

УДК 629.584:553.98

Разработка модульно-унифицированных систем управления манипуляторными комплексами и автономными необитаемыми подводными аппаратами интервенционного класса для решения задач автоматического пробоотбора грунта

А.М. Маевский^{1,2*}, В.Ю. Занин¹

¹ АО «НПП ПТ «Океанос», Российская Федерация, 194295, г. Санкт-Петербург, б-р Поэтический, д. 2, литер А, пом. 1384

² ЮФУ, Российская Федерация, 344006, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42

* E-mail: maevskiy_andrey@mail.ru

Ключевые слова: интервенционный подводный аппарат, АНПА, система управления, отбор проб грунта, резидентные подводные технологии.

Тезисы. 24 января 2020 г. ученые Океанографического института в Вудс-Хоуле (*англ.* Woods Hole Oceanographic Institution) осуществили погружение гибридного необитаемого подводного аппарата Neried в Эгейском море на глубину более 500 м для исследования подводного вулкана Колумбо. Во время работ также впервые осуществлен автоматический отбор проб грунта в условиях открытого моря. Подобные исследования крайне важны с точки зрения освоения океана и шельфовой зоны. Дно морей и океанов – одна из самых биологически разнообразных и наименее изученных экосистем на планете, при этом подвергающаяся интенсивным прямым и косвенным воздействиям жизнедеятельности человечества. Контроль и оценка результатов этого воздействия требует применения робототехнических комплексов, в том числе для отбора проб грунта, биологических организмов и др.

В статье описываются результаты, достигнутые учеными и инженерами компании АО «НПП ПТ «Океанос» в сфере проектирования и применения легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата, предназначенного для взятия проб грунта. Полученные результаты исследований и натурных испытаний доказывают возможность применения разработанной технологии и устройства в режимах реальной эксплуатации.

Сегодня подводная робототехника широко применяется в сфере исследования и освоения дна морей и океанов. Например, Океанографический институт в Вудс-Хоуле в январе 2020 г. организовал погружение своего гибридного телеуправляемого подводного аппарата (ТНПА) Neried в Эгейском море в районе о-ва Санторини, где на глубине более 500 м ТНПА осуществил забор проб грунта (рис. 1). Целями исследования являлись изучение автоматической работы заборного устройства и получение данных о загрязненных породах и осадках в окрестностях вулкана Колумбо [1].

Другая зарубежная разработка – специализированный гибкий манипулятор (рис. 2), установленный на подводном обитаемом аппарате Triton 3К3.



Рис. 1. Выполнение ТНПА Neried работ по забору фракций грунта



Рис. 2. Выполнение работ гибким манипулятором в районе архипелага Фернанду-ди-Норонья (Бразилия)

Это корпоративный проект 2018–2020 гг. Кембриджского института и других научных лабораторий. Комплекс позволяет осуществлять высокоточные операции на основе движений кисти оператора. Технология обеспечивает забор хрупких биологических проб, таких, например, как кораллы [2].

В РФ подобные работы на базе отечественных разработок единичны. Так, с 2016 г. АО «НПП ПТ «Океанос» ведет разработку автоматизированного подводного манипуляторного комплекса (МК) для телеуправляемой и автономной подводной робототехники, который в части телеуправляемой тематики коммерциализован для самоходного подводного аппарата из состава комплекса «Александрит-ИСПУМ-Э» АО «ГНПП «Регион», а в части автономной тематики прошел успешное апробирование в рамках натурных испытаний на полигоне подводной робототехники испытательного бассейна ФГБОУ ВО СПбГМТУ. Данная работа ведется в рамках развития направления резидентных подводных технологий, в том числе разработки легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата (ЛИ АНПА) [3–5].

Применение резидентных технологий в морской нефтегазодобывающей отрасли

Резидентная робототехника – новейший класс морских робототехнических комплексов, функционирующих в составе донной инфраструктуры нефтегазового месторождения. Как правило, аппараты такого рода базируются на донных станциях и имеют возможность как дистанционного, так и автономного управления. Разработанное программное обеспечение должно быть адаптивным и реконфигурируемым для оперативного изменения под формирующиеся задачи. На данный момент к уровню практической реализации в мире

подошло только несколько компаний: норвежская компания IKM Subsea & Technology с аппаратом Merlin UCV, американская компания Oceaneering Int. с аппаратами Freedom и E-ROV, шведская компания Saab Seaeeye с аппаратом Sabertooth и итальянская компания Saipem с аппаратом Hydrone-R (рис. 3). Перечисленные аппараты имеют на борту различные по имеющимся степеням свободы манипуляторные комплексы для осуществления работ, связанных с сервисным обслуживанием донной инфраструктуры месторождений.

Аппараты такого типа обычно осуществляют следующие работы:

- обследование и инспекцию элементов подводной инфраструктуры (трубопроводов, подводных добывающих комплексов (ПДК)) [6];
- сервисное обслуживание подводных панелей ПДК [7];
- исследование дна, поиск месторождений полезных ископаемых, в том числе углеводородов [8];
- отбор проб грунта [9].

Все перечисленные работы крайне сложны и трудоемки, требуют комплексного решения многих задач. Так, необходимо обеспечить корректное управление как АНПА, так и установленным на борту МК. Многие системы на сегодняшний момент спроектированы таким образом, что подразумевают частичное вмешательство оператора в процесс управления аппаратом. Однако сфера резидентных технологий предполагает максимальную автоматизацию. Исходя из этого перед разработчиками ставятся многочисленные задачи, связанные с необходимостью обеспечить полноценное автономное функционирование аппарата в неизвестной динамически изменяющейся среде с возможными статическими и движущимися препятствиями.



Рис. 3. Резидентные аппараты зарубежных компаний



Разработка системы управления манипуляторным комплексом

Для обеспечения безопасной работы МК на борту ЛИ АНПА необходимо предварительно решить задачу определения допустимых рабочих положений МК и сформировать области ограничений, включая форму корпуса ЛИ АНПА и возможных внешних препятствий. Кроме того, важно создать систему автоматического управления (САУ) МК, способную обрабатывать заданные положения в режиме реального времени, с возможностью ее будущего совершенствования и добавления алгоритмов обхода препятствий.

Задачу определения зон ограничений ЛИ АНПА решали методом сеточной триангуляции модели. Разработанная трехмерная модель аппарата в среде Matlab была преобразована в триангуляционную модель, состоящую из сформированных массивов элементов и узлов (рис. 4). Для проверки работоспособности алгоритма в разработанной симуляционной модели сформирована точка проверки Check Point, после задания которой осуществляется проверка нахождения данной точки внутри триангуляционной модели.

Алгоритм проверки следующий (рис. 5):

- 1) строится замкнутая модель триангуляции аппарата, в структуре данных которой хранится информация о гранях F и вершинах P в трехмерных координатах x, y, z для каждой грани;
- 2) на основании полученных данных из массивов триангуляционная модель заполняется вокселями, после чего формируется массив всех внутренних вокселей модели;
- 3) сформированные воксели состоят из шести прямоугольных полигонов;
- 4) от имеющейся точки строятся лучи по направлениям к каждой вершине каждого полигона;
- 5) происходит проверка, находится ли луч на той же стороне ребра, что и противоположная вершина;
- 6) если условие 5 выполняется для всех ребер, то точка лежит в области модели.

На следующем этапе необходимо разработать общую симуляционную модель МК. В таблице представлены параметры D-H-матрицы рассматриваемого МК.

Механическая конструкция МК накладывает следующие ограничения на допустимые углы поворота θ каждого из сочленений:

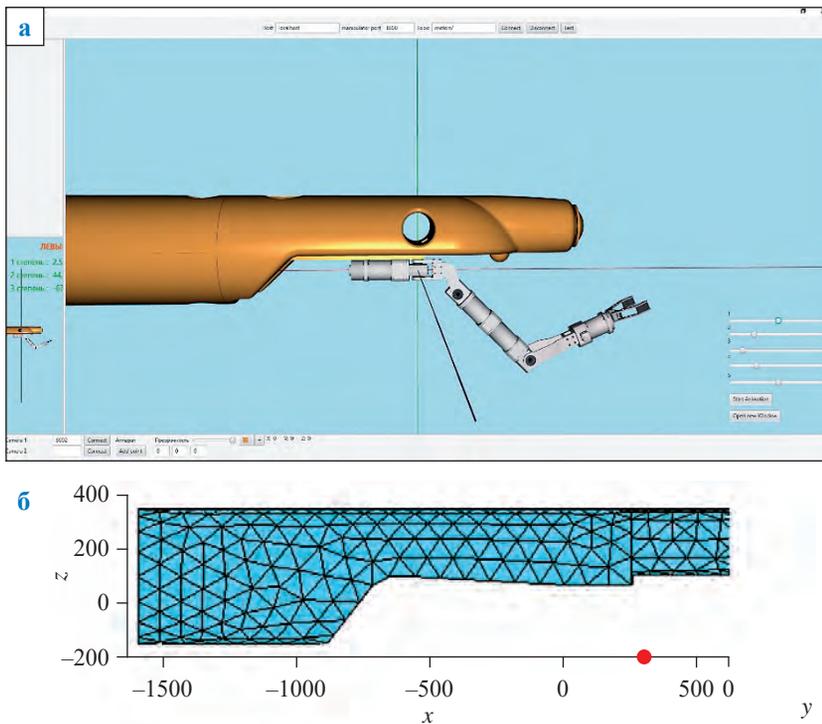


Рис. 4. 3D-модель передней части корпуса ЛИ АНПА (а) и ее триангуляционная модель в среде Matlab (б)

$$\begin{aligned} \theta_1 &= [-90;90]; \theta_2 = [-90;180]; \\ \theta_3 &= [-135;135]. \end{aligned} \quad (1)$$

Из полученной матрицы находят матрицы взаимосвязи всех сочленений манипулятора и его рабочего органа:

$$FK = [T_1^0, T_2^1, T_3^2]. \quad (2)$$

На основании полученных матриц можно вычислить координаты окончания каждого из сочленений:

$$\begin{aligned} Q_1 &= [FK(1,4), FK(1,8), FK(1,12)]; \\ Q_2 &= [FK(2,4), FK(2, 8), FK(2,12)]; \\ Q_3 &= [FK(3,4), FK(3, 8), FK(3,12)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Система автоматического управления МК основана на методе псевдообратной кинематики на основе матрицы якобиана манипулятора. Для этого рассчитаем якобиан манипулятора по следующей формуле

$$J = [J_1; J_2; J_3], \quad (4)$$

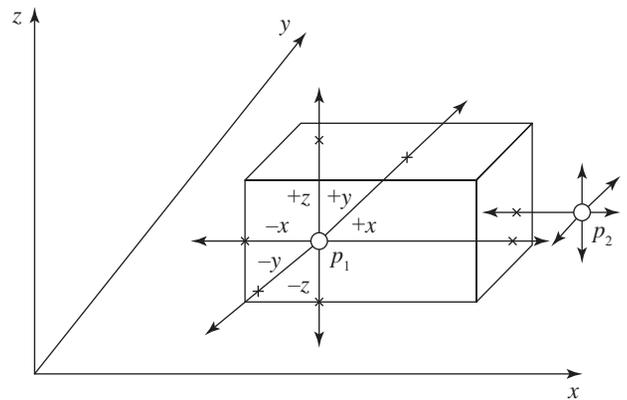


Рис. 5. Схема проверки нахождения точки внутри вокселя триангуляционной модели ЛИ АНПА

Параметры матрицы Денавита – Хартенберга рассматриваемого МК

Сочленение	<i>a</i> , мм	Угол расположения звена относительно предыдущего звена, рад.	Смещение звена относительно предыдущего звена МК, мм	Угол поворота, рад.
1	193	$\pi/2$	-117	θ_1
2	552	0	0	θ_2
3	596	0	0	θ_3

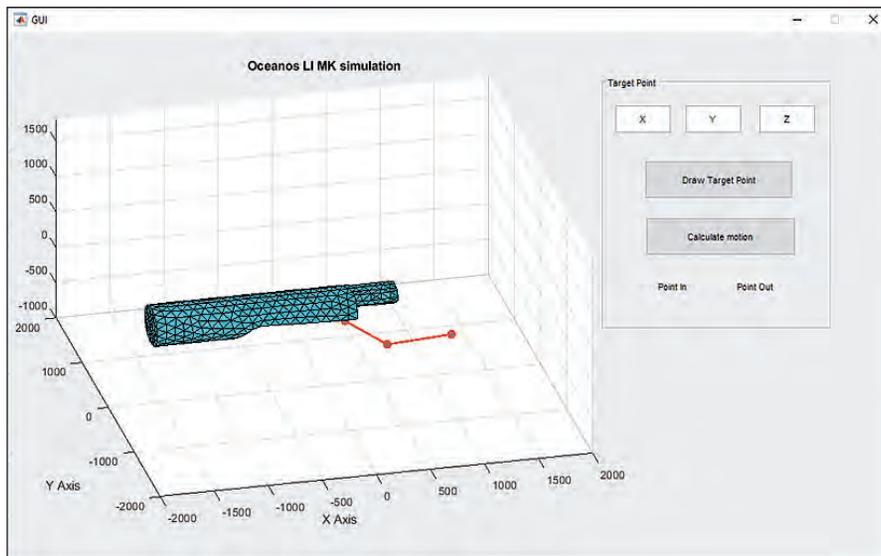


Рис. 6. Окно симуляции

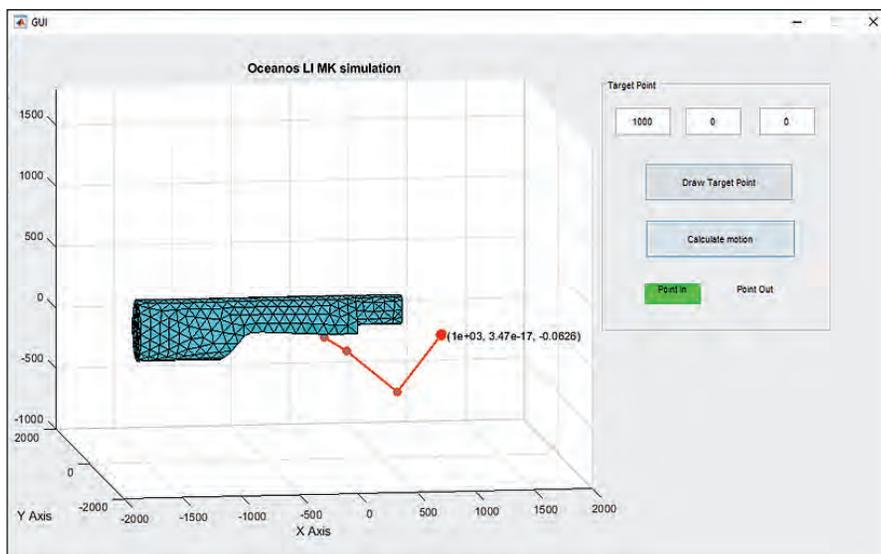
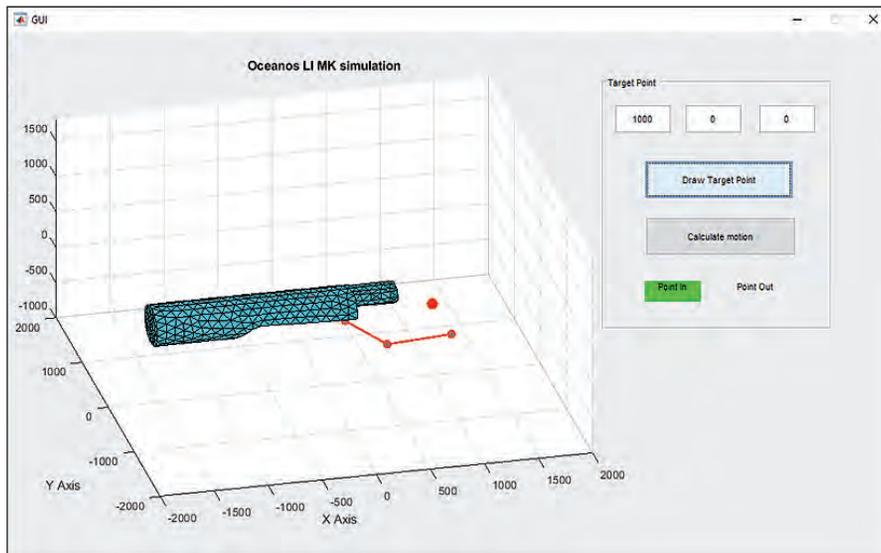


Рис. 7. Установка целевой точки в передней части ЛИ АНПА

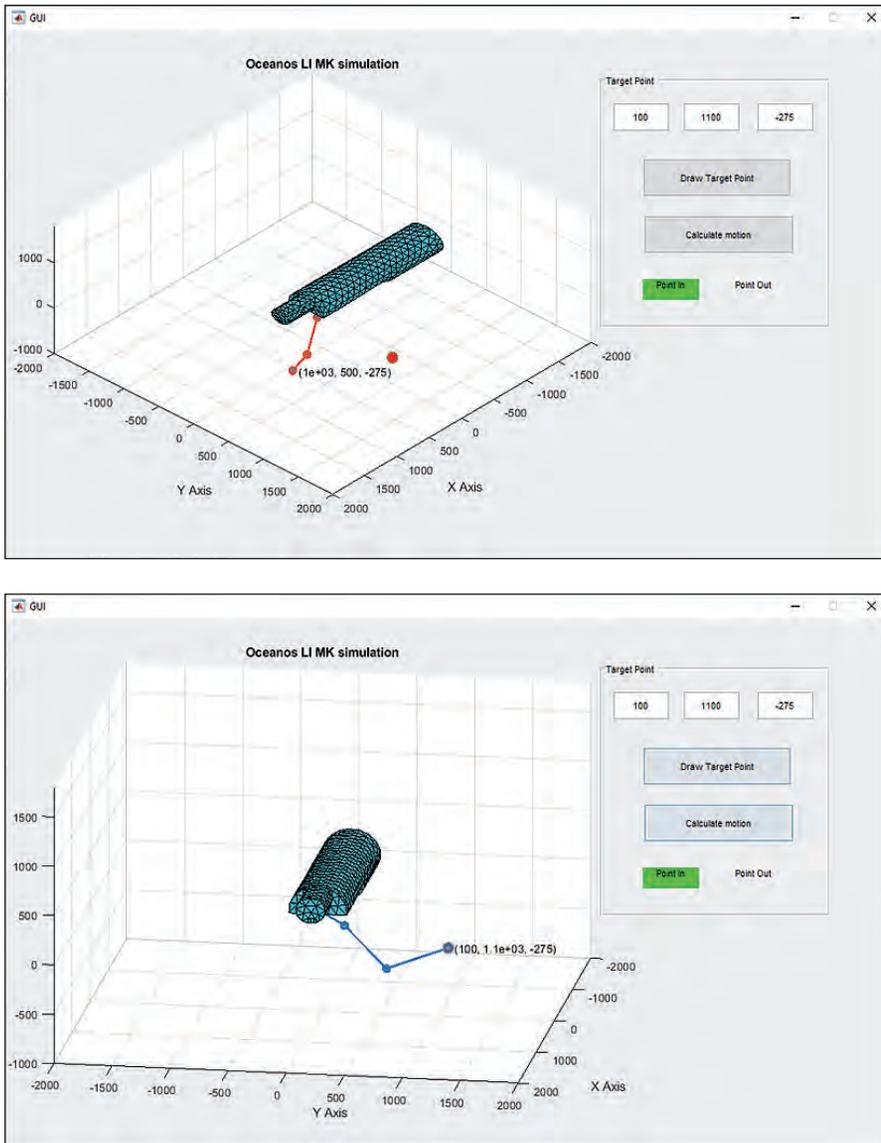


Рис. 7'. Установка целевой точки с левого борта ЛИ АНПА

где $J_i = \left[\frac{Z_{i-1}(O_n - O_{i-1})}{Z_{i-1}} \right]$, i – номер сочленения

МК; O_n – координаты рабочего органа манипулятора; Z_i – первые три элемента 3-й колонны матрицы T_i^0 ; O_i – первые три элемента 4-й колонны матрицы T_i^0 .

Поскольку матрица J квадратная размерностью 3×3 , то справедливым сочтем следующее выражение:

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X}, \tag{5}$$

где \dot{X} – приращение координат x, y, z с равным шагом, найденное как $(pos_target - pos_start)/k$; pos_target – целевая позиция рабочего органа МК; pos_start – стартовая

позиция рабочего органа МК; k – коэффициент шага приращения, фактически влияющий на угловую скорость перемещения манипулятора; J^{-1} – псевдообратная матрица МК. В ходе вычисления \dot{q} необходимо установить допустимый предел ошибки приращения $\epsilon = \min(pos_target - pos_start) = 10^{-2}$.

В результате разработан симулятор (рис. 6), позволяющий проверить работоспособность описанных алгоритмов управления.

На рис. 4 видно, что манипулятор всегда находится в начальном положении $q_start = [0; -45; 50]$. Данное положение выбрано как начальное рабочее. Зададим ряд целевых точек pos_start различного положения в пространстве. Некоторые из этих точек

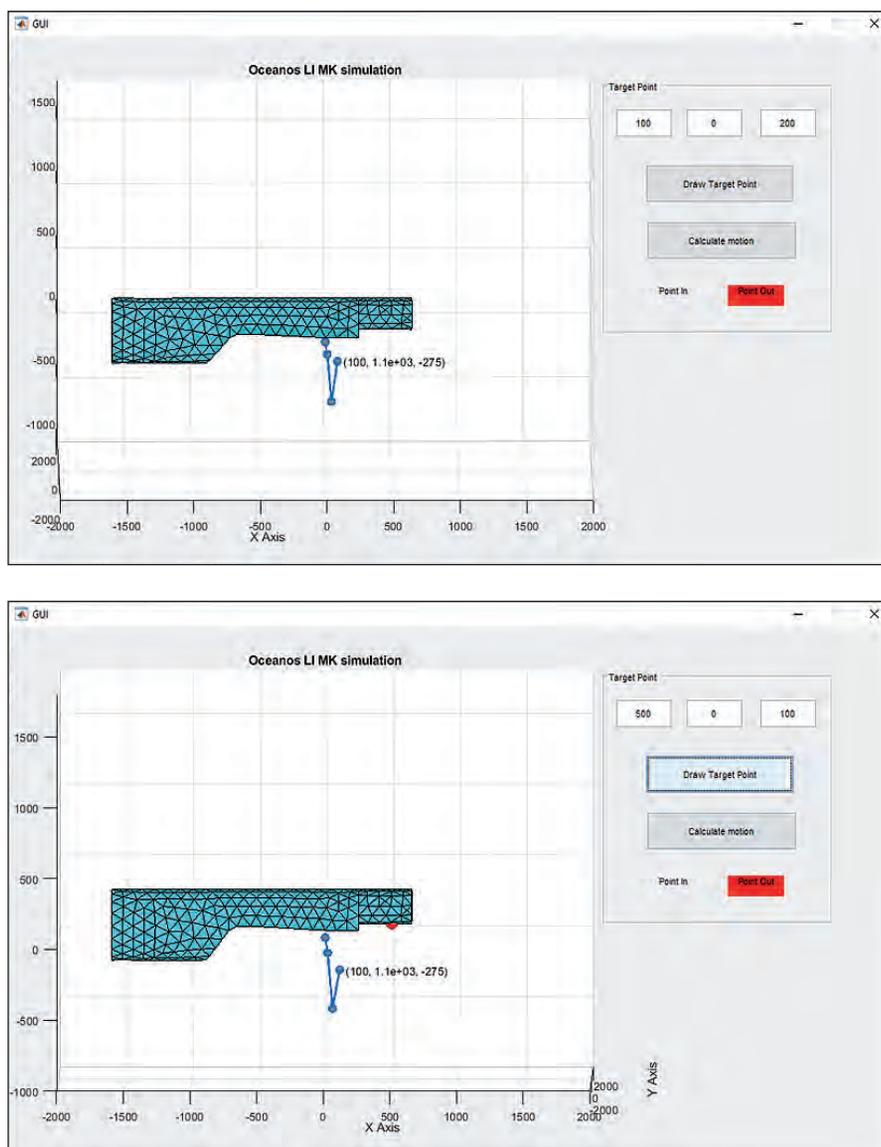


Рис. 7". Установка целевой точки внутри области корпуса ЛИ АПНА

будут находиться в области корпуса ЛИ АПНА, на что в симуляторе укажет соответствующий индикатор. Пример работы симулятора, подтверждающий работоспособность алгоритма проверки доступности целевой точки, представлен на рис. 7–7".

Алгоритм функционирования ЛИ АПНА и его систем движения и стабилизации подробно описан ранее [4, 10]. Следует отметить, что работа САУ МК также способна обеспечить выполнение забора грунта при возможных недетерминированных воздействиях, оказываемых на аппарат.

Результаты натуральных испытаний

Разработанные алгоритмы апробированы в рамках натуральных испытаний. По результатам испытаний опубликованы работы, демонстрирующие работоспособность данной системы при решении задач на макете рабочей панели ПДК (рис. 8) [10]. Там также перечисляются смежные технологии, используемые в «демонстраторе технологии» ЛИ АПНА, например, такие как система оптического обмена информацией, безджойстиковое управление МК, система технического зрения [10].

Следующим этапом испытаний стал забор фракций грунта. Для выполнения поставленных задач МК необходимо последовательно перевести в ряд определенных позиций. (График изменения положения сочленений МК



Рис. 8. Результаты испытаний ЛИ АНПА и работы МК с макетом рабочей панели

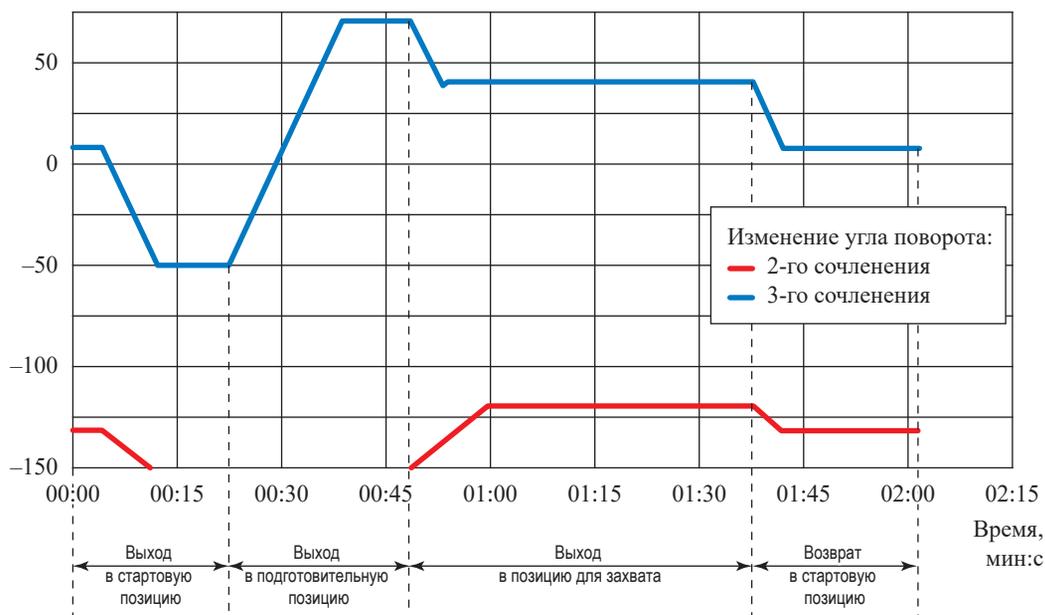


Рис. 9. Позиции изменения углов поворота сочленений МК

изображен на рис. 9.). По достижении дна МК переходил в режим забора, после чего осуществлял захват фракций грунта (рис. 10). По окончании процесса забора МК с захваченными образцами переходил в транспортное положение.

В ходе выполнения задачи для более стабильного захвата фракций САУ ЛИ АНПА компенсировала как внутренние возмущения со стороны МК, так и возмущения со стороны внешней среды. На рис. 11 отражена работа системы стабилизации на основных этапах выполнения задачи. Моменты изменения положения сочленений МК и глубины погружения аппарата околнурены черным. На графиках видно, что разработанная система с достаточной степенью точности способна удерживать аппарат на заданной глубине. Существенное отклонение по дифференту (оранжевая линия на графике) наблюдается в момент забора грунта и указывает на то, что МК аппарата

«уперся» в дно. Для компенсации данного явления необходима более точная настройка САУ, в частности контура управления, отвечающего за дифферент аппарата.

В АО «НПП ПТ «Океанос» разработана САУ МК ЛИ АНПА, позволяющая организовать перемещение МК как по заданным координатам, так и в режиме прямого управления. В САУ встроены алгоритмы проверки доступности целевых точек на основании построенной трехмерной триангуляционной модели корпуса ЛИ АНПА. Также алгоритм способен осуществлять проверку пересечения промежуточных точек, которые могут описывать отдельные сочленения МК. Это позволит избежать ситуаций, в которых отдельные сочленения МК могут пересекать области ограничений (например, перекрытие оптического канала

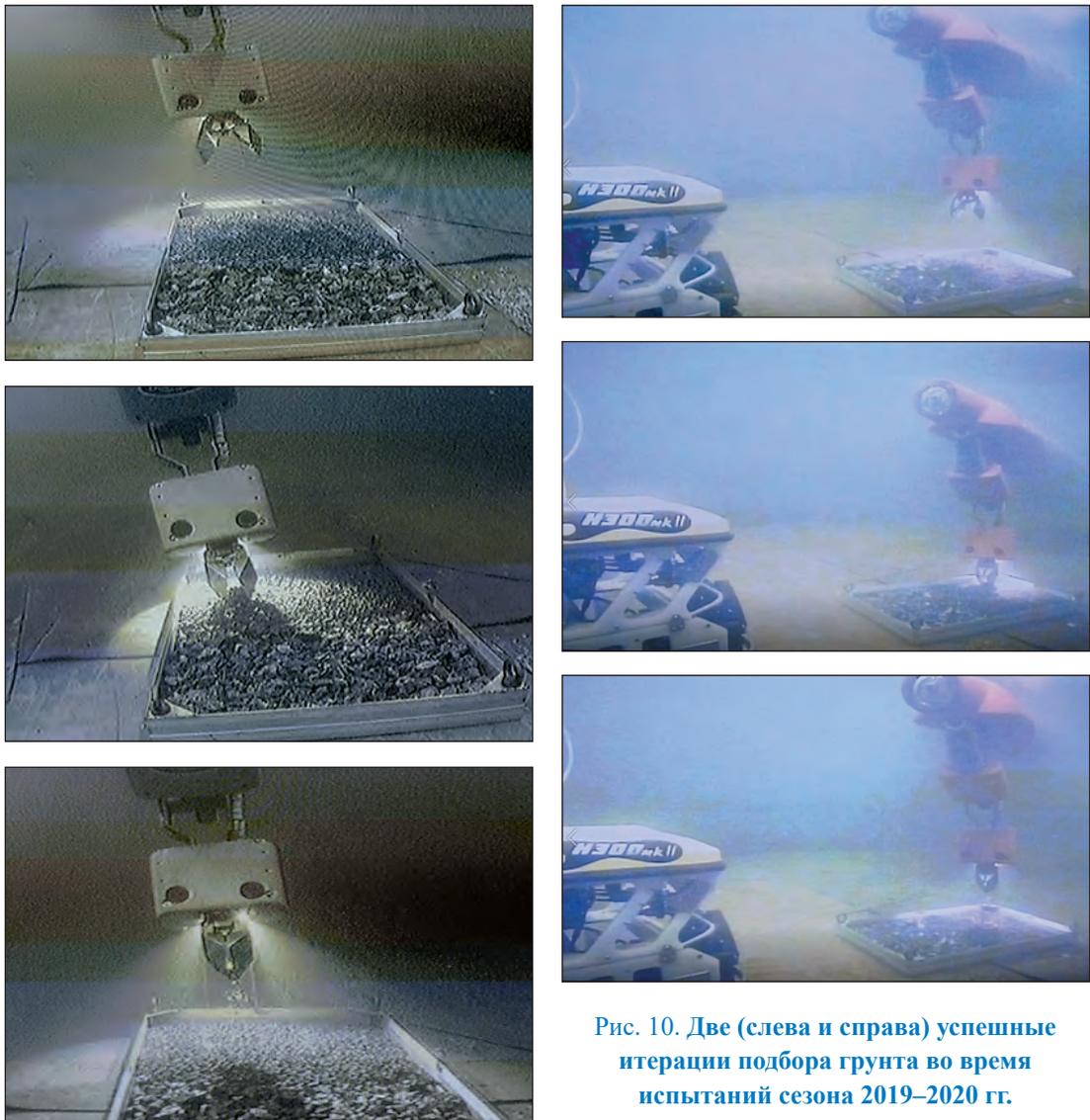


Рис. 10. Две (слева и справа) успешные итерации подбора грунта во время испытаний сезона 2019–2020 гг.

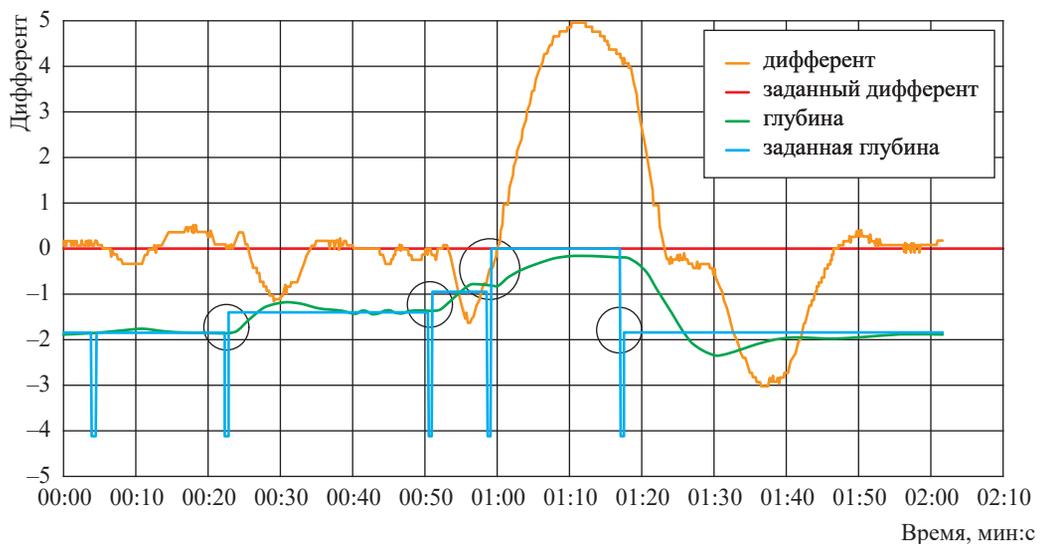


Рис. 11. Работа систем стабилизации ЛИ АНПА при заборе грунта

связи 3-й степенью МК в режиме работы по такому каналу). Разработанный алгоритм подвергается легкой модернизации и адаптации, позволяет учесть дополнительные ограничения, накладываемые на движение МК, например,

внешние препятствия. САУ способна легко интегрировать различные системы планирования траектории МК в недетерминированных средах, чему будут посвящены дальнейшие исследования авторов.

Список литературы

1. WHOI underwater robot takes first known automated sample from ocean // Woods Hole Oceanographic Institution. – 08.01.2020. – <https://www.whoi.edu/press-room/news-release/whoi-underwater-robot-takes-first-known-automated-sample-from-ocean>
2. Phillips B.T. A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate deep-sea biological exploration / Brennan T. Phillips, Kaitlyn P. Becker, Shunichi Kurumaya, etc. // *Scientific Reports*. – 2018. – Т. 8. – Ст. № 14779.
3. Применение подводных глайдеров для геологоразведки // *RoboTrends*. – <http://robotrends.ru/pub/1837/primenenie-podvodnyh-glyayderov-dlya-geologorazvedki>
4. Маевский А.М. Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах / А.М. Маевский, Б.А. Гайкович // Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X Молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 83–98.
5. Занин В.Ю. Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата интервенционного класса и сопутствующих технологий / В.Ю. Занин, А.М. Маевский и др. // Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. – 2019. – С. 18–26. – https://oceanos.ru/s1/files/File/2019_Arctic_residential.pdf
6. Capocci R. Inspection-class remotely operated vehicles – A review / R. Capocci, G. Dooly, E. Omerdic, et al. // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2017. – Т. 5. – № 1. – С. 13. – <https://doi.org/10.3390/jmse5010013>.
7. Total marine technology ROV and subsea tooling handbook. – https://www.tmtrov.com.au/sites/default/files/tmt_rov_and_tooling_handbook_2017.pdf
8. Маевский А.М. Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов / А.М. Маевский, Б.А. Гайкович // *Вести газовой науки: науч.-технический сб.* – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2019. – № 2 (39): *Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа*. – С. 30–41.
9. Hwang J. AUV adaptive sampling methods: a review / Hwang J., N. Bose, Sh. Fan // *Applied Sciences*. – 2019. – № 9 (15). – № 3145. – <https://doi.org/10.3390/app9153145>.
10. Занин В.Ю. Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии. Отечественный и зарубежный опыт / В.Ю. Занин, А.М. Маевский, И.В. Кожемякин и др. // *Морские информационно-управляющие системы*. – 2020. – № 1 (17). – С. 94–102. – http://oceanplatform.ru/wp-content/uploads/2020/08/journal_07_2020.pdf

Designing modular-unified control systems for manipulator complexes and autonomous unmanned submarine vehicles of interventional class to implement tasks of automated sampling of soil

A.M. Mayevskiy^{1,2*}, V.Yu. Zanin¹

¹ OCEANOS JSC, off. 1384, Bld. 2, liter A, Poeticheskiy boulevard, St. Petersburg, 194295, Russian Federation

² Southern Federal University, Bld. 105/42, Bolshaya Sadovaya street, Rostov-on-Don, Rostov region, 344006, Russian Federation

* E-mail: maevskiy_andrey@mail.ru

Abstract. On January 24, 2020, the Woods Hole Oceanographic Institution scientists carried out the 500 meter dive of the Neried hybrid unmanned submarine apparatus in Aegean Sea to examine the underwater volcano Kolumbo. During these works, there was the first automated sampling of bottom soil in open waters. Such explorations are rather actual in context of mastering the ocean and the shelf zones.

The bottom of the seas and the oceans is one of the most biologically diverse and the least studied ecosystems in the world; at that, it is subject of the intensive direct and indirect manmade exposure. Control and assessment of this effect demand application of the robotic machinery including sampling of soil, biological organisms etc. The article describes the achievements of the OCEANOS JSC scientists and engineers in designing and applying a light interventional autonomous unmanned submarine vehicle for soil sampling. The results of studies and the field tests assert the possibility to use the named technology and equipment in practice.

Keywords: interventional submarine vehicle, automated unmanned submarine vehicle, control system, sampling of soil, resident submarine technologies.

References

1. WHOI underwater robot takes first known automated sample from ocean. *Woods Hole Oceanographic Institution* [online]. 8 January 2020. Available from: <https://www.whoi.edu/press-room/news-release/whoi-underwater-robot-takes-first-known-automated-sample-from-ocean>.
2. PHILLIPS, B.T., K.P. BECKER, Sh. KURUMAYA, etc. A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate deep-sea biological exploration. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, paper no. 14779.
3. Application of submarine gliders for geological prospecting [Primeneniye podvodnykh glyayderov dlya geologorazvedki]. *RoboTrends* [online]. Available from: <http://robotrends.ru/pub/1837/primenenie-podvodnyh-glyayderov-dlya-geologorazvedki>. (Russ.).
4. MAYEVSKIY, A.M., B.A. GAYKOVICH. Development of light interventional autonomous uninhabited submarine vehicle aimed at application within submarine resident systems [Razrabotka legkogo interventsionnogo avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata v tselyakh ispolzovaniya v podvodnykh rezidentnykh sistemakh]. In: *14th All-Russia R&D conference and 10th Youthful school-seminar "Control and processing of information in technical systems"*. Rostov-on-Don and Taganrog, Russia: Southern Federal University, 2019, pp. 83–98. (Russ.).
5. ZANIN, V.Yu., A.M. MAYEVSKIY. Designing elements of robotic resident systems as exemplified by a domestic autonomous inhabited submarine vehicle of interventional class and related technologies [Razrabotka elementov podvodnykh robototekhnicheskikh sistem na primere otechestvennogo avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata interventsionnogo klassa i soputstvuyushchikh tekhnologiy]. In: *Collected awardee papers of the International contest of scientific, R&D and innovational projects aimed at development of the Arctic and the continental shelf*, 2019, pp. 18–26. (Russ.). Available from: https://oceanos.ru/s1/files/File/2019_Arctic_residential.pdf
6. CAPOCCI, R., G. DOOLY, E. OMERDIC, et al. Inspection-class remotely operated vehicles – A review. *Journal of Marine Science and Engineering* [online], 2017, vol. 5, no. 1, pp. 13, ISSN 2077-1312. Available from: <https://doi.org/10.3390/jmse5010013>.
7. *Total marine technology ROV and subsea tooling handbook*. Available from: https://www.tmtrov.com.au/sites/default/files/tmt_rov_and_tooling_handbook_2017.pdf
8. MAYEVSKIY, A.M., B.A. GAYKOVICH. Designing hybrid autonomous unmanned vehicles for exploration of hydrocarbon fields [Razrabotka gibridnykh neobitayemykh apparatov dlya issledovaniy mestorozhdeniy uglevodorodov]. *Vesti Gazovoy Nauki: collected scientific technical papers*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2019, no. 2 (39): Modern approach and promising technologies within the projects for development of oil-and-gas fields at Russian continental shelf, pp. 30–41. ISSN 2306-8949. (Russ.).
9. HWANG, J., N. BOSE, Sh. FAN. AUV adaptive sampling methods: a review. *Applied Sciences*, 2019, no. 9(15), paper no. 3145, ISSN 1454-5101. Available from: <https://doi.org/10.3390/app9153145>.
10. ZANIN, V.Yu., A.M. MAYEVSKIY, I.V. KOZHEMYAKIN, et al. Application of marine robotics for tasks of real-time oceanography. Domestic and foreign practice [Ispolzovaniye morskoy robototekhniki v zadachakh operativnoy okeanografii. Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt]. *Morskiye Informatsionno-Upravlyayushchiye Sistemy*, 2020, no. 1(17), pp. 94–102, ISSN 2308-2119. (Russ.). Available from: http://oceanplatform.ru/wp-content/uploads/2020/08/journal_07_2020.pdf