

Научная статья

УДК 004.896

DOI: 10.31857/S0869769824010044

EDN: leqds

Разработка комплекса методов для автономного выполнения технологических операций манипуляционными подводными аппаратами

А. Ю. Коноплин✉, Н. А. Красавин, А. П. Юрманов, П. А. Пятавин,
В. В. Костенко, А. Ю. Быканова

Александр Юрьевич Коноплин

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

kaur-prim@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7554-1002>

Никита Андреевич Красавин

научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

krasyava061@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1102-5409>

Александр Павлович Юрманов

научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

yurmanov_a@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6849-3700>

Павел Алексеевич Пятавин

научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

mcmaster988@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0812-808X>

Владимир Владимирович Костенко

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

kosten.ko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3821-3787>

Анна Юрьевна Быканова
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
vladianna@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3040-1345>

Аннотация. Описана разработка комплекса методов, предназначенных для решения актуальной задачи повышения эффективности выполнения дорогостоящих манипуляционных технологических операций в глубинах Мирового океана с помощью необитаемых подводных аппаратов (НПА), оснащаемых многозвенными манипуляторами (ММ). На основе предложенных методов синтезированы системы обработки сенсорной информации и распознавания окружающей обстановки, а также формирования программных (целевых) сигналов и динамического управления НПА с ММ. За счет согласованной работы этих систем обеспечивается успешное автономное выполнение контактных манипуляционных операций в режиме зависания НПА над или вблизи морских объектов. Выполнена программно-аппаратная реализация разработанных систем, при этом результаты бассейновых экспериментов и полунатурного моделирования подтвердили работоспособность и высокую эффективность предложенных разработок, расширяющих функциональные возможности НПА.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, многозвенный манипулятор, позиционно-силовое управление, контактные операции, система управления, система технического зрения, идентификация объектов, построение траекторий

Для цитирования: 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 // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 1. С. 54–71. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824010044>. EDN: leqds

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

Original article

Development of methods for autonomous implementation of technological operations by manipulative underwater vehicles

A. Yu. Konoplin, N. A. Krasavin, A. P. Yurmanov, P. A. Piatavin,
V. V. Kostenko, A. Yu. Bykanova

Alexander Yu. Konoplin
Candidate of Sciences in Technology, Leading Scientific Researcher
Academician M. D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Vladivostok,
Russia
kayur-prim@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7554-1002>

Nikita A. Krasavin
Scientific Researcher
Academician M. D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Vladivostok,
Russia
krasyava061@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1102-5409>

Alexander P. Yurmanov
Scientific Researcher
Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Vladivostok,
Russia
yurmanov_a@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6849-3700>

Pavel A. Piatavin
Scientific Researcher
Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Vladivostok,
Russia
mcmaster988@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0812-808X>

Vladimir V. Kostenko
Candidate of Sciences in Technology, Leading Scientific Researcher
Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Vladivostok,
Russia
kosten.ko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3821-3787>

Anna Yu. Bykanova
Candidate of Sciences in Technology, Senior Scientific Researcher
Academician M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Vladivostok,
Russia
vladianna@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3040-1345>

Abstract. The article is devoted to the development of a set of methods designed to solve the urgent task of increasing the efficiency of performing expensive manipulative technological operations in the depths of the World Ocean using unmanned underwater vehicles (UUV) equipped with multilink manipulators (MM). Based on the proposed methods, systems for processing sensory information, recognizing the environment, target (control) signals formation and dynamic control of the UUV with MM are synthesized. Due to the coordinated operation of these systems, successful autonomous execution of contact manipulation operations in the UUV hovering mode above or near marine objects is ensured. The developed systems were implemented in hardware and software. In addition, the results of basin experiments and semi-natural modeling confirmed the operability and high efficiency of the proposed methods that expand the UUV functionality.

Keywords: unmanned underwater vehicle, multilink manipulator, position-force control, contact operations, control system, vision system, object identification, trajectory construction

For citation: Konoplin A. Yu., Krasavin N. A., Yurmanov A. P., Piatavin P. A., Kostenko V. V., Bykanova A. Yu. Development of methods for autonomous implementation of technological operations by manipulative underwater vehicles. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(1): 54–71. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824010044>. EDN: leqds

Funding. The research was supported by Russian Science Foundation grant № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>

Введение

В настоящее время эффективность выполнения многих подводных операций (прокладка, инспекция и ремонт газопроводов, подводное строительство, мониторинг водной среды, отбор проб грунта, охрана подводных акваторий и т. д.) достигается за счет применения подводной робототехники [1–5]. Однако подавляющее большинство манипуляционных операций вблизи поверхности дна или объектов подводной инфраструктуры в заранее неизвестной и непрерывно меняющейся обстановке все еще выполняется в режиме телеуправления с помощью телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) [6, 7], требующих

наличия дорогих судов сопровождения с габаритными лебедками и многочисленным высококвалифицированным персоналом.

Поэтому многие исследователи приступили к созданию новых интеллектуальных подводных робототехнических комплексов, позволяющих хотя бы частично заменить маломаневренные, громоздкие и дорогостоящие ТНПА (особенно для глубоководных работ) более производительными и дешевыми автономными и гибридными НПА, оснащаемыми одним или несколькими многозвенными манипуляторами (ММ). Работа таких аппаратов-роботов не требует использования специализированных обеспечивающих судов, многочисленного обслуживающего персонала, их перемещения не ограничены длиной кабель-троса, и они способны преодолевать десятки километров в поисках целевых объектов [8, 9]. При этом оснащение ММ позволяет значительно расширить функциональные возможности НПА, обеспечивая не только выполнение осмотровых, поисковых и транспортных миссий, но и проведение манипуляционных операций.

В работах [2, 3, 10, 11] приведен детальный анализ исследовательских проектов SWIMMER, ALIVE, SAUVIM, RAUVI, TRIDENT, TRITON, PANDORA, Girona 500 и Aquanaut, которые специализированы для очень специфических и ограниченных операций в основном в оффшорной промышленности. Создаваемые НПА, оснащенные ММ, продемонстрировали возможности выполнения простейших операций захвата целевых объектов в процессе экспериментальных морских испытаний. При этом авторами отмечается, что проведение автономных манипуляционных операций в реальных условиях неопределенности и изменчивости водной среды все еще остается нерешенной научно-практической проблемой.

Отечественными исследователями АО Научно-производственное предприятие подводных технологий «Океанос» при активном участии ФГБОУ ВО СПбГМТУ разработан автономный НПА, оснащенный и электрическим подводным ММ с пятью степенями подвижности. Приведены демонстрации выполнения некоторых операций в супервизорном и автономном режимах в условиях бассейновых испытаний. Однако не удалось найти патентов и открытых научных публикаций, описывающих использованные методы и технологии. Результаты использования этого НПА с ММ в морских условиях также не представлены.

Автономному решению манипуляционных подводных задач способствуют уже созданные системы навигации и управления пространственными перемещениями НПА [1, 10], а также системы технического зрения (СТЗ) различного типа (оптические, лазерные и гидроакустические) [3, 5, 11, 12], необходимые для распознавания окружающей обстановки и формирования программных сигналов управления НПА с ММ. При этом система [13] позволяет оценивать пригодность рельефа дна в зоне работ, подводить НПА к поверхности дна или целевых объектов в удобном для манипулирования положении, а также формировать желаемые траектории ММ по поверхностям с учетом его кинематических особенностей и требований к выполнению конкретных операций.

В случае выполнения технологических операций форма подводного объекта работ известна предварительно, поэтому желаемые пространственные траектории движения рабочего инструмента ММ по поверхности этого объекта могут быть также сформированы заранее. Заданные траектории необходимо спроецировать (наложить) на реальный объект, а для этого требуется точно определить его местоположение и пространственную ориентацию относительно НПА. Для решения этой проблемы в работах [7, 14] применяются сложные алгоритмы обработки видеозображений и используются специальные маркеры, которые заранее закрепляются на подводном объекте и позволяют определить его местоположение и пространственную ориентацию. В работе [14] проведены исследования эффективности

использования эталонных маркеров различного типа (крестообразный, круговой и прямоугольный) для определения их местоположения и ориентации относительно НПА. Кроме того, подход [7] позволяет с помощью стереокамеры, установленной на схвате ММ, определять положение и ориентацию известного объекта с заранее установленным маркером.

Однако очевидно, что необходимость установки маркеров сильно затрудняет практическое использование этих методов и накладывает дополнительные ограничения на выполнение манипуляционных операций в заранее неизвестной обстановке. При этом подводные объекты неизбежно подвергаются обрастаниям, заиливаниям или деформациям в случаях коррозии или механического воздействия, что значительно затрудняет их идентификацию и последующее построение траекторий рабочего инструмента ММ по поверхности этих объектов.

В промышленной робототехнике применяются методы [15], которые для высокоточного определения формы деформированных деталей предлагают использовать облака точек, получаемые от СТЗ, а также заранее построенные трехмерные модели этих деталей, подвергающиеся преобразованиям в облака точек. При этом облака точек объекта не должны содержать пропусков, в противном случае потребуется его повторное сканирование с исходной точки, что зачастую невозможно выполнить ввиду ограниченной точности в позиционировании НПА. К тому же перенос траектории ММ на деформированные участки деталей производится без учета топологии этих деталей, поскольку для оценки деформаций выполняется проецирование на специальную плоскость. При этом в реальных условиях водной среды ввиду однонаправленного характера сканирования бортовых СТЗ необходимо выполнять проверку точности совмещения облаков точек построенной модели и реального сканируемого объекта, на основе проведенной оценки должно приниматься решение о построении на поверхности объекта траектории рабочего инструмента ММ.

Также необходимо учитывать, что технологические операции требуют силового контакта рабочего инструмента подводного ММ с объектами работ. К таким операциям относятся: введение пробоотборников в грунт, очистка поверхностей от обрастаний и заиливаний, установка пробоотборников в контрольные отверстия на подводных манифольдах и др. В настоящее время уже существуют решения задачи обеспечения позиционно-силового управления ММ, установленными на НПА. Для этого используют методы импедансного или параллельного позиционно-силового управления, а также комбинации вышеописанных подходов [4]. При этом многие подходы предлагают применение дорогих многокомпонентных силовых и моментных датчиков для измерения динамических воздействий на НПА и ММ, возникающих при контакте последнего с объектом работ.

Известен способ¹ обеспечения движения рабочего инструмента ММ по желаемой траектории с оказанием заданного силового воздействия на поверхность объекта работ, работоспособность инструмента зависит от точности стабилизации НПА в режиме зависания [1] вблизи этого объекта, а также от точности отработки движителями аппарата желаемых значений входных сигналов, формируемых с учетом нарастающих силовых и моментных воздействий со стороны ММ. Однако в реальных условиях работы при наличии течений требуемая точность стабилизации НПА в режиме зависания в заданной точке пространства с заданной ориентацией при работающем ММ практически недостижима, поскольку НПА являются очень инерционными динамическими объек-

¹ Патент 2799176 Российская Федерация, МПК В 63 G 8/00, G 05 B13/02. Способ позиционно-силового управления автономным необитаемым подводным аппаратом с многостепенным манипулятором: № 2023106449: заявл. 20.03.2023; опублик. 04.07.2023 / Зуев А.В., Филаретов В.Ф., Тимошенко А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИПМТ ДВО РАН. – 22 с.: 1 ил.

тами, а их СТЗ определяют информацию о линейных смещениях НПА с неизбежными временными задержками и ограниченной точностью. При этом даже с использованием эффективных систем управления движители НПА обрабатывают поступающие на их входы сигналы управления с ограниченной точностью. Это обусловлено нелинейностью статических характеристик движителей, постоянными времени этих движителей, а также сложными нелинейными зависимостями создаваемой движителем тяги от частоты вращения винта, направления и скорости набегающего потока жидкости. В результате даже незначительные неизбежные смещения НПА относительно исходного положения в пространстве приведут либо к потере контакта рабочего инструмента ММ с поверхностью объекта работ, либо к соударению рабочего инструмента с объектом и сходу этого инструмента с заданной траектории.

Таким образом, результаты анализа публикаций позволяют сделать вывод, что возможность выполнения манипуляционных задач НПА в автономном режиме активно исследуется научным сообществом, однако по данным открытых источников практически применимых решений пока не существует. Введение в эксплуатацию и практическое использование этих аппаратов до сих пор сдерживаются ограниченными функциональным и интеллектуальным уровнями их систем осязания и управления и, как следствие, недостаточной точностью и малой скоростью проведения работ, что в экстремальных условиях морских глубин препятствует выполнению технологических манипуляционных операций.

Постановка задачи

Обозначенная выше научно-практическая проблема до сих пор не решена, а потребность в быстром и точном выполнении различных подводных манипуляционных операций со временем только увеличивается при расширении области применения НПА. Поэтому для создания и последующей эксплуатации в автономном режиме НПА, оснащенных ММ, необходимо решить задачу разработки методов синтеза согласованно функционирующих систем идентификации целевых объектов с последующим формированием программных (целевых) сигналов управления НПА и рабочего инструмента ММ. При этом распознавание известных объектов работ должно выполняться на основе полученных от СТЗ облаков точек, а траектории движения рабочего инструмента ММ должны строиться с учетом взаимного расположения рабочей зоны ММ и поверхности объекта, которая может быть подвержена заиливанию, обрастаниям и деформации.

Кроме того, для выполнения контактных операций с идентифицированными объектами работ в режиме стабилизируемого зависания НПА с оказанием ММ желаемого силового воздействия на эти объекты необходима разработка нового метода позиционно-силового управления указанными динамическими объектами. Этот метод должен обеспечивать сохранение непрерывного силового контакта рабочего инструмента ММ с поверхностью объекта даже в условиях неизбежных смещений НПА относительно этой поверхности, не требуя при этом использования многокомпонентных силомоментных датчиков.

Метод идентификации целевых объектов и его практическая реализация

На основе подхода [16] разработан и экспериментально исследован метод, позволяющий с высокой точностью идентифицировать объекты, форма которых заранее известна. Чтобы выделить известный объект из облака точек, получаемого от СТЗ НПА, предложено использовать трехмерную модель этого объекта, предва-

рительно обработанную и преобразованную в облако точек, заданное точками K_q ($q = 1, m$) в системе координат (СК) $CX_C Y_C Z_C$, связанной с НПА. Для совмещения этих двух облаков применяется итеративный алгоритм Iterative Closest Point (ICP). Повышение точности совмещения облаков достигается путем их предварительного виртуального сближения на основе информации о местоположении реального объекта, выделяющегося из окружения. Кроме того, после первых итераций алгоритма ICP из облака точек K_q модели объекта удаляются точки, не видимые СТЗ из-за однонаправленного характера сканирования. Затем снова облака совмещаются алгоритмом ICP и определяются вектор $\vec{p}_k \in R^3$ и матрица $M_k \in R^{3 \times 3}$, описывающие линейное смещение и поворот облака точек K_q относительно осей СК $CX_C Y_C Z_C$. В результате удается рассчитать координаты точек D_q совмещенного облака модели объекта:

$$D_q = H_k + M_k \vec{n}_q + \vec{p}_k, \quad (1)$$

где $H_k = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m K_q$ – центр масс облака исходных точек K_q , $\vec{n}_q = (K_q - H_k)$ – вектор, определяющий положение любой точки K_q относительно точки H_k этого облака.

Чтобы проверить достоверность выполненного совмещения предлагается сравнивать две проекции одной проверочной траектории – проекцию на триангуляционную поверхность отсканированного объекта с проекцией этой траектории на триангуляционную поверхность совмещенной модели объекта. Для этого облако точек D_q триангулируется числом w треугольников с вершинами V_{h0}, V_{h1}, V_{h2} ($h = 1, w$). Направление проецирующих лучей задается единичным вектором $o = (H_D - S) / \|H_D - S\|$, соединяющим начало S СК СТЗ с центром масс $H_D = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m D_q$ облака точек модели объекта (рис. 1, а). Проверочная траектория должна лежать в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{o} , ее вид может быть выбран в зависимости от известных размеров и формы объекта. На рис. 1, а показан пример траектории, заданной в виде n лежащих на одной прямой точек c_i ($i = 1, n$). Пересечения лучей, выходящих из этих точек в направлении вектора \vec{o} , с обеими триангуляционными поверхностями образуют наборы точек C_i и C'_i (рис. 1, б):

$$C_i = c_i + \frac{\left((c_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0}) \right) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{\left(\vec{o} \times (V_{k2} - V_{k0}) \right) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{o},$$

$$C'_i = c_i + \frac{\left((c_i - V_{h0}) \times (V_{h1} - V_{h0}) \right) \cdot (V_{h2} - V_{h0})}{\left(\vec{o} \times (V_{h2} - V_{h0}) \right) \cdot (V_{h1} - V_{h0})} \vec{o}, \quad (2)$$

где (\times) – векторное произведение векторов.

Для проверки правильности выполненного совмещения предложен критерий – среднее квадратичное отклонение координат точек спроецированных траекторий

$$Q = \sqrt{\sum_{i=1}^n \|\vec{E}_i\|^2}, \quad \vec{E}_i = C_i - C'_i,$$

пороговое значение которого подбирается экспериментально и зависит от размеров объекта и разрешающей способности СТЗ.

Когда выполненная проверка показала, что облака точно совмещены, построенная на исходной модели объекта траектория движения рабочего инструмента ММ может быть перенесена на реальный объект. Эта траектория изначально задается или в аналитическом виде, или последовательностью точек X'_j (s – количество точек) с соответ-

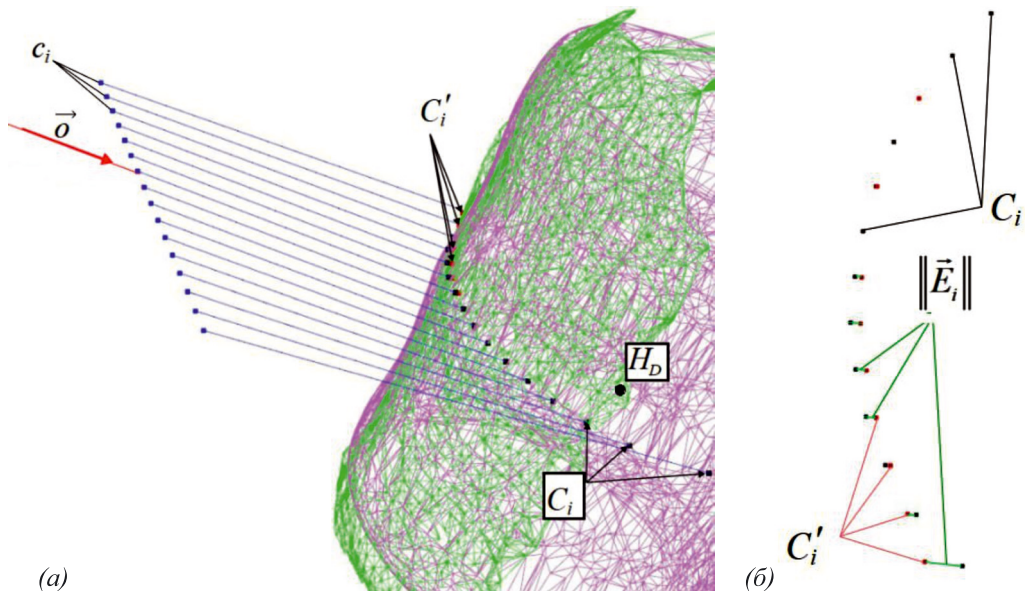


Рис. 1. Совмещение облаков точек C_i и C'_i (а) и точки пересечения проверочной траектории с триангуляционными поверхностями (б)

ствующими единичными векторами ориентации инструмента \vec{a}'_j и \vec{b}'_j . С учетом (1) желаемую траекторию, перенесенную на реальный объект, можно представить в виде:

$$X_j = H_D + M_{r2}M_{r1}(X'_j - H_K), \vec{a}_j = M_{r2}M_{r1}\vec{a}'_j, \vec{b}_j = M_{r2}M_{r1}\vec{b}'_j, \quad (3)$$

где X_j – точки, задающие желаемые положения рабочего инструмента на поверхности объекта с соответствующими векторами ориентации \vec{a}_j и \vec{b}_j , $H_K = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m K_q$ – центр масс облака исходных точек K_q модели объекта.

В случаях, когда точная форма объекта не может быть известна заранее или велика вероятность его деформации, обрастания или заиливания, желаемая траектория ММ (3) может быть дополнительно спроецирована на построенную с помощью СТЗ триангуляционную поверхность этого объекта. Для этого аналогично (2) выполняется прецирование точек X_j в положительном и отрицательном направлениях вектора o , поскольку эти точки могут находиться как снаружи, так и внутри триангуляционной поверхности объекта. В результате формируется последовательность точек T_j , которые будут лежать на поверхности реального объекта. Для плавного движения ММ по траектории последовательности точек X_j или T_j сглаживаются параметрическими В-сплайнами третьего порядка.

Проверка работоспособности метода выполнялась с использованием СТЗ, разработанной в ИПМТ ДВО РАН. Аппаратная часть этой СТЗ состоит из стереоскопической камеры Stereolabs Zed 2 с вычислительным модулем NVIDIA Jetson TX2 и дополнительными блоками освещения. Для функционирования в водной среде все элементы установлены в герметичный бокс. Система обработки сенсорной информации, идентификации и формирования траекторий ММ была реализована на языке программирования C++. Калибровка СТЗ в водной среде выполнена с использованием общедоступного метода на основе библиотеки OpenCV. В результате созданная СТЗ позволяет сканировать и распознавать подводные объекты на расстоянии от 30 см до 10 м, а низкая энергозатратность дает возможность использовать эту СТЗ на автономных НПА.

В ходе эксперимента на основе облаков точек сканируемой сцены (рис. 2, *a*), включающей различные объекты, успешно идентифицировался целевой объект – морская звезда (рис. 2, *б*). Для проверки правильности выполненного совмещения на объект проецировалась проверочная траектория в форме окружности, показанная на рис. 2, *б*. При этом ошибка определения расположения объекта не превышала 5 мм на расстоянии 1 м от СТЗ. Также успешно проведен эксперимент по идентификации в водной среде бочки (рис. 3, *a*) с последующим наложением на ее поверхность различных траекторий (рис. 3, *б*).

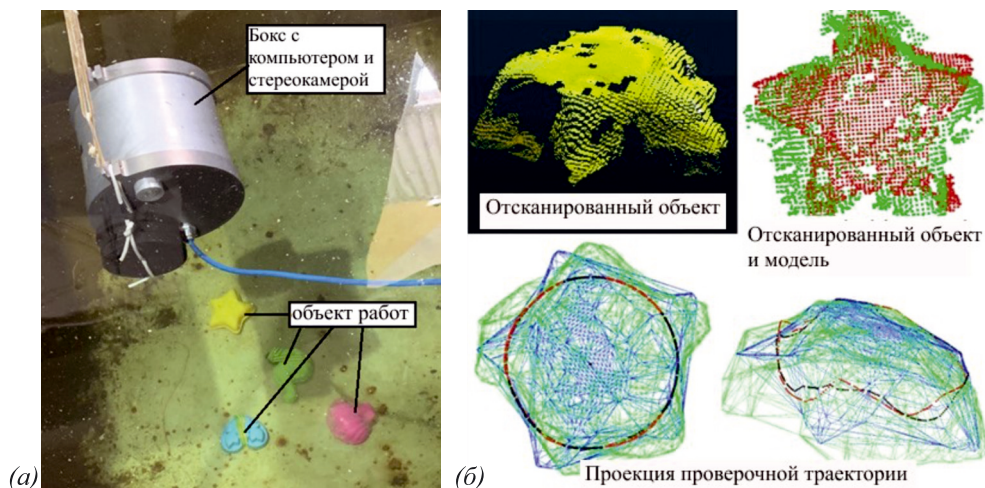


Рис. 2. Экспериментальная установка (*a*) и полученные с ее помощью результаты (*б*)

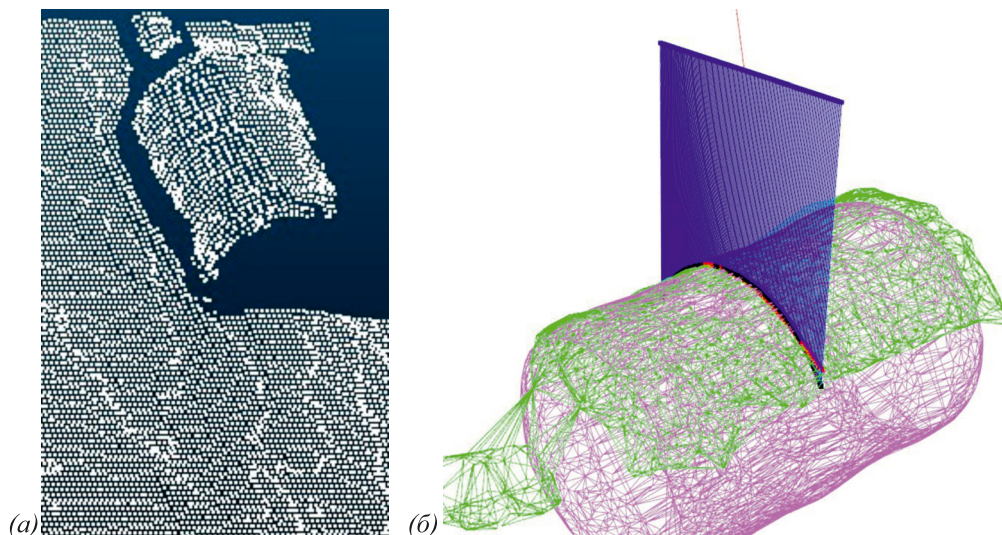


Рис. 3. Облако точек объекта (*a*), наложенная траектория (*б*)

Метод позиционно-силового управления НПА с ММ

Для выполнения в режиме стабилизируемого зависания НПА контактных операций с оказанием ММ желаемого силового воздействия на объект на основе подхода [17] разработан метод позиционно-силового управления, не требующий

использования многокомпонентных сило-моментных датчиков. Этот метод² состоит из трех этапов, реализуемых одновременно в реальном масштабе времени.

На первом этапе в процессе плавного сближения рабочего инструмента ММ с поверхностью объекта работ и далее при контактном движении по этой поверхности выполняется определение внешних моментов, действующих на выходные валы приводов во всех степенях подвижности ММ в результате указанного силового контакта. На основе вычисленных величин внешних моментов для конкретной кинематической схемы ММ рассчитываются величина и направление вектора силы, оказываемой инструментом ММ на объект работ в процессе выполнения контактной операции.

На втором этапе на приводы всех степеней подвижности ММ на основе информации о желаемом и реальном векторах силового воздействия подаются сигналы управления, реализующие дополнительные перемещения рабочего инструмента в направлении, обеспечивающем достижение желаемой величины силового воздействия этого инструмента на поверхность объекта работ. При появлении нежелательных линейных и угловых смещений НПА от исходного положения конфигурация ММ корректируется [16] таким образом, чтобы сохранялись заданные положение и ориентация рабочего инструмента относительно поверхности неподвижного объекта. В результате указанная двойная коррекция обеспечивает непрерывный контакт движущегося инструмента с поверхностью объекта даже в условиях неизбежных задержек в получении информации о линейных смещениях НПА относительно целевого объекта, а также ограниченной точности подсистемы стабилизации аппарата, замкнутой по его положению.

На третьем этапе на входы соответствующих движителей НПА подаются сигналы управления, компенсирующие динамические воздействия на этот аппарат со стороны ММ, перемещающегося в вязкой среде и оказывающего силовое воздействие на объект работ. Причем сигналы управления движителями НПА формируются в реальном масштабе времени на основе аналитических выражений, определяющих силу и момент, с которыми этот ММ действует на НПА. Для этого учитываются вычисляемые величина и направление вектора силы, оказываемой рабочим инструментом ММ на объект работ, эффекты взаимовлияния между всеми степенями подвижности ММ, а также гидростатические и гидродинамические силы сопротивления его движению, включая вязкие трения и присоединенные массы окружающей жидкости [18, 19]. В результате обеспечивается высокоточная стабилизация НПА в режиме его зависания вблизи или над объектом работ в процессе работы ММ. При этом создается необходимый упор в точке крепления ММ к НПА, позволяющий рабочему инструменту этого ММ оказывать желаемые силовые воздействия на поверхность объекта работ.

Необходимо отметить, что при выполнении наиболее ответственных операций движение рабочего инструмента по траектории должно начинаться после того, как будет достигнуто желаемое силовое воздействие этим инструментом на объект работ в начальной точке траектории.

Предложенный метод реализуется следующим образом. Чтобы стабилизироваться в желаемом пространственном положении над или вблизи объекта работ, НПА должен иметь схему компоновки движителей, обеспечивающую управление перемещениями аппарата по шести степеням свободы за счет создаваемых этими движителями тяг. Пример такой схемы компоновки движителей НПА, оснащен-

² Патент 2789510 Российская Федерация, МПК G 05 B 13/02, B 25 J 13/00, B 63 G 8/00. Способ позиционно-силового управления подводным аппаратом с многозвенным манипулятором для выполнения контактных манипуляционных операций с подводными объектами: № 2022128925: заявл. 09.11.2022; опубл. 06.02.2023 / Коноплин А. Ю., Красавин Н. А., Юрманов А. П., Пятавин П. А.; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИПМТ ДВО РАН. 13 с.: 1 ил.

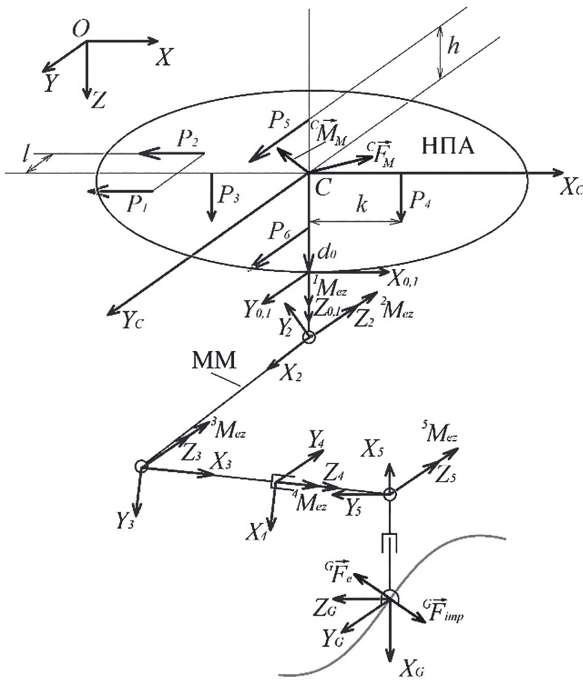


Рис. 4. НПА, выполняющий контактную операцию; направления воздействия векторов сил и моментов при контакте рабочего инструмента с поверхностью объекта работ

ствует внешний момент ${}^i M_{dz}$, направленный вдоль оси шарнира i . ${}^i M_{dz} = {}^i M_{wz} + {}^i M_{ez}$. Здесь ${}^i M_{wz}$ – момент, обусловленный эффектами взаимовлияния между всеми степенями подвижности ММ, а также гидростатическими и гидродинамическими силами сопротивления его движению, включая вязкие трения и присоединенные массы окружающей жидкости, ${}^i M_{ez}$ – момент, обусловленный влиянием силы реакции опоры поверхности объекта работ ${}^G \vec{F}_e \in R^3$, которая равна по величине и противоположна по направлению силе ${}^G \vec{F}_{imp} \in R^3$ воздействия рабочего инструмента на этот объект. На рис. 4 показаны перечисленные векторы сил и моментов, а также векторы силового ${}^C \vec{F}_M \in R^3$ и моментного ${}^C \vec{M}_M \in R^3$ воздействия на НПА со стороны работающего ММ; индексом G отмечены векторы, заданные в СК $X_G Y_G Z_G$, связанной с рабочим инструментом ММ; $OXYZ$ – абсолютная СК; $CX_C Y_C Z_C$ – связанная с НПА СК; $X_0 Y_0 Z_0$ – СК, связанная с основанием ММ; $X_{1...5} Y_{1...5} Z_{1...5}$ – СК, связанные с началами соответствующих звеньев ММ; $X_G Y_G Z_G$ – СК, связанная с инструментом ММ; $P_{1...6}$ – тяги, создаваемые двигателями НПА; h, l, k – геометрические параметры компоновки двигателей НПА; $d_0 \in R^3$ – вектор, определяющий положение основания ММ в СК $X_C Y_C Z_C$.

Как уже было отмечено выше, с каждым звеном ММ жестко связана правая СК с осями $X_i Y_i Z_i$. Величина ${}^i M_{dz}$ измеряется с помощью относительно простого однокомпонентного датчика или наблюдателя момента нагрузки привода [15]. При этом величины моментов ${}^i M_{wz}$ вычисляются с помощью алгоритма решения обратной задачи динамики (ОЗД) для подводного ММ [1]. Величина момента ${}^i M_{ez}$ вычисляется с помощью выражения ${}^i M_{ez} = {}^i M_{dz} - {}^i M_{wz}$.

Далее для конкретной кинематической схемы ММ на основе вычисленных величин внешних моментов ${}^i M_{ez}$, действующих на выходные валы приводов во всех

ного ММ, изображен на рис. 4. Чтобы обеспечить перемещение рабочего инструмента с заданной ориентацией в пределах рабочей зоны, ММ должен иметь не менее 6 степеней подвижности. В качестве примера рассмотрим изображенную на рис. 4 кинематическую схему ММ PUMA с 6 степенями подвижности, который закреплен под центром водоизмещения аппарата, что позволяет минимизировать динамические воздействия на НПА в процессе работы этого многозвенника. Однако для выполнения манипуляций с вертикальными конструкциями ММ может крепиться в стороне от вертикальной оси аппарата.

При движении рабочего инструмента подводного ММ по поверхности объекта работ на выходной вал редуктора привода i -й степени подвижности ММ ($i = 1, n, n$ – количество степеней подвижности ММ) дей-

степенях подвижности в результате силового контакта рабочего инструмента этого ММ с поверхностью объекта работ, определяются элементы действующего на инструмент ММ вектора силы ${}^G\vec{F}_e$. При этом для упрощения описания предлагаемого метода достаточно рассмотреть первые 4 степени подвижности (3 переносные и 1 ориентирующую) ММ типа PUMA (рис. 4).

Для принятой кинематической схемы подводного ММ с учетом его текущей конфигурации (рис. 4) вычисление упомянутого вектора осуществляется следующим образом. Очевидно, что при ${}^G\vec{F}_e \neq 0$ в шарнире четвертой степени подвижности ММ возникает дополнительный момент силы, вычисляемый с помощью рекуррентных соотношений [1]:

$${}^4\vec{M}_e = \vec{p}_4 \times \left({}^4{}_G A {}^G\vec{F}_e \right), \quad (4)$$

где $\vec{p}_i \in R^3$ – вектор, направленный вдоль продольной оси звена i и определяющий положение СК, связанной со звеном $i + 1$ в СК i -го звена; ${}^{i+1}{}_i A \in R^{3 \times 3}$ – матрица поворота векторов из СК, связанной со звеном $i + 1$, в СК, связанную с основанием i -го звена.

На выходной вал редуктора привода четвертой степени подвижности ММ будет действовать составляющая ${}^4M_{ez}$ момента ${}^4\vec{M}_e$, направленная вдоль оси вращения сочленения. Поэтому из выражения (4) нетрудно выразить составляющую ${}^G F_{ez}$ силы ${}^G\vec{F}_e$, направленную вдоль оси Z_G .

Действующие на рабочий инструмент ММ составляющие ${}^G F_{ex}$, ${}^G F_{ey}$ вектора ${}^G\vec{F}_e$ определяются аналогично на основе измеряемых значений моментов ${}^3M_{ez}$ и ${}^1M_{ez}$, возникающих в приводах третьей и первой степеней подвижности соответственно и обусловленных воздействием вектора ${}^G\vec{F}_e$ на упомянутый рабочий инструмент.

В результате для используемой кинематической схемы ММ вектор ${}^G\vec{F}_e$ с учетом направления осей СК, расположенных в степенях подвижности ММ, будет иметь вид:

$${}^G\vec{F}_e = \begin{bmatrix} {}^G F_{ex} \\ {}^G F_{ey} \\ {}^G F_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left({}^3M_{ez} - \frac{{}^4M_{ez}}{P_{4x}} (p_{3x}c_4 + p_{4x}) \right) / p_{3x}s_4 \\ {}^1M_{ez} / (p_{4x}c_{234} + p_{3x}c_{23} + p_{2x}c_2) \\ {}^4M_{ez} / p_{4x} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $c_{234} = \cos(q_2 + q_3 + q_4)$, $c_4 = \cos(q_4)$, $c_2 = \cos(q_2)$, $c_{23} = \cos(q_2 + q_3)$, $s_4 = \sin(q_4)$, $q_{2,3,4}$ – обобщенные координаты ММ.

Чтобы рабочий инструмент ММ воздействовал на поверхность объекта работ с желаемым усилием ${}^G\vec{F}_{imp}^* \in R^3$, необходимо подавать дополнительные управляющие сигналы на приводы его степеней подвижности, которые будут обеспечивать перемещение инструмента в направлении вектора ${}^G\vec{F}_f = {}^G\vec{F}_{imp}^* - {}^G\vec{F}_{imp}$, причем ${}^G\vec{F}_{imp} = -{}^G\vec{F}_e$. При этом величина k указанного дополнительного перемещения рабочего инструмента формируется ПИД-регулятором пропорционально длине (модулю) вектора ${}^G\vec{F}_f$ с учетом его направления. В зависимости от знака полученной разницы $\|{}^G\vec{F}_{imp}^*\| - \|{}^G\vec{F}_{imp}\|$ формируется величина k дополнительного смещения рабочего инструмента пропорционально величине полученной разницы либо в направлении к поверхности объекта, либо от нее. Таким образом обеспечивается непрерывное оказание заданного силового воздействия рабочим инструментом ММ на поверхность объекта.

Чтобы создать необходимый упор в точке крепления ММ к НПА, позволяющий рабочему инструменту этого ММ оказывать желаемые силовые воздействия на поверхность объекта работ, на входы соответствующих движителей НПА должны подаваться сигналы, которые будут компенсировать оказываемые на этот НПА со стороны ММ силовые и моментные воздействия.

Для создания в реальном масштабе времени дополнительных сигналов управления движителями НПА рассчитываются векторы силы ${}^C\vec{F}_M$ и момента ${}^C\vec{M}_M$, с которыми ММ воздействует на центр величины (водоизмещения) НПА (рис. 4). Эти векторы обусловлены величиной и направлением вектора силы ${}^G\vec{F}_e$ (5), оказываемой на рабочий инструмент ММ объектом работ, эффектами взаимовлияния между всеми степенями подвижности ММ, а также гидростатическими и гидродинамическими силами сопротивления движению звеньев, включая вязкие трения и присоединенные массы окружающей жидкости – векторы ${}^C\vec{F}_D \in R^3$ и ${}^C\vec{M}_D \in R^3$ соответственно. Расчет упомянутых динамических воздействий ${}^C\vec{F}_M$ и ${}^C\vec{M}_M$ с учетом вычисляемой величины ${}^G\vec{F}_e$ (5) осуществляется с помощью аналитических выражений, описывающих решение ОЗД подводного ММ [1]:

$${}^C\vec{F}_M = {}^C\vec{F}_D + {}^C_G A {}^G\vec{F}_e, \quad {}^C\vec{M}_M = {}^C\vec{M}_D + {}^C\vec{M}_e,$$

где ${}^C\vec{M}_e \in R^3$ – момент, вызванный действием силы ${}^G\vec{F}_e$; ${}^C_G A \in R^{3 \times 3}$ – матрица вращения СК, связанной с инструментом ММ, вокруг СК НПА.

Вычисленные воздействия компенсируются соответствующими тягами движителей НПА с помощью разомкнутого контура системы стабилизации [1]. В результате чего обеспечивается стабилизация НПА в режиме его зависания вблизи или над объектом работ в процессе работы установленного на нем ММ, при этом создается необходимый упор в точке крепления ММ к НПА, позволяющий рабочему инструменту этого ММ оказывать желаемые силовые воздействия на поверхность объекта работ.

При выполнении силовых операций даже с использованием системы стабилизации неизбежно возникновение небольших смещений НПА относительно объекта. В связи с этим траектория и ориентация инструмента ММ должны корректироваться [16] в режиме реального времени с учетом текущих линейных и угловых отклонений НПА от точки стабилизации. Скорректированные векторы положения ${}^O\vec{P}^* \in R^3$ и ориентации ${}^O\vec{X}_G^*$, ${}^O\vec{Y}_G^* \in R^3$ рабочего инструмента ММ в СК $CX_cY_cZ_c$ имеют вид:

$${}^C\vec{P}^* = R^T ({}^O\vec{P}^* - \vec{r}), \quad {}^C\vec{X}_G^* = R^T {}^O\vec{X}_G^*, \quad {}^C\vec{Y}_G^* = R^T {}^O\vec{Y}_G^*,$$

где $R \in R^{3 \times 3}$ – матрица поворота СК $CX_cY_cZ_c$ относительно СК $OXYZ$, $\vec{r} \in R^3$ – вектор линейного смещения НПА в СК $OXYZ$.

Результаты исследования особенностей функционирования системы, синтезированной на основе предложенных методов, и их обсуждение

Был проведен эксперимент по идентификации в водной среде бочки (рис. 3, б) с последующим наложением на ее поверхность двух траекторий, лежащих вдоль ее продольной и поперечной осей, имитирующих операцию очистки. После распознавания объекта на его реальную триангуляционную поверхность проецировалась траектория движения рабочего инструмента ММ. Сформированная траектория отправлялась в Matlab/Simulink для отработки динамической моделью ММ, установленного на НПА. При моделировании использовалась хорошо апроби-

рованная математическая модель НПА [1] с установленным ММ кинематической схемы PUMA, имеющей 6 степеней подвижности (3 переносные и 3 ориентирующие).

Параметры модели НПА и его ММ детально описаны в работах [16, 17]. Для этой модели была синтезирована система управления для автономного выполнения манипуляционных операций в режиме стабилизируемого зависания НПА [16], включающая в себя комбинированную систему стабилизации НПА [1], систему коррекции программных траекторий и ориентации рабочего инструмента ММ, а также разработанную систему позиционно-силового управления. Чтобы визуализировать движение ММ по поверхности объекта работ, получаемые в процессе моделирования данные от динамической модели НПА с ММ отправлялись из Matlab/Simulink в CoppeliaSim через протокол UDP. К этим данным относятся изменения реальных обобщенных координат ММ, а также линейные и угловые смещения НПА относительно исходной точки его стабилизации. Также в CoppeliaSim отправлялись данные от системы обработки сенсорной информации и формирования траекторий ММ, за счет чего достигалась наглядная визуализация выполнения технологической манипуляционной операции 3D моделью НПА с ММ (рис. 5, а).

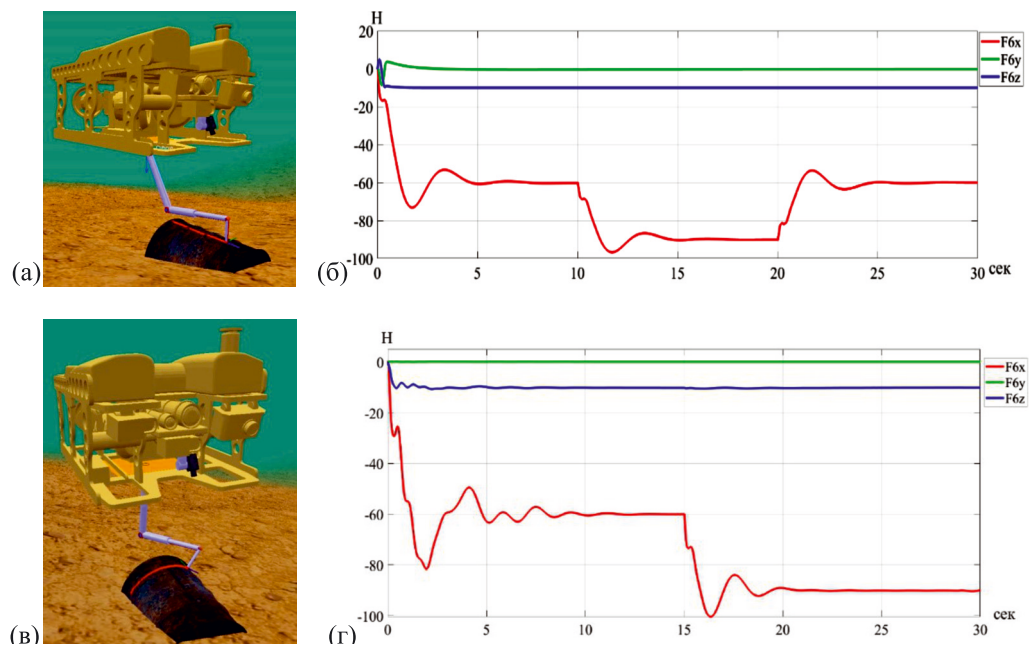


Рис. 5. ММ, выполняющий очистку объекта в продольной (а) и поперечной (в) плоскостях, и составляющие силы вектора, действующего на инструмент в процессе движения по прямой (б) и по окружности (г)

В первом случае при движении инструмента вдоль продольной оси отсканированного объекта (рис. 5, а) траектория движения включала три участка, на которых на поверхность объекта работ перпендикулярно траектории оказывалось заданное силовое воздействие в 60, 90 и 60 Н соответственно (рис. 5, б). Во втором случае при движении инструмента вдоль траектории, лежащей в поперечной плоскости (рис. 5, в), на объект работ оказывалось воздействие в 60 и 90 Н (рис. 5, г). В обоих случаях рабочий инструмента ММ двигался со скоростью 2 см/с вдоль сформированных траекторий, сохраняя заданную ориентацию перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Отклонение инструмента от желаемых траекторий не превышало 3 мм.

Из графиков, представленных на рис. 5, б, з, видно, что после завершения переходных процессов рабочий инструмент ММ воздействовал на поверхность объекта с заданными усилиями (рис. 5, б, з, красная кривая) на протяжении всей траектории движения. При этом на движущийся инструмент воздействовало также тангенциальное усилие (рис. 5, б, з, синяя кривая), характеризующееся силой трения, возникающей между инструментом и поверхностью объекта работ, и действующее против направления движения инструмента.

Результаты проведенных экспериментов по идентификации подводных объектов позволяют сделать выводы, что разработанные СТЗ и метод обработки сенсорной информации позволяют определять местоположение подводных объектов с погрешностью до 1% расстояния от СТЗ до целевого объекта. За счет дополнительных итераций алгоритма идентификации и проецирования проверочных траекторий удалось с высокой точностью определять деформированные участки сканируемого объекта. Кроме того, созданная СТЗ показала высокую эффективность использования стереокамеры для получения облаков точек в водной среде без существенных трудностей в ее реализации.

Также необходимо отметить, что исследования предложенного метода позиционно-силового управления НПА с ММ подтвердили возможность воздействия манипулятором на объекты работ с заданной величиной и направлением вектора силы в режиме стабилизируемого зависания НПА. Несмотря на то, что исследования проводились с использованием типовой кинематической схемы ММ типа PUMA, разработанный метод применим для любых других кинематических схем ММ. Влияние силы трения, вызванного движением рабочего инструмента по поверхностям объекта, компенсируется адаптивными корректирующими устройствами приводов ММ. В результате обеспечивается требуемая точность движения инструмента по заданным траекториям, что было продемонстрировано в процессе численного моделирования.

Поддерживание непрерывного контакта (исключение биений) рабочего инструмента ММ с поверхностями объектов работ достигалось благодаря предложенной двойной коррекции положения и ориентации этого инструмента. При этом компенсировались ошибки формирования траекторий ММ по поверхностям подводных объектов, обусловленные ограниченной точностью калибровки СТЗ и изменяющимися параметрами водной среды. Указанная коррекция реализована с учетом информации о текущих линейных и угловых смещениях НПА от исходного положения, а также информации о текущих величине и направлении вектора силового воздействия, оказываемого рабочим инструментом на объект.

Заключение

На основе разработанных методов синтезированы системы управления НПА, позволяющие точно идентифицировать подводные объекты и выполнять с ними манипуляционные работы в автоматическом режиме. Для упрощения внедрения в реальные образцы НПА предложенные системы были реализованы в виде программно-аппаратных средств. Работоспособность и высокое качество работы отдельных элементов этих систем были подтверждены результатами численного и полунатурного моделирования, а также натурных морских испытаний. Ожидается, что использование созданных разработок позволит не только добиться качественного решения существующих на сегодняшний день манипуляционных задач в автономном режиме, но и значительно расширить круг работ, выполняемых НПА. Эти разработки легли в основу создания в ИПМТ ДВО РАН экспериментальных образцов подводного ММ [20] и СТЗ, которыми



Рис. 6. НПА ММТ-3500, оснащенный ММ

оснащается автономный НПА ММТ-3500 [21] (см. рис. 6). Дальнейшие исследования будут направлены на проведение полномасштабных морских экспериментов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А. Особенности синтеза высокоточных систем управления скоростным движением и стабилизацией подводных аппаратов в пространстве. Владивосток: Дальнаука, 2016. 400 с.
2. Manley J. E., Halpin S., Radford N., Ondler M. Aquanaut: A new tool for subsea inspection and intervention // OCEANS2018 MTS/IEEE Charleston. Charleston, SC, USA, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604508.
3. Marani G., Choi S. K., Yuh J. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs // Ocean Engineering. 2009. Vol. 36, N1. P. 15–23. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2008.08.007.
4. Cao H., Chen X., He Y., Zhao X. Dynamic adaptive hybrid impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environments // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 83162–83174. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2924696.
5. Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous underwater panel operation by GIRONA500 UVMS: A practical approach to autonomous underwater manipulation // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA. 2015. P. 529–536. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139230.
6. Казанин А. Г., Казанин Г. С., Иванов Г. И., Саркисян М. В. Инновационные технологии при выполнении инженерно-геологических работ на арктическом шельфе России // Научный журнал российского газового общества. 2016. № 4. С. 25–30.
7. Sivčev S., Rossi M., Coleman J., Dooly G., Omerdić E., Toal D. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs // Control Engineering Practice. 2018. Vol. 74. P. 153–167. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.03.005.
8. Youakim D., Dornbush A., Likhachev M., Ridao P. Motion planning for an underwater mobile manipulator by exploiting loose coupling // 2018 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS). Madrid, Spain, 2018. P. 7164–7171. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593604.
9. Yu L., Yang E., Ren P. et al. Inspection robots in oil and gas industry: A review of current solutions and future trends // 2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC). Lancaster, United Kingdom, 2019. P. 1–6. DOI: 10.23919/IconAC.2019.8895089.
10. Antonelli G. Underwater robots. 3rd ed. Switzerland: Springer international publishing, 2014. 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-02877-4. (Springer tracts in advanced robotics; Vol. 96).

11. Penalver A., Perez J., Fernandez J.J., Sales J., Sanz P.J., Garcia J.C., Fornas D., Marin R. Visually-guided manipulation techniques for robotic autonomous underwater panel interventions // *Annual Reviews in Control*. 2015. Vol. 40. P. 201–211. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2015.09.012.
12. Guerneve T., Subr K., Petillot Y. Three-dimensional reconstruction of underwater objects using wide-aperture imaging SONAR // *Journal of Field Robotics*. 2018. Vol. 35, N. 6. P. 890–905. DOI: doi.org/10.1002/rob.21783.
13. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. № 8. С. 543–549. DOI: 10.17587/mau.18.543–549.
14. Борейко А. А., Воронцов А. В., Кушнерик А. А., Щербатюк А. Ф. Алгоритмы обработки видеоизображений для решения некоторых задач управления и навигации автономных необитаемых подводных аппаратов // *Подводные исследования и робототехника*. 2010. № 1. С. 29–39.
15. Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Губанков А. С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. М.: Наука, 2018. 232 с.
16. Коноплин А. Ю., Юрманов А. П., Красавин Н. А., Пятавин П. А. Разработка, программная реализация и исследование системы управления многозвенными манипуляторами необитаемых подводных аппаратов при динамическом позиционировании над морскими объектами // *Подводные исследования и робототехника*. 2021. № 3. С. 4–15. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_01.
17. Коноплин А. Ю., Красавин Н. А., Юрманов А. П., Пятавин П. А., Кацурун А. А. Система позиционно-силового управления подводными аппаратами с многозвенными манипуляторами для выполнения контактных манипуляционных операций // *Подводные исследования и робототехника*. 2022. № 4. С. 40–52. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_04.
18. Leabourne K.N., Rock S.M. Model development of an underwater manipulator for coordinated arm-vehicle control // *OCEANS'98 Conference Proceedings*. Vol. 2, Nice, France. 1998. P. 941–946. DOI: 10.1109/OCEANS.1998.724376.
19. McLain T.W., Rock S.M., Lee M.J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system // *Autonomous Robots*. 1996. Vol. 3, N2/3. P. 213–232. DOI: 10.1007/BF00141156.
20. Kostenko V.V., Bykanova A. Yu., Tolstogonov A. Yu. Developing the multilink manipulator system for an autonomous underwater vehicle // *2022 International conference on ocean studies (ICOS)*. Vladivostok, Russian Federation, 2022. P. 45–50. DOI: 10.1109/ICOS55803.2022.10033371.
21. Бабаев Р. А., Боровик А. И., Ваулин Ю. В., Елисеенко Г. Д., Михайлов Д. Н., Найденко Н. А. Применение АНПА ММТ-3500 для научных исследований в Атлантическом секторе Антарктики // *Подводные исследования и робототехника*. 2022. № 3. С. 15–32. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_02.

REFERENCES

1. Filaretov V.F., Yuhimec D.A. Osobennosti sinteza vysokotochnykh sistem upravleniya skorostnym dvizheniem i stabilizatsiei podvodnykh apparatov v prostranstve = [Features of synthesis of high-precision control systems for high-speed movement and stabilization of underwater vehicles in space]. Vladivostok: Dal'nauka; 2016. 400 p. (In Russ.).
2. Manley J.E., Halpin S., Radford N., Ondler M. Aquanaut: A new tool for subsea inspection and intervention. In: *OCEANS2018 MTS/IEEE Charleston*. Charleston, SC, USA; 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604508.
3. Marani G., Choi S.K., Yuh J. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs. *Ocean Engineering*. 2009;36(1):15–23. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2008.08.007.
4. Cao H., Chen X., He Y., Zhao X. Dynamic Adaptive Hybrid Impedance Control for Dynamic Contact Force Tracking in Uncertain Environments. *IEEE Access*. 2019; 7:83162–83174. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2924696.
5. Cieslak P., Ridao P., Giergiel M. Autonomous Underwater Panel Operation by GIRONA500 UVMS: A Practical Approach to Autonomous Underwater Manipulation. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Seattle, WA, USA; 2015. P. 529–536. DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139230.
6. Kazanin A.G., Kazanin G.S., Ivanov G.I., Sarkisyan M.V. Innovatsionnye tekhnologii pri vypolnenii inzhenerno-geologicheskikh rabot na arkticheskom shel'fe Rossii = [Innovative technologies in the performance of engineering and geological works on the Arctic shelf of Russia]. *Nauchnyi zhurnal rossiiskogo gazovogo obshchestva*. 2016;(4):25–30. (In Russ.).
7. Sivčev S., Rossi M., Coleman J., Dooly G., Omerdić E., Toal D. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs. *Control Engineering Practice*. 2018; 74:153–167. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.03.005.

8. Youakim D., Dornbush A., Likhachev M., Ridao P. Motion planning for an underwater mobile manipulator by exploiting loose coupling. In: *2018 IEEE/RSJ International conference on intelligent robots and systems (IROS)*. Madrid, Spain; 2018. P. 7164–7171. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593604.
9. Yu L., Yang E., Ren P. et al. Inspection robots in oil and gas industry: a review of current solutions and future trends. In: *2019 25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. Lancaster, United Kingdom; 2019. P. 1–6. DOI: 10.23919/IconAC.2019.8895089.
10. Antonelli G. Underwater robots. 3rd ed. In: *Springer tracts in advanced robotics*. Vol. 96. Switzerland: Springer International Publishing; 2014. 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-02877-4.
11. Penalver A., Perez J., Fernandez J.J., Sales J., Sanz P.J., Garcia J.C., Fornas D., Marin R. Visually-guided manipulation techniques for robotic autonomous underwater panel interventions. *Annual Reviews in Control*. 2015; 40:201–211. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2015.09.012.
12. Guerneve T., Subr K., Petillot Y. Three-dimensional reconstruction of underwater objects using wide-aperture imaging SONAR. *Journal of Field Robotics*. 2018;35(6):890–905. DOI: doi.org/10.1002/rob.21783.
13. Filaretov V.F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. Sistema dlya avtomaticheskogo vypolneniya manipulyatsionnykh operatsii s pomoshch'yu podvodnogo robota = [A system for automatic manipulation operations with the help of an underwater robot]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2017;(8):543–549. (In Russ.). DOI: 10.17587/mau.18.543-549.
14. Boreyko A.A., Vorontsov A.V., Kushnerik A.A., Shcherbatyuk A.F. Algoritmy obrabotki videoizobrazhenii dlya resheniya nekotorykh zadach upravleniya i navigatsii avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov = [Video image processing algorithms for solving some control and navigation tasks of autonomous uninhabited underwater vehicles]. *Underwater investigations and robotics*. 2010;(1):29–39. (In Russ.).
15. Filaretov V.F., Zuev A.V., Gubankov A.S. Upravlenie manipulyatorami pri vypolnenii razlichnykh tekhnologicheskikh operatsii = [Manipulator control when performing various technological operations]. Moscow: Nauka; 2018. 232 p. (In Russ.).
16. Konoplin A. Yu., Yurmanov A.P., Krasavin N.A., Piatavin P.A. Razrabotka, programmaya realizatsiya i issledovanie sistemy upravleniya mnogozvennymi manipulyatorami neobitaemykh podvodnykh apparatov pri dinamicheskom pozitsionirovanii nad morskimi ob"ektami = [Development, software implementation, and research of multilink manipulator control system for UUV in dynamic positioning mode above underwater objects]. *Underwater investigations and robotics*. 2021;(3):4–15. (In Russ.). DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_01.
17. Konoplin A. Yu., Yurmanov A.P., Krasavin N.A., Piatavin P.A., Katsurin A.A. Sistema pozitsionno-silovogo upravleniya podvodnymi apparatami s mnogozvennymi manipulyatorami dlya vypolneniya kontaktnykh manipulyatsionnykh operatsii = [System of position/force control of underwater vehicles with multi-link manipulators for performing contact manipulation operations]. *Underwater investigations and robotics*. 2022;(4):40–52. (In Russ.). DOI: 10.37102/1992-4429_2022_42_04_04.
18. Leabourne K.N., Rock S.M. Model development of an underwater manipulator for coordinated arm-vehicle control. In: *OCEANS '98 Conference Proceedings. Vol. 2*. Nice, France; 1998. P. 941–946. DOI: 10.1109/OCEANS.1998.724376.
19. McLain T.W., Rock S.M., Lee M.J. Experiments in the coordinated control of an underwater arm/vehicle system. *Autonomous Robots*. 1996;3(2–3):213–232. DOI:10.1007/BF00141156.
20. Kostenko V.V., Bykanova A. Yu., Tolstonogov A. Yu. Developing the multilink manipulator system for an autonomous underwater vehicle. In: *2022 International Conference on Ocean Studies (ICOS)*. Vladivostok, Russian Federation; 2022. P. 45–50. DOI: 10.1109/ICOS55803.2022.10033371.
21. Babaev R. A., Borovik A. I., Vaulin Yu.V., Eliseenko G. D., Mikhailov D. N., Naidenko N. A. Primenenie ANPA MMT-3500 dlya nauchnykh issledovaniy v Atlanticheskoy sektore Antarktiki = [Application of AUV MMT-3500 for scientific research in the Atlantic sector of Antarctica]. *Underwater investigations and robotics*. 2022;(3):15–32. (In Russ.). DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_02.