

МЕТОД КОРРЕКЦИИ ТРАЕКТОРИЙ РАБОЧЕГО ОРГАНА МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

А.П. Юрманов, М.О. Панчук, А.Ю. Коноплин

Статья посвящена новому методу коррекции траекторий движения рабочих органов (РО) многозвенных манипуляторов (ММ) необитаемых подводных аппаратов (НПА) на основе данных, полученных при распознавании заранее закрепленного вблизи РО ММ специального графического маркера. Предложенный метод предполагает использование систем технического зрения (СТЗ) для идентификации положения маркера и последующего его сравнения с положением, рассчитанным с помощью решения прямой задачи кинематики (ПЗК). Указанные вычисления выполняются на основе информации об обобщенных координатах ММ с помощью датчиков, расположенных в его степенях подвижности. Таким образом, путем сравнения двух пространственных положений РО в реальном масштабе времени вычисляется вектор ошибки, позволяющий уточнить желаемую траекторию движения РО ММ. Данное исследование проводилось с помощью численного моделирования в Matlab/Simulink и Unitya и натурных экспериментов с использованием ММ и СТЗ, разработанных в ИПМТ ДВО РАН. Полученные результаты свидетельствуют о том, что представленный в работе метод позволяет повысить точность определения положения РО ММ при выполнении манипуляционных операций.

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, многозвенный манипулятор, рабочий орган, система технического зрения, траектория, манипуляционные операции, графический маркер

Введение

В настоящее время НПА с установленными на них многозвенными манипуляторами активно используются не только для исследовательских, но и для сложных технологических операций, выполняемых в глубинах Мирового океана. Среди основных выполняемых задач выделяются такие, как сбор морских животных, установка различных приборов и сенсоров, проведение работ по обслуживанию объектов нефтегазового комплекса и другие [1]. Чтобы сканировать и распознавать подводные объекты НПА оснащаются системами технического зрения, построенными на основе стереокамер [2, 3]. По поверхностям идентифицированных объектов формируются траектории движения рабочих органов манипуляторов с использованием известных методов [4–7], предполагающих получение от СТЗ облаков точек объекта с дальнейшим построением триангуляционных поверхностей этого объекта [6–9].

Исследования показали, что недостаточная точность получения облаков точек, обусловленная ограниченной точностью калибровки СТЗ и изменяющимися параметрами водной среды, приводит к значительным ошибкам при построении траекторий РО ММ по поверхностям реальных объектов. Также известно, что точность сканирования подводных объектов напрямую зависит от точности полученных в ходе калибровки параметров для каждой из камер СТЗ, таких как дисторсия, фокусное расстояние и другие [8, 9]. Указанная проблема была также обнаружена в процессе экспериментальных исследований СТЗ для выполнения сложных манипуляционных операций интервенционными НПА [10]. В результате построенная по поверхности объекта работ траектория имела значительные отклонения от реальной поверхности этого объекта.

Данная проблема возникает вследствие того, что сконфигурированный заранее калибровочный файл для СТЗ не позволяет учесть параметры, которые мо-

гут изменяться в процессе работы НПА и непосредственно влияют на точность получения и формирования облаков точек стереокамерой. Для устранения появившейся ошибки используются методы перекалибровки камер СТЗ с помощью шахматной доски [11]. Также известен способ калибровки подводной видеокамеры [12], который позволяет с помощью перемещения манипулятором калибровочного объекта получить информацию о реальных искажениях получаемых изображений. Перечисленные способы сложно реализуемы в условиях выполнения реальных подводных манипуляционных операций, так как проведение калибровки – довольно длительный процесс, приводящий к значительному повышению времени выполнения требуемых операций.

Чтобы заново не проводить цикл калибровки камеры, используются методы самостоятельной калибровки [13,14], которые основаны на обнаружении специальных опорных точек на изображении. Например, в работе [13] для обнаружения опорных точек используется специальный алгоритм обработки видеоинформации, получаемой от стереоскопической камеры. Этот алгоритм достаточно сложен и требователен к вычислительным ресурсам, поэтому его использование на бортовом вычислителе НПА затруднено. Метод [14] предполагает использование точек, полученных с помощью многолучевого сонара, а также монокулярной камеры, перемещающейся относительно сонара с помощью поворотной платформы. Однако этот метод требует оснащения НПА дополнительным дорогостоящим оборудованием. При этом процесс самостоятельной калибровки занимает определенное время перед выполнением манипуляционных работ, что может быть недопустимо в некоторых ситуациях. Поэтому целесообразно не выполнять полный цикл калибровки, а уточнять положение РО в процессе движения ММ по сформированной с помощью СТЗ траектории. При этом достаточно использовать предварительную калибровку, выполненную в схожей среде.

Для решения указанной проблемы в статье предложен новый метод уточнения траекторий движения РО ММ на основе данных, полученных при распознавании специального графического маркера, который заранее закрепляется на ММ вблизи его РО.

1. Идентификация специального графического маркера для уточнения траекторий

Как отмечалось во введении, для построения траекторий движения РО ММ по поверхностям объектов

может использоваться любой из методов [4–7], основанный на обработке облаков точек, получаемых от СТЗ. Для уточнения построенных траекторий вблизи РО ММ предлагается устанавливать специальный графический маркер (рис. 1). При этом маркер всегда должен находиться в поле зрения СТЗ в процессе выполнения манипуляционных операций.

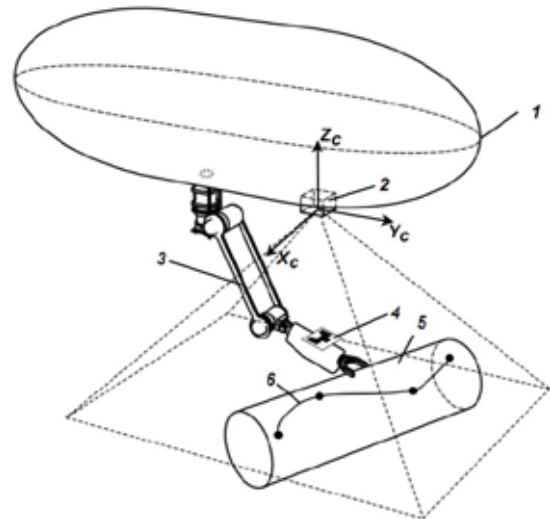


Рис. 1. Схема НПА с ММ при распознавании маркера

На рис. 1 введены следующие обозначения: 1 – НПА; 2 – установленная на НПА СТЗ; 3 – ММ; 4 – специальный графический маркер, расположенный в поле зрения СТЗ; 5 – объект работ; 6 – желаемая траектория движения РО, построенная на поверхности объекта; $X_c Y_c Z_c$ – правая прямоугольная СК, связанная с СТЗ.

Ограниченная точность получения облаков точек СТЗ приводит к смещению желаемой траектории движения РО относительно поверхности объекта (рис. 2). Эти ошибки возникают, когда значения параметров окружающей водной среды (соленость, температура, освещенность и ряд других факторов) в зоне работ НПА отличаются от значений соответствующих параметров в зоне проведения первоначальной калибровки СТЗ.

На рис. 2 введены следующие обозначения: 1 – первоначально построенная в СК $X_c Y_c Z_c$ желаемая траектория движения РО ММ; 2 – желаемая траектория движения РО ММ, точки которой перенесены на поверхность объекта с помощью корректирующих векторов $P_{Ei} = [P_{Eix}, P_{Eiy}, P_{Eiz}] \in R^3$; $T_i = [T_{ix}, T_{iy}, T_{iz}] \in R^3$ – соответствующие точки траектории 2; $T'_i = [T'_{ix}, T'_{iy}, T'_{iz}] \in R^3$ – соответствующие

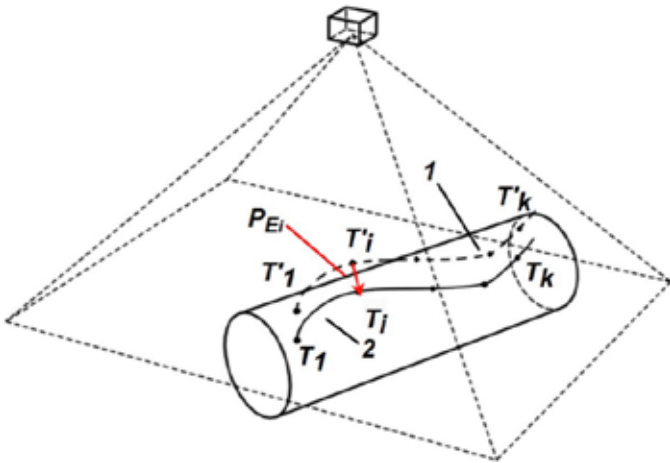


Рис. 2. Графическое представления вектора уточнения траектории движения РО ММ

точки траектории $1; i = \overline{1, k}$, где k – количество точек траектории.

Для компенсации ошибок построения траектории движения РО в реальном масштабе времени предлагается использовать корректирующий вектор P_{Ei} . Его координаты необходимо вычислять начиная с подхода РО ММ к начальной точке его желаемой траектории и далее в процессе движения по этой траектории. При этом вычисление вектора P_{Ei} возможно посредством сравнения в СК $X_C Y_C Z_C$ текущих положений характерной точки специального маркера, вычисляемых двумя способами.

Первый способ в каждой i -й точке траектории РО ММ точно определяет вектор $P_{gk_i} \in R^3$ положения характерной точки маркера, закрепленного вблизи этого органа, с помощью решения прямой задачи кинематики для рассматриваемого манипулятора. Указанные вычисления выполняются на основе информации об обобщенных координатах ММ, получаемой от датчиков, расположенных в его степенях подвижности. При этом учитывается линейное смещение точки крепления ММ относительно начала СК $X_C Y_C Z_C$.

Второй способ в каждой i -й точке траектории РО ММ определяет вектор $P_{ac_i} \in R^3$ положения характерной точки маркера с использованием известного метода [15] визуального распознавания графического маркера с помощью СТЗ. При этом указанное распознавание маркера выполняется с ошибкой, которую можно приравнять к текущей ошибке построения траектории движения РО по поверхности объекта. Это объясняется тем, что при распознавании маркера и идентификации целевого объекта используется одна и та же СТЗ, первоначально откалиброванная в

условиях, отличающихся от условий выполнения манипуляционной операции.

Результатом первоначальной калибровки СТЗ является калибровочная матрица, параметры которой описывают фокусные расстояния и координаты оптического центра в плоскости изображения, а также коэффициенты, описывающие радиальное и тангенциальное искажения для каждой камеры СТЗ [16–18].

С помощью метода [15] с учетом элементов калибровочной матрицы маркер однозначно идентифицируется на двухмерном изображении с целью получения uv -координат (u, v – координаты в плоскости изображения, получаемого от СТЗ). Затем uv -координаты преобразуются в искомые координаты вектора P_{ac_i} положения маркера в трехмерном пространстве СК $X_C Y_C Z_C$ с помощью выражения [15]:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = KM \begin{bmatrix} P_{ac_i X} \\ P_{ac_i Y} \\ P_{ac_i Z} \\ 1 \end{bmatrix},$$

где s – масштаб изображения, получаемого от СТЗ; $K \in R^{3 \times 3}, M \in R^{3 \times 4}$ – матрицы, описывающие внутренние и внешние параметры СТЗ соответственно; s, K, M – элементы калибровочной матрицы СТЗ; $P_{ac_i X}, P_{ac_i Y}, P_{ac_i Z}$ – элементы искомого вектора P_{ac} .

В результате для расчета искомого вектора P_{Ei} необходимо найти разность векторов P_{gk_i} и P_{ac_i} :

$$P_{Ei} = P_{gk_i} - P_{ac_i}.$$

Как показано на рис. 3, для уточнения траектории движения ММ изначально необходимо скорректировать первую точку траектории:

$$T_1 = T_1' + P_{E1}.$$

При достижении РО точки T_1 рассчитывается промежуточная точка t_i' для соответствующей точки T_i' , где $i = \overline{2, k}$:

$$t_i' = T_i' + P_{E_{i-1}}.$$

Когда РО ММ достиг точки t_i' , выполняется дополнительно уточнение с учетом рассчитанного для точки t_i' вектора P_{E_i} :

$$T_i = t_i' + (P_{E_{i-1}} - P_{E_i}).$$

Таким образом уточняется каждая последующая точка траектории движения РО ММ в процессе его движения вблизи или по поверхности объекта работ.

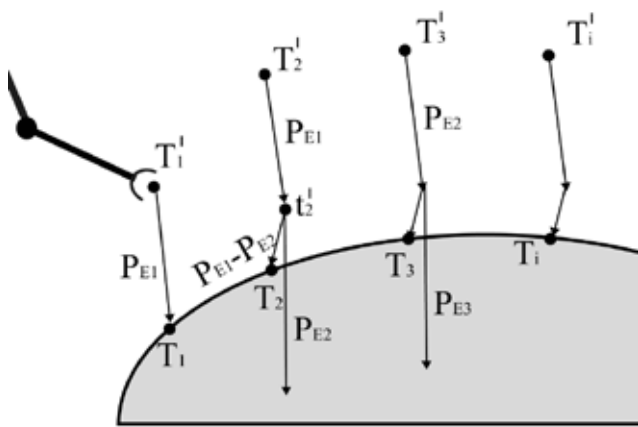


Рис. 3. Графическое представление способа уточнения траектории движения РО ММ

2. Оценка влияния параметров окружающей среды на идентификацию специального маркера

Для оценки влияния параметров окружающей среды на идентификацию специального маркера была реализована в среде Unity модель НПА с установленными на нее СТЗ и ММ, на который был закреплен специальный графический маркер. В среде была проведена первоначальная калибровка используемой для СТЗ камеры.

Было проведено моделирование, в процессе которого РО ММ двигался вдоль заранее заданной траектории (рис. 4), имитируя процесс выполнения манипуляционной операции. За счет изменения ориентации РО ММ маркер всегда находился в области зрения СТЗ. В процессе движения РО ММ по траектории в режиме реального времени рассчитывалось положение маркера. На основе данных, полученных при распознавании маркера, была воспроизведена траектория движения РО ММ (рис. 5, а). Процесс обнаружения маркера происходил при тех же параметрах окружающей среды (коэффициент дисторсии = 1), в которых заранее калибровалась камера (рис. 5, б).

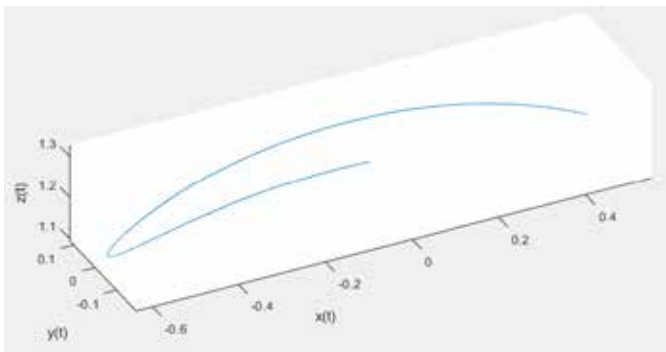


Рис. 4. Заранее полученная траектория движения РО ММ

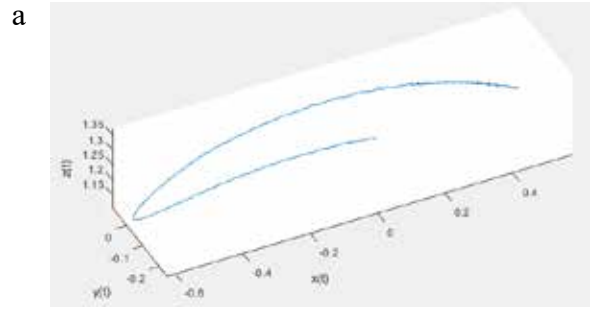


Рис. 5. Траектория движения РО ММ, полученная при распознавании маркера (а) и визуальное отслеживание РО ММ (б)

В процессе движения РО ММ по траектории производился расчет вектора P_{E_i} уточнения для заданной траектории (рис. 6).

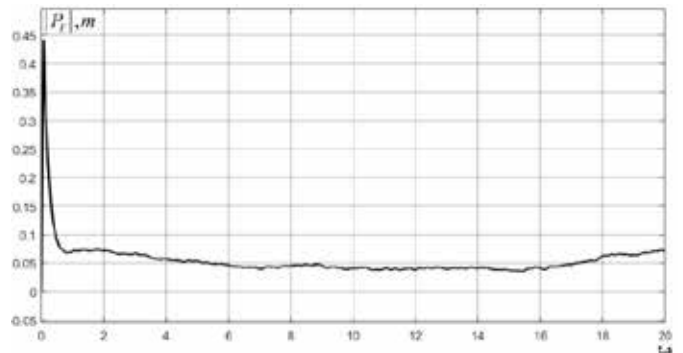


Рис. 6. Изменения длины вектора P_{E_i} в процессе движения РО ММ по траектории

Как видно из графиков, среднее значение вектора P_{E_i} достигает 0,05 м, поскольку первоначальная калибровка не позволяет полностью нивелировать оптические искажения камер. Рассчитанный в ходе моделирования вектор P_{E_i} позволил бы компенсировать ошибки, возникающие при движении РО ММ по траектории.

При дальнейшем моделировании были изменены параметры окружающей среды, влияющие на точность получения облаков точек, следовательно, на построенную траекторию и на распознавание маркера. При этом при моделировании был увеличен коэффициент дисторсии камеры (коэффициент дис-

торсии = 1,11). Это привело к появлению эффекта «рыбьего глаза».

При этом РО ММ двигался по той же исходной траектории (рис. 4). Соответствующая траектория движения РО ММ, полученная при распознавании маркера, и расчетный вектор P_{E_i} представлены на рис. 7, 8.

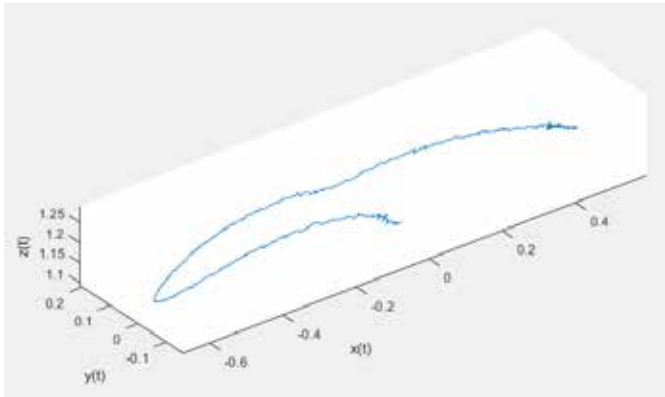


Рис. 7. Траектория движения РО ММ, полученная при распознавании маркера при добавлении эффекта дисторсии

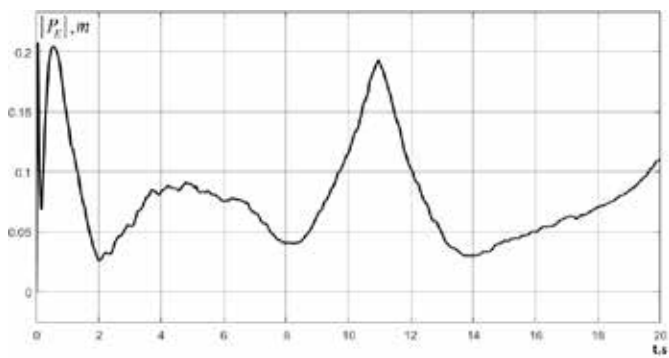


Рис. 8. Длина вектора P_{E_i} коррекции траектории РО ММ при добавлении эффекта дисторсии

Проведенное моделирование показывает, что изменение параметров внешней среды значительно влияет на качество идентификации графического маркера. Ошибка в этом случае достигала 20 см. При получении облаков точек с использованием данной СТЗ указанная ошибка неизбежно отразится на точности идентификации поверхности объекта работ и построении желаемой траектории движения РО ММ по этой поверхности.

3. Экспериментальное исследование разработанного метода

Для исследования работоспособности предложенного метода было проведено натурное испытание с использованием разработанных в ИПМТ ДВО РАН подводных ММ и СТЗ (рис. 9). В качестве СТЗ выступала стереоскопическая камера ZED2-Stereocam, помещенная в герметичную установку с вычислитель-

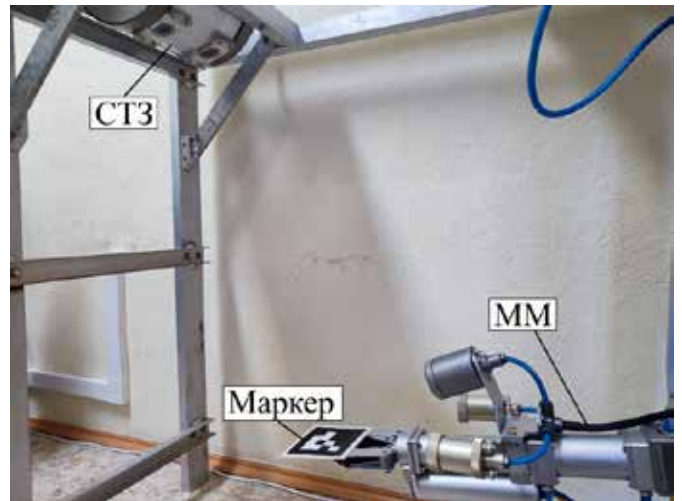


Рис. 9. Герметичная установка СТЗ с вычислительным модулем

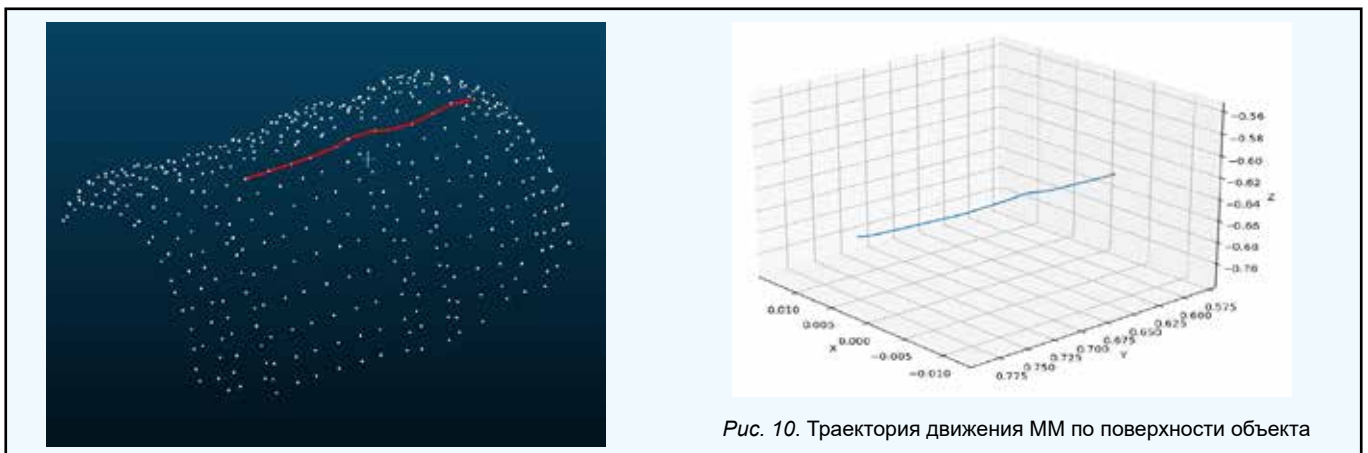


Рис. 10. Траектория движения ММ по поверхности объекта

ным модулем NVIDIA Jetson. Jetson использовался для обработки видеоинформации и расчета корректирующего вектора P_{E_i} . В качестве первоначальной калибровки использовалась заводская настройка для стереокамеры ZED2-Stereocam.

Для построения траектории по поверхности объекта работ (рис. 10) использовалась система [10], позволяющая определить пространственное положение объекта и сформировать желаемую траекторию движения РО ММ на основе данных, поступающих от СТЗ. Траектория движения имитировала замер толщины стенок трубопровода в продольном направлении.

При движении по траектории автоматически идентифицировался графический маркер и в режиме реального времени рассчитывался корректирующий вектор P_{E_i} с помощью данных, представленных на рис. 11. Без использования разработанного метода уточнения РО ММ имел отклонение от поверхности объекта около 40–50 мм на протяжении всей траекто-

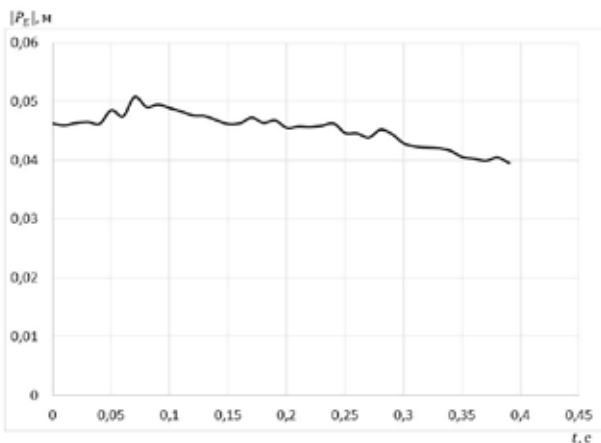


Рис. 11. Изменение длины полученного корректирующего вектора P_{E_i} при проведении натурального испытания

рии. С учетом вектора P_{E_i} при движении манипулятора удалось устранить ошибку, вызванную неточностью калибровки СТЗ (рис. 12).

Заключение

Разработанный метод позволяет корректировать траектории движения РО ММ в режиме реального времени. При этом не требуется установки дорогостоящего дополнительного оборудования и процесс уточнения траекторий не занимает дополнительно времени перед выполнением миссии. Показано, что метод может повысить точность выполнения контактных операций с объектами, а также операций, где необходимо точно позиционировать РО на заданном расстоянии от поверхности объекта работ.

Результаты проведенного численного моделирования в виртуальной среде позволили оценить качество идентификации специального маркера при изменяющихся параметрах водной среды. Полученные модельные данные подтверждаются результатами натурального эксперимента по коррекции пространственных траекторий движения РО ММ. При этом важно отметить, что представленный в данной работе метод позволяет в режиме реального времени вычислять корректирующий вектор на типовом для СТЗ вычислительном модуле с частотой 10 Гц. Поэтому практическая реализация метода не вызывает принципиальных затруднений и может быть выполнена на типовом бортовом вычислителе НПА.

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



Рис. 12. Положение РО ММ: а – без учета корректирующего вектора, б – с учетом корректирующего вектора

ЛИТЕРАТУРА

1. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, №. 8. С. 543–549.
2. Коноплин А. Ю., Коноплин Н. Ю., Шувалов Б. В. Подход к выполнению АНПА технологических манипуляционных операций с различными подводными объектами // Подводные исследования и робототехника. 2019. №. 1. С. 31–37.
3. 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.
4. Коноплин А. Ю., Юрманов А. П., Пятавин П. А. Метод формирования траекторий подводного манипулятора для супервизорного выполнения операций // Extreme Robotics. 2020. Т. 1, №. 1. С. 259–264.
5. Möller T., Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection // Journ. of Graphics Tools. 1997. Vol 2 (1). P. 21–28.
6. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Метод супервизорного управления манипулятором подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. № 2. С. 95–99.
7. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Pyatavin P. Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 3. P. 1666.
8. Shortis M. Calibration Techniques for Accurate Measurements by Underwater Camera Systems // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 30810–30826.
9. Schmidt V.E., Rzhanov Y. Measurement of micro-bathymetry with a GOPRO underwater stereo camera pair // 2012 Oceans. Hampton Roads, VA, USA, 2012. P. 1–6.
10. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Pyatavin P., Panchuk M., Vasilenko R. System for Identifying Target Objects to Perform Manipulative Operations by Unmanned Underwater Vehicles // International Conference on Ocean Studies. Vladivostok, 2022. P. 55–59.
11. Бабухин Н.И., Смирнов В.А. Калибровка камеры с применением современных вычислительных средств обработки данных // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2020. №. 9. С. 72–76.
12. Патент № 2789190 Российская Федерация, МПК G01C11/00(2006-01-01). Способ калибровки подводной видеокамеры : № 2022104417 : заявл. 18.02.2022: опубликовано 31.01.2023 / Филаретов В.В.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет.
13. Pessel N., Opederbecke J., Marie-José Aldon. Camera Self-Calibration in Underwater Environment. WSCG // Winter School of Computer Graphics. Plzen, Czech Republic, 2003. P. 104–110.
14. Pecheux N., Creuze, V., Comby F., Tempier O. Self Calibration of a Sonar–Vision System for Underwater Vehicles // A New Method and a Dataset. Sensors. 2023. Vol. 23. P. 1700.
15. Detection of ArUco Markers. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html (дата обращения: 20.10.2023).
16. Juyang Weng, Paul Cohen, Marc Herniou. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation // IEEE Transaction on pattern analysis nad machine intelligence. 1992. Vol. 14, No. 10.
17. Gennery D.B. Stereo-camera calibration / Artificial Intelligence Laboratory, Computer Science Department Stanford University. Stanford, 1979.
18. Camera Calibration and 3D Reconstruction. URL: https://docs.opencv.org/3.4/d9/d0c/group_calib3d.html (дата обращения: 20.10.2023).

Об авторах

ЮРМАНОВ Александр Павлович, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН;
Дальневосточный федеральный университет
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Тел.: 89146786060
E-mail: yurmanov_a@mail.ru
ORCID: 0000-0001-6849-3700

ПАНЧУК Максим Олегович, младший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Тел.: 89996170369
E-mail: my_panchuk@mail.ru
ORCID: 0009-0006-2738-6347

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН;
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Тел.: 89244298396
E-mail: kayur-prim@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7554-1002

Для цитирования:

Юрманов А.П., Панчук М.О., Коноплин А.Ю. МЕТОД КОРРЕКЦИИ ТРАЕКТОРИЙ РАБОЧЕГО ОРГАНА МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 4 (46). С. 43–51. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_46_04_04. EDN: EIPJUC.



METHOD FOR CORRECTION OF WORKING TOOL TRAJECTORIES OF MULTI-LINK MANIPULATOR OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

A.P. Yurmanov, M.O. Panchuk, A.Yu. Konoplin

The article is devoted to a new method of correction the trajectories of working tools (WT) of multi-link manipulators (MM) installed on unmanned underwater vehicles (UUV), based on data obtained during recognition of a special graphic marker pre-fixed near the MM WT. The proposed method involves the use of technical vision systems (TVS) to identify the position of the marker and then compare it with the position calculated using the solution of the forward kinematics (FK) for this MM. These calculations are performed on the basis of information on generalized coordinates of MM obtained from sensors located in its degrees of freedom. Thus, by comparing the two spatial positions of the WT in real time, a correction vector is calculated that allows to clarifying the desired trajectory of the MM WT. The research of the developed method was carried out using numerical modeling in Matlab/Simulink and Unity, as well as full-scale experiments using MM and TVS developed in the IMTP of the Far Eastern Branch of the RAS. The obtained results indicate that the method presented in the work increases the accuracy of determining the position of the WT MM during manipulation operations.

Keywords: unmanned underwater vehicles, trajectory, working tool, technical vision system, manipulation operations, multi-link manipulator, graphical marker

References

1. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. Sistema dlya avtomaticheskogo vypolneniya manipulyacionnyh operacij s pomoshch'yu podvodnogo robota. Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2017. Vol. 18. No. 8. P. 543-549.
2. Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu., Shuvalov B.V. Podhod k vypolneniyu ANPA tekhnologicheskikh manipulyacionnyh operacij s razlichnymi podvodnymi ob'ektami. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2019. No. 1. P. 31-37.
3. 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.
4. Konoplin A.Yu., Yurmanov A.P., Pyatavin P.A. Metod formirovaniya traektorij podvodnogo manipulyatora dlya supervizornogo vypolneniya operacij. Extreme Robotics. 2020. Vol. 1. No. 1. P. 259-264.
5. Möller T., Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection. Journ. of Graphics Tools. 1997. Vol 2 (1). P. 21-28.
6. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. Metod supervizornogo upravleniya manipulyatorom podvodnogo robota. Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2018. No. 2. P. 95-99.
7. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. "Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects," Applied Sciences, 2022; vol. 12, no. 3, P. 1666.
8. Shortis M. Calibration Techniques for Accurate Measurements by Underwater Camera Systems. Sensors 2015, 15, 30810-30826.
9. Schmidt V.E., Rzhano Y. "Measurement of micro-bathymetry with a GOPRO underwater stereo camera pair," 2012 Oceans, Hampton Roads, VA, USA, 2012, pp. 1-6.
10. Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Pyatavin P., Panchuk M., Vasilenko R. System for Identifying Target Objects to Perform Manipulative Operations by Unmanned Underwater Vehicles. International Conference on Ocean Studies. Vladivostok, 2022. P. 55-59.
11. Babuhin N.I., Smirnov V.A. Kalibrovka kamery s primeneniem sovremennyh vychislitel'nyh sredstv obrabotki dannyh. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2020. No. 9. P. 72-76.
12. Patent RF № RU 2789190, 31.01.2023. Sposob kalibrovki podvodnoj videokamery. Filaretov V.V.
13. Nathalie Pessel, Jan Operderbecke, Marie-José Aldon. Camera Self-Calibration in Underwater Environment. WSCG: Winter School of Computer Graphics, Feb 2003, Plzen, Czech Republic. pp.104-110.
14. Pecheux N., Creuze V., Comby F., Tempier O. Self Calibration of a Sonar-Vision System for Underwater Vehicles: A New Method and a Dataset. Sensors 2023, 23, 1700.
15. Detection of ArUco Markers [Elektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html (Access Date: 20.10.2023).
16. Juyang Weng, Paul Cohen, Marc Herniou. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. IEEE Transaction on pattern analysis nad machine intelligence, vol. 14, no. 10, 1992
17. Donald B. Gennery. Stereo-camera calibration. Artificial Intelligence Laboratory, Computer Science Department Stanford University, Stanford, 1979.
18. Camera Calibration and 3D Reconstruction [Elektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: https://docs.opencv.org/3.4/d9/d0c/group_calib3d.html (Access Date: 20.10.2023).

About authors

YURMANOV Aleksandr Pavlovich, scientific researcher
Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of
RAS

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Phone: 89146786060

E-mail: yurmanov_a@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6849-3700

PANCHUK Maksim Olegovich, junior researcher
Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of
RAS

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Phone: 89996170369

E-mail: my_panchuk@mail.ru

ORCID: 0009-0006-2738-6347

KONOPLIN Alexander Yurevich, Ph.D, Acting Director
Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of
RAS

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Phone: 89244298396

E-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7554-1002

Recommended citation:

Yurmanov A.P., Panchuk M.O., Konoplin A.Yu. METHOD FOR CORRECTION OF WORKING TOOL TRAJECTORIES OF MULTI-LINK MANIPULATOR OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLE. Underwater investigations and robotics. 2023. No. 4 (46). P. 43–51. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_46_04_04. EDN: EIPJUC.

