DOI: 10.25808/24094609.2019.27.1.004

# ПОДХОД К ВЫПОЛНЕНИЮ АНПА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОДВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

**А.** Ю. Коноплин<sup>1,2</sup>, **Н.** Ю. Коноплин<sup>1,3</sup>, **Б.** В. Шувалов<sup>1,2</sup>

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Дальневосточный федеральный университет<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН<sup>3</sup>

Рассмотрен новый подход к решению исследовательских и технологических манипуляционных задач с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащаемых многозвенными манипуляторами (ММ). Разработанный подход предполагает построение математических моделей объектов работ с помощью облаков точек, получаемых от бортовых гидроакустических многолучевых 3D-сонаров или систем технического зрения. На основе полученных моделей автоматически формируются целевые точки и сложные пространственные траектории рабочих органов подводных ММ. При этом учитываются требования к выполнению конкретных манипуляционных операций. Кроме того, для определения местоположения и пространственной ориентации известных подводных объектов предлагается использовать их трехмерные модели, подвергающиеся дополнительной обработке и преобразованиям в облака точек. Эти облака совмещаются с облаками точек, принадлежащих реальному подводному объекту. На основе разработанного подхода создано программное обеспечение, позволяющее строить модели поверхности подводных объектов и рассчитывать пространственные траектории движения рабочих органов ММ, установленных на АНПА.

### введение

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) все чаще оснащаются подводными многозвенными манипуляторами (ММ), предназначенными для выполнения исследовательских и технологических операций. Решению различных манипуляционных задач в автономных условиях способствуют уже созданные системы навигации и управления пространственными перемещениями АНПА [1–3], позволяющие этим аппаратам с требуемой точностью выходить в зону работ, а также системы и алгоритмы [4–6], обеспечивающие обнаружение заданных подводных объектов, выделяющихся из окружения, с помощью бортовых сонаров.

В процессе сближения АНПА с грунтом или обнаруженным объектом известный алгоритм [7] позволяет оценивать сложность рельефа морского дна в зоне работ и принимать решения о пригодности указанного рельефа для безаварийного выполнения поставленных манипуляционных задач. Указанный алгоритм определяет расположение и ориентацию донной поверхности относительно АНПА с помощью доплеровского лага и обеспечивает безопасный подход к объекту работ, позволяя аппарату занимать наиболее удобное положение для выполнения манипуляционной операции.

Для удержания АНПА вблизи объектов работ без посадки на грунт, приводящей к взмучиванию донных отложений, и без механической фиксации на этих объектах созданы высокоточные системы автоматической стабилизации АНПА в режиме зависания [8–10]. Используя алгоритмы распознавания последовательности цифровых фотоизображений донного объекта, получаемых от видеосистемы АНПА, система [8] позволяет удерживать аппарат в заданной точке пространства даже при наличии

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (423) 2226416. E-mail: konoplin@marine.febras.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 690000, Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: +7 (423) 2434472. E-mail: shuvalov.bv@gmail.com

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> 690041, Владивосток, ул. Пальчевского, 17. Тел.: +7 (423) 2310905. E-mail: konoplin.nikita@gmil.com

неизвестных подводных течений. При этом комбинированная система [9, 10] обеспечивает высокоточную компенсацию с помощью движителей АНПА, рассчитываемых в реальном масштабе времени силовых и моментных воздействий на него со стороны работающего MM.

В работе [11] предложен подход к выполнению АНПА простейших исследовательских манипуляционных операций взятия проб грунта и образцов геологических пород. Этот подход позволяет формировать пространственные траектории движения рабочего органа подводного ММ на основе непрерывно вычисляемых коэффициентов уравнения плоскости, приближенно описывающей поверхность дна. При этом учитывается форма рабочей зоны ММ, в которой пробоотборник может погрузиться в грунт с заданным углом к его поверхности. Однако указанный подход применим только в случаях, когда относительно ровная поверхность морского дна может быть аппроксимирована усредненной плоскостью на основе измерений доплеровского лага, определяющего расстояния от места его крепления на аппарате до дна вдоль всех осей антенн.

Современные АНПА, оснащенные ММ, могут использоваться для выполнения более сложных операций с подводными поверхностями, например для взятия поверхностного слоя грунта грунтоотборным боксом или бесконтактной очистки протяженных конструкций от заиливания и обрастаний. В таких случаях траектории рабочих органов ММ должны формироваться с использованием информации о взаимном расположении АНПА и непрерывно уточняемой модели поверхности морского дна или объекта работ, которая должна быть построена на основе данных, получаемых от бортовых сонаров или систем технического зрения этого АНПА. При этом должны учитываться кинематические особенности ММ и требования к выполнению конкретных манипуляционных операций.

Если требуется выполнять работы с подводным объектом, форма которого хорошо известна, то желаемые пространственные траектории движения рабочего органа ММ по поверхности этого объекта могут быть сформированы заранее. Заданные траектории необходимо спроецировать (наложить) на реальный объект, а для этого требуется точно определить его местоположение и пространственную ориентацию относительно АНПА. В настоящее время активно используются системы [4–6], позволяющие вычислять расстояние от АНПА до обнаруженного подводного объекта на основе обработки информации, получаемой от гидролокаторов бокового обзора. Также существуют системы распознавания видеоизображений [12], позволяющие определять форму и расположение объекта работ на видеокадре. Однако этой информации недостаточно для точного наложения желаемых траекторий ММ на подводный объект. В работах [13, 14] применяются сложные алгоритмы обработки видеоизображений и используются специальные маркеры, которые заранее закрепляются на подводном объекте и позволяют определить его пространственную ориентацию. Очевидно, что необходимость установки маркеров сильно затрудняет практическое использование этих методов.

В результате из-за особенностей и недостатков известных подходов и методов до сих пор сдерживается использование АНПА для выполнения распространенных подводных манипуляционных операций. Для успешного решения этой проблемы в статье ставятся задачи разработки и программной реализации нового подхода к выполнению АНПА, оснащенными MM, исследовательских и технологических манипуляционных операций с различными подводными объектами.

#### 1. Формирование траекторий движения рабочего органа ММ на поверхности морского дна или объекта работ

При выполнении исследовательских манипуляционных операций на океанских глубинах [15, 16], как правило, заранее определяется место отбора проб, после чего сближение АНПА с донной поверхностью в желаемой зоне работ должно осуществляться с помощью известных алгоритмов [1, 7]. Для выполнения операций с поверхностями дна или объектами работ необходимо использовать многолучевые гидроакустические 3D-сонары [17, 18], позволяющие с высокой точностью формировать облака точек, принадлежащих указанным поверхностям дна в зоне работ АНПА. Эти облака точек задаются в прямоугольной системе координат (СК) Охуг, жестко связанной с корпусом АНПА, где x, y, z – оси связанной СК, начало которой О расположено в центре величины (водоизмещения) АНПА, ось х совпадает с горизонтальной продольной осью АНПА, ось z – с его вертикальной осью, а ось у составляет с ними правую тройку. С помощью полученных облаков и известных методов [19, 20] строится триангуляционная модель (рис. 1), представляющая собой множество треугольных пластин, сшитых между собой. Каждый *k*-й треугольник в триангуляции задается в СК Оху<u>г</u> координатами трех вершин  $V_{k0}$ ,  $V_{k1}$ ,  $V_{k2} \in \mathbb{R}^3$ , где k = 1, g, g – количество треугольников.



Рис. 1. Триангуляционная модель поверхности дна

Для формирования траектории движения рабочего органа ММ в СК Охуг заранее задаются s точек  $B_i \in R^3$   $(i = \overline{1, s})$ , принадлежащих рабочей зоне ММ и лежащих в плоскости, параллельной плоскости Оху. Причем для выполнения простых операций, например отбора осадочного слоя грунта, достаточно задать только две точки  $B_i$ , определяющие начало и конец перемещения пробоотборника вдоль поверхности дна. Для очистки поверхности объекта работ от заиливания или обрастаний, а также других операций, требующих перемещения рабочего органа ММ по сложным пространственным траекториям, может задаваться любое количество s точек  $B_i$ , достаточное для описания этих траекторий.

Чтобы спроецировать желаемую траекторию на построенную триангуляционную поверхность, необходимо найти точки пересечения с этой поверхностью лучей, выходящих из точек  $B_i$  в направлении, противоположном направлению единичного вектора  $\vec{z} \in \mathbb{R}^3$ , параллельного оси z CK Oxyz:

$$A_i = B_i - t_i \vec{z}, \tag{1}$$

где  $t_i$  – параметр, изменяющийся в пределах  $[0, \infty)$ .

Для нахождения координат каждой целевой точки  $A_i$  вначале необходимо определить, какой из всех g треугольников триангуляционной модели пересекается лучом (1). Для этого используется алгоритм Моллера–Трумбора [21], который на основе информации о координатах точки  $B_i$ , элементах вектора  $\vec{z}$ , а также координатах вершин  $V_{k0}$ ,  $V_{k1}$ ,  $V_{k2}$  всех g треугольников позволяет определить k-й треугольник, через который проходит луч (1). При этом координаты точки  $A_i$  в указанной СК относительно вершин k-го треугольника в векторной форме могут быть определены в виде:

$$A_{ik} = w_{ik}V_{k0} + u_{ik}V_{k1} + v_{ik}V_{k2} , \qquad (2)$$

где  $u_{ik}$ ,  $v_{ik}$ ,  $w_{ik}$  – барицентрические координаты

точки  $A_i$  относительно вершин *k*-го треугольника  $(u_{ik} + v_{ik} + w_{ik} = 1).$ 

Выразив  $w_{ik} = 1 - (u_{ik} + v_{ik})$  и подставив уравнение луча (1) в выражение (2), получим систему уравнений относительно параметров  $t_{ik}$ ,  $u_{ik}$ ,  $v_{ik}$ :

$$B_i - t_{ik}\vec{z} = (1 - (u_{ik} + v_{ik}))V_{k0} + u_{ik}V_{k1} + v_{ik}V_{k2},$$

которая может быть записана в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \vec{z} & V_{k1} - V_{k0} & V_{k2} - V_{k0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{ik} \\ u_{ik} \\ v_{ik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i - V_{k0} \end{bmatrix}.$$
(3)

Значения параметров  $t_{ik}$ ,  $u_{ik}$ ,  $v_{ik}$  находятся путем решения системы уравнений (3) [21]:

$$\begin{bmatrix} t_{ik} \\ u_{ik} \\ v_{ik} \end{bmatrix} = \frac{1}{((-\vec{z}) \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \cdot \begin{bmatrix} ((B_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0}) \\ ((-\vec{z}) \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (B_i - V_{k0}) \\ ((B_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (-\vec{z}) \end{bmatrix},$$
(4)

где (·) – скалярное произведение векторов; (×) – векторное произведение векторов.

В результате треугольник k с вершинами  $V_{k0}$ ,  $V_{k1}$  и  $V_{k2}$ , который пересекает луч (1), находится из условий [21]:

$$0 \le u_{ik} \le 1,$$
  

$$0 \le v_{ik} \le 1,$$
  

$$u_{ik} + v_{ik} \le 1,$$

а координаты точки  $A_i$  определяются подстановкой найденного параметра  $t_{ik}$  из выражения (4) в уравнение (1):

$$A_{i} = B_{i} - \frac{((B_{i} - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{((-\vec{z}) \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{z}.$$

Место зависания и автоматической стабилизации АНПА над дном должно быть достаточно близко к дну, чтобы рабочая зона ММ позволяла ему правильно выполнить операцию. В то же время аппарат должен находиться на безопасном расстоянии от поверхности дна, чтобы избежать столкновений с грунтом и не взмучивать придонный слой вращающимися винтами движителей. Поэтому АНПА, сохраняя требуемую пространственную ориентацию, должен заглубляться до тех пор, пока все вычисляемые точки  $A_i$  будут располагаться в пределах рабочей зоны ММ. После заглубления АНПА должен быть застабилизирован в режиме зависания [8–10]. Для последующего построения траектории движения рабочего органа ММ, проходящей через все полученные точки  $A_i$ , эта траектория представляется в виде последовательности разрезов триангуляционной поверхности, которые являются вертикальными профилями частей этой поверхности между соседними целевыми точками. Указанные профили можно представить в виде множества точек пересечения ребер треугольников триангуляции и плоскости, образованной вектором  $\overline{A_i A_{i+1}}$ , соединяющим соседние целевые точки, и единичным вектором  $\vec{z}$  (см. рис. 1).

Для построения траектории движения рабочего органа ММ, проходящей через точки пересечения треугольников с плоскостью, образованной векторами  $\overline{A_i A_{i+1}}$  и  $\vec{z}$ , используется метод [20]. Указанный метод позволяет сформировать последовательность точек Т<sub>i</sub>, расположенных между соседними целевыми точками  $A_i$  и  $A_{i+1}$ , где j – порядковый номер точки в последовательности перемещения рабочего органа ММ. Каждой точке Т, соответствуют единичные векторы  $\vec{a}_i$  и  $\vec{n}_i$ , определяющие желаемую ориентацию рабочего органа ММ при переходе между соседними точками траектории (рис. 2). В результате полученная последовательность точек Т<sub>i</sub> и соответствующих им векторов  $\vec{a}_i$  и  $\vec{n}_i$  формирует траекторию движения рабочего органа ММ, позволяющую выполнить требуемую манипуляционную операцию с поверхностью дна или объектом работ. Причем для плавного перемещения ММ полученная траектория движения его рабочего органа может быть сглажена В-сплайнами с помощью алгоритма [22], который также реализует возможность управления скоростью этого движения.

Разработанный метод формирования траекторий ММ реализован на языке программирования С++. Входными данными для созданной программы является множество принадлежащих поверхности дна точек, получаемых с помощью гидроакустических сонаров АНПА и определяемых в трехмерном пространстве. Это множество загружается в программу в виде текстового файла. В эту же программу заносятся координаты точек  $B_i$  и элементы вектора  $\vec{z}$ .

Разработанная программа строит триангуляционную модель донной поверхности (см. рис. 2), используя алгоритм [23], реализованный в программной библиотеке Point Cloud Library (PCL) [19]. После задания точек  $B_i$  программа рассчитывает координаты целевых точек  $A_i$ , а также формирует последовательность точек  $T_j$  и соответствующих им векторов  $\vec{a}_j$  и  $\vec{n}_j$  рабочего органа ММ. Визуализация результатов работы созданной программы выполнялась с использованием программного продукта 3DS Мах и графического программного пакета ParaView.

#### 2. Формирование траекторий ММ при выполнении операций с подводными объектами, имеющими заранее известную форму

Чтобы выделить некоторый известный объект (рис. 3) из облака точек, получаемого от сонара АНПА, необходимо использовать трехмерную модель этого объекта, предварительно обработанную и преобразованную в облако точек, заданное в СК Охуг.

Это облако, состоящее из *m* точек  $C_q \in R^3$   $(q = \overline{1, m})$ , нужно совместить с облаком, принадлежащим реальному объекту, для этого применяется итеративный алгоритм Iterative Closest Point (ICP) [24].

Поскольку в алгоритме ICP связка точек двух облаков осуществляется по критерию ближайшего соседа [24], на качество его работы сильно влияет изначальное взаиморасположение этих облаков. Поэтому для успешного совмещения указанных обла-



*Рис.* 2. Триангуляционная модель поверхности дна и сформированная траектория движения рабочего органа ММ



*Рис.* 3. Модели поверхности дна и объекта работ

ков необходимо выполнить их предварительное виртуальное сближение. Известные системы [13, 14] с помощью гидролокаторов бокового обзора позволяют обнаружить подводный объект, выделяющийся из окружения, и определить его координаты в СК Охуг. На основе этой информации величина и направление смещения облака точек модели объекта в СК Охуг могут быть определены вектором  $\vec{p}_1 \in R^3$  (см. рис. 4). В результате этого виртуального смещения облако точек модели объекта, заданное в СК Охуг точками  $P_q = (C_q + \vec{p}_1)$ , приближается к облаку точек, принадлежащих реальному подводному объекту (см. рис. 4).

После предварительного сближения эти облака необходимо совместить, используя итеративный алгоритм ІСР, причем количество итераций определяется требованиями к точности совмещения облаков. Для этого предлагается использовать программную реализацию алгоритма ICP в открытой библиотеке PCL [25], которая выполняет оценку точности совмещения облаков методом наименьших квадратов для ближайших точек этих облаков на каждой итерации алгоритма. Итерации алгоритма прекращаются, когда точность совмещения облаков начинает удовлетворять заданным требованиям. Если с ростом числа итераций точность совмещения облаков уменьшается или не изменяется, то принимается решение о прекращении работы алгоритма ICP и выполнении повторного сканирования объекта.

В случае успешного совмещения указанных облаков точек (рис. 5) стандартными средствами библиотеки PCL определяются вектор  $\vec{p}_1 \in R^3$  и матрица  $M_r \in R^{3x3}$ , соответственно описывающие линейное смещение и поворот облака точек модели относительно осей СК Охуг, необходимые для совмещения облаков. То есть для любой точки  $P_q$ , принадлежащей облаку точек модели объекта работ, можно получить точку  $G_q$ , определяющую положение точки  $P_q$  после совмещения двух облаков:

$$G_{q} = H + M_{r} \vec{l}_{q} + \vec{p}_{2}, \qquad (5)$$

где  $H = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^{m} P_q$  – средняя точка (центр масс) облака точек модели объекта,  $\vec{l}_q = (P_q - H)$  – вектор, определяющий положение любой точки  $P_q$  относительно точки H этого облака.

С учетом выражения (5) желаемую траекторию движения рабочего органа ММ, изначально сформированную для априорно известной модели объекта, можно перенести на реальный объект и представить в виде:

$$\vec{x}(t) = H + M_r(\vec{x}(t) + \vec{p}_1 - H) + \vec{p}_2$$
 (6)

где  $\vec{x}(t)$  – вектор, задающий текущее желаемое положение характерной точки рабочего органа ММ на поверхности модели объекта работ,  $\vec{x}(t)$  – положение этой же точки на поверхности реального объекта работ, полученное после совмещения облака точек модели объекта с облаком точек, полученным от сонара АНПА.

На основе выражения (6) могут быть сформированы как траектории движения АНПА вблизи объекта для его детального обследования, так и траектории движения подводного ММ для захвата этого объекта или выполнения других манипуляционных операций. При этом может использоваться метод [26], который за счет дополнительных линейных движений АНПА позволяет избежать остановки выполнения операции при входе некоторых степеней подвижности ММ в ограничения, а также исключить появление нежелательных реверсов в его приводах.

Программная реализация разработанного метода была выполнена на языке программирования C++ с использованием открытой библиотеки PCL. Для его



и его известной модели

исследования в среде 3D-моделирования 3DS Мах были созданы трехмерные модели морского дна и объекта работ (см. рис. 3), которые использовались для построения облака точек этого объекта, а также облака точек, имитирующего выходные данные многолучевого 3D-сонара (см. рис. 4). Исследования качества функционирования предложенного метода выполнялись на различных объектах работ с различной степенью детализации и зашумленности их облаков точек. Результаты этих исследований подтвердили работоспособность и простоту практической реализации этого метода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к выполнению манипуляционных операций с помощью АНПА, оснащенных ММ и многолучевыми сонарами. Этот подход включает методы формирования траекторий движения рабочих органов MM, позволяющих выполнять различные манипуляционные операции с донной поверхностью, а также с отдельными объектами, форма которых заранее известна. С помощью современных программных средств выполнена реализация созданных методов в виде программного обеспечения, которое позволяет взаимодействовать с различными типами сканирующих устройств и может быть эффективно внедрено в реальные АНПА, оснащаемые MM.

Разработка метода определения местоположения и пространственной ориентации подводных объектов выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-08-01204\_а и 16-29-04195 офи\_м), программная реализация и исследования выполнены при финансовой поддержке программы «Дальний Восток» (грант 18-5-054). Разработка алгоритмов формирования траекторий ММ с учетом формы и расположения объектов работ осуществлена при финансовой поддержке РНФ (проект №17-79-10064).



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / под ред. Л.В. Киселева. Владивосток: Дальпресс, 2018. 367 с.

2. Tuphanov I.E., Scherbatyuk A.F. Adaptive algorithm of AUV meander pattern trajectory planning for underwater sampling // Proc. of the 10th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Vladivostok, Russia, 2012. P. 181–185.

3. Filaretov V.F., Yukhimets D.A., Scherbatyuk A.F., Tuphanov I.E., Mursalimov E.S. Some Marine Trial Results of a New Method for AUV Trajectory Motion Control // Proc. of the OCEANS 2014 MTS/IEEE Conf. St. John's. Newfoundland and Labrador, Canada, 2014. P. 1–6.

4. Инзарцев А.В., Павин А.М., Лебедко О.А., Панин М.А. Распознавание и обследование малоразмерных подводных объектов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 36–43.

5. Galceran E., Djapic V., Carreras M., Williams D.P. A Real-time Underwater Object Detection Algorithm for Multi-beam Forward Looking Sonar // 3rd IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles. 2012. Vol. 45 (5). P. 306–311.

6. Guerneve T., Subr K., Petillot Y. Three-dimensional reconstruction of underwater objects using wide-aperture imaging SONAR // Journ. of Field Robotics. 2018. Vol. 35(6). P. 890–905.

7. 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.

8. Костенко В.В., Павин А.М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1(17). С. 39–47.

 Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 53–56.

10. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 29–34.

11. Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. System for automatic soil sampling by underwater vehicle // Proc. of 2017 Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Saint-Petersburg, Russia, 2017.

12. Oleari F., Kallasi F., Rizzini D.L., Aleotti J., Caselli S. Performance Evaluation of a Low-Cost Stereo Vision System for Underwater Object Detection // Proc. of the 19th IFAC World Congress. Cape Town, South Africa, 2014. Vol. 47(3). P. 3388–3394.

13. Marani G., Choi S.K., Yuh J. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs // Ocean Engineering. 2009. Vol. 36 (1). P. 15-23.

14. Faria R.O., Kucharczak F., Freitas G.M., Leite A.C., Lizarralde F., Galassi M., From P.J. A Methodology for Autonomous Robotic Manipulation of Valves Using Visual Sensing // 2nd IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production. Florianópolis, Brazil, 2015. Vol. 48 (6). P. 221–228.

15. Galkin S.V., Vinogradov G.M., Tabachnik K.R., Rybakova E.I., Konoplin A.Y., Ivin V.V. Megafauna of the Bering Sea slope based on observations and imaging from ROV "Comanche" // Marine Imaging Workshop. Kiel, Germany, 2017.

16. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Разработка и натурные испытания системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 12–20.

17. Multibeam Sonar for 3D Model View of Sonar Imagery – Tritech products. – URL: http://www.tritech.co.uk/ (дата обращения: 25.01.2019).

18. Teledyne BlueView's 3D Multibeam Scanning Sonar. – URL: http://www.teledynemarine.com/ (дата обращения: 25.01.2019).

19. Fast triangulation of unordered point clouds: Documentation of Point Cloud Library. – URL: http://pointclouds.org/documentation/tutorials/ greedy\_projection.php (дата обращения: 25.01.2019).

20. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Метод супервизорного управления манипулятором подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. № 2. С. 95–99.

21. Möller T., Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection // Journ. of Graphics Tools. 1997. Vol 2 (1). P. 21-28.

22. Горностаев И.В., Губанков А.С. Разработка метода формирования законов перемещения мехатронных объектов с желаемой скоростью по гладким пространственным траекториям // Материалы III Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника». Севастополь, 2017. С. 83–86.

23. Marton Z., Rusu R., Beetz M. On Fast Surface Reconstruction Methods for Large and Noisy Datasets // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). Kobe, Japan, 2009. P. 3218–3223.

24. Besl P.J. McKay N.D. Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Los Alamitos, CA, USA, 1992. Vol. 14 (2). P. 239–256.

25. Interactive Iterative Closest Point: Documentation of Point Cloud Library. – URL: http://pointclouds.org/documentation/tutorials/interactive\_ icp.php (дата обращения: 25.01.2019).

26. Филаретов В.Ф., Губанков А.С., Горностаев И.В., Коноплин А.Ю. Разработка метода формирования программных сигналов управления манипуляторами, установленными на подводных аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 1(25). С. 32–39.