида дефектов и их объемов формируются пакеты данных для осуществления первого цикла передачи данных оператору АНПА (табл. 1). Центроиды, представленные изначально в формате float (4 Байта) в метрах, для передачи данных они запаковываются в 2 Байта, где 4 бита отводится под целую часть числа, 11 бит под дробную часть и 1 бит – под знак.

Таблица 1

Структура пакетов данных первого цикла передачи данных

Данные	x_{C_k}	y_{C_k}	z_{C_k}	V
Размер, байт	2	2	2	2

Формируемые на первом этапе данные необходимо передать в полном объеме, исключая потерю пакетов, так как они несут ключевую информацию о результатах идентификации, на основании которой будет выполняться дальнейшее уточнение. Для оператора эта информации интерпретируется как карта дефектов и ХО на объекте с информацией о их объемах и началом СК для каждого из них (рис. 4).

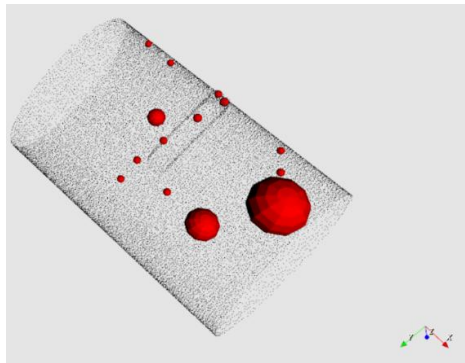


Рис. 4. Карта дефектов и ХО

На втором цикле передачи данных пакеты включают в себя следующую информацию: два вектора, задающих ориентацию облака точек дефекта, причем векторы задаются сонаправленными с $\vec{v}_{maj_k}$ и $\vec{v}_{min_k}$, а их длина равняется размерам w и h ОП дефекта; линейный размер ОП дефекта в направлении вектора $\vec{v}_{min_k}$, перпендикулярного первым двум (табл. 2).

Таблица 2

Структура пакетов данных второго цикла передачи данных

Данные	$v_{maj_k}^x w$	$v_{maj_k}^y w$	$v_{maj_k}^z w$	$v_{min_k}^x h$	$v_{min_k}^y h$	$v_{min_k}^z h$	d
Размер, байт	1	1	1	1	1	1	1

В отличие от первого этапа, второй этап допускает потерю пакетов, которая может привести к отсутствию информации о нескольких дефектах и ХО. В этом случае оператор самостоятельно принимает решение о запросе информации о конкретном дефекте и ХО, ориентируясь на карту, полученную на предыдущем этапе. Полученная информация дополняет карту объекта путём отображения ОП (рис. 5). При этом полученные векторы необходимы для определения СК каждого дефекта и ХО, что требуется на следующем этапе.

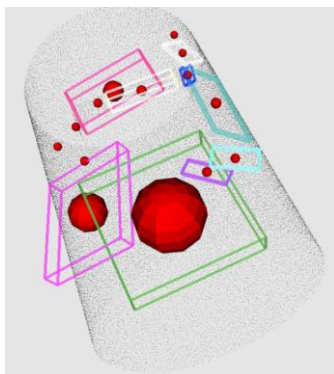


Рис. 5. Карта дефектов с ОБВ

На третьем цикле передачи данных передается воксельная сетка B_k облака точек дефекта и ХО. Поскольку ориентация отдельных вокселей задаётся векторами, переданными на втором цикле, требуется передать только координаты их центров (табл. 3). Эти координаты задаются относительно центроида облака точек:

$$\vec{\beta}_m^k = \vec{\beta}_m^k - \vec{X}_{C_k},$$

где $\vec{\beta}_m^k$ – координаты центра вокселя в СК объекта ($m = \overline{1, b_k}$), $\vec{\beta}_m^k = [x_{\vec{\beta}_m^k}, y_{\vec{\beta}_m^k}, z_{\vec{\beta}_m^k}]^T$ – смещение центра вокселя относительно центроида облака точек k -го дефекта и ХО.

Таблица 3

Структура пакетов данных третьего цикла передачи данных

Данные	$x_{\vec{\beta}_k}$	$y_{\vec{\beta}_k}$	$z_{\vec{\beta}_k}$
Размер, байт	1	1	1

Третий этап является финальным циклом передачи информации о дефектах и ХО и позволяет в полном объеме оценить их характер. Полученная информация дополняет карту воксельной сеткой, которая в достаточном виде отображает форму объекта (рис. 6).

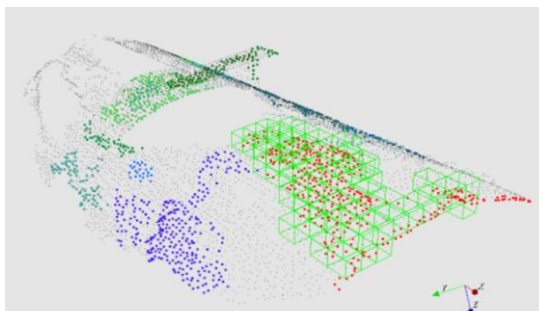


Рис. 6. Воксельная сетка ХО и дефектов

Всю полученную информацию предлагается визуализировать с помощью специализированного графического интерфейса. На основе этой информации, эталонной трёхмерной модели объекта, а также поступающей от АНПА телеметрии, графический интерфейс отображает подводную обстановку: положение АНПА, целевой объект относительно аппарата, его пространственная ориентация, а также выявленные ХО и отклонения от эталонной модели (рис. 7). Такая визуализация позволяет оператору наглядно оценить достоверность выполненной идентификации и принять решение о дальнейших действиях.

На основе полученной информации оператор может спланировать последующие целеуказания, в частности сформировать траекторию движения рабочего инструмента ММ для проецирования на поверхность объекта. Благодаря тому, что у оператора есть информация не только о геометрии объекта, но и его дефектах и ХО, формируемая траектория может строиться комбинированно: на участках дефектов и заиливания – по эталонной модели объекта (для выполнения очистки), а на участках ХО – по реальной отсканированной поверхности. При необходимости оператор также имеет возможность скорректировать предварительное совмещение облаков точек, выполненное автоматическим алгоритмом ICP. Задавая необходимый угол смещения или сдвиг вручную, он может повысить точность совмещения в случаях, когда оно выполнено неточно из-за попадания алгоритма ICP в локальный минимум.

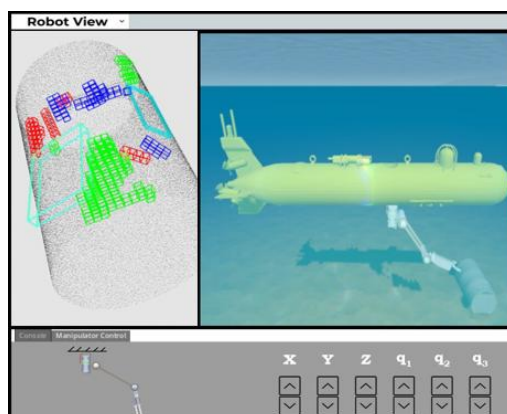


Рис. 7. Интерфейс оператора

Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает не только идентификацию объекта, подверженного заиливанию и обрастанию, но и предоставляет оператору достаточную информацию для принятия решений и формирования последующих целеуказаний.

Результаты. Для проверки работоспособности и особенностей функционирования предложенного метода были проведены экспериментальные исследования (в том числе и в реальных условиях), в рамках которых выполнялись обнаружение и идентификация подводного объекта с дефектами, а также формирование и передача оператору данных, достаточных для подтверждения достоверности идентификации.

Для проведения экспериментов выполняются следующие этапы:

1. В качестве типового подводного объекта работ был выбран участок трубопровода (рис. 8). Искомая характерная особенность (ХО) – анодное кольцо. Для оценки работоспособности алгоритма было выбрано три сценария: объект правильной формы, имеющий только анодное кольцо (рис. 9,а) – целевой объект; объект, не имеющий искомым характерных особенностей, но содержащий дефекты (рис. 9,б) – ложный объект; объект правильной формы, имеющий анодное кольцо и дополнительные элементы на поверхности (рис. 9,в) – целевой объект с усложняющими факторами.

2. Предложенный метод был программно реализован на базе одноплатного бортового компьютера NVIDIA Jetson TX2.

3. Проводилось сравнительное моделирование работы метода со стандартными подходами информационного взаимодействия.

4. Для передачи сформированных пакетов данных проводился эксперимент в реальных морских условиях с использованием гидроакустической системы связи производства ИПМТ ДВО РАН [20].

5. Полученные данные графически интерпретировались с помощью интерфейсе оператора.

6. Выполнялась оценка возможности оператора оценивать корректность идентификации и формировать последующие целеуказания. Оператор должен был определить верные сценарии из трех, описанных выше.

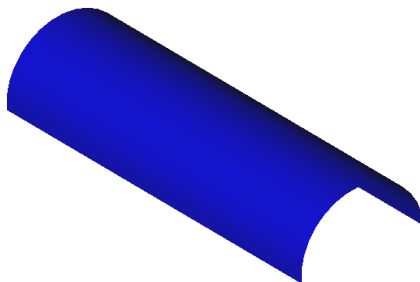


Рис. 8. Эталонный объект

Для каждого из сценариев на вычислителе NVIDIA Jetson TX2 выполнялась идентификация объекта путем совмещения облаков точек эталонного объекта с облаками точек, имитирующих реальный объект. Далее определялись ХО и дефекты, выполнялась их сегментация, и формировались пакеты данных. Средний объем передаваемой информации составил около 2кБ, в то время как необработанные данные (облака точек всей модели или только ХО) имели объем порядка 70-200 кБ. Время обработки всех данных на вычислителе занимало около 10 с (табл. 4).

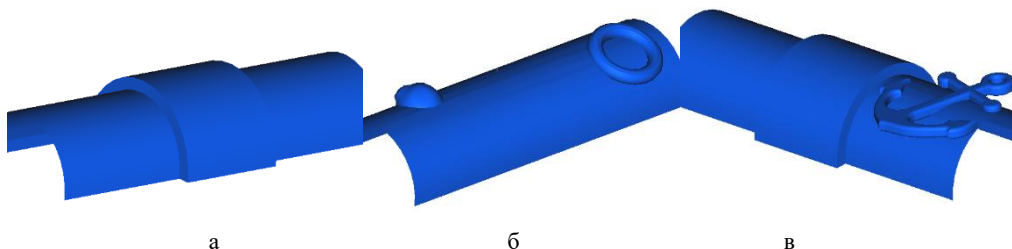


Рис. 9. Модели реальных объектов: а – объект с анодом; б – объект без анода, имеющий неизвестные объекты на поверхности; в – объект с анодом, имеющий неизвестные объекты на поверхности

Для анализа и оценки эффективности предложенного метода (далее «Авторский») проводилось сравнительное моделирование с двумя подходами (табл. 4): «Базовый» – передаются «сырые» данные в виде облака точек; «Дефекты» – передаются облака точек только дефекта и ХО. При анализе времени передачи данных принималась скорость канала связи 300 бит/с. Таким образом для передачи данных «Базовым» подходом (объем облака точек – ~200 кБ) понадобится ~91 минута; подходом «Дефекты» (объем облака точек дефектов и ХО – ~62 кБ) потребует ~30 мин. Предложенный метод (с учетом трехэтапной генерации Intel HEX файлов размером 419 Б, 391 Б и 1326 Б соответственно) суммарно потребует ~1 мин.

Предлагаемый в данный работе метод показал при моделировании следующие результаты: все данные, полученные на трехэтапной генерации файлов, содержат сведения о дефектах и их потери могут привести к необходимости повторной отправки. Однако

при успешной передаче данных первого этапа (содержащие сведения о карте дефектов и ХО), последующие данные (второго и третьего цикла), приходящие с ошибкой, не влекут за собой «ошибки» в понимании оператором состояния объекта. Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительный анализ

	«Базовый»	«Дефекты»	«Авторский»
Время обработки данных	~0 с	~13 с	~14 с
Объем передаваемых данных	~200 кБ	~62 кБ	~2136 Б (2 кБ)
Ошибка идентификации положения	Отсутствует	< 2 см	< 3 см
Время передачи	~91 мин	~30 мин	~1 мин

Для оценки работоспособности системы в акватории использовался режим передачи данных со скоростью 250 бит/с [20]. Преамбульная часть сигнала формировалась на основе псевдослучайной последовательности длительностью 4 мс с центральной частотой излучения 12 кГц. Передача данных осуществлялась формированием многочастотного сигнала на 16-ти частотных каналах в полосе 6375 Гц с последующим усилением в классе D. Морские тесты проводились в мелководной акватории с глубинами до 12 м на дистанциях до 515 м. Гидрологические особенности в данной акватории характеризовались придонным распространением звука со значительным поглощением энергии сигнала в илистом донном грунте.

Для оценки вероятностей ошибок при передаче данных были сформированы блоки данных длиной не более 32 байт. По выполненной серии тестов по передаче данных (584 байт на один этап) на дистанции 515 м в статическом положении антенн получены вероятности ошибки на бит от 10^{-2} до 10^{-3} .

Вся полученная информация в режиме реального времени отображалась на графическом интерфейсе оператора (рис. 10), и в случае необходимости оператор мог дополнительно запросить потерянный пакет данных.

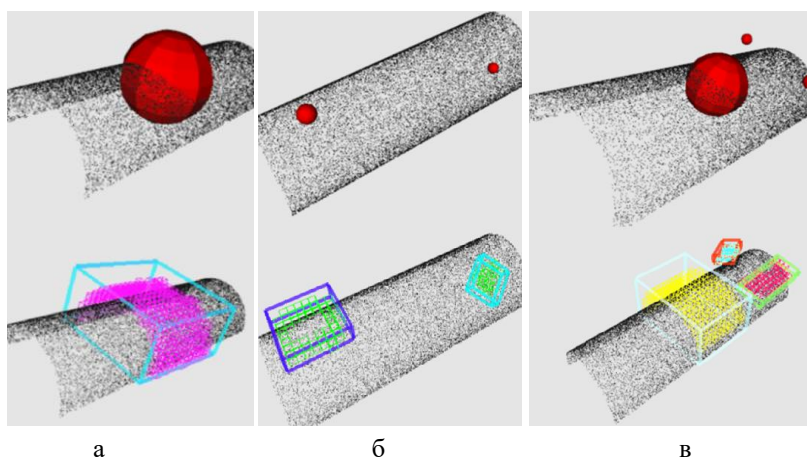


Рис. 10. Визуализация полученных данных: а – первый сценарий; б – второй сценарий; в – третий сценарий

Как видно из визуализации результатов:

♦ Первый сценарий (рис. 10,а) – на карте характерных особенностей четко идентифицируется искомый элемент (анодное кольцо), дополнительные элементы отсутствуют. При анализе полученной воксельной сетки оператор может в полной мере убедиться в достоверности идентификации и сформировать дальнейшие целеуказания для выполнения манипуляционных операций.

♦ Второй сценарий (рис. 10,б) – на карте отсутствует искомый элемент, при этом полученная воксельная сетка подтверждает наличие посторонних объектов на поверхности. Данная информация может быть использована оператором для принятия решения о необходимости выполнения очистки поверхности перед проведением целевых операций.

♦ Третий сценарий (рис. 10,в) – карта отображает наличие как искомого анодного кольца, так и посторонних объектов. Детальная воксельная сетка наглядно подтверждает присутствие целевого элемента и дополнительных объектов на поверхности. На основе этой информации оператор может самостоятельно сформировать последовательность целеуказаний: выполнить очистку поверхности от посторонних объектов, а также произвести замер катодного потенциала в области анодного кольца.

Как показал эксперимент, данных, формируемых разработанным методом, достаточно для подтверждения оператором достоверности идентификации объекта, а также для формирования последующих целеуказаний. Время передачи информационного пакета от бортового вычислителя АНПА до поста оператора составило около 1 минуты, что является приемлемым временем, в течение которого аппарат может гарантированно находиться в режиме динамического позиционирования (зависания) вблизи объекта работ [21]. Предоставляемая информация позволяет оператору не только удостовериться в правильности распознавания целевого объекта, но и принять обоснованное решение о необходимости дополнительных операций (например, очистки поверхности), а также сформировать траекторию для дальнейших манипуляций с учетом выявленных особенностей и дефектов объекта.

Заключение. Резюмируя изложенное, можно сделать следующие выводы.

Предложенные в работе метод информационного взаимодействия оператора и АНПА для идентификации целевых объектов позволяет выполнять с помощью АНПА инспекционные и манипуляционные операции под контролем оператора в условиях ограниченной пропускной способностью гидроакустического канала связи. Предложенный метод обладает невысокой вычислительной сложностью, что позволяет реализовать его на бортовом вычислителе СТЗ или АНПА.

В отличие от известных работ [1–4, 11, 14], в которых системы рассчитаны для подводных аппаратов, имеющих возможность использования высокоскоростных каналов связи, в данной работе предложен метод для типовых АНПА, оснащенных исключительно гидроакустическим каналом, принципиальными ограничениями которого являются низкая пропускная способность и значительные задержки при передаче данных. Данный метод позволяет передавать оператору структурированный информационный пакет, содержащий данные о типе объекта, его пространственном положении, карте дефектов и ключевых ХО, при объеме данных, на три порядка меньшем по сравнению с передачей полного облака точек сканируемого объекта.

Экспериментальные исследования, проведенные в натурных условиях с использованием гидроакустической системы связи на дистанции 515 м, подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенного метода. Время передачи информационного пакета составило около 1 минуты, что является приемлемым для удержания аппарата в режиме зависания. Экспериментально подтверждено, что предоставляемой информации достаточно для однозначного подтверждения оператором достоверности идентификации объекта и формирования дальнейших целеуказаний для АНПА и его бортового ММ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Palomeras N, Peñalver A., Massot-Campos M., Negre P.L., Fernández J.J., Ridao P., Oliver-Codina G. I-AUV docking and panel intervention at sea // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16, No. 10. – 1673 p.
2. Ridao P., Carreras M., Ribas D., Sanz P.J., Oliver G. Intervention AUVs: the next challenge // *Annual Reviews in Control*. – 2015. – Vol. 40. – P. 227-241.
3. Konoplin A. Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a control system for underwater vehicles with multilink manipulators performing contact manipulation operations // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12, No. 7. – 1126 p.

4. Панчук М.О., Юрманов А.П., Коноплин А.Ю. Система автоматической инспекции проблемных участков протяженных объектов с помощью АНПА // Подводные исследования и робототехника. – 2025. – № 2 (52). – С. 41-52.
5. Jaber N., Wehbe B., Kirchner F. 3D-DUO: 3D detection of underwater objects in low-resolution multibeam echosounder maps // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 331. – P. 121254.
6. Besl P., McKay H. A method for registration of 3-D shapes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14, No. 2. – P. 239-256.
7. Tam G.K.L., Cheng Z.Q., Lai Y.K., Langbein F.C., Liu Y., Marshall D., Martin R.R., Sun X.F., Rosin P.L. Registration of 3D point clouds and meshes: A survey from rigid to nonrigid // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2012. – Vol. 19, No. 7. – P. 1199-1217.
8. Lv C., Lin W., Zhao B. KSS-ICP: Point Cloud Registration Based on Kendall Shape Space // IEEE Transactions on Image Processing. – 2023. – Vol. 32. – P. 1681-1693.
9. Филаретов В.Ф., Зуев А.В., Губанков А.С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. – М.: Наука, 2018. – 254 с.
10. Marani G., Yuh J. The SAUVIM Underwater Vehicle-Manipulator System // Introduction to Autonomous Manipulation: Case Study with an Underwater Robot, SAUVIM. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. – P. 79-105.
11. López-Barajas S.S., Solis A., Marín-Prades R., Sanz P.J. Towards Autonomous Coordination of Two I-AUVs in Submarine Pipeline Assembly // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13, No. 8. – 1490 p.
12. Денисов В.Е. Пропускная способность гидроакустического канала связи // Russian Technological Journal. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 31-40.
13. Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Shuvalov B.V. Technology for implementation of manipulation operations with different underwater objects by AUV // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2019. – P. 1-5.
14. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 1666.
15. Hegedűs-Kuti J., Szőlősi J., Varga D., Abonyi J., Ando M., Ruppert T. 3D scanner-based identification of welding defects – clustering the results of point cloud alignment // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 5. – P. 2503.
16. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P., Panchuk M., Vasilenko R. System for identifying target objects to perform manipulative operations by unmanned underwater vehicles // 2022 International Conference on Ocean Studies (ICOS). – IEEE, 2022. – P. 55-59.
17. How to use a KdTree to search. – URL: https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/kdtree_search.html (дата обращения: 01.03.2026).
18. Nguyen A., Cano A. M., Edahiro M., Kato S. Fast Euclidean cluster extraction using GPUs // Journal of Robotics and Mechatronics. – 2020. – Vol. 32, No. 3. – P. 548-560.
19. Van Loan C. F., Golub G. Matrix computations. – Third Ed. – Johns Hopkins University Press, 1996. – Vol. 1. – 723 p.
20. Родионов А.Ю. Цифровые системы связи и навигации в нестационарных гидроакустических средах: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.08.06. ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет». – Владивосток, 2022. – 352 с.
21. Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Василенко Р.П. Система стабилизации АНПА, оснащаемого дополнительным движителем для компенсации динамических воздействий со стороны многозвездного манипулятора // Подводные исследования и робототехника. – 2023. – № 3. – С. 20-29.

REFERENCES

1. Palomeras N. Peñalver A., Massot-Campos M., Negre P.L., Fernández J.J., Ridao P., Oliver-Codina G. I-AUV docking and panel intervention at sea, *Sensors*, 2016, Vol. 16, No. 10, 1673 p.
2. Ridao P., Carreras M., Ribas D., Sanz P.J., Oliver G. Intervention AUVs: the next challenge, *Annual Reviews in Control*, 2015, Vol. 40, pp. 227-241.
3. Konoplin A. Krasavin N., Yurmanov A., Piatavin P., Vasilenko R., Panchuk M. Development of a control system for underwater vehicles with multilink manipulators performing contact manipulation operations, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, Vol. 12, No. 7, 1126 p.
4. Panchuk M.O., Yurmanov A.P., Konoplin A.Yu. Sistema avtomaticheskoy inspektsii problemnykh uchastkov protyazhennykh ob"ektov s pomoshch'yu ANPA [Automatic inspection system for problematic sections of extended objects using AUV], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Research and Robotics], 2025, No. 2 (52), pp. 41-52.

5. Jaber N., Wehbe B., Kirchner F. 3D-DUO: 3D detection of underwater objects in low-resolution multibeam echosounder maps, *Ocean Engineering*, 2025, Vol. 331, pp. 121254.
6. Besl P., McKay H. A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256.
7. Tam G.K.L., Cheng Z.Q., Lai Y.K., Langbein F.C., Liu Y., Marshall D., Martin R.R., Sun X.F., Rosin P.L. Registration of 3D point clouds and meshes: A survey from rigid to nonrigid, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012, Vol. 19, No. 7, pp. 1199-1217.
8. Lv C., Lin W., Zhao B. KSS-ICP: Point Cloud Registration Based on Kendall Shape Space, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2023, Vol. 32, pp. 1681-1693.
9. Filaretov V.F., Zuev A.V., Gubankov A.S. Upravlenie manipulyatorami pri vypolnenii razlichnykh tekhnologicheskikh operatsiy [Control of manipulators when performing various technological operations]. Moscow: Nauka, 2018, 254 p.
10. Marani G., Yuh J. The SAUVIM Underwater Vehicle-Manipulator System, *Introduction to Autonomous Manipulation: Case Study with an Underwater Robot, SAUVIM*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, pp. 79-105.
11. López-Barajas S.S., Solis A., Marín-Prades R., Sanz P.J. Towards Autonomous Coordination of Two I-AUVs in Submarine Pipeline Assembly, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, Vol. 13, No. 8, 1490 p.
12. Denisov V.E. Propusknaya sposobnost' gidroakusticheskogo kanala svyazi [Bandwidth of hydroacoustic communication channel], *Russian Technological Journal*, 2023, Vol. 11, No. 1, pp. 31-40.
13. Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Shuvalov B.V. Technology for implementation of manipulation operations with different underwater objects by AUV, *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2019, pp. 1-5.
14. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects, *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, No. 3, pp. 1666.
15. Hegedüs-Kuti J., Szölösi J., Varga D., Abonyi J., Ando M., Ruppert T. 3D scanner-based identification of welding defects – clustering the results of point cloud alignment, *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 5, pp. 2503.
16. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P., Panchuk M., Vasilenko R. System for identifying target objects to perform manipulative operations by unmanned underwater vehicles, *2022 International Conference on Ocean Studies (ICOS)*. IEEE, 2022, pp. 55-59.
17. How to use a KdTree to search. Available at: https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/kdtree_search.html (accessed 01 March 2026).
18. Nguyen A., Cano A. M., Edahiro M., Kato S. Fast Euclidean cluster extraction using GPUs, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2020, Vol. 32, No. 3, pp. 548-560.
19. Van Loan C. F., Golub G. Matrix computations. Third Ed. Johns Hopkins University Press, 1996, Vol. 1, 723 p.
20. Rodionov A.Yu. TSifrovye sistemy svyazi i navigatsii v nestatsionarnykh gidroakusticheskikh sredakh: diss. ... d-ra tekhn. nauk: 05.08.06. FGAOU VO «Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet» [Digital communication and navigation systems in non-stationary hydroacoustic environments: dr. of eng. sc. diss.: 05.08.06. Far Eastern Federal University]. Vladivostok, 2022, 352 p.
21. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Vasilenko R.P. Sistema stabilizatsii ANPA, osnashchaemogo dopolnitel'nyim dvizhitelem dlya kompensatsii dinamicheskikh vozdeystviy so storony mnogozvennogo manipulyatora [Stabilization system of an AUV equipped with an additional thruster for compensation of dynamic disturbances from a multilink manipulator], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Exploration and Robotics], 2023, No. 3, pp. 20-29.

Коноплин Александр Юрьевич – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: kayur-prim@mail.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79244298396; директор; д.т.н.

Юрманов Александр Павлович – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: yurmanov_a@mail.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79146786060; научный сотрудник.

Родионов Александр Юрьевич – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: deodar1618@yandex.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79243331618; д.т.н.

Василенко Роман Павлович – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: vrp261200@mail.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79020644321; м.н.с.

Панчук Максим Олегович – Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: my_panchuk@mail.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79996170369; м.н.с.

Konoplin Aleksandr Yurievich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kayur-prim@mail.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79244298396; director; dr. of eng. sc.

Yurmanov Aleksandr Pavlovich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: yurmanov_a@mail.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79146786060; research scientist.

Rodionov Aleksandr Yurievich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: deodar1618@yandex.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79243331618; dr. of eng. sc.

Vasilenko Roman Pavlovich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: vrp261200@mail.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79020644321; junior research scientist.

Panchuk Maksim Olegovich – Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: my_panchuk@mail.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79996170369; junior research scientist.

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-135-150

В.А. Костюков

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ РОБОТОВ В СЛОЖНЫХ КОНФЛИКТНЫХ СРЕДАХ С ПОЛИГОНАЛЬНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

При разработке алгоритмов планирования путей роботов в режиме реального времени возникает проблема ограничения быстродействия соответствующих классических алгоритмов. В настоящей работе рассматривается метод планирования перемещений робота в двумерной сложной конфликтной среде. В отношении планирования в сложных средах предложен гибридный алгоритм планирования, базирующийся на сочетании и синтезе классического алгоритма клеточной декомпозиции и недавно предложенного алгоритма на базе характеристического графа видимости. Этот алгоритм подразумевает предварительный анализ степени сложности сцены с препятствиями, по результатам которого выбирается один из двух указанных частных алгоритмов. Показывается, что таким образом удастся в значительной степени преодолеть ограничения обоих этих алгоритмов. В компактном виде описан метод уклонения от источников возмущения, основанный на аппарате характеристических вероятностных функций, и показана его взаимосвязь с методами планирования в сложных средах при решении соответствующих задач глобальной оптимизации вероятности успешного прохождения целевой траектории. В рамках развиваемого подхода рассмотрен вопрос о взаимосвязи вероятности успешного прохождения пути в поле источников и соответствующей функции риска. Для решения задач глобального планирования перемещений роботов в сложной конфликтной среде на первом этапе предлагается использовать указанный гибридный алгоритм - для построения семейства начальных кривых в соответствующих допустимых коридорах движения без учета источников. Затем решается семейство задач локальной оптимизации в пределах допустимых коридоров движения с учетом источников. Далее выбирается траектория с максимальным значением вероятности успешного прохождения либо нормированной функции безопасного движения. Приводятся примеры численной реализации предлагаемого метода, подтверждающие его эффективность.

Планирование пути; метод клеточной декомпозиции; характеристический граф видимости; вычислительная сложность алгоритма; задача уклонения от источников; характеристическая вероятностная функция; целевой вероятностный функционал.