

Визуальная навигация для обследования промышленных подводных сооружений с использованием виртуальной координатной сети

А.П. Кудряшов¹

¹ *Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ул. Радио, 5, Владивосток, 690041, РФ*

Аннотация

Инспекция объектов подводной промышленной инфраструктуры с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) требует высокой точности навигации АНПА относительно инспектируемых объектов. Наряду с традиционными средствами навигации, базирующимися на инерционной навигационной системе и гидролокаторах, сегодня активно разрабатываются и технологии, основанные на обработке видеoinформации. Методы, основанные на визуальной одометрии, могут обеспечивать более высокую точность навигации в условиях локального маневрирования при небольших расстояниях до объектов. Однако при длительных перемещениях АНПА для таких методов свойственно накопление погрешности при расчете траектории. Поэтому в настоящей работе предлагается метод навигации, позволяющий существенно повысить точность движения АНПА в координатном пространстве инспектируемого объекта благодаря генерации и использованию виртуальной сети координатной привязки к подводному объекту.

Ключевые слова

Автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), подводный добывающий комплекс (ПДК), стереоизображения, навигация, координатная привязка, виртуальная сеть.

Visual Navigation for the Inspection of Industrial Underwater Structures Using a Virtual Coordinate Network

A.P. Kudryashov¹

¹ *Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 690041, Vladivostok, Russia*

Abstract

Inspection of underwater industrial infrastructure facilities using autonomous uninhabited underwater vehicles (AUVs) requires high accuracy of AUV navigation relative to the objects being inspected. Along with traditional navigation aids based on the inertial navigation system and sonars, technologies based on video information processing are being actively developed today. Methods based on visual odometry can provide higher navigation accuracy in conditions of local maneuvering at small distances to objects. However, during long-term movements of the AUV, such methods tend to accumulate errors in the calculation of the trajectory. Therefore, this paper proposes a navigation method that can significantly improve the accuracy of AUV movement in the coordinate space of the inspected object due to the generation and use of a virtual network of coordinate reference to an underwater object.

Keywords

Autonomous underwater vehicle (AUV), underwater production complex, stereo images, navigation, coordinate referencing, virtual network.

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: alkud1981@mail.com (А.П. Кудряшов)

ORCID: 0000-0003-3595-3648 (А.П. Кудряшов)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

1. Введение

Одной из практически важных проблем применения АНПА является инспекция объектов подводной промышленной инфраструктуры, включая подводные трубопроводы, коммуникации, подводные добычные комплексы и др. В [1] дается обзор по проблеме инспекции подводных объектов и обосновывается необходимость разработки новых технологий на базе использования АНПА. Выполнение инспекционной миссии требует высокой точности навигации АНПА относительно инспектируемых объектов, что необходимо для детального осмотра запланированных элементов этих объектов. При этом используются разные технологии с применением различного типа сенсоров. Обычно навигация АНПА использует инерциальную навигационную систему, которая сочетается со вспомогательными датчиками или другими навигационными системами, такими как доплеровский лаг, компас, датчик давления, глобальная система позиционирования (ГЛОНАСС, GPS), сонар, или геофизическая навигационная система. Обзор последних достижений в области интегрированных навигационных технологий для АНПА приведен в [2]. В [3] даны некоторые примеры разработки методов навигации АНПА с различными комбинациями сенсоров.

Также, в последнее время, активно развиваются технологии навигации с обработкой видеоинформации. Визуальная одометрия была хорошо изучена для воздушных и наземных приложений, но современные алгоритмы недостаточно хорошо работают под водой. Поэтому в ряде работ усилия были направлены на разработку алгоритмов с использованием камер, которые могут преодолевать негативное влияние некоторых факторов подводной среды, препятствующих распознаванию объектов.

В [4] были предложены два алгоритма визуальной одометрии на основе стереозрения применительно к случаям близкого перемещения АНПА к морскому дну. В статье [5] представлено исследование по тестированию различных решений для визуальной одометрии для АНПА.

Отдельного рассмотрения требуют инспекционные миссии подводных объектов, располагаемых локальным образом, на ограниченной площади. В этом случае возможно дополнительное повышение точности навигации АНПА за счет учета повторного посещения роботом одних и тех же мест. Задача известна в литературе как «проблема замыкания петли» (loop closing problem). Для ее решения в [6] был предложен метод, известный как BoW (bag-of-words). Позже для решения проблемы «loop closure» были озвучены идеи применения визуальной стерео одометрии, графа позиций, алгоритмов определения «loop closure», для работы в режиме мульти сессии. Например, в [7] большинство этих идей были реализованы и интегрированы в единую систему.

Анализ работ приведенного обзора показывает, что потенциал использования видеоинформации в большинстве современных систем навигации АНПА реализуется достаточно успешно. Вместе с тем, растущие потребности в высокоточной навигации АНПА со стороны практических приложений, требуют дальнейших исследований в этом направлении.

В настоящем докладе предлагается новый подход к решению задачи точной навигации АНПА по видеоинформации при выполнении инспекционной миссии. Подход основывается на комплексном использовании метода визуальной одометрии, виртуальной сети координатной привязки для решения «loop closure problem», а также ранее разработанного авторами метода распознавания и привязки АНПА к объектам подводного добывающего комплекса (ПДК). Предлагаемая технология направлена на повышение точности вычисления локализации АНПА по отношению к инспектируемым подводным объектам с минимизацией вычислительных затрат.

2. Постановка задачи. Описание общего подхода

Предполагается, что при выполнении инспекции штатные бортовые средства навигации АНПА не позволяют обеспечить требуемую для инспекции субметровую точность, но позволяют обеспечить выход АНПА к объекту инспекции. Поэтому рассматривается задача навигации АНПА по видеоинформации, которая потенциально может обеспечить

прецизионную координацию АНПА по отношению к подводному объекту. Предполагается, что АНПА оснащен стереокамерой, фиксирующей видеопоток в процессе движения аппарата по запланированной в инспекционной миссии траектории. В качестве объекта инспекции рассматривается подводный добычный комплекс, состоящий из нескольких объектов, распределенных на ограниченной площади (рисунок 1).

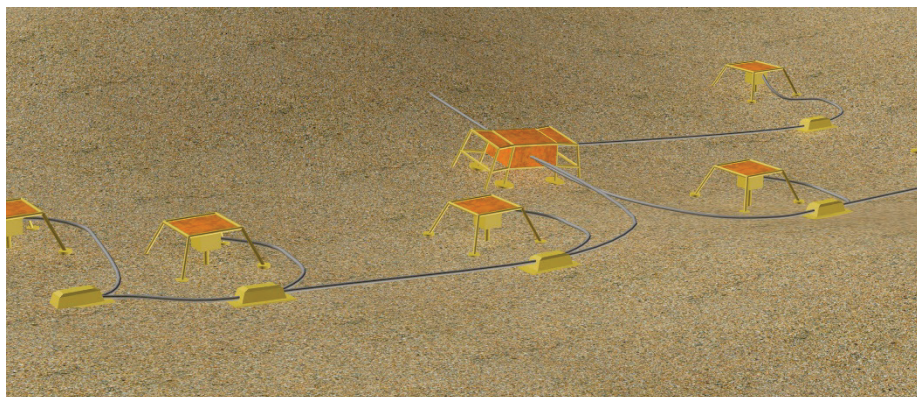


Рисунок 1 – Подводный добывающий комплекс. Модель

Метод визуальной одометрии обеспечивает высокую точность навигации при коротких перемещениях. Однако при длительном движении происходит существенное накопление погрешности в расчете траектории, что требует от разработчиков специальных алгоритмов для уменьшения такой ошибки. Другой нежелательный аспект при выполнении инспекционной миссии – значительные вычислительные затраты при распознавании объекта с привязкой к его системе координат (СК). Поэтому в настоящей работе предлагается подход, основанный на применении виртуальной сети координатной привязки (ВСКП) для повышения точности навигации и снижения вычислительных затрат. ВСКП состоит из пунктов привязки двух типов.

Пункты привязки первого типа - ПП1 предназначены для уменьшения погрешности используемого метода визуальной навигации при совершении АНПА длительных перемещений во время инспекции.

Под ПП1 понимается некоторая позиция траектории, с которой связан набор данных, требуемый для связывания СК начальной позиции и СК ПП1. Он включает в себя:

- стереопару снимков, зафиксированных камерой в данной позиции траектории;
- вычисленную методом визуальной навигации матрицу геометрического преобразования координат из СК АНПА начальной позиции АНПА в СК ПП1;
- координаты этой позиции АНПА во внешней системе координат;
- параметры съемки, определяющие видимый камерой участок дна.

Пункты привязки второго типа – ПП2 обеспечивают прямую координатную привязку АНПА к подводному объекту с помощью ранее разработанного авторами метода распознавания/идентификации объекта [8, 9]. Применяемый метод основан на использовании для распознавания/идентификации объекта его предварительно построенной геометрической модели и применении принципа структурной когерентности.

Соответственно, использование ПП2 обеспечивает расчет траектории АНПА в координатном пространстве ПДК. Следует подчеркнуть, что операция осмотра ПДК не требует точных абсолютных координат АНПА (во внешней СК), так как для управления перемещениями АНПА относительно объектов ПДК достаточно знания его положения в пространстве координат ПДК. Расчет траектории АНПА может производиться, как в СК объекта, так и во внешней СК, в качестве которой рассматривается СК начального положения траектории. Для обзорной (исходной) траектории внешнюю СК обозначим как ВСК1, а для текущей (новой) траектории аналогичную СК обозначим как ВСК2. Для каждой новой траектории обеспечивается необходимая связь между ВСК2 и ВСК1.

Начальное состояние ВСКП формируется при прохождении АНПА по обзорной траектории или при первом прохождении по рабочей траектории. В качестве обзорной траектории выбирается траектория, проходящая над наиболее характерными местами ПДК (местами с

наибольшей вероятностью идентификации) либо траектория, покрывающая весь ПДК (прямоугольным меандром или спиралью).

Таким образом, точность, необходимая для выполнения запланированного инспекционного задания, обеспечивается за счет скоординированной работы метода визуальной навигации и алгоритма привязки АНПА к ПП сформированной ВСКП. При движении АНПА по траектории регулярно осуществляется поиск и привязка к ПП (к которому возможна привязка), и вычисляется положение АНПА в СК ПДК. При этом используются данные, хранимые в ПП. Повышение точности навигации за счет использования ВСКП складывается из двух составляющих. Во-первых, при привязке к ПП происходит частичное обнуление погрешности в работе метода визуальной навигации за счет решения «loop closing problem». Во-вторых, в процессе движения АНПА по инспекционной траектории осуществляется регулярная непосредственная привязка АНПА к ПДК на основе распознавания объекта ПДК.

После выполнения привязки АНПА к ПП выполняется корректировка текущего результата работы метода визуальной навигации в позиции i за счет использования данных ПП. Корректировка заключается в том, что цепочка локальных преобразований, накопленная от начальной позиции до позиции i , заменяется на более короткую, принадлежащую ПП, плюс преобразование H_i , связывающее текущую позицию с ПП. Таким образом, погрешность, соответствующая участку траектории от ПП до позиции, обнуляется, что приводит к скачкообразному снижению погрешности.

3. Расчет инспекционной траектории АНПА

Методика расчета инспекционной траектории основывается на выполнении регулярной привязки АНПА к ПП ВСКП и к объектам ПДК в процессе движения. Инспекционную траекторию условно можно разбить на участки, определяемые точками привязки АНПА к ПП ВСКП и к ПДК. Расчет траектории выполняется на каждом из участков по-разному, с учетом предшествующих привязок АНПА. Положение в каждой позиции текущего участка траектории вычисляется с использованием сохраняемых текущих параметров привязки до появления очередной координатной привязки (рисунок 2). Имеет место ограниченное число возможных ситуаций в зависимости от различия пространственного положения начальной точки траектории ($WCS2$) по отношению к начальной точке исходной траектории ($WCS1$), и от чередования указанных двух типов координатной привязки АНПА. Поэтому предлагаемая методика реализуется алгоритмом, который описывается ниже.

Обозначения. В приводимых ниже формулах используются следующие эквивалентные аббревиатуры:

Подводный добычный комплекс (ПДК) – subsea production system (SPS), виртуальная сеть координатной привязки (ВСКП) – virtual coordinate reference net (VCRN), пункт привязки (ПП) – point reference (PR), АНПА – autonomous underwater vehicle (AUV), внешняя система координат (ВСК) – world coordinate system (WCS).

Сначала вычислим матрицу, связывающую $WCS2$ с $WCS1$, используя привязку АУВ в точке P_{j1}^2 траектории 2 к PR_{i1}^1 траектории 1:

$$H_{wcs2, wcs1} = H_{S2, j1} \cdot H_{j1, PR_{i1}^1} \cdot (H_{wcs1, PR_{i1}^1})^{-1}$$

здесь $H_{wcs2, wcs1}$ – искомая матрица преобразования из $WCS2$ в $WCS1$; $H_{S2, j1}$ – матрица преобразования координат из $WCS2$ стартовой точки новой траектории 2 в СК позиции $j1$ траектории 2 (визуальная одометрия); H_{j1, PR_{i1}^1} – матрица преобразования координат из СК позиции $j1$ траектории АНПА в СК PR_{i1}^1 .

А координаты точки стартовой точки $S2$ в $WCS1$ будут, соответственно:

$$S_2^{wcs1} = S_2^{wcs2} \cdot H_{wcs2, wcs1}$$

Теперь будем вычислять траекторию 2 предлагаемым методом на каждом из участков по отдельности.

1. Расчет траектории 2 на участке $[S2, P_{j1}^2]$.

Координаты произвольной точки P_{k1}^2 в позиции $k1$ в $WCS1$:

$$P_{k1}^{wcs1} = S_2^{wcs2} \cdot H_{1, k1} \cdot H_{wcs2, wcs1};$$

2. Расчет траектории 2 на участке $[P_{j1}^2, P_{j2}^2]$

Вычисляем координаты произвольной точки P_{k2}^2 в позиции $k2$ в WCS1:

$$P_{k2}^{WCS1} = P_{k2}^2 \cdot (H_{j1, k2})^{-1} \cdot H_{j1, WCS1}$$

Здесь $H_{j1, WCS1}$ - матрица привязки АНПА к новому ПП в позиции $j1$. Она вычисляется как:

$$H_{j1, WCS1} = H_{j1, PR^{1i1}} \cdot (H_{WCS1, PR^{1i1}})^{-1}$$

3. Расчет траектории 2 на участке $[P_{j2}^2, P_{j3}^2]$:

В позиции $j2$ выполняется привязка АНПА к объекту ПДК. При последующем движении АНПА до позиции $j3$ работает «метод визуальной навигации» с соответствующим накоплением погрешности.

Вычисляем координаты произвольной точки P_{k3}^2 в СК SPS:

$$P_{k3}^{SPS} = P_{k3}^2 \cdot (H_{j2, k3})^{-1} \cdot H_{j2, SPS}$$

4. Расчет траектории 2 на участке $[P_{j3}^2, E2]$:

Возможны два варианта расчета координат произвольной точки P_{k4}^2 на участке $[P_{j3}^2, E2]$:

Вариант 1. Сначала получаем координаты точки P_{k4}^2 в WCS1 после привязки к P_{i2}^1 (предполагается, что привязка нейтрализует накопленную визуальной одометрией ошибку на участке $[j2, j3]$). К этим координатам применяется ранее полученное преобразование $H_{WCS1, SPS}$:

$$\text{Тогда } P_{k4}^{WCS1} = P_{k4}^2 \cdot (H_{j3, k4})^{-1} \cdot H_{j3, PR^{1i2}} \cdot (H_{WCS1, PR^{1i2}})^{-1} \cdot H_{WCS1, SPS}$$

Здесь P_{k4}^2 – координаты АНПА в СК АНПА в позиции $k4$ траектории 2.

Вариант 2. Вычисление координат произвольной точки P_{k4}^2 на участке $[P_{j3}^2, E2]$ выполняется с использованием последней привязки АНПА к ПДК:

$$P_{k4}^{SPS} = P_{k4}^{AUV} \cdot (H_{j2, k4})^{-1} \cdot H_{j2, PR^{2i3}} \cdot H_{PR^{2i3}, SPS}$$

Здесь $H_{j2, k4}$ – матрица преобразования координат из СК АНПА в позиции $j2$ в СК АНПА в позиции $k4$;

$H_{j2, SPS}$ - матрица преобразования координат из СК АНПА в позиции $j2$ в СК ПДК.

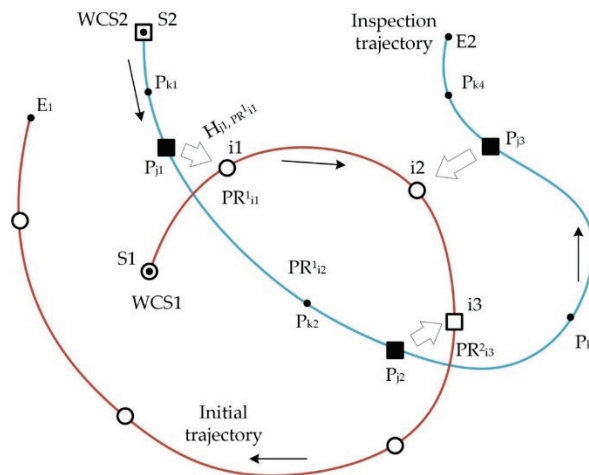


Рисунок 2 – Расчет траектории по виртуальным точкам ВСКП. Белые кружки и квадраты — ориентиры ВСКП. Черными квадратами отмечены позиции на траектории, где осуществляется привязка к опорным точкам

4. Результаты

Для оценки эффективности предложенного метода были выполнены два типа экспериментов: а) с виртуальной сценой (рисунок 3); и б) с используемой вручную камерой Karmin2 (Nerian's 3D Stereo Camera, 25 cm) в лабораторных условиях.

Высота прохождения АНПА над объектами ПДК от 3м до 5м, частота съемки 10 кадров/сек, разрешение снимков 1200 x 900. Расчет координат АНПА осуществлялся в позициях траектории через каждые 10 кадров фотосъемки. Поэтому номера позиций, указываемых на приведенных ниже рисунках, соответствуют значениям времени движения АНПА, измеряемым в секундах.

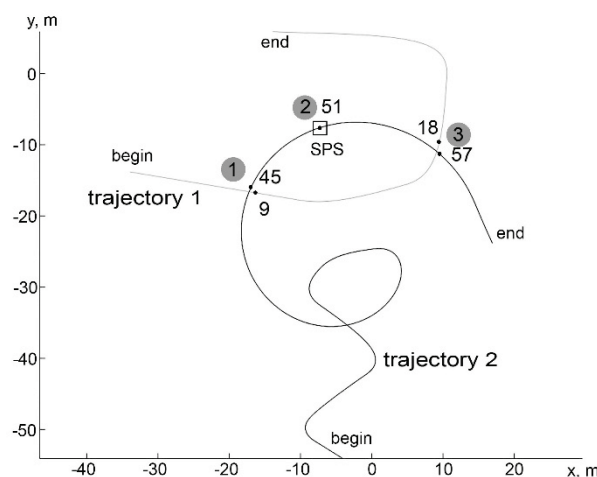


Рисунок 3 – Траектория предварительного прохода АНПА и рабочая траектория в плоскости морского дна с указанными позициями привязок к ТП и к объекту ПДК. Виртуальная сцена

График погрешности в сравнении со стандартным методом для данной виртуальной сцены показан на рисунке 4. Как видно из графика, погрешность при привязках к пунктам привязки VCRN и к СК ПДК уменьшается скачкообразным образом. При привязке к первому ТП (в позиции 45) погрешность уменьшилась в сравнении со стандартным методом с 27.1 см до 9.4 см. При привязке к СК ПДК погрешность уменьшилась (после возрастания до 16.7 см) до 8.7 см против 43.6 см для стандартного метода. При привязке ко второй ТП (в позиции 57) погрешность уменьшилась до 14.2 см против 51.8 см для стандартного метода. Из графика также видно, что при отсутствии привязок накопление ошибки происходит достаточно быстро, из чего следует вывод о необходимости регулярной координатной привязки АНПА к VCRN и ПДК для обеспечения точной координации.

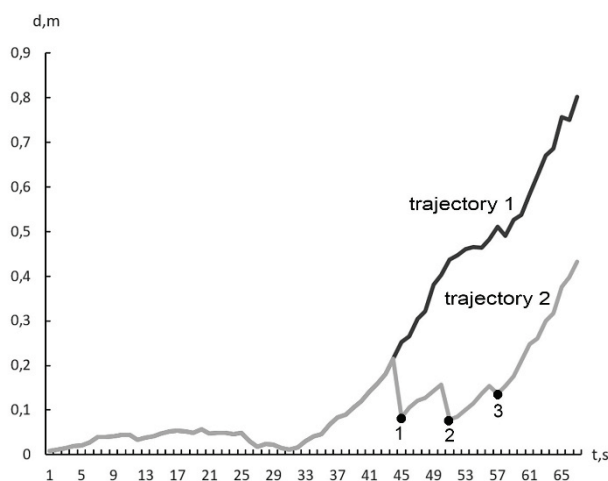


Рисунок 4 – Сравнение «стандартного» метода вычисления траектории АНПА с предлагаемым методом, снижающим погрешность навигации

Эксперимент с камерой Karmin2. Эксперимент проводился в лабораторных условиях – камера перемещалась вручную на высоте 1.5 м от пола со скоростью ≈ 0.25 м/сек. Так же, как и в эксперименте с виртуальной сценой, сначала был выполнен проход с камерой по «предварительной» траектории (траектория 1) для организации ВСКП (расчет траектории выполнялся методом визуальной навигации), а затем по «рабочей» траектории (траектория 2), для расчета которой был применен предлагаемый метод.

На рисунке 5 показано сравнение по точности расчета траектории 2 стандартного метода (визуальная одометрия) и предлагаемого метода. На графике видно, что погрешность на начальном участке траектории до позиции 200 растет (за счет накопления ошибки метода

визуальной одометрии), а после привязки уменьшается от 0.142 м до значения 0.062 м. Далее погрешность снова растет (накопление ошибки визуальной навигации) до значения 0.086 м в позиции 231, а после привязки к объекту становится 0.115 м (эту точность обеспечивает алгоритм распознавания и привязки к объекту). Величина погрешности в этой позиции для метода визуальной одометрии выше - 0.134 м. Далее погрешность увеличивается от 0.115 м до 0.120 м в позиции 261 также за счет накопления ошибки, а при привязке уменьшается до значения 0.078 м.

Полученные результаты для реальных данных с камерой Karmin2 подтверждают результаты для модельной сцены. А именно, регулярное использование при движении АНПА координатных привязок двух типов позволяет обеспечить приемлемую точность навигации при инспекции искусственных подводных объектов.

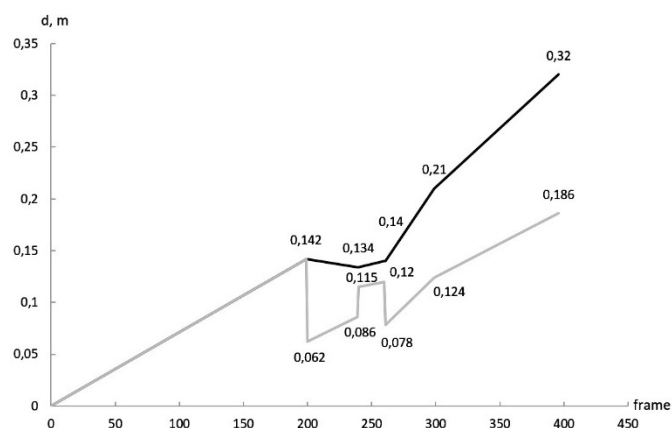


Рисунок 5 – Сравнение «стандартного» метода вычисления траектории АНПА (линия графика выделена черным цветом) с предлагаемым методом (линия графика выделена серым цветом) в эксперименте с камерой Karmin2

5. Заключение

В докладе представлен новый подход к обеспечению точной навигации АНПА при длительных перемещениях, использующий только обработку стереоизображений. Подход основан на эпизодической координатной привязке АНПА к генерируемой виртуальной сети координатной привязки для повышения точности навигации и координации АНПА в координатном пространстве подводного объекта. Предлагаемая методика направлена на обеспечение достаточной точности навигации в пространстве ПДК во время выполнения инспекционных миссий. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность предложенного подхода.

6. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00032, <https://rscf.ru/project/22-11-00032/>.

7. Список источников

- [1] Y. Zhang, M. Zheng, Ch. An. A review of the integrity management of subsea production systems: inspection and monitoring methods // *Ships and Offshore Structures*, 2019, vol.14, Issue 8, p. 1-15. DOI:10.1080/17445302.2019.1565071.
- [2] J. Bao, D. Li, Xi Qiao. Integrated navigation for autonomous underwater vehicles in aquaculture: A review // *Information Processing in Agriculture*, Volume 7, Issue 1, 2020, p. 139-151. DOI:10.1016/j.inpa.2019.04.003.

- [3] M. Jacobi, D. Karimanzira, Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs // Oceans - St. John's 2014, 2014, p. 1-6. DOI:10.1109/OCEANS.2014.7003013.
- [4] S. Wirth, P. L. N. Carrasco, G. O. Codina, Visual odometry for autonomous underwater vehicles. 2013. MTS/IEEE OCEANS. Bergen, p. 1-6. DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608094.
- [5] L. Zacchini, A. Bucci, M. Franchi, R. Costanzi, A. Ridolfi, Mono visual odometry for Autonomous Underwater Vehicles navigation // in 2019 MTS/IEEE Oceans. Marseille, France, 2019. DOI:10.1109/OCEANSE.2019.8867286.
- [6] J. Sivic, A. Zisserman. Video Google: A text retrieval approach to object matching in videos // in Proceedings of the International Conference on Computer Vision, vol. 2, 2003, p. 1470–1477. DOI: 10.1109/ICCV.2003.1238663.
- [7] J. McDonald, M. Kaess, C. Cadena. Real-time 6-DOF multi-session visual SLAM over large-scale environments // Robotics and Autonomous Systems. Volume 61 Issue 10, 2013, p. 1144-1158. DOI:10.1016/j.robot.2012.08.008.
- [8] V. A. Bobkov, A. P. Kudryashov, A. V. Inzartsev. Technology of UAV High-Precision Referencing to Inspected Object // Gyroscopy and Navigation, 2019, vol 10, №4, p. 322-329. DOI:10.1134/S2075108719040060.
- [9] V. Bobkov, A. Kudryashov, A. Inzartsev // Method for the Coordination of Referencing of Autonomous Underwater Vehicles to Man-Made Objects Using Stereo Images. J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9, 1038. DOI:10.3390/jmse9091038.