

В. Ф. Филаретов^{1, 3}, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., filaretov@inbox.ru,
А. Ю. Коноплин^{2, 3}, канд. техн. наук, зав. лаб., konoplin@marine.febras.ru,
Н. Ю. Коноплин^{2, 3}, мл. науч. сотр., konoplin.nikita@gmail.com,

¹Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,

²Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток,

³Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Метод супервизорного управления манипулятором подводного робота¹

Рассмотрен новый метод супервизорного выполнения манипуляционных операций многозвенными манипуляторами, установленными на подводных роботах. Этот метод предполагает построение математических моделей объектов работ с помощью бортовых гидроакустических сонаров, формирование целевых точек и сложных пространственных траекторий рабочих органов манипуляторов с помощью управляемой оператором телекамеры, изменяющей пространственную ориентацию своей оптической оси.

Ключевые слова: супервизорное управление, подводный робот, многозвенный манипулятор, облако точек, математическая модель, глубоководные исследования, пространственная траектория, подводные операции, система управления

Введение

Анализ современных тенденций в области проектирования и эксплуатации подводных роботов (ПР), оснащаемых многозвенными подводными манипуляторами (ПМ), указывает на расширение функциональных возможностей этих роботов за счет создания высококачественных систем и устройств навигации [1], а также методов распознавания окружающей обстановки и планирования траекторий движения как ПР, так и закрепленных на них ПМ [2, 3]. При этом подавляющее большинство подводных технологических и исследовательских манипуляционных операций до сих пор выполняется в ручном режиме специально обученными операторами ПР, которые, основываясь на своем опыте и знаниях, планируют траектории движения рабочих инструментов. Однако, не имея прямого контакта с объектом работ и судя о его расположении только по видеоизображению, оператору очень сложно быстро и точно решать поставленные задачи. Это приводит к снижению производительности его работы и росту вероятности ошибок.

В частности, обозначенная проблема была подтверждена в глубоководных научно-исследовательских экспедициях в Японском, Беринговом и Охотском морях при работе с ПР Sub-

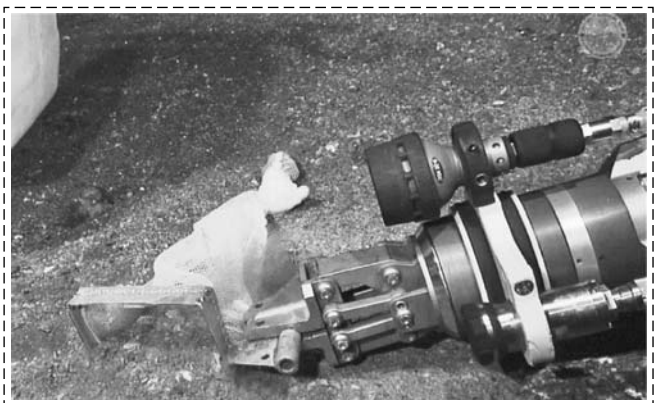


Рис. 1. Выполнение манипуляционной операции с помощью ПМ Schilling Orion 7P

Atlantic Comanche 18, оснащенным ПМ Schilling Orion 7P. Взятие проб грунта, геологических пород и бактериальных матов (рис. 1) приводило к быстрой утомляемости операторов, к значительному увеличению времени выполнения операций, к ошибкам в работе и даже к повреждению рабочих инструментов.

Для решения этой возникшей проблемы в статье предложен и рассмотрен новый метод супервизорного выполнения манипуляционных операций с помощью ПМ, установленного на ПР.

1. Описание метода супервизорного управления ПМ, установленным на ПР

Предложенный метод вначале предполагает определение геометрической формы и местоположения объектов работ с помощью бортовых ги-

¹ Разработка и программная реализация метода супервизорного выполнения манипуляционных операций выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-10064). Теоретические и экспериментальные работы по построению математических моделей донной поверхности выполнены за счет грантов РФФИ (проекты 16-29-04195 Офи_м, 17-57-45055 Инд_а).

дроакустических сонаров. Затем оператор наводит на объект работ установленную на ПР телекамеру, которая может изменять пространственную ориентацию своей оптической оси, и задает одну или несколько рабочих точек, принадлежащих этому объекту. По координатам заданных точек, лежащих на поверхности объекта работ, автоматически формируется пространственная траектория движения и ориентация рабочего инструмента ПМ в зависимости от поставленной манипуляционной задачи.

На рис. 2 на примере взятия поверхностного слоя грунта показана реализация супервизорного управления грунтоотборным боксом, который перемещается ПМ 1, установленным на ПР 2. С помощью многолучевого гидроакустического сонара 3 в реальном масштабе времени формируется облако точек, с помощью которого строится математическая модель донной поверхности 4, используемая для дальнейшего формирования траектории движения рабочего инструмента ПМ. В частности, для отбора грунта в местах скопления бактериальных матов оператор, перемещая оптическую ось 5 телекамеры, задает s целевых точек A_i ($i = 1, s$), которые являются точками пересечения этой оси с поверхностью дна. По заданным целевым точкам формируется траектория 6 движения рабочего инструмента ПМ 2. При взятии поверхностного слоя грунта вектор a грунтоотборного бокса при движении ПМ по траектории (см. рис. 2) всегда должен быть перпендикулярен к поверхности дна, а вектор n нормали к a должен быть направлен к следующей целевой точке A_{i+1} .

Во многих случаях поверхность дна, не имеющая существенных неровностей, может быть представлена в виде усредненной плоскости [4]. В прямоугольной системе координат (СК) хуз, жестко связанной с корпусом ПР, указанную плоскость можно описать уравнением в нормальном виде [5]:

$$ax + by + cz = d, \quad (1)$$

где x , y и z — оси связанной СК, начало которой O расположено в центре величины (водоизмещения) ПР, ось x совпадает с горизонтальной продольной осью ПР, ось z — с его вертикальной осью, а ось y составляет с ними правую тройку; a , b и c — направляющие косинусы единичного

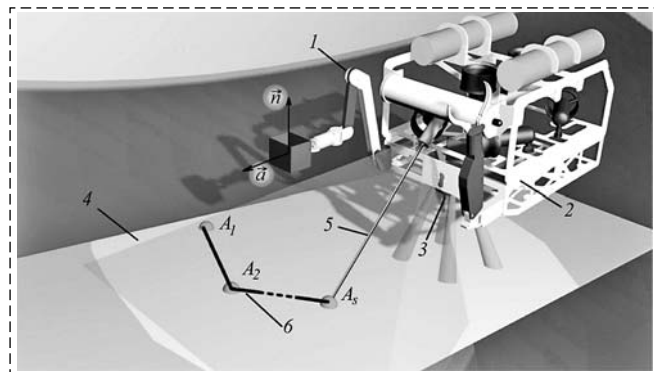


Рис. 2. Выполнение операции в супервизорном режиме

вектора $m = [a, b, c]$ нормали к плоскости (1), который совпадает с вектором a ; d — расстояние от начала СК хуз до этой плоскости. Элементы m и d рассчитываются с помощью сформированного облака точек, принадлежащих донной поверхности, по методу, изложенному в работе [6].

Для формирования траектории движения рабочего инструмента ПМ в СК хуз необходимо вычислить координаты целевых точек A_i (рис. 2). Если телекамера наведена на точку $A_i = [A_{ix}, A_{iy}, A_{iz}]$, то в СК хуз положение этой камеры определяется заранее заданной точкой $P_i = [P_{ix}, P_{iy}, P_{iz}]$, расположенной на оптической оси, а ее ориентация — единичным вектором $d_i = [d_{ix}, d_{iy}, d_{iz}]$. В этом случае оптическая ось телекамеры, совпадающая с вектором d_i , выходящим из точки P_i в направлении плоскости (1) дна, описывается выражением

$$A_i = P_i + t_i d_i, \quad (2)$$

где t_i — параметр, изменяющийся в пределах $[0, \infty)$. Значение параметра t_i в точке пересечения оси (2) с плоскостью (1) можно получить, подставив выражение (2) в уравнение (1) [7]:

$$a(P_{ix} + t_i d_{ix}) + b(P_{iy} + t_i d_{iy}) + c(P_{iz} + t_i d_{iz}) - d = 0;$$

$$t_i = \frac{-(aP_{ix} + bP_{iy} + cP_{iz} - d)}{ad_{ix} + bd_{iy} + cd_{iz}}. \quad (3)$$

Координаты точки A_i пересечения оптической оси телекамеры с плоскостью дна определяются подстановкой найденного значения параметра t_i в выражение (2)

$$A_i = P_i + \frac{-(aP_{ix} + bP_{iy} + cP_{iz} - d)}{ad_{ix} + bd_{iy} + cd_{iz}} d_i.$$

После наведения оператором оптической оси телекамеры на следующую целевую точку A_{i+1} значение параметра t_{i+1} вычисляется с помощью выражения (3) для новой точки P_{i+1} и вектора d_{i+1} . Аналогично определяются координаты остальных целевых точек, и в результате траектория движения рабочего инструмента ПМ представляется в виде его последовательного перехода по всем целевым точкам.

2. Построение траектории движения рабочего инструмента ПМ при сложном рельефе дна

Если поверхность дна имеет сложный рельеф, то необходимо использовать многолучевые гидроакустические 3D-сонары [8, 9], позволяющие с высокой точностью формировать облака точек, принадлежащих поверхности дна в зоне работ ПР. С помощью этих облаков и известных методов [10, 11] строится триангуляционная модель (рис. 3), представляющая собой множество треугольных пластин, сшитых между собой. На основе этой модели формируется траектория движения рабочего инструмента ПМ, которая прохо-

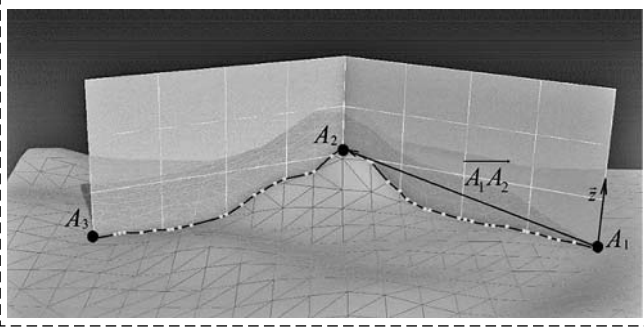


Рис. 3. Триангуляционная модель поверхности дна

дит через заданные оператором целевые точки A_i на сложном рельефе морского дна. Каждый k -й треугольник в триангуляции задается в СК хуэ координатами трех вершин $V_{k0}, V_{k1}, V_{k2} \in R^3$, где $k = 1, g$, g — число треугольников.

Для нахождения в этой СК координат каждой целевой точки A_i на пересечении оптической оси телекамеры и полученной триангуляционной поверхности вначале необходимо определить, какой из всех g треугольников в текущий момент времени пересекается осью (2). Для этого используется алгоритм Моллера—Трумбора [12], который на основе информации о координатах точки P_i , элементах вектора d_i , а также координатах вершин V_{k0}, V_{k1}, V_{k2} всех g треугольников позволяет определить k -й треугольник, через который проходит ось (2). При этом координаты точки A_i в указанной СК относительно вершин k -го треугольника в векторной форме могут быть определены в виде

$$A_{ik} = w_{ik}V_{k0} + u_{ik}V_{k1} + v_{ik}V_{k2}, \quad (4)$$

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 оси (2) в выражение (4), получим систему уравнений относительно параметров t_{ik}, u_{ik}, v_{ik} :

$$P_i + t_{ik}d_i = (1 - (u_{ik} + v_{ik}))V_{k0} + u_{ik}V_{k1} + v_{ik}V_{k2},$$

которая может быть записана в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} -d_i & V_{k1} - V_{k0} & V_{k2} - V_{k0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{ik} \\ u_{ik} \\ v_{ik} \end{bmatrix} = [P_i - V_{k0}]. \quad (5)$$

Значения параметров t_{ik}, u_{ik}, v_{ik} находятся путем решения системы уравнений (5) [12]:

$$\begin{bmatrix} t_{ik} \\ u_{ik} \\ v_{ik} \end{bmatrix} = \frac{1}{(d_i \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \times \begin{bmatrix} ((P_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0}) \\ (d_i \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (P_i - V_{k0}) \\ ((P_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot d_i \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где (\cdot) — скалярное произведение векторов; (\times) — векторное произведение векторов.

В результате треугольник k с вершинами V_{k0}, V_{k1} и V_{k2} , который пересекает ось (2), находится из условий [12]:

$$0 \leq u_{ik} \leq 1, \quad (7)$$

$$0 \leq v_{ik} \leq 1, \quad (8)$$

$$u_{ik} + v_{ik} \leq 1, \quad (9)$$

а координаты точки A_i пересечения оптической оси телекамеры с треугольником k определяются подстановкой найденного параметра t_{ik} из выражения (6) в уравнение (2):

$$A_i = P_i + \frac{((P_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{(d_i \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} d_i.$$

Для последующего построения траектории движения рабочего инструмента ПМ, 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 z , параллельным оси z СК хуэ (рис. 3).

Для построения траектории движения рабочего инструмента ПМ, проходящей через точки пересечения треугольников с плоскостью, образованной векторами $\overline{A_i A_{i+1}}$ и z , необходимо вычислить, какие из всех g треугольников пересекаются указанной плоскостью, и рассчитать координаты точек этих пересечений. При определении факта пересечения ребра треугольника k указанной плоскостью для каждой пары его вершин с помощью алгоритма [7] сравниваются знаки расстояний p_{ikh} от h -й вершины ($h = 0, 1, 2$) до плоскости, образованной векторами $\overline{A_i A_{i+1}}$ и z , а сами величины p_{ikh} вычисляются по формуле $p_{ikh} = r_i \cdot \overline{A_i V_{kh}}$, $r_i = \frac{\overline{A_i A_{i+1}} \times z}{\|\overline{A_i A_{i+1}} \times z\|}$, где $\overline{A_i V_{kh}}$ — вектор, соединяющий целевую точку A_i и h -ю вершину V_{kh} k -го треугольника.

Если для любой пары вершин треугольника k соответствующие им величины p_{ikh} имеют одинаковые знаки ($p_{ik0}p_{ik1} > 0$ и $p_{ik0}p_{ik2} > 0$ или $p_{ik0}p_{ik1} < 0$ и $p_{ik0}p_{ik2} < 0$), то плоскость не пересекает k -й треугольник. Если же p_{ikh} имеют разные знаки ($p_{ik0}p_{ik1} > 0$ и $p_{ik0}p_{ik2} < 0$ или $p_{ik0}p_{ik1} < 0$ и $p_{ik0}p_{ik2} > 0$), то на ребре треугольника k , образованном этой парой вершин, лежит точка T_{ike} , через которую должен пройти рабочий инструмент ПМ ($e = 1, 2$, поскольку в общем случае ребра каждого треугольника могут иметь не более двух точек пере-

сечения с плоскостью). Координаты точки T_{ike} для ребра, образованного вершинами V_{k0} и V_{k1} , определяются по формуле [7]

$$T_{ike} = V_{k0} + t_{ike} \frac{\overline{V_{k0}V_{k1}}}{\|\overline{V_{k0}V_{k1}}\|},$$

где $t_{ike} = \frac{-(r_i \cdot \overline{OV_{k0}} + |\overline{OA_i} \cdot r_i|)}{r_i \cdot \overline{V_{k0}V_{k1}}}$, $\overline{V_{k0}V_{k1}}$ — вектор, соединяющий вершины V_{k0} и V_{k1} треугольника k [7], $|\overline{OA_i} \cdot r_i|$ — расстояние от плоскости, образованной векторами $\overline{A_iA_{i+1}}$ и z , до начала O СК хуэ.

Координаты второй точки T_{ike} на одном из двух оставшихся ребер k -го треугольника, образованных вершинами V_{k0} и V_{k1} или V_{k1} и V_{k2} , вычисляются аналогично. Если же справедливо равенство $p_{ikh} = 0$, то h -я вершина k -го треугольника лежит на указанной плоскости. В этом случае $T_{ike} = V_{kh}$.

В результате формируется множество точек T_{ike} , через которые ПМ должен провести рабочий инструмент (в частности, грунтоотборный бокс). При этом в точках T_{ik1} и T_{ik2} , а также при перемещении между этими точками вектор a_{ik} всегда будет перпендикулярен плоскости k -го треугольника, которому принадлежат указанные точки. Поэтому в СК хуэ вектор a_{ik} всегда перпендикулярен плоскости, заданной тремя вершинами k -го треугольника.

Для построения траектории движения рабочего инструмента ПМ полученное множество точек T_{ike} с соответствующими им векторами a_{ik} сортируется в последовательность точек T_j с векторами a_j , расположенных между соседними целевыми точками A_i и A_{i+1} , где j — порядковый номер точки в последовательности перемещения рабочего инструмента ПМ. При этом вектор n_j указанного инструмента всегда параллелен вектору $\overline{T_jT_{j+1}}$, соединяющему пройденную и следующую точки множества. В результате полученная последовательность точек T_j и соответствующих им векторов a_j и n_j формирует траекторию движения рабочего инструмента, а также может задавать различные режимы этого движения [13].

3. Программная реализация и исследование метода супервизорного управления подводным манипулятором, установленным на подводном роботе

Разработанный метод супервизорного управления ПМ реализован на языке программирования C++. Входными данными для созданной программы является множество принадлежащих поверхности дна точек, получаемых с помощью гидроакустических сонаров и определяемых в трехмерном пространстве (рис. 4, а). Это множество загружается в программу в виде текстового файла. В эту же программу заносятся задаваемые

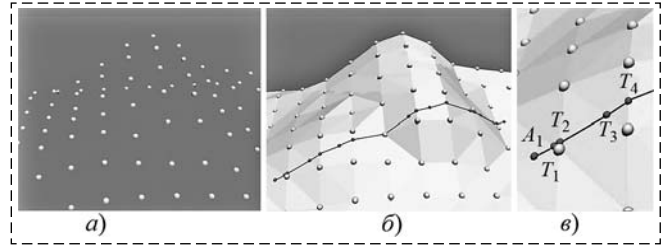


Рис. 4. Множество точек поверхности дна СК хуэ (а), триангуляционная модель дна и сформированная траектория движения рабочего инструмента ПР (б), детальное описание (представление) траектории (в)

оператором координаты точек P_i и векторов d_i , определяющих расположение оптической оси телекамеры в СК хуэ.

Разработанная программа строит триангуляционную модель донной поверхности (рис. 4, б), используя алгоритм [10], реализованный в программной библиотеке Point Cloud Library [11]. После задания оператором точек P_i и векторов d_i программа рассчитывает координаты целевых точек A_j , а также формирует последовательность точек T_j (рис. 4, б, 4, в) и соответствующих им векторов a_j и n_j рабочего инструмента ПМ. Визуализация результатов работы созданной программы выполнялась с использованием программного продукта 3ds Max и графического программного пакета ParaView.

Заключение

Разработанный метод может использоваться для выполнения в супервизорном режиме многих подводных манипуляционных операций. При этом траектории и ориентация в процессе движения рабочих инструментов ПМ формируются на основе математической модели объекта работ с учетом требований к выполнению конкретных технологических операций. Разработанный метод реализован в виде программы, позволяющей строить триангуляционные модели поверхности морского дна и рассчитывать пространственные траектории движения рабочих инструментов ПМ на основе целеуказаний, задаваемых оператором.

Список литературы

1. Dubrovin F. S., Scherbatyuk A. F. Development of Algorithms for an Autonomous Underwater Vehicle Navigation with a Single Mobile Beacon: The Results of Simulations and Marine Trials // Proc. of the XXIIth International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2015 / Saint Petersburg, Russia. P. 144—152.
2. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu. System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 1441—1449.
3. 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 40. 2015. P. 201—211.
4. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu., Gorbachev G. V. Control system for underwater vehicle with

multilink manipulator for automatic manipulation operations // Proc. of the 27th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, Vienna, Austria, 2016. P. 714–720. DOI: 10.2507/27th.daaam.proceedings.103.

5. Korn G. A. and Korn T. M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review. General Publishing Company, 2000. 1151 p.

6. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 8. Т. 18. С. 543–549.

7. Schneider P. J., Eberly D. H. Geometric Tools for Computer Graphics. New York: Elsevier Science Inc., 2002.

8. Tritech Eclipse. Multibeam Sonar for 3D Model View of Sonar Imagery. URL: <http://www.tritech.co.uk/>

9. BlueView 3D Multibeam Scanning Sonar. URL: <http://www.teledynemarine.com/>

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

11. Point Cloud Library: Fast triangulation of unordered point clouds. URL: <http://ns50.pointclouds.org/>

12. Möller T., Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection // Journal of Graphics Tools (JGT), 2(1):21–28, October 1997. 254.

13. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Konoplin A. Yu. Synthesis of System for Automatic Formation of Multilink Manipulator Velocity // The Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2014), Tehran IRAN, International IEEE Conference. 2014. P. 785–790. DOI: 10.1109/ICRoM.2014.6990999.

Supervisory Control Method for Manipulator Mounted on Underwater Robot

V. F. Filaretov^{1,3}, filaretov@inbox.ru, A. Yu. Konoplin^{2,3}, konoplin@marine.febras.ru,
N. Yu. Konoplin^{2,3}, konoplin.nikita@gmail.com,

¹ Institute of Automation and Control Processes, Vladivostok, 690041, Russian Federation

² Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Vladivostok, 690091, Russian Federation

³ Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690091, Russian Federation

Corresponding author: Konoplin Aleksandr Yu., Ph. D., Head of Laboratory,
Institute of Marine Technology Problems, FEB RAS, Far Eastern Federal University,
Vladivostok, 690091, Russian Federation, e-mail: konoplin@marine.febras.ru

Accepted on October 19, 2017

At present, the underwater vehicles equipped with multilink manipulators are used to perform a wide range of survey, technological and research operations in the depths of the world ocean. But in most cases, said manipulation operations are performed in a manual mode with help of the specially trained operators of the underwater vehicles. Based on their experience and knowledge, these operators plan the trajectories of working tools of underwater manipulators. However, it is very difficult for the operator to quickly and accurately solve manipulation tasks without direct contact with the working object and identifying the location of this object of work with help of video images. This leads to the performance decreasing of his work and to the probability increasing of the errors. The work proposes the new method for the supervisory implementation of manipulative operations by means of multilink manipulators mounted on underwater vehicles. This method involves the construction of mathematical models of objects of work with the help of on-board sonars. Herewith, the formation of target points and spatial trajectories of the manipulator's working tools is carried out by means of the targeting of the optical axis of the camera taking into account the requirements for the implementation of specific technological operations. The developed method can be used to perform many underwater manipulation operations in the supervisory mode.

Keywords: supervisory implementation, underwater robot, multilink manipulator, point cloud, underwater operations, spatial trajectory, mathematical model, deep-sea research, control system

For citation:

Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. A Supervisory Control Method for Manipulator Mounted on Underwater Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 95–99.

DOI: 10.17587/mau.19.95-99

References

1. Dubrovin F. S., Scherbatyuk A. F. Development of Algorithms for an Autonomous Underwater Vehicle Navigation with a Single Mobile Beacon: The Results of Simulations and Marine Trials, *Proc. of the XXIth International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2015*, Saint Petersburg, Russia, pp. 144–152.

2. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu. System of Automatically Correction of Program Trajectory of Motion of Multilink Manipulator Installed on Underwater Vehicle, *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 1441–1449.

3. 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, pp. 201–211.

4. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu., Gorbachev G. V. Control system for underwater vehicle with multilink manipulator for automatic manipulation operations. Proceedings of the 27th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, Vienna, Austria, 2016, pp. 714–720. DOI: 10.2507/27th.daaam.proceedings.103.

5. Korn G. A. and Korn T. M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review, General Publishing Company, 2000, 1151 p.

6. Filaretov V. F., Konoplin A. Yu., Konoplin N. Yu. Sistema dlja avtomaticheskogo vypolnenija manipulacionnyh operacij s pomoshh'ju podvodnogo robota (System for automatic implementation of manipulative operations by means of underwater robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, no. 8, pp. 543–549 (in Russian).

7. Schneider P. J. and Eberly D. H. Geometric Tools for Computer Graphics. Elsevier Science Inc., New York, 2002.

8. Tritech Eclipse. Multibeam Sonar for 3D Model View of Sonar Imagery, available at: <http://www.tritech.co.uk/>

9. BlueView 3D Multibeam Scanning Sonar, available at: <http://www.teledynemarine.com/>

10. Marton Z., Rusu R. and Beetz M. On Fast Surface Reconstruction Methods for Large and Noisy Datasets, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2009, Kobe, Japan, pp. 3218–3223.

11. Point Cloud Library: Fast triangulation of unordered point clouds, available at: <http://ns50.pointclouds.org/>

12. Möller T. and Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection, *Journal of Graphics Tools (JGT)*, 2 (1): 21–28, October 1997. 254.

13. Filaretov V. F., Yukhimets D. A., Konoplin A. Yu. Synthesis of System for Automatic Formation of Multilink Manipulator Velocity, *The Second RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2014)*, Tehran IRAN, International IEEE Conference, 2014, pp. 785–790, DOI: 10.1109/ICRoM.2014.6990999.