

А.М. Маевский, И.А. Печайко, М.А. Алексеев, Н.М. Буров

**РАЗРАБОТКА РОБОТИЗИРОВАННОГО ИМИТАТОРА ПОДВОДНОГО
АППАРАТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ АВТОНОМНОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЗИДЕНТНЫХ АНПА С ОБЪЕКТАМИ ПОДВОДНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Представлен процесс разработки имитатора подводного аппарата (ИПА) с установленным 5-степенным подводным манипуляторным комплексом (МК). Имитатор предназначен для комплексной отработки автономного взаимодействия морского робототехнического комплекса (МРТК) с объектами подводной инфраструктуры. В частности, рассматривается пример решения задач работы имитатора с макетом подводной панели подводного добычного комплекса (ПДК) и решение задачи определения конкреции и их автономного забора при помощи имитатора и МК. Современные тенденции развития подводной робототехники ориентированы на создание резидентных автономных систем, способных работать в удаленных и труднодоступных районах Мирового океана в круглогодичном режиме. Развитие резидентных технологий связано с необходимостью снижения операционных затрат, минимизации рисков для персонала и увеличения времени автономного функционирования подводных комплексов. Применение таких технологий особенно актуально в условиях освоения дальнего шельфа, где традиционные методы эксплуатации подводных аппаратов сталкиваются с техническими и экономическими ограничениями. Необходимость проведения работ на дальнем шельфе обусловлена возрастающим спросом на углеводородные ресурсы и исчерпанием легко доступных месторождений на континентальном шельфе. Согласно прогнозам, перспективные глубоководные районы, расположенные на глубинах более 1000 м, обладают значительным потенциалом добычи нефти и газа. По оценкам специалистов, объем извлекаемых запасов в таких районах может составлять сотни миллиардов баррелей углеводородного сырья, что делает разработку эффективных автономных решений стратегически важной задачей для нефтегазовой отрасли. В работе представлены программно-аппаратные решения, используемые при реализации ИПА. Приведена структурная схема конструкции, описана архитектура программного обеспечения и особенности применения систем искусственных нейронных сетей (ИНС) в составе системы технического зрения (СТЗ) ИПА. Использование ИНС позволяет значительно повысить автономность работы подводных манипуляторов при выполнении сложных технологических операций, таких как захват объектов с грунта, работа с объектами донной инфраструктуры и др. В заключении продемонстрированы полученные результаты, подтверждающие работоспособность принятых конструктивных, программных и аппаратных решений при выполнении реальных работ в автономном режиме с макетами рабочих инструментов hot-stab и torque-tool и ответными частями, расположенными на макете панели ПДК.

Подводный манипулятор; морские робототехнические комплексы; система управления; система технического зрения; искусственный интеллект.

A.M. Mayevskiy, I.A. Pechayko, M.A. Alekseyev, N.M. Burov

**DEVELOPMENT OF AN UNDERWATER VEHICLE ROBOTIC SIMULATOR
TO STUDY METHODS OF RESIDENT AUVs AUTONOMOUS INTERVENTION
WITH UNDERWATER INFRASTRUCTURE OBJECTS**

The article presents the process of developing an underwater vehicle simulator (USV) with an installed 5-degree underwater manipulator complex (MC). The simulator is designed for complex testing of autonomous interaction of a marine robotic complex (MRC) with underwater infrastructure objects. In particular, an example of solving the problems of simulator operation with a model of an underwater panel of an underwater production complex (UPC) and solving the problem of determining concretions and their autonomous collection using the simulator and MC are considered. Modern trends in the development of underwater robotics are focused on the creation of resident autonomous systems capable of operating in remote and hard-to-reach areas of the World Ocean all year round. The development of resident technologies is associated with the need to reduce operating costs, minimize risks to personnel and increase the autonomous functioning time of underwater complexes. The use of such technologies is especially relevant in the conditions of offshore shelf development, where traditional methods of operating underwater vehicles encounter technical and economic limitations. The need to carry out work on the

distant shelf is due to the increasing demand for hydrocarbon resources and the depletion of easily accessible deposits on the continental shelf. According to forecasts, promising deep-water areas located at depths greater than 1000 m have significant potential for oil and gas production. According to experts, the volume of recoverable reserves in such areas can amount to hundreds of billions of barrels of hydrocarbon raw materials, which makes the development of effective autonomous solutions a strategically important task for the oil and gas industry. The paper presents software and hardware solutions used in the implementation of the USV. A structural diagram of the design is provided; the software architecture and features of the use of artificial neural network (ANN) systems as part of the technical vision system (TVS) of the USV are described. The use of TVS allows to significantly increasing the autonomy of underwater manipulators when performing complex technological operations, such as capturing objects from the ground, working with bottom infrastructure objects, etc. In conclusion, the obtained results are demonstrated, confirming the operability of the adopted design, software and hardware solutions when performing real work in autonomous mode with mock-ups of hot-stab and torque-tool working tools and mating parts located on the mock-up of the UPC panel.

Underwater manipulator; marine robotic systems; control system; machine vision system; artificial intelligence.

Введение. На сегодняшний день, область подводной резидентной робототехники за рубежом находится на этапе прикладного применения для решения реальных коммерческих задач.

Прикладные исследования в области автоматизированных и автоматических бортовых манипуляторных комплексов необитаемых подводных аппаратов (НПА) стартовали в 1996 году. На момент 2024 года один из ведущих мировых центров компетенций перехода от мониторинговых НПА к интервенционным – университет Жироны, уже более 15 лет ведет разработку моделей своего интервенционного АНПА (на англ. Interventional AUV (i-AUV)). Особенностью интервенционных аппаратов является наличие манипуляторного комплекса и способности аппарата в автономном режиме осуществлять различные операции с использованием МК. В 2014 разработчики университета Жироны продемонстрировали работу своего аппарата в испытательном бассейне [1, 2]. Основной задачей в тот период времени являлась отработка технологий взаимодействия с макетом рабочей панели (рис. 1,а). На тот момент разработчиками была проведена интеграция имеющихся систем распознавания и обнаружения образов, с целью определения состояния рабочих элементов на макете подводной панели. Следующим этапом являлась отработка технологии позиционирования и докования АНПА [3,4] (рис. 1,б). В 2022 году все те же разработки, понимая тенденции развития технологий группового управления (проект Twinbot), продемонстрировали сопряженную работу двух аппаратов с целью укладки трубопровода [5] (рис. 1,в).

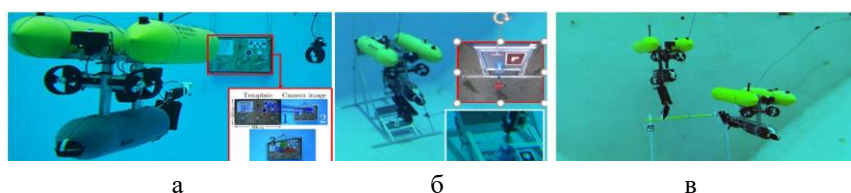


Рис. 1. Демонстрация работы i-AUV Girona при взаимодействии с панелью, доковании и укладки трубопровода

В 2024 году разработчики из университета Жироны представили автономную систему очистки подводных объектов. Интервенционный автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) "Жирона 1000" (Girona1000 AUV) наглядно выполнил автономную миссию: выход на подводный объект и очистка его элементов от биологического обрастания с использованием зачистной машинки (рис. 2), установленной на бортовом многозвенном манипуляторном комплексе [6].

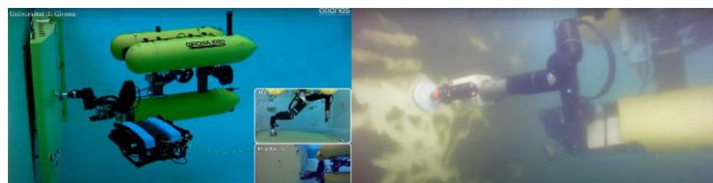


Рис. 2. Автономное техническое обслуживание подводных объектов с использованием АНПА

Помимо университета Жироны, к 2024 году в опытно-коммерческую эксплуатацию были переданы подводные резидентные интервенционные аппараты таких компаний как Oceaneering International, Inc., США (аппарат Freedom и др.) [7], Saab Seaeye Limited, Великобритания (аппарат Sabertooth), DFKI [8], Германия (аппарат FlatFish) [9] (рис. 3).

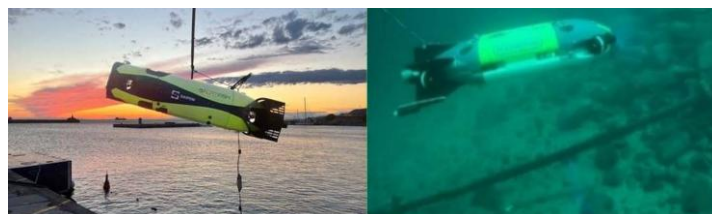


Рис. 3. Современные подводные резидентные аппараты: Freedom и FlatFish

Очевидно, что такие технологии необходимы и в Российской Федерации. Имеющиеся целевые программы и указы Президента РФ, направленные на развитие арктического региона 2030, программа развития судостроения 2030 и необходимость обеспечения безопасности северного морского пути и объектов стратегического назначения прямо указывают на потребность интенсивного развития комплексных технологий, обеспечивающих долгосрочную и автономную работу МРТК.

На сегодняшний день, развитием отечественных прикладных разработок в данной области занимаются такие предприятия, образовательные и научные учреждения как АО "НПП ПТ "Океанос", ФГБОУ ВО СПбГМТУ, АО "Концерн "НПО "Аврора" и ФГУБН ИПМТ им. академика М.Д. АГЕЕВА ДВО РАН [7–12].

С целью углубленной отработки технологий уже имеющихся в заделе АО «НПП ПТ «Океанос» и дальнейшего развития сопутствующих программно-аппаратных средств, в рамках перспективного развития востребованных резидентных технологий, авторами, в содружестве с конструкторским коллективом АО «НПП ПТ «Океанос», был разработан стенд натурной отработки технологий взаимодействия подводного манипуляторного комплекса и ИПА, позволяющий обеспечить дополнительное перемещение в трех плоскостях (степенях свободы), к имеющимся собственным пяти степеням МК, тем самым имитируя пространственное перемещение реального автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) при работе с подводными объектами. Разработанный стенд обеспечивает:

- ◆ автономную работу МК и ИПА с «рабочими линиями» макета панели ПДК;
- ◆ выход и удержание ИПА относительно установленных целевых точек, определенных системой технического зрения;
- ◆ интеллектуальный анализ состояния рабочих объектов макета панели ПДК и их учет в системе планирования действий;

Как видно, целью данного ИПА является развитие и детальная проработка программно-аппаратных систем, верификация работы этих систем при выполнении реальных задач. Основные задачи, решаемые при помощи ИПА в данной работе, можно сформулировать как:

1. Определение состояния панели и оценка возможности взаимодействия МК с макетом панели ПДК (определение наличия загрязнения, объема и метода (инструментария) необходимой очистки области загрязнения (обрастания)).
2. Выполнение технических работ по очистке загрязненных областей макета панели ПДК.

3. Проведение автономных работ МК с рабочими объектами (hotstab и torque-tool) на макете панели ПДК.

4. Оценка проведенных работ (считывание данных манометров).

5. Обеспечение работ по поиску, определению и забору необходимых образцов конкреций, грунта или иных проб и образцов с их дальнейшим размещением в «контейнере» для хранения.

6. Оценка работы интеллектуальной СТЗ в водной среде с учетом различных условий видимости.

Конструкция имитатора подводного аппарата (ИПА) и архитектура системы автономного управления. Макет панели ПДК выполнен на основе анализа существующих эксплуатируемых ПДК [11, 12] и опыта обслуживания подобных комплексов.

Макет выполненной рабочей панели ПДК и ИПА, а также натурное представлено на рис. 4.

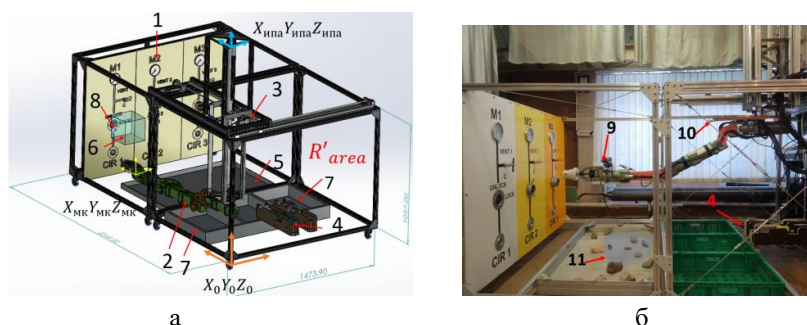


Рис. 4. Макет и натурное представление выполненной рабочей панели ПДК и ИПА

Разработанный стенд представляет из себя быстро сборную каркасную платформу размером 2346 x 1473 x 1057 мм. выполненную из алюминиевых направляющих.

Конструкция ИПА имеет 3 системы координат $X_0 Y_0 Z_0$ – базовая система координат, $X_{ИПА} Y_{ИПА} Z_{ИПА}$ – система координат ИПА, $X_{МК} Y_{МК} Z_{МК}$ – система координат МК, включающих в себя следующие элементы: 1 – макет панели подводного добывающего комплекса (имеет 3 «рабочих линии», обозначенных как M1, M2 и M3 и выделенных различными цветами. На рабочих линиях присутствуют органы контроля и управления макетом панели (манометр, для отслеживания изменения давления в системе и два разъема для вращательного инструмента с низким крутящим моментом и приемное устройство для штепселя); 2 – подводный электрический пяти степенной манипулятор; 3 – имитатор подводного аппарата; 4 – макетов рабочих инструментов (рабочий штепсель и вращательный инструмент с низким крутящим моментом визуально соответствующих ПНСТ 605-2022 [13]); 5 – поддона (размером 1100·650·90 мм с образцами конкреций).

Также на рис. 4,а,б представлены: 6 – область «окрестности» целевой точки; 7 – поддоны для хранения собранных конкреций; 8 – целевая точка для выхода МК и ИПА; 9 – блок компонентов ИСТЗ на схвате МК в составе (камеры глубины Orbbece Astra Pro, дальномеров ближней (Sharp GP2Y0A41 (4–30 см)) и средней зоны Benewake TFmini Plus LIDAR (12 м); 10 – блок компонентов ИСТЗ на ИПА в составе камеры глубины Intel RealSens D435; 11 – расположение «конкреций». Поток данных с камер глубины может быть представлен в виде двумерных матриц интенсивностей пикселей:

$$V_{x,y}^1 = \{V_{x,y}^1 | x \in [1,1024], y \in [1,1024]\} \quad (1)$$

$$V_{x,y}^2 = \{V_{x,y}^2 | x \in [1,1024], y \in [1,1024]\}. \quad (2)$$

К основным параметрам, описывающим текущее состояние системы МК и ИПА можно отнести:

ИПА способен функционировать при следующих режимах управления:

- ◆ дистанционный режим управления с пульта управления оператора;
- ◆ режим движения по заранее заданным значениям степеней свободы манипуляторного комплекса (по пресетам);

- ♦ автоматизированный режим управления на основе решения обратной задачи кинематики;
- ♦ автономном режиме с использованием интеллектуальной системы технического зрения (ИСТЗ).

Контроль и управление ИПА и МК осуществляется на пункте управления оператора (ПУО). Общая структурная схема комплекса ИПА представлена на рис. 5.

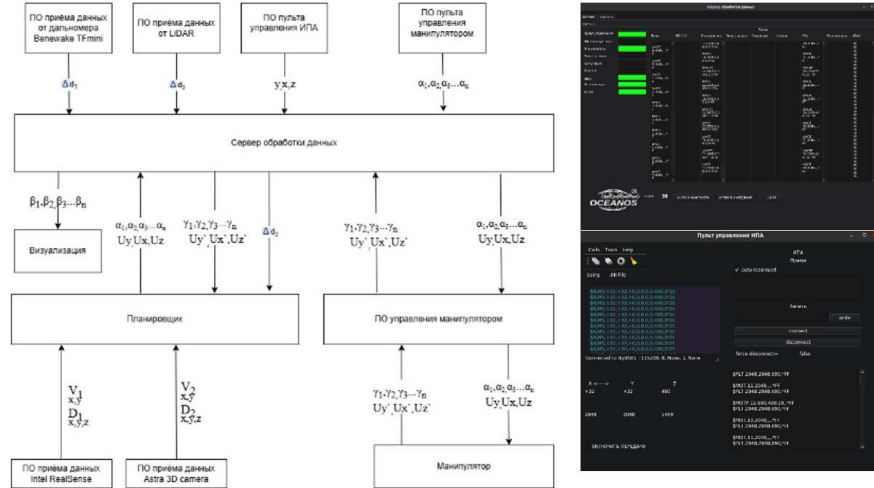


Рис. 5. Общая структурная схема комплекса ИПА и графический интерфейс оператора

ПУО состоит из пульта управления МК и пульта управления ИПА. Оператор имеет возможность настройки скорости перемещения МК и ИПА, что позволяет обеспечить более плавное перемещение объектов управления. Графический интерфейс оператора позволяет производить настройку пресетов, загружать предустановленные миссии, визуализировать положение МК и ИПА в пространстве, выводить диагностическую информацию о состоянии исполнительных механизмов и отображать данные полученные с модулей ИСТЗ. Графический интерфейс оператора представлен на рис. 5. Сервер обработки и маршрутизации данных, обеспечивает дополнительное программно-аппаратное взаимодействие между данными реального ИПА и его цифрового двойника, реализованного при помощи компонентов ROS 2 и визуализации телеметрии.

На рис. 5: U_x, U_y, U_z – значение усилия для трёх направлений движения ИПА в условных единицах; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ – значения усилия на каждую степень манипулятора в условных единицах; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n$ – количество импульсов посчитанных энкодерами при работе моторов для каждой из степеней манипулятора (каждые 16 импульсов равны одному обороту мотора на 360 градусов); U'_x, U'_y, U'_z – количество импульсов посчитанных энкодерами при обороте моторов для каждого из направлений движения ИПА; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ – значения углов отклонения каждой из степеней манипулятора

Перевод значений энкодера в углы манипулятора основан выражении

$$V_{\text{angle}} = \frac{V_{\text{enc}} - V_{\text{min}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \quad (3)$$

$$\theta = \Delta\theta + V_{\text{angle}} \cdot (\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}}) + \theta_{\text{min}}, \quad (4)$$

где V_{enc} – текущее значение энкодера; $V_{\text{min}}, V_{\text{max}}$ – минимальные и максимальные значения энкодера; V_{angle} – коэффициент перевода значений энкодера в углы в диапазоне работы звена; θ – вычисленный угол звена манипулятора; $\Delta\theta$ – базовый (смещённый) угол манипулятора (определяется оператором для упреждения возможности выхода за пределы рабочей зоны); $\theta_{\text{min}}, \theta_{\text{max}}$ – минимальный и максимальный углы вращения звена.

Как видно, разработанный ИПА является сложным технологичным комплексом, предназначенным для проработки и исследования алгоритмов планирования движения, детектирования и оценки состояния, а также сопряженного управления МК и ИПА.

Разработка интеллектуальной системы технического зрения (ИСТЗ)

Функции ИСТЗ:

- ◆ определение элементов рабочей панели ПДК и их состояния;
- ◆ определении загрязнений на рабочей панели ПДК;
- ◆ определении координат элементов панели ПДК;
- ◆ определении конкреций и их типа;
- ◆ определение координат конкреций.

Представленный спектр задач решается методами классификации и сегментации искусственными нейронными сетями, совместно с алгоритмами трекинга.

В качестве датасета для обучения были засняты 3200 изображений. В результате аугментации данных (методами геометрических цветовых преобразований, а также использования шумов и искажений) было получено 25000 изображений. Для обучения использовалась Yolo v.8. Нейронная сеть была обучена для определения следующего количества классов $\Phi_{i,k}$ – где i – выбранная рабочая линия, k – объект на панели ($\Phi_{i,1}$ – манометр (подпись), $\Phi_{i,2}$ – манометр, $\Phi_{i,3}$ – вентиль сброса давления (подпись), $\Phi_{i,4}$ – вентиль сброса давления (состояние), $\Phi_{i,5}$ – отверстия для установки инструмента Нт, $\Phi_{i,6}$ – CIR (подпись линии панели), $M_{\Phi_{i,1}}$ – показание манометра (принято 0 или 1, в случае превышения порогового значения $M_{crit} = 1$ Па). Количество эпох обучения 30, размер batch_size = 20.

Результат кривых обучения, и работы ИСТЗ по определению объектов на макете рабочей панели представлен на рис. 6.



Рис.6. Результат метрики точности обучения модели (mAP50) и работы ИСТЗ по определению объектов на макете рабочей панели

Результатом работы ИСТЗ является набор центра координат $P_{\Phi_{i,k}} = [x_{\Phi_{i,k}}, y_{\Phi_{i,k}}, z_{\Phi_{i,k}}]$ определенных ИСТЗ объектов на панели. Как видно, в процессе обучения достигнут показатель точности равный 97%. Отдельно сеть обучена определять состояние показателей средств измерений работы линии (манометров).

Разработка системы планирования перемещения МК и ИПА. В основу текущей разработки САУ МК легли результаты, полученные авторами ранее, которые были подробно описаны в работах [10–13] и продемонстрированы при выполнении интервенционных операций в испытательном бассейне СПбГМТУ [14].

Для определения координат схвата МК P_{arm} используется преобразование Денавита-Хартенберга (DH):

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & a_i \cos \theta_i \\ -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & \sin \alpha_i & -d_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & d_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где θ_i – угол вращения вокруг оси Z_{i-1} ; d_i – смещение вдоль оси Z_{i-1} ; a_i – длина звена; α_i – угол наклона между Z_{i-1} и Z_i .

В результате выполнения описанных вычислений могут быть получены итоговые матрицы положения для различных систем координат.

В результате могут быть рассчитаны итоговая матрица положения схвата:

$$T_{arm} = T_{UDS1} \cdot T_{UDS2} \cdot T_{UDS3} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3. \quad (6)$$

где T_{UDS} – матрица преобразования, которая описывает смещение одного звена манипулятора относительно другого; T_i – матрица преобразования, которая описывает смещение одного звена манипулятора относительно другого.

И соответственно координаты схвата:

$$P_{arm} = T_{arm} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Итоговая матрица положения камеры на имитаторе подводного аппарата:

$$T_{realsense} = T_{UDS1} \cdot T_{UDS2} \cdot T_{UDS3} \cdot T_{realsense_tf1} \cdot T_{realsense_tf2} \cdot T_{realsense_tf3}, \quad (8)$$

где $T_{realsense_tf}$ – матрица преобразования, которая описывает смещение камеры относительно имитатора подводного аппарата:

$$T_{astra} = T_{UDS1} \cdot T_{UDS2} \cdot T_{UDS3} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_{astra_tf1} \cdot T_{astra_tf2} \cdot T_{astra_tf3}. \quad (9)$$

где T_{astra_tf} – матрица преобразования, которая описывает смещение камеры относительно схвата манипулятора.

Решение обратной задачи кинематики манипулятора основано на методе построения обратной матрицы Якоби, которая также позволяет учесть необходимые ограничения заложенные в конструкции ИПА и МК. Ошибка в положении схвата МК может быть представлена выражением:

$$\Delta P = P_{target} - P_{arm}. \quad (10)$$

где $P_{target} = [x_{\Phi_{i,k}}, y_{\Phi_{i,k}}, z_{\Phi_{i,k}}]$ – координаты целевой точки МК определяемые системой СТЗ $(V_{x,y}^1, V_{x,y}^2)$. При работе с инструментами $P_{target} = P_{\Phi_k} = P^{\forall}$, где $P_{\Phi_{i,k}}^{\forall} = [x_{\Phi_{i,k}}, y_{\Phi_{i,k}}, z_{\Phi_{i,k}} - z_{p_{ндк}}^{\forall}]$ – координаты центра окрестности облака целевых точек выхода МК определяющегося на основе нормального закона распределения (в среднем на удалении от панели $z_{p_{ндк}}^{\forall} = 0.1$ (м)).

В данном описании результатов итерации решения задачи кинематики МК функция самотестирования и корректировки ΔP автономным МК не раскрывается.

Плавность хода движения схвата к целевой точке осуществляется за счет управления по каналу скорости:

$$Vp = \frac{\|\Delta P\|}{\Delta P} \cdot v_{step}, \quad (11)$$

где v_{step} – коэффициент сходимости равный 0.05 метра.

Для построения Якобиана (J) необходимо найти производные координат по обобщённым координатам:

$$J = \partial q \partial P. \quad (12)$$

Используется псевдообратная матрица J, которая помогает решать уравнения вида $Ax = b$, даже если у матрицы A нет обратной матрицы, находя наилучшее приближение к решению:

$$\Delta Q = J \cdot Vp, \quad (13)$$

где Vp скорость сходимости решения ОЗК схвата.

Обновление углов происходит на основе выражения:

$$Q_{new} = Q_{current} + \Delta Q. \quad (14)$$

Итерации продолжают, пока не станет меньше порогового значения $\|\Delta P\| < 0.02$ м.

Матричное представление рассчитанного якобиана может быть представлено в виде выражений для поступательного (15) и вращательного движения (16)

$$J_{trans_i} = R_i \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$J_{rot_i} = R_i \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times (P_{arm} - P_i), \quad (16)$$

где R_i – матрица поворота из ДН-матрицы, P_{arm} – координаты схвата, P_i – координаты i-й степени МК.

Реализация автономной работы ИПА при выполнении сервисного обслуживания макета панели ПДК. Процесс сервисного обслуживания макета панели ПДК может быть представлен в виде блок-схемы алгоритма на рис. 7.

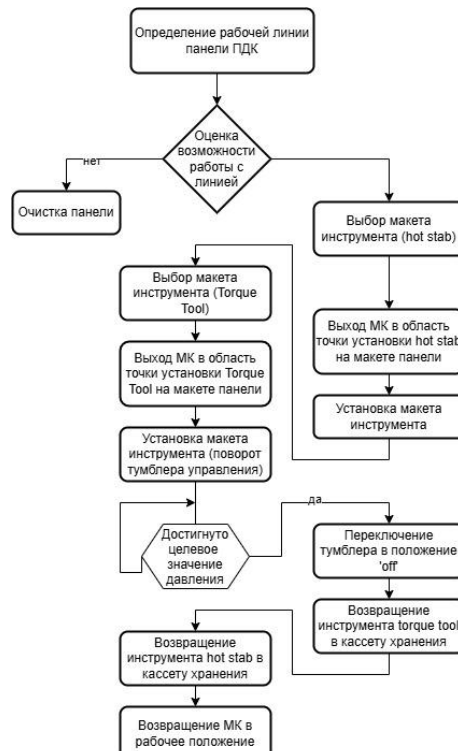


Рис. 7. Блок-схема процесса сервисного обслуживания макета панели ПДК

На первом этапе оператор на ПУО задает целевую миссию, к примеру, «сервисное обслуживание 1 линии макета панели ПДК». МК и ИПА выходят в рабочее положение, из которого видна вся рабочая область макета панели. Происходит определение позиций рабочих объектов на панели $\Phi_{i,k}$ и определение их состояния. Сценарий обслуживания, включает в себя установку рабочего инструмента hot-stab (Ht) (МК забирает инструмент из макета кассеты на основе пресета) в сервисное отверстие на панели. Переход МК и ИПА из рабочего положения в окрестность целевой точки $P_{\Phi_{1,5}}^y$ осуществляется на основе решения обратной задачи кинематики с использованием матрицы Якоби (на данный момент принято допущение, связанное с выбором целевой точки $P_{\Phi_{1,5}}^y$, дальнейшая комплексная проработка, подразумевает работу с оптимизированным облаком целевых точек). Детальное позиционирование относительно объекта $\Phi_{i,k}$ происходит за счет поэтапного смещения ИПА в плоскости XY с учетом нормализации значений $V_{x,y}^2$ в диапазоне $[0,1]$ ($V_{x,y}^{2(norm)}$).

$$X_{dev} = \left| x_{\Phi_{i,k}} - \frac{(V_{x,y}^{2(norm)})}{2} \right|, Y_{dev} = \left| y_{\Phi_{i,k}} - \frac{(V_{x,y}^{2(norm)})}{2} \right|. \quad (17)$$

В случае $X_{dev} < \Delta_{threshold}$, $Y_{dev} < \Delta_{threshold}$ где $\Delta_{threshold} = 0.05$ - минимальное значение ошибки по отклонению от целевого значения, система управления останавливает движение в плоскости XY, считая, что схват МК спозиционирован относительно $P_{\Phi_{1,5}}^y$ в плоскости XY. Отрабатывая смещение камеры схвата (X_{dev}, Y_{dev}) по оси Y и осуществляя перемещение вдоль оси Z на величину (Ω) (зависящую от типа инструмента $\Omega_{Hs} = 0.37$ (м.) для инструмента Hs ; $\Omega_{Tt} = 0.28$ (м.) – для инструмента Tt). Таким образом, когда $\Delta d_1 = \Omega_{Hs}$ и $\Delta d_1 = \Omega_{Tt}$ можно считать, что инструменты Hs и Tt успешно установлены в панели. Пример позиционирования относительно окрестности целевой точки представлен на рис. 8.

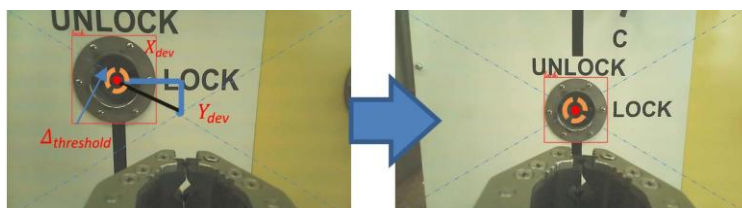


Рис. 8. Пример позиционирования относительно окрестности целевой точки

По аналогичному принципу происходит установка инструмента Tt . После открытия клапана подачи давления система отслеживает изменение состояния манометра $M_{\Phi_{1,1}}$. При достижении M_{crit} $M_{\Phi_{1,1}} = 1$ и система автоматически закрывает клапан подачи давления. Процесс завершения работы с панелью происходит по обратной схеме.

Пример выполнения сценария автономного обслуживания панели представлен на рис. 9 и 10.

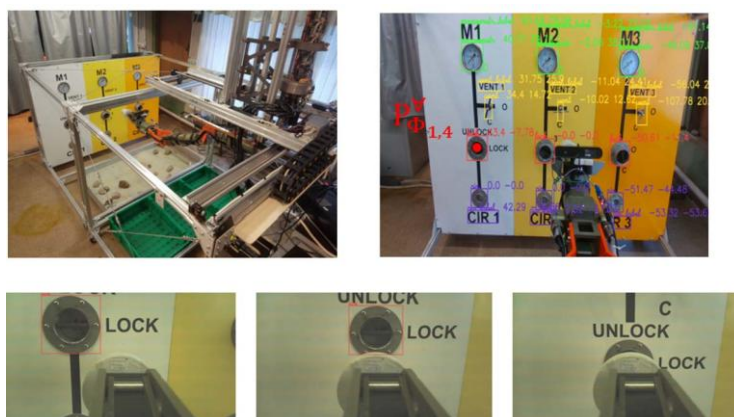


Рис. 9. Пример движения ИПА с МК в окрестность точки установки рабочего инструмента Tt и установка инструмента в посадочное место на панели ПДК

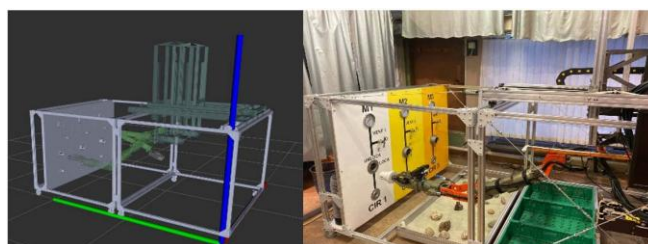


Рис. 10. Пример движения ИПА с МК в комплексе симуляции Gazebo и передвижение на реальном образце ИПА

Графики изменения ошибки перемещения схвата относительно целевой точки представлены на рис. 11.

Реализация автономной работы ИПА при выполнении задачи по сбору конкреции. Для начала обследования области донной поверхности в поисках необходимого типа конкреций, МК и ИПА перемещаются в точку начала поиска

Поиск необходимых конкреций проводится за счет покрытия указанного участка донной поверхности R'_{area} набором точек $P_{R'_{area}} = [P_{R1}, P_{R2} \dots P_{Rn}]$ – где n – количество точек образующих целевую траекторию движения рабочего органа МК (к примеру, в виде галсов). В процессе прохождения ИПА с МК по целевой траектории ИСТЗ при об-

наружении необходимого типа конкреций $K_{tr} = [x_c, y_c]$ обнаруживается центр определенного объекта $K_{tr} = [x_c, y_c]$. На основе выражений (те же что и выше для наведения по камере) САУ ИПА стабилизирует над целевым объектом, так чтобы конкреция находилась в центре изображения. Зная смещение камеры на схвате МК относительно центральной точки самого схвата (dx, dy) происходит перемещение ИПА вдоль осей XYZ на величины (dx, dy) и dz (минимальное расстояние МК от грунта), после чего происходит процесс захвата конкреции. После выполнения забора конкреции, в зависимости ее типа, ИПА и МК располагают ее в определенный контейнер для сбора. Пример выполнения сценария по забору грунта представлен на рис. 12.

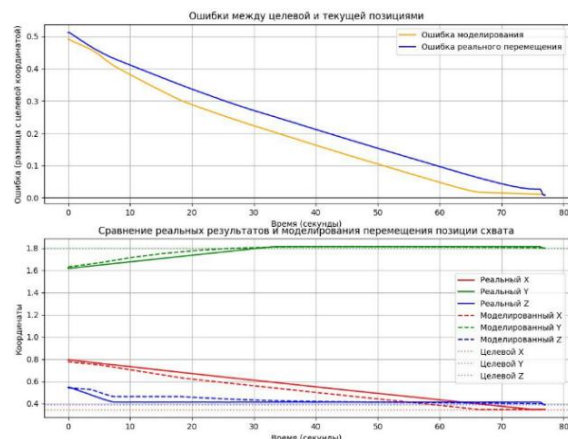


Рис. 11. График перемещения схвата манипулятора и ошибка перемещения относительно целевой точки в сравнении с имитационным моделированием

Сравнение изменения обобщенных координат ИПА и МК с результатами моделирования представлено на рис. 13.

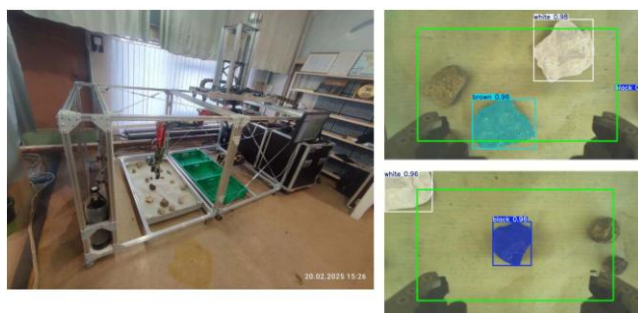


Рис. 12. Пример выполнения сценария детектирования и забора заданной конкреции грунта

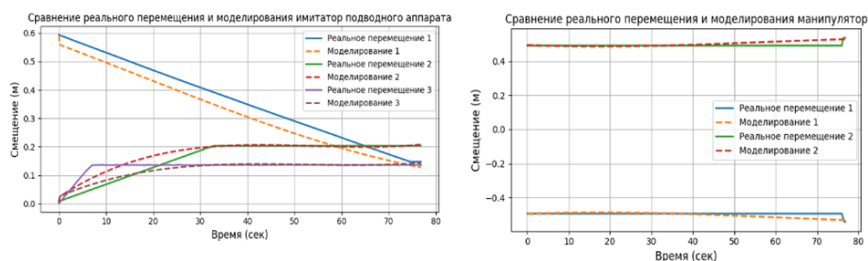


Рис. 13. Перемещение имитатора подводного аппарата и манипулятора относительно целевых обобщенных координат

Заключение. В работе рассмотрен процесс разработки и применения имитатора подводного резидентного аппарата с установленным манипуляторным комплексом. Представлен анализ существующих зарубежных проектов и основных трендов в области резидентной техники. Для решения задач технологического обслуживания панели подводного добычного комплекса использовалась интеллектуальная система технического зрения, целью которой являлось распознавание типов объектов на рабочей панели и их состояния.

Представленные результаты демонстрируют возможность автономной работы МК на основе данных ИСТЗ, что позволяет производить детектирование объектов интереса панели ПДК и заданных конкреций, а также позиционирование относительно этих объектов.

Представленное численное решение обратной задачи кинематики обладает универсальностью, позволяя применять его для различных конфигураций манипуляторных комплексов с учетом их конструктивных ограничений. Использование матрицы Якоби в процессе решения обратной задачи кинематики совместно с решением прямой задачи кинематики для комплекса ИПА и МК обеспечивает не только точный расчет траектории, но и учет существующих механических и геометрических ограничений манипулятора на этапе планирования движения. Благодаря этому путь, заданный в модели, практически совпадает с реальным перемещением робота, что повышает предсказуемость и точность работы системы.

Использование локального планировщика пути на основе данных с камеры на схвате позволяет корректировать перемещение ИПА в процессе перемещения, что значительно повышает точность работы системы в сложных подводных условиях.

Направление дальнейших работ связано с проведением исследований в подводной среде с учетом генерации возмущающих воздействий (турбулентных течений, создаваемых генератором потока) и изменяемых параметров освещенности и мутности подводной среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Carrera A., Carreras M., Kormushev P., Palomeras N. and Naqappa S.* Towards valve turning with an AUV using Learning by Demonstration // 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, Bergen, Norway, 2013. – P. 1-7. – DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608097.
2. *Palomeras N., Carrera A., Hurtós N. et al.* Toward persistent autonomous intervention in a subsea panel // Auton Robot. – 2016. – 40. – P. 1279-1306. – <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9511-7>.
3. *Palomeras N., Peñalver A., Massot-Campos M., Negre P.L., Fernández J.J., Ridao P., Sanz P.J., Oliver-Codina G.* I-AUV Docking and Panel Intervention at Sea // Sensors. – 2016. – 16, 1673. – <https://doi.org/10.3390/s16101673>.
4. *Palomeras N., Ridao P., Ribas D., and Vallicrosa G.* Autonomous I-AUV docking for fixed-base manipulation // Proc. IFAC. – 2014. – Vol. 47, No. 3. – P. 12 160-12 165.
5. *Pi R., Cieślak P., Ridao P. and Sanz P.J.* TWINBOT: Autonomous Underwater Cooperative Transportation // in IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 37668-37684. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3063669.
6. Electric Manipulators tested for Offshore Wind O&M by University of Girona. – <https://reachrobotics.com/blog/electric-manipulators-conduct-ndt-for-offshore-wind-platforms/>.
7. *Cherame Jami, and Alan Anderson.* Developing the Next Generation of Pipeline Inspection AUV // Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023. – DOI: <https://doi.org/10.4043/32559-MS>.
8. *Glenn Casey.* Next Generation Building Blocks of an Autonomous Subsea Vehicle // Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023. – DOI: <https://doi.org/10.4043/32520-MS>.
9. *Neviso C., Cavallini F., Massari G., Bernini T., Watanabe T., and Britto A.* Going Deeper: Inspecting Subsea Live Assets by Means of an Advanced AUV Solution // Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2024. – DOI: <https://doi.org/10.4043/35245-MS>.
10. *Пятавин П.А.* Метод автоматической стыковки необитаемых подводных аппаратов с использованием многозвенных манипуляторов // Международный семинар «Навигация и управление движением» (NMC-2023). – С. 57-59.
11. *Юрманов А.П., Панчук М.О., Коноплин А.Ю.* Метод коррекции траекторий рабочего органа многозвеного манипулятора необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2023. – № 4 (46). – С. 43-51. – https://doi.org/10.37102/1992-4429_2023_46_04_04.
12. *Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А., Костенко В.В., Быканова А.Ю.* Разработка комплекса методов для автономного выполнения технологических операций манипуляционными подводными аппаратами // Вестник ДВО РАН. – 2024. – No. 1. – С. 54-71. – <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824010044>. EDN: leqdse.

13. *Маевский А.М., Занин В.Ю., Кожемякин И.В.* Разработка Комбинированной Системы Управления Резидентным/Интервенционным Анпа На Основании Поведенческих Методов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1 (211). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-kombinirovannoy-sistemy-upravleniya-rezidentnym-interventsionnym-ampa-na-osnovanii-povedencheskih-metodov> (дата обращения: 09.03.2021).
14. *Chemisky B., Menna F., Nocerino E., Drap P.* Underwater Survey for Oil and Gas Industry: A Review of Close Range Optical Methods // *Remote Sens.* – 2021. – 13, 2789. – <https://doi.org/10.3390/rs13142789>.
15. *Nauert Franka and Kampmann Peter.* Inspection and maintenance of industrial infrastructure with autonomous underwater robots // *Frontiers in Robotics and AI.* – 2023. – 10. – 10.3389/frobt.2023.1240276.
16. ПНСТ 605-2022. Нефтяная и газовая промышленность. Системы подводной добычи. Инструменты телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов и их интерфейсы. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 50 с.
17. *Занин В.Ю., Маевский А.М., Кожемякин И.В. и др.* Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии. Отечественный и зарубежный опыт // *Морские информационно-управляющие системы.* – 2020. – № 1 (17). – С. 94-102. – http://oceanplatform.ru/wp-content/uploads/2020/08/journal_07_2020.
18. *Занин В.Ю., Маевский А.М. и др.* Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата интервенционного класса и сопутствующих технологий // *Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа.* – 2019. – С. 18-26. – https://oceanos.ru/s1/files/File/2019_Arctic_residential.pdf.
19. *Маевский А.М., Гайкович Б.А.* Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов // *Вести газовой науки. Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа.* – 2019. – № 2 (39). – С. 30-41.
20. *Маевский А.М., Гайкович Б.А.* Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // *Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X Молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах».* – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 83-98.

REFERENCES

1. *Carrera A., Carreras M., Kormushev P., Palomeras N. and Naqappa S.* Towards valve turning with an AUV using Learning by Demonstration, 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, Bergen, Norway, 2013, pp. 1-7. DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608097.
2. *Palomeras N., Carrera A., Hurtós N. et al.* Toward persistent autonomous intervention in a subsea panel, *Auton Robot*, 2016, 40, pp. 1279-1306. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9511-7>.
3. *Palomeras N., Peñalver A., Massot-Campos M., Negre P.L., Fernández J.J., Ridao P., Sanz P.J., Oliver-Codina G.* I-AUV Docking and Panel Intervention at Sea, *Sensors*, 2016, 16, 1673. Available at: <https://doi.org/10.3390/s16101673>.
4. *Palomeras N., Ridao P., Ribas D., and Vallicrosa G.* Autonomous I-AUV docking for fixed-base manipulation, *Proc. IFAC*, 2014, Vol. 47, No. 3, pp. 12 160-12 165.
5. *Pi R., Cieślak P., Ridao P. and Sanz P.J.* TWINBOT: Autonomous Underwater Cooperative Transportation, in *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 37668-37684. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3063669.
6. Electric Manipulators tested for Offshore Wind O&M by University of Girona. Available at: <https://reachrobotics.com/blog/electric-manipulators-conduct-ndt-for-offshore-wind-platforms/>.
7. *Cheramie Jami, and Alan Anderson.* Developing the Next Generation of Pipeline Inspection AUV, *Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023.* DOI: <https://doi.org/10.4043/32559-MS>.
8. *Glenn Casey.* Next Generation Building Blocks of an Autonomous Subsea Vehicle, *Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2023.* DOI: <https://doi.org/10.4043/32520-MS>.
9. *Nevo C., Cavallini F., Massari G., Bernini T., Watanabe T., and Britto A.* Going Deeper: Inspecting Subsea Live Assets by Means of an Advanced AUV Solution, *Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, May 2024.* DOI: <https://doi.org/10.4043/35245-MS>.
10. *Pyatavin P.A.* Metod avtomaticheskoy stykovki neobitaemykh podvodnykh apparatov s ispol'zovaniem mnogozvennykh manipulyatorov [Method of automatic docking of unmanned underwater vehicles using multi-link manipulators], *Mezhdunarodnyy seminar «Navigatsiya i upravlenie dvizheniem» (NMC-2023)* [International Seminar "Navigation and Motion Control" (NMC-2023)], pp. 57-59.
11. *Yurmanov A.P., Panchuk M.O., Konoplin A.Yu.* Metod korrektsii traektoriy rabocheho organa mnogozvennogo manipulyatora neobitaemogo podvodnogo apparata [Method of correction of trajectories of the working element of a multi-link manipulator of an unmanned underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Research and Robotics], 2023, No. 4 (46), pp. 43-51. Available at: https://doi.org/10.37102/1992-4429_2023_46_04_04.

12. Konoplin A.Yu., Krasavin N.A., Yurmanov A.P., Pyatavin P.A., Kostenko V.V., Bykanova A.Yu. Razrabotka kompleksa metodov dlya avtonomnogo vypolneniya tekhnologicheskikh operatsiy manipulyatsionnymi podvodnymi apparatami [Development of a set of methods for autonomous performance of technological operations by underwater manipulation vehicles], *Vestnik DVO RAN* [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], 2024, No. 1, pp. 54-71. Available at: <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824010044>. EDN: leqds.
13. Maevskiy A.M., Zanin V.Yu., Kozhemyakin I.V. Razrabotka Kombinirovannoy Sistemy Upravleniya Rezydentnym/Interventsionnym Anpa Na Osnovanii Povedencheskikh Metodov [Development of a Combined Control System for a Resident/Interventional Unmanned Aerial Vehicle Based on Behavioral Methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 1 (211). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-kombinirovannoy-sistemy-upravleniya-rezydentnym-interventsionnym-anpa-na-osnovanii-povedencheskikh-metodov> (accessed 09 March 2021).
14. Chemisky B., Menna F., Nocerino E., Drap P. Underwater Survey for Oil and Gas Industry: A Review of Close Range Optical Methods, *Remote Sens*, 2021, 13, 2789. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs13142789>.
15. Nauert Franka and Kampmann Peter. Inspection and maintenance of industrial infrastructure with autonomous underwater robots, *Frontiers in Robotics and AI*, 2023, 10. Available at: [10.3389/frobt.2023.1240276](https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1240276).
16. PNST 605-2022. Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Sistemy podvodnoy dobychi. Instrumenty teleupravlyayemykh neobitaemykh podvodnykh apparatov i ikh interfeysy [PNST 605-2022. Oil and gas industry. Underwater production systems. Tools of remotely operated unmanned underwater vehicles and their interfaces]. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2022, 50 p.
17. Zanin V.Yu., Maevskiy A.M., Kozhemyakin I.V. i dr. Ispol'zovanie morskoy robototekhniki v zadachakh operativnoy okeanografii. Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt [Use of marine robotics in operational oceanography tasks. Domestic and foreign experience], *Morskie informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Marine information and control systems], 2020, No. 1 (17), pp. 94-102. Available at: http://oceanplatform.ru/wp-content/uploads/2020/08/journal_07_2020.
18. Zanin V.Yu., Maevskiy A.M. i dr. Razrabotka elementov podvodnykh robototekhnicheskikh rezidentnykh sistem na primere otechestvennogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata intervencionnogo klassa i soputstvuyushchikh tekhnologiy [Development of elements of underwater robotic resident systems using the example of a domestic autonomous unmanned underwater vehicle of the intervention class and related technologies], *Sb. rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye i osvoeniye Arktiki i kontinental'nogo shel'fa* [Collection of works of laureates of the International Competition of Scientific, Scientific-Technical and Innovative Developments Aimed at the Development and Exploitation of the Arctic and the Continental Shelf], 2019, pp. 18-26. Available at: https://oceanos.ru/s1/files/File/2019_Arctic_residential.pdf.
19. Maevskiy A.M., Gaykovich B.A. Razrabotka gibridnykh avtonomnykh neobitaemykh apparatov dlya issledovaniya mestorozhdeniy uglevodorodov [Development of hybrid autonomous unmanned vehicles for exploration of hydrocarbon deposits], *Vesti gazovoy nauki. Sovremennye podkhody i perspektivnye tekhnologii v proektakh osvoeniya neftegazovykh mestorozhdeniy rossiyskogo shel'fa* [News of gas science. Modern approaches and promising technologies in projects for development of oil and gas fields of the Russian shelf], 2019, No. 2 (39), pp. 30-41.
20. Maevskiy A.M., Gaykovich B.A. Razrabotka legkogo intervencionnogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v tselyakh ispol'zovaniya v podvodnykh rezidentnykh sistemakh [Development of a light intervention autonomous unmanned underwater vehicle for use in underwater resident systems], *Mater. XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X Molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Proceedings of the XIV All-Russian scientific and practical conference and the X Youth school-seminar "Management and processing of information in technical systems"]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 83-98.

Маевский Андрей Михайлович – АО «НПП ПТ «Океанос»; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; к.т.н., н.с.; начальник отдела морской робототехники СПбГМТУ.

Печайко Иван Александрович – АО «НПП ПТ «Океанос»; e-mail: pechaikojohn@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; инженер-робототехник

Алексеев Михаил Александрович – АО «НПП ПТ «Океанос»; e-mail: miho23@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; инженер-программист

Буров Никита Михайлович – ГУАП; e-mail: burov.nm@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; студент.

Maevsky Andrey Mikhailovich – Oceanos JSC; e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; cand. of eng. sc.; researcher; head of Marine Department SMTU.

Pechayko Ivan Aleksandrovich – Oceanos JSC; e-mail: pechaikojohn@gmail.com; Saint Petersburg, Russia; robotics engineer.

Alekseev Michail Aleksandrovich – Oceanos JSC; e-mail: miho23@bk.ru; Saint Petersburg, Russia; engineer programmer.

Burov Nikita Mikhailovich – SUAI; e-mail: burov.nm@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; student.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-96-108

В.П. Носков, Ю.С. Баричев, О.П. Гойдин, А.Н. Курьянов

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ВИДЕО-ДАЛЬНОМЕТРИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ РОБОТОВ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Работа посвящена решению актуальных задач совместной автономной видеонавигации роботов воздушного и наземного применения в наиболее востребованных для проведения специальных операций урбанизированных средах, включающих плотную городскую застройку и здания, где применение традиционных средств дистанционного управления ограничено наличием экранированных зон. Задачи групповой навигации предлагается решать на основе данных бортовых систем технического зрения в процессе оперативной разведки рабочей зоны беспилотным летательным аппаратом, результаты которой обеспечивают автономные движение и полет, как отдельных гетерогенных робототехнических средств, так и в группе. В основу алгоритмов навигации положены методы выделения из объемного облака точек, формируемого бортовым лидаром, опорной горизонтальной поверхности и горизонтальных сечений внешней среды, позволяющих с высокой точностью и быстротой определять все шесть координат объекта управления. Рассмотрены случаи, обусловленные возможными характеристиками внешней среды, когда навигационная задача решается не полностью, и предложены методы их исключения путем дополнения дальнометрических данных лидара видеоданными телекамеры. Приведена оценка точности решения задач видеонавигации, полученная путем математического моделирования внешней среды и формирования видеоданных. Предложены методы снижения ошибки видеонавигации, основанные на использовании специально банка опорных изображений с известными координатами их формирования, позволяющие обеспечить безопасные автономные полет и движение робототехнических средств в урбанизированной среде. Эффективность используемых методов и предлагаемых алгоритмов видеонавигации подтверждается результатами экспериментальных исследований соответствующих программно-аппаратных средств в реальных урбанизированных средах.

Беспилотный летательный аппарат; наземный транспортный робот; система технического зрения; лидар; телекамера; видео-дальнометрическое изображение; навигационная задача; математическое моделирование; ошибка решения навигационной задачи.

V.P. Noskov, Y.S. Barichev, O.P. Goydin, A.N. Kuryanov

DEVELOPMENT AND ANALYSE VISUAL NAVIGATION SYSTEM FOR AIR AND GROUND-BASED ROBOTS

The work is devoted to solving urgent problems of joint autonomous visual navigation for air and ground-based robots in urbanized environments. These environments are highly demanded for special operations, including dense urban areas and buildings, where the use of traditional remote control devices is limited due to the presence of shielded areas. The proposed solution addresses group navigation tasks based on data from onboard vision systems during operational reconnaissance of the working area by an unmanned aerial vehicle (UAV). The results of this reconnaissance enable autonomous movement and flight, both for individual heterogeneous robotic systems and for groups. The navigation algorithms are based on methods for extracting a horizontal reference surface and horizontal sections of the external environment from a volumetric point cloud generated by an onboard lidar. These methods allow for the precise and rapid determination of all six coordinates of the control object. Cases where the navigation task cannot be fully solved due to specific environmental characteristics are also considered. To address