

АЛГОРИТМЫ ИНСПЕКЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ДОННОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНПА

А.В. Инзарцев, М.А. Панин, В.А. Бобков

АНПА могут быть применены для автоматизированной инспекции объектов подводных добычных комплексов. При наличии априорной информации об объекте (его модели) целью обследования может быть детальная фотосъемка заданных фрагментов объекта. Для выхода АНПА к этим фрагментам используются алгоритмы точной навигационной привязки к объекту на базе анализа последовательности стереоизображений и имеющейся информации о расположении характерных точек объекта. В случае отсутствия априорной информации целью обследования может быть построение детальной 3D модели объекта (с помощью лазерного сканера или многолучевого эхолотатора). Для этого АНПА производит первоначальное обнаружение (локализацию) объекта. Далее его траектория формируется динамически от одной видовой позиции к другой по мере поступления новой информации об объекте. В качестве критерия при выборе очередной видовой позиции используется оценка ее информативности (т.е. объем получаемой новой информации об объекте). Итоговая модель объекта формируется по собранной информации с использованием методов фотограмметрии. В работе рассматриваются подходы и алгоритмы, которые могут быть использованы при обследовании объектов для этих двух случаев.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), построение трехмерной модели объекта, точная навигационная привязка к объекту, фотосъемка заданных фрагментов объекта.

ВВЕДЕНИЕ

Объекты подводной промышленной инфраструктуры, включая подводные добычные комплексы (ПДК), газовые и нефтяные трубопроводы и др., требуют регулярной проверки общего состояния, а также состояния отдельных функциональных модулей. Можно выделить несколько групп задач по обследованию и мониторингу технического состояния объектов ПДК [1]:

- контактный контроль технического состояния объектов (общий и детальный визуальный осмотр средств ПДК с использованием фототелевизионной и звуковизорной аппаратуры, а также обследование объектов ПДК неразрушающими методами контроля);

- контроль планово-высотного состояния объектов ПДК (выполняется бесконтактными методами с использованием гидролокаторов, 3D-лазерных сканеров, фототелевизионной аппаратуры и электромагнитных локаторов с целью проверки фактического

пространственно-углового положения конструкций линейных и площадных объектов и их элементов);

- контроль текущего состояния участка морского дна, на котором размещены объекты ПДК (площадное обследование рельефа дна с использованием различных средств для построения карты местности, обнаружение и обследование посторонних предметов на морском дне);

- контроль экологического состояния объектов и участка морского дна в зоне размещения объектов ПДК (отбор проб воды и грунта, определение утечек рабочих жидкостей, мониторинг с контролем физико-химических полей на площадке ПДК).

Обычно для выполнения этих работ применяются телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), работающие с борта судна обеспечения. Однако использование для этих целей автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в ряде случаев требует меньше времени и материально-технических затрат, особенно при нахождении объектов ПДК подо льдом.

Применению АНПА для целей инспекции в мире уделяется все большее внимание. В работе [2] предлагается метод управления автономным роботом при инспекции подводного объекта, основанный на интеграции сенсорных данных, включая камеру, многолучевой акустический локатор, поддонный профилограф и магнитный сенсор. Модуль интеграции реализуется на базе вероятностных карт, которые содержат локацию и рейтинг достоверности данных от каждого сенсора. А в работе [3] этих же авторов рассматривается модуль управления роботом, который генерирует контрольные точки (waypoints) при формировании траектории, основываясь на данных, получаемых от модуля интеграции сенсорных измерений. В [4] описана система для подводной инспекции с использованием автономного робота, оснащенного триангуляционной лазерной системой и камерой высокого разрешения. Снимки делаются с перекрытием для последующего формирования мозаики высокого разрешения. В [5] представлена робототехническая сенсорная сеть локализации для инспекции подводных трубопроводов. В работах [6–8] описана система обнаружения и прослеживания подводного оптического кабеля с помощью АНПА, основанная на обработке измерений магнитометра. В [9] представлен надежный (по утверждению авторов) метод визуальной одометрии для восстановления движения камеры.

В настоящее время с помощью АНПА уже решаются некоторые из перечисленных выше задач. К таким практически решенным задачам можно отнести:

- обзорные задачи (площадное обследование рельефа дна, выполнение экологического мониторинга водной среды в районе размещения объектов ПДК) [10, 11];
- обследование протяженных объектов на морском дне (кабелей, шлангокабелей, трубопроводов) с использованием различного оборудования [12–14];
- обнаружение и дообследование посторонних малоразмерных объектов на морском дне [15–17].

В то же время методы решения задач инспекции локальных объектов ПДК (манифольдов, фонтанной арматуры, дожимных компрессорных станций) с помощью АНПА еще только разрабатываются. В качестве задач для АНПА в этом направлении можно выделить:

- получение трехмерной текстурированной модели объекта по данным фототелевизионных, звуковизорных и лазерных датчиков, демонстрирующей полную картину состояния объекта;
- детальную фотосъемку заданных участков объекта (в частности, приборных панелей манифольдов и фонтанной арматуры);

- выполнение планово-высотных измерений.

Для выполнения этих работ система технического зрения (СТЗ) АНПА должна включать видеосистему, звуковизор или многолучевую эхолокационную систему (МЛЭ) и лазерный сканер.

Поведение АНПА при обследовании локальных объектов существенно отличается от обследования линейных объектов [14]. К особенностям такого обследования можно отнести:

- сложный характер движения АНПА вблизи объекта с маневрированием по курсу и высоте с целью обеспечения эквидистантной траектории относительно объекта для оптимальных условий видеофиксации;
- оценка степени покрытия объекта видео- и иной съемкой в реальном времени с коррекцией движения АНПА для обеспечения полноты такого покрытия.

При получении общей картины состояния объекта следует учитывать, что априорная информация об объекте может отсутствовать (точное положение, размеры, форма, ориентация). Соответственно траектория движения должна планироваться динамически по мере поступления новой информации об объекте.

Принципиально другой задачей является выполнение планово-высотных замеров и детальной съемки заданных участков объекта. В этом случае необходимо наличие сведений об основных геометрических характеристиках объекта (т.е. наличие трехмерной модели объекта). Система управления АНПА должна иметь возможность распознавать заданные объекты или их фрагменты на основе поступающих от СТЗ данных.

Далее в статье рассматриваются подходы, ориентированные на решение отдельных аспектов упомянутых задач. На основе этих подходов предложена цельная методика выполнения работ по обследованию объектов ПДК.

1. Особенности реализации системы управления АНПА для выполнения обследования объектов ПДК

Архитектура программного обеспечения информационно-управляющей системы (ИУС) АНПА, пригодная для выполнения работ обследовательского класса, обоснована и описана в [18, 19]. Расширение функциональности АНПА по обследованию объектов ПДК реализуется на стратегическом и тактическом уровнях ИУС и касается, в первую очередь, вопросов представления миссии и использования априорной информации об объектах.

Модель использования АНПА предполагает перемещение из точки старта в заданный район расположения объектов ПДК, автоматическое обнаружение указанных объектов, их обследование и возвращение в точку запуска. Для выполнения этих требований на стратегическом уровне миссия описывается в виде последовательности элементов маршрутного задания (ЭМЗ). Каждый ЭМЗ (рис. 1) должен содержать информацию о планируемых перемещениях АНПА, координатах обследуемого объекта ПДК либо его идентификатор в случае наличия информации об объекте в бортовой базе данных (БД). К таковым характеристикам объекта можно отнести: идентификатор объекта, его координаты, ориентацию, геометрические характеристики, характерные точки (см. информацию в следующих разделах). Кроме того, ЭМЗ должен содержать информацию о действиях, которые необходимо выполнить с объектом (общая фотосъемка или съемка заданных фрагментов объекта).

База данных на стратегическом уровне ИУС содержит гидрологическую и иную информацию о районах выполнения работ, а также может содержать информацию об объектах ПДК в районе обследования. Данные из БД используются ИУС для планирования маршрута при обследовании нескольких объектов ПДК.

Расширение функциональности АНПА реализуется в агентах миссии на тактическом уровне. Используемые в агентах алгоритмы обследования рассматриваются ниже.

2. Обследование объектов ПДК заранее неизвестной формы

Необходимость обследования объектов ПДК заранее неизвестной формы может возникать в случае отсутствия детальной модели обследуемого объекта или частичного разрушения объекта в силу естественных причин или в результате человеческой деятельности.

При этом вполне возможно решение задачи сбора данных для последующего построения детальной фото или 3D картины объекта. На реализацию алгоритмов выполнения обследовательской миссии АНПА влияют такие факторы, как:

- особенности расположения важных фрагментов оборудования на объекте;
- возможности сбора разнородных данных в рамках одной миссии АНПА;
- доступные вычислительные ресурсы на борту АНПА (для планирования траекторий перемещения, сохранения в памяти детальной модели внешней среды).

Алгоритм для решения задачи обследования включает следующую последовательность действий АНПА:

1. Получение общей картины района (донной поверхности) в месте предполагаемого размещения объекта для выявления аномальных зон, соответствующих объектам ПДК;
2. Выполнение более детальной съемки потенциальных объектов обследования для построения грубой модели и возможности планирования последующих действий АНПА;

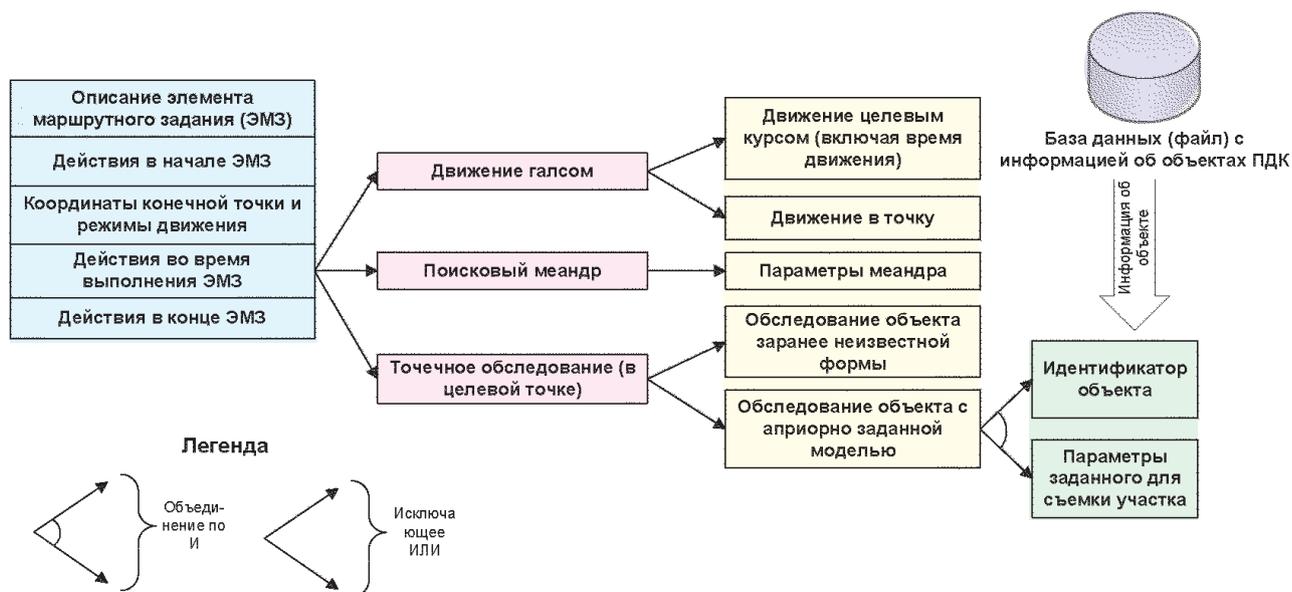


Рис. 1. Структура ЭМЗ для АНПА, ориентированного на выполнение инспекции ПДК



Рис. 2. Подводный манифольд [20]

3. Планирование перемещений АНПА с целью детальной фотосъемки (сканирования) обнаруженных объектов, при этом объекты (части объекта) с большим количеством мелких деталей требуется фотографировать (сканировать) более детально.

При выполнении пункта 3 нужно учитывать, что предварительно полученная модель объекта будет дорабатываться и уточняться по мере поступления новой информации. Кроме того, объекты могут иметь значительные габариты (рис. 2), что во многих случаях требует лаговых перемещений АНПА в горизонтальной и вертикальной плоскостях для съемки боковых поверхностей объекта.

Далее рассмотрим методы и алгоритмы, которые могут быть использованы для реализации описанной выше последовательности действий. Следует отметить, что при наличии приблизительной (грубой) априорной информации о расположении и примерных размерах объекта перемещения АНПА могут быть спланированы заранее и пункты 1 и 2 могут быть опущены.

2.1. Обнаружение объекта и построение его грубой модели

Задача сбора данных для построения карты района относится к классу обзорных работ. Методика их проведения достаточно подробно рассмотрена в [21]. В качестве средств для получения исходных данных используются устройства с широкой диаграммой направленности – ГБО, батиметрический ГБО или МЛЭ. Следует отметить, что последние два варианта являются более предпочтительными при выполнении автоматического построения карты района. Оптимальными траекториями движения АНПА при

выполнении этой задачи являются различные варианты прямоугольных меандров. Они обеспечивают покрытие района траекторией минимальной длины с минимальным количеством поворотов и старт-стопных режимов.

В настоящее время генерация таких траекторий на борту АНПА может быть автоматизирована с использованием алгоритмов покрытия области и планирования маршрута [22]. Отметим, что входными данными для такого рода алгоритмов являются: точка старта, точка финиша, обследуемая зона и запрещенные зоны (опционально), параметры работы аппаратуры освещения обстановки. Выходными данными алгоритма является массив галсов с нужными характеристиками, прохождение которых обеспечит покрытие области.

Для первоначального обнаружения объектов во время выполнения обзора целесообразно использовать ГБО ввиду меньшего объема поступающих от устройства данных, возможности их обработки и распознавания объектов в реальном времени. Алгоритмы и методы обнаружения объектов с заданными характеристиками на получаемых ГБО-данных достаточно подробно изложены в [17]. После обнаружения объекта происходит перемещение АНПА к объекту для его дообследования и получения более детальной информации. Генерация траектории покрытия АНПА в районе расположения объекта также происходит в автоматическом режиме.

Сбор информации об объекте для последующего построения его трехмерной модели удобнее осуществлять с использованием МЛЭ. В процессе прохождения АНПА по сгенерированной траектории строится грубая трехмерная воксельная карта района. Пример такой карты представлен на рис. 3.

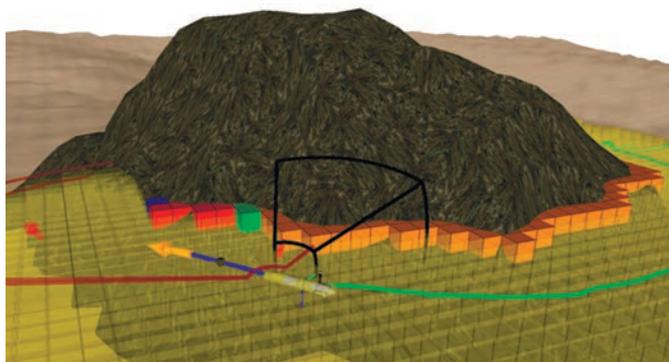


Рис. 3. Получение воксельной карты обследуемой области [23]

В начале построения карты всем вокселям присваивается значение, соответствующее полной неизвестности о занятости вокселя. Данные от МЛЭ представлены вектором уровней сигнала (длин лучей), полученных на определенном курсовом угле и глубине. Обновление воксельной карты по мере поступления информации от МЛЭ происходит следующим образом [24]:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}_G = \begin{bmatrix} x_{АНПА} \\ y_{АНПА} \\ z_{АНПА} \end{bmatrix}_G + R_{АНПА}^G R_{son}^{АНПА} \begin{bmatrix} r \cdot \cos(\psi) \\ r \cdot \sin(\psi) \\ 0 \end{bmatrix},$$

здесь: $[x_c, y_c, z_c]_G$ – трехмерные координаты обновляемого вокселя при обработке замера от МЛЭ; $[x_{АНПА}, y_{АНПА}, z_{АНПА}]_G$ – глобальная позиция аппарата; $R_{АНПА}^G$ – матрица вращения аппарата в глобальных

координатах; $R_{son}^{АНПА}$ – матрица вращения сонара относительно аппарата; $[r \cdot \cos(\psi), r \cdot \sin(\psi), 0]$ – матрица, выдающая трехмерные позиции «занимаемых» вокселей при данной длине луча r и угле ψ .

Обновление вероятности занятости вокселя производится согласно теореме Байеса:

$$P(c_{ijk,t}) = P(c_{ijk,t} | ss(\psi, r)_t) = \frac{P(ss(\psi, r)_t | c_{ijk,t-1}) P(c_{ijk,t-1})}{P(ss(\psi, r)_t)},$$

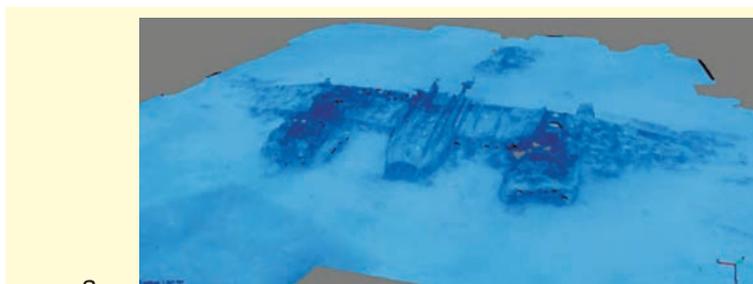
здесь: $P(c_{ijk,t})$ – вероятность занятости клетки; $P(ss(\psi, r)_t)$ – вероятность получения уровня замера $ss(\psi, r)_t$; $P(ss(\psi, r)_t | c_{ijk,t-1})$ – вероятность получения замера $ss(\psi, r)_t$ при данной модели сонара и того факта, что воксель $c_{ijk,t}$ занят.

После получения воксельной карты расположения объекта (карты занятости) распознаются его границы, например, производя детектирование аномальных зон. Для этого производится построение «информационной карты» (рис. 4) [24], вычисление которой включает следующие шаги.

Определение градиентной карты с использованием оператора Собеля:

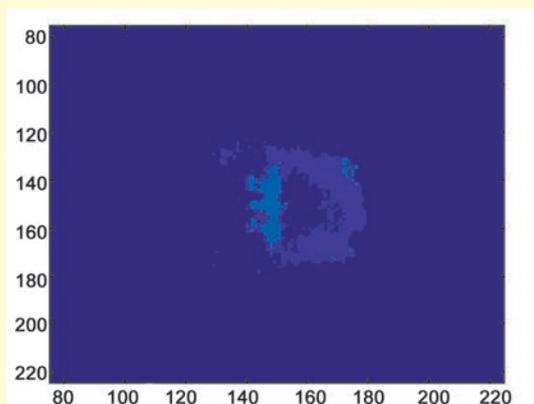
$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * E, \\ G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * E,$$

где E – «карта занятости»

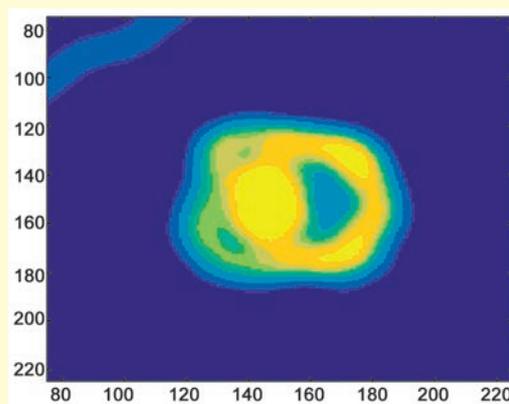


а

Рис. 4. Пример обработки данных [24]: а – исходный объект для обследования, б – карта занятости, в – информационная карта



б



в

Построение карты размытия с помощью фильтра Гаусса. Расчет матрицы размытия производится следующим образом [24]:

$$B(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{АНПА}}^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_{\text{АНПА}}^2}}.$$

Итоговая информационная карта вычисляется как $I = B \times G$.

Информационная карта используется для взвешивания важности каждого вокселя при выявлении объектов интереса. Искусственные объекты имеют большее изменение в высоте, чем окружающая среда, так что области с высокой степенью изменения высоты имеют более высокую оценку. Далее информационная карта используется обследовательскими агентами для формирования траектории обследования.

2.2. Детальная съемка объекта

Детальная съемка объектов может производиться фото/видео камерой и/или лазерным сканером. Для выполнения детального фотографирования невысоких («плоских») объектов (рис. 4, а) или верхней части габаритного объекта (рис. 2) достаточно информации, полученной при построении грубой воксельной модели. Для съемки боковых поверхностей габаритного объекта необходимо получение дополнительной информации. Кроме того, съемка боковых поверхностей предполагает наличие на АНПА соответствующим образом ориентированных фотокамер/сканеров, а также возможность АНПА зависать и совершать лаговые движения.

Определим алгоритмы действий АНПА для обоих случаев.

2.2.1. Получение общей фотографической картины поверхности плоского объекта

Для сбора фото/видео данных планируется траектория, полностью покрывающая объект съемки. При планировании траектории используется «информационная карта». Траектория прокладывается таким образом, чтобы наиболее информативные участки были покрыты более густой сетью проходов (галсов). При этом следует принимать в расчет ограничения, налагаемые динамическими характеристиками АНПА, а также доступность для АНПА тех или иных участков (на основе «карты занятости»).

Для планирования траектории возможно применение алгоритма RRT [25]. Алгоритм основан на построении случайных деревьев поиска в геометрическом пространстве состояний. Случайность при построении дерева ограничивается входными параметрами; при построении узлов алгоритм может отдавать предпочтение тем или иным узлам в зависимости от функции оценки узла. Дополнительно предлагаются алгоритмы обрезки лишних узлов [26] и модификации функции оценки. Алгоритм является вероятно полным и неоптимальным, но широко применяемым в планировании перемещений многозвенных манипуляторов и иных систем с большой размерностью пространства состояний.

На практике применяются различные модификации алгоритма [23, 24], обеспечивающие большую скорость генерации траекторий. Пример автоматически сгенерированных траекторий АНПА для шести наиболее информативных участков объектов интереса [26] показан на рис. 5.

Особенностью фото/видео съемки является то, что на основе этих данных может быть построена цветная текстурированная трехмерная модель обследуемой



Рис. 5. Траектории движения АНПА над наиболее информативными зонами обследуемой площади

дуемого объекта, как это показано на рис. 4, а. Для этих целей в настоящее время существует значительное количество доступных программных пакетов, например, Agisoft Photoscan [27].

2.2.2. Получение 3D картины объемного объекта с помощью сканера

В общем случае использование 3D сканера предполагает съемку из наиболее информативных видовых позиций, расположенных вокруг объекта. От позиции к позиции планируется безопасный маршрут АНПА. В каждой точке АНПА получает новый скан объекта, который используется для уточнения модели объекта и планирования новой точки съемки.

Подобную стратегию реализует алгоритм [28]. Предполагается, что на каждом шаге видовая точка выбирается из множества случайных разбиений среды в соответствии с функцией полезности.

Общая схема предполагает помещение (перемещение) аппарата в начальную безопасную позицию. Начальная точка, а также безопасная траектория вокруг объекта может определяться на основе полученных ранее карт «занятости» и «информативности» и представляет собой задачу, противоположную выбо-

ру наиболее информативных участков карты. Общая блок-схема алгоритма поведения АНПА показана на рис. 6.

Данные от сканера, полученные в текущей точке, заносятся в воксельную модель внешней среды (рис. 7).

Далее генерируется следующая видовая точка (точка обзора), которая должна находиться:

- вблизи сгенерированной на начальном шаге безопасной траектории;
- внутри безопасных для аппарата пространственных пределов возле занятых вокселей;
- внутри пустых вокселей.

Кроме того, для точки производится расчет видимости (множество лучей, которые излучил бы сканер аппарата и сколько при этом он открыл бы неизвестных вокселей). Производится также оценка полезности точки (ожидаемый вклад в процесс обследования). В рассмотрение берутся данные расчета видимости и то расстояние, которое нужно пройти для подхода к видовой точке.

Оценка полезности происходит в соответствии со следующим выражением:

$$u_i = \left(d_i w_d + \frac{f_i}{\max(f)} w_f + \frac{ct_i}{\max(ct)} w_{ct} \right) ol_i,$$

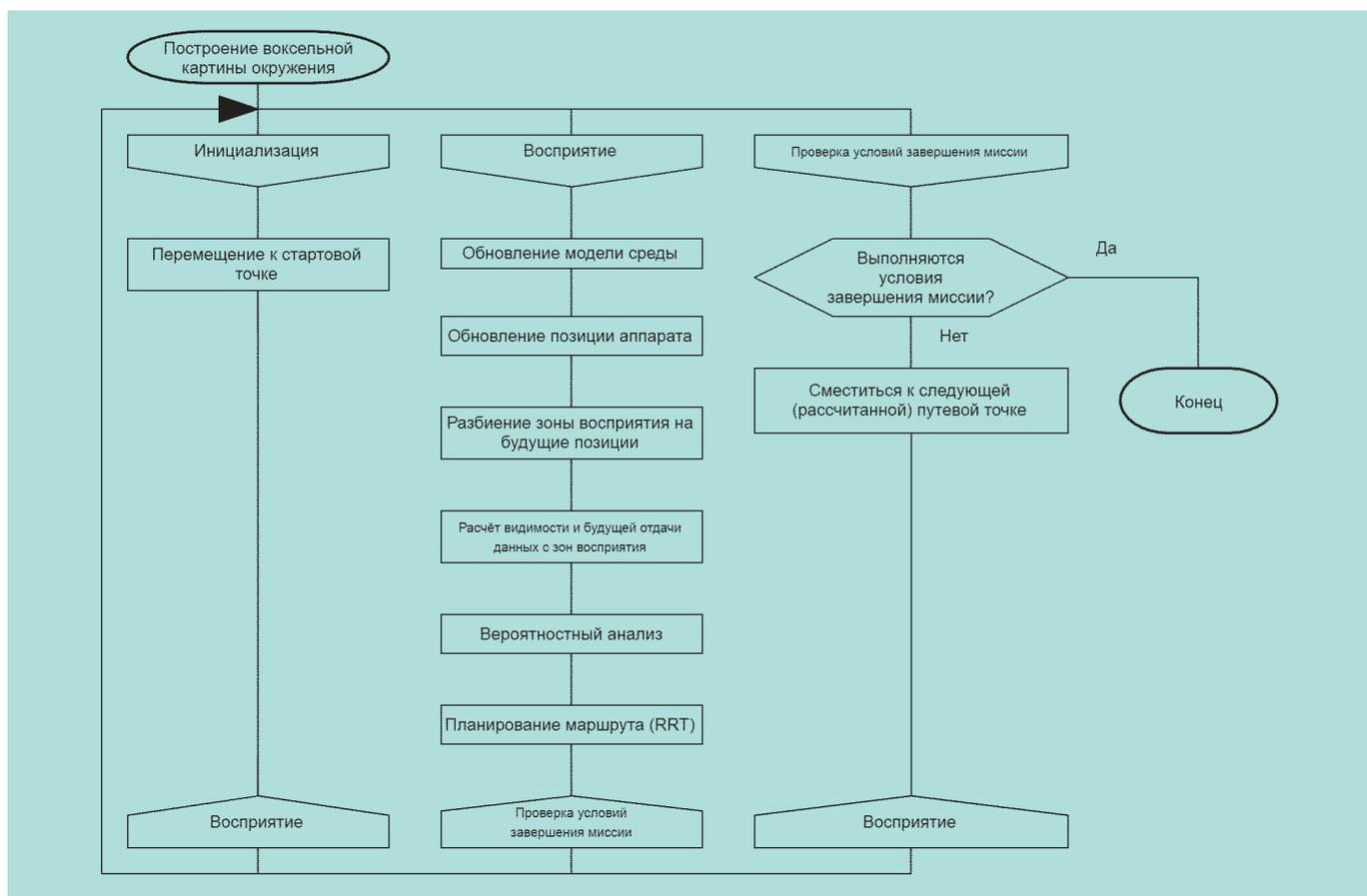


Рис. 6. Общая схема алгоритма поведения АНПА

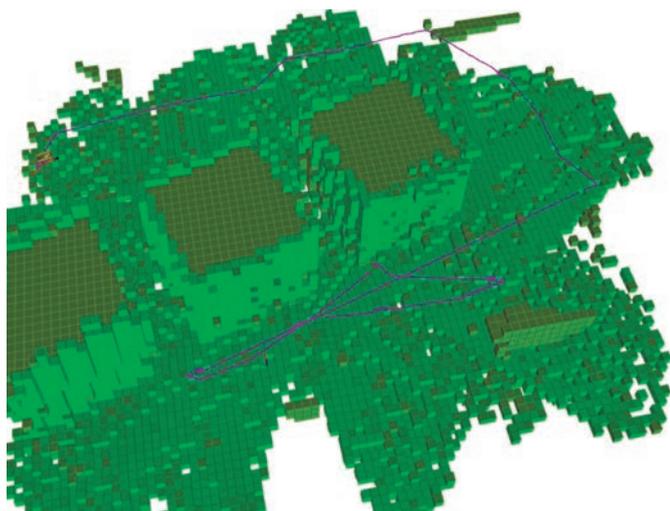


Рис. 7. Воксельная модель среды и автоматически сгенерированная траектория АНПА [28] (светло-зеленые воксели – препятствия, темно-зеленые – неизвестные области, пустые – свободное пространство)

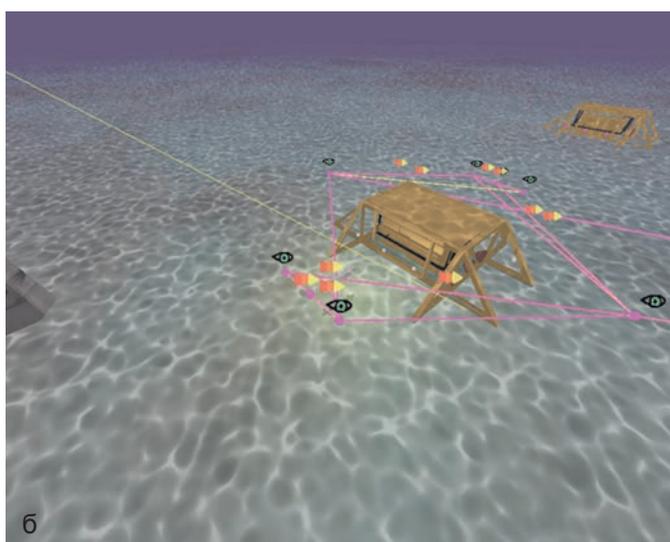
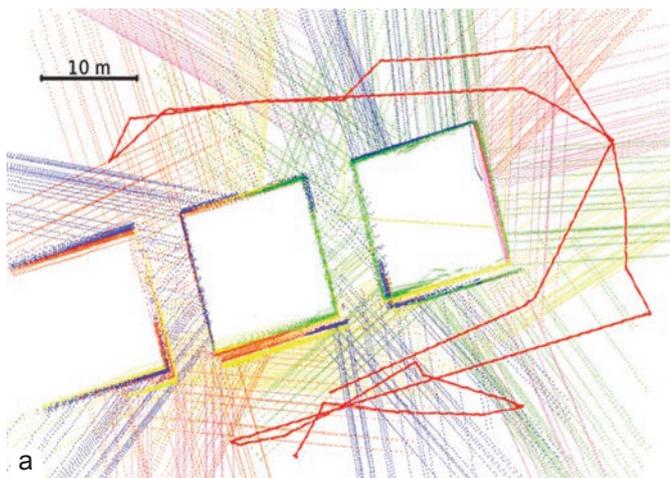


Рис. 8. Моделирование обследования подводных объектов: а – траектория АНПА вблизи волнорезов и разноцветные линии сканов [28]; б – видовые точки для получения общей картины манифольда [29]

здесь: d_i – коэффициент в пределах от 0 до 1, определяющий влияние на полезность видовой точки ее удаления от аппарата; w_d, w_p, w_{ct} – веса отдельных поведений аппарата, отвечающих за движение в неисследованную область либо движение вдоль исследованных зон (в сумме все три коэффициента должны быть равны единице); ol_i – перекрытие исследуемых областей.

Если w_f намного больше коэффициента w_{ct} , то алгоритм будет всегда вести аппарат на исследование неизвестных областей (классический фронтальной алгоритм). В противном случае алгоритм будет вести аппарат вдоль видимых структур объектов (контурно-сопроводительный подход).

В зависимости от окружения выбираются разные поведения. Фронтальной алгоритм будет тратить тем больше времени, чем больше пустых областей в исследуемой области. С другой стороны, если в обследуемой области имеется больше непересекающихся объектов, то перевес контурно-сопроводительного подхода затруднит работу. Для расчета безопасного маршрута от точки к точке может применяться упомянутый выше алгоритм RRT.

На рис. 8, а представлены результаты моделирования процедуры обследования (получения 3D картины) волнорезов. Обследовались три блока, каждый $12 \times 12 \times 8$ м. Для исключения подхода аппарата близко к блокам была выставлена безопасная дистанция, равная 6 м. Похожий подход использовался в работе [29], где моделировалось обследование обслуживания ПДК (рис. 8, б).

3. Обследование объектов ПДК при наличии априорно заданной модели

Одной из основных проблем использования АНПА при обследовании заданных объектов ПДК является необходимость точной навигационной привязки во время движения вблизи объекта. Применение для этих целей стандартных бортовых навигационных средств, комплексирующих данные от системы счисления пути, и акустических навигационных средств (с длинной или ультракороткой базой) не позволяет обеспечить требуемую субметровую точность. Эти средства могут быть использованы для первоначального выхода АНПА к объекту инспекции. Далее необходимо обеспечить прецизионную навигацию АНПА среди объектов, например, на базе обработки видеоизображений.

В упомянутых выше работах [2–9], а также в ряде других работ эта задача решается на основе комплексов различных сенсоров. При этом видеоин-

формация от камер используется только на уровне 2D. Использование 3D информации потенциально обеспечивает более высокую точность координатной привязки. Такой подход может быть реализован с помощью АНПА, оснащенного стандартным навигационным оборудованием и СТЗ с видеостереокамерой, на базе технологии координатной привязки к инспектируемому объекту, использующей предварительно заданную геометрическую модель объекта. Это позволяет решать задачу точной навигационной привязки АНПА к объекту на базе обработки видеоинформации, фиксируемой стереокамерой при движении аппарата [30].

3.1. Описание подхода

В качестве модели, однозначно идентифицирующей объект, рассматривается множество его характерных точек (ХТ) $P\{P_1, \dots, P_N\}$ и множество измеренных расстояний $D^{model}\{d_{1,2}^{model}, \dots, d_{N-1,N}^{model}\}$ между ними. Здесь $d_{i,j}^{model}$ – расстояние между ХТ P_i и P_j . Характерные точки задаются в системе координат (СК), связанной с объектом. Формирование модели осуществляется с учетом имеющейся геометрической информации об объекте (документация, непосредственные измерения). Фиксируется пронумерованная последовательность (множество) принадлежащих ему характерных 3D точек. В качестве ХТ выбираются преимущественно угловые точки, которые потенциально могут хорошо извлекаться на фотоизображениях программой-детектором (например, хорошо апробированным детектором Харриса). Число таких точек зависит от размеров и геометрической сложности объекта (рис. 9).

Подход к решению задачи основывается на трехэтапной схеме обработки стереоизображений с использованием вышеописанной модели объекта:

1. Выделение и сопоставление на снимках стереопары 2D-точечных особенностей. Построение по сопоставленным точкам множества 3D точек $S\{S_P, \dots, S_M\}$ (3D облако). Формирование 3D облака выполняется в СК камеры методом триангуляции лучей с учетом известной калибровки камеры. Сформированное 3D облако содержит как точки объекта, так и видимые камерой точки рельефа дна.

2. Распознавание в 3D облаке точек, принадлежащих объекту, с помощью разработанного оригинального алгоритма идентификации точек объекта, использующего геометрическую модель объекта. Алгоритм основан на принципе структурной когерентности, согласно которому сходство двух групп точек определяется сохраняющимся взаимораспо-

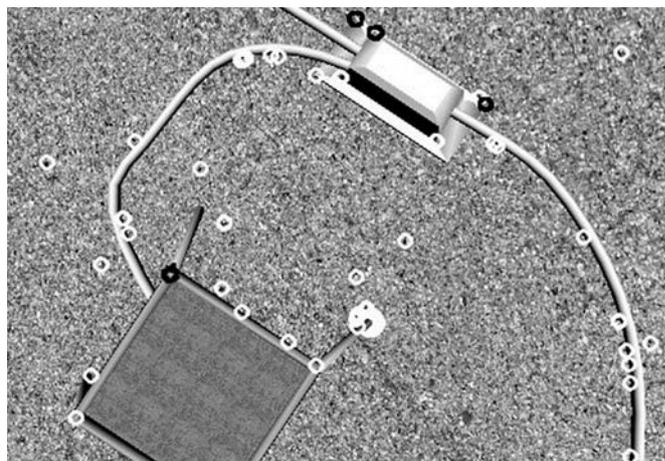


Рис. 9. 2D-особенности на снимке, сформированные детектором Харриса [30]

ложением точек в обеих группах. Входной информацией для работы алгоритма служат сформированное 3D облако точек и геометрическая модель объекта.

3. Координатная привязка АНПА к объекту, т.е. вычисление матрицы геометрического преобразования точек из СК АНПА в СК объекта. Вычисление матрицы реализуется на полученном алгоритмом идентификации сопоставлении нескольких точек 3D облака и модели объекта.

3.2. Алгоритм идентификация точек объекта в 3D облаке

Задача заключается в поиске в 3D облаке точек, принадлежащих объекту. Эти точки должны соответствовать точкам в множестве P , представляющем модель объекта. Критерий соответствия группы точек в 3D облаке сопоставляемой группе точек в модели объекта строится, как было отмечено выше, на принципе структурной когерентности. Поскольку для вычисления матрицы координатной привязки АНПА к объекту требуется не менее 3 сопоставленных точек, в процессе поиска анализируются группы точек размерностью $n \geq 3$. Поиск осуществляется сравнением выборок точек заданного размера из множества P и множества S с использованием указанного критерия соответствия. Нетривиальность задачи идентификации определяется тем, что заведомо неизвестно, сколько и какие именно ХТ попадут во множество точек, видимых камерой. А также тем, что нумерация точек во множестве S не совпадает с нумерацией точек в модели объекта. Поэтому в модели, которая должна служить шаблоном для последующей идентификации точек объекта в 3D облаке, рассматриваются все возможные выборки точек из N по n .

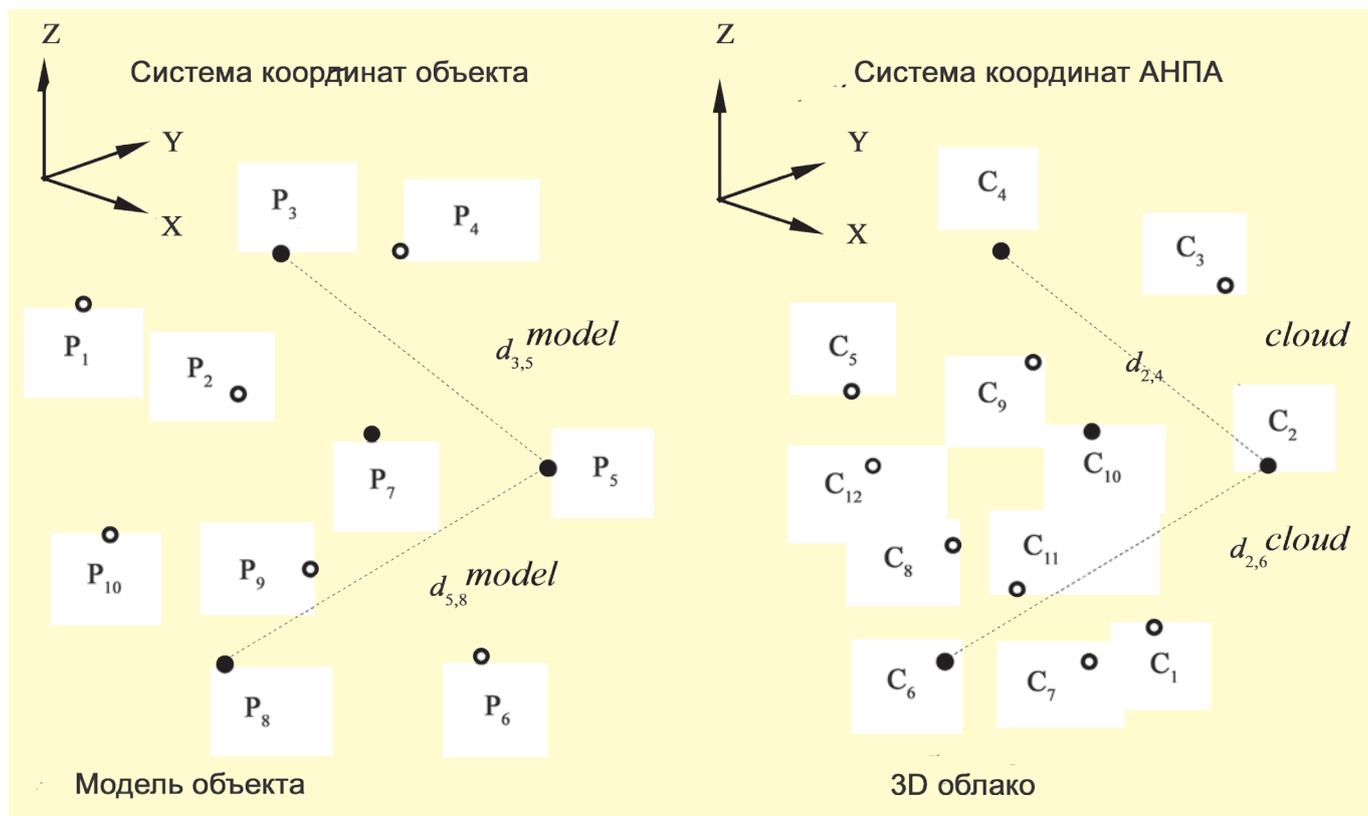


Рис. 10. Идентификация ХТ объекта в 3D облаке. Модель объекта включает в себя 10 точек, в 3D облаке 12 точек. Черным цветом помечены ХТ в 3D облаке и соответствующие им точки модели объекта. Для ХТ C_2 найдена соответствующая ей точка модели P_5 в результате анализа индексов двух пар расстояний между точками: $d_{2,4}^{cloud} = d_{3,5}^{model}$ и $d_{2,6}^{cloud} = d_{5,8}^{model}$

Таким образом, в операции сравнения участвуют две выборки одной размерности n – выборка из множества P (модель) и выборка из множества C (3D облако).

С каждой выборкой $S_k^{model} \{P_{i_1}, \dots, P_{i_{n-1}}, P_{i_n}\}$ размерности n из множества $P \{P_1, \dots, P_N\}$ однозначно связано множество расстояний $D_k^{model} \{d_{i_1, i_2}^{model}, \dots, d_{i_{n-1}, i_n}^{model}\}$ между точками данной выборки. Здесь d_{i_p, i_s}^{model} расстояние между точками P_{i_p} и P_{i_s} . Индексы p, s относятся к нумерации точек в выборке, а i_p, i_s обозначают номера точек выборки в множестве P . Аналогичным образом, с каждой выборкой $S_l^{cloud} \{C_{j_1}, \dots, C_{j_{n-1}}, C_{j_n}\}$ из множества $C \{C_1, \dots, C_M\}$ однозначно связано множество расстояний $D_l^{cloud} \{d_{j_1, j_2}^{cloud}, \dots, d_{j_{n-1}, j_n}^{cloud}\}$ между точками данной выборки. Заметим, что $d_{i_p, i_s}^{model} = d_{i_s, i_p}^{model}$, аналогично для точек C_{j_p} и C_{j_s} $d_{j_p, j_s}^{cloud} = d_{j_s, j_p}^{cloud}$.

Число элементов в каждом из множеств D_k^{model}, D_l^{cloud} равно $\frac{n(n-1)}{2}$. Тогда задача идентификации n ХТ ПДК сводится к последовательному решению двух задач:

1. Нахождение такой выборки S_l^{cloud} из множества C , для которой существует выборка S_k^{model} из модели, удовлетворяющая условию:

$$D_l^{cloud} \{d_{j_1, j_2}^{cloud}, \dots, d_{j_{n-1}, j_n}^{cloud}\} = D_k^{model} \{d_{i_1, i_2}^{model}, \dots, d_{i_{n-1}, i_n}^{model}\}.$$

2. Равенство множеств здесь означает, что они состоят из одних и тех же элементов, но не обязательно в одном и том же порядке.

Идентификация ХТ в выборке S_l^{cloud} , т.е. для каждой точки C_{j_m} из найденной выборки S_l^{cloud} требуется найти соответствующую ей точку в модели.

Первая задача решается перебором выборок из множеств P и C с проверкой указанного условия $D_l^{cloud} = D_k^{model}$. Перебор начинается от максимального возможного n ($n = \min(N, M)$) до минимального ($n = 3$). Условие завершения – нахождение первой соответствующей выборки.

Вторая задача решается анализом индексов элементов $D_l^{cloud} = D_k^{model}$. Соответствие анализируемой точки C_{j_m} некоторой ХТ модели P_{i_s} устанавливается сравнением двух пар расстояний, в которых анализируемая точка фигурирует (рис. 10). А именно, если $d_{j_m, j_k}^{cloud} = d_{i_1, i_p}^{model}$ и $d_{j_m, j_q}^{cloud} = d_{i_s, i_p}^{model}$.

3.3. Методика координатной привязки АНПА к ПДК

При выходе АНПА в район расположения объекта ПДК инициируется работа описанного алгоритма координатной привязки АНПА к ПДК. Если количество идентифицированных точек в 3D облаке оказалось недостаточным (< 3) для данной позиции траектории, то делается попытка привязки в следующей позиции.

Основная трудность в осуществлении привязки с помощью описанного алгоритма связана с тем, что процесс выбора (человеком) ХТ на этапе формирования модели ПДК и процесс выявления особенностей на снимках (программа-детектор Харриса) являются относительно независимыми друг от друга. Это приводит, как показали эксперименты, к возможным ситуациям с небольшим количеством идентифицированных точек модели ПДК, что негативно сказывается на точности привязки. Другой аспект, также ограничивающий число идентифицируемых точек модели ПДК, связан с распределенной пространственной структурой ПДК. Поскольку ХТ задаются в модели на разнесенных друг от друга объектах ПДК, в поле зрения камеры в фиксированной позиции АНПА попадает только часть ХТ от общего количества. Предлагаемая методика, с учетом необходимости преодоления указанных трудностей, направлена на обеспечение приемлемой для целей инспекции точности привязки.

Формированию модели может предшествовать предварительный проход АНПА по траектории над установленным ПДК. Совместный анализ результатов обработки полученных снимков детектором и геометрической модели ПДК позволит включить в модель только те ХТ, которые с большей вероятностью будут определяться и сопоставляться детектором на разных видах сцены. Сформированная модель будет использоваться для координатной привязки уже непосредственно при выполнении инспекционной миссии.

Привязка заключается в вычислении матрицы геометрического преобразования $H^{АНПА, объект}$, обеспечивающей преобразование координат точек из СК АНПА в СК объекта. Задача нахождения матрицы $H^{АНПА, объект}$ может быть решена одним из существующих методов.

Например, традиционным методом минимизации суммарного расхождения двух сопоставленных множеств точек, совмещенных в одном координатном

пространстве: $\min \sum_{k=1}^n \|P_k - C_k H^{АНПА, объект}\|$, где P_k – k -я

точка в выборке S^{model} , заданная в СК объекта, а C_k – точка в выборке S^{cloud} , сопоставленная точке P_k , заданная в СК АНПА.

Эксперименты на модельных сценах в среде имитационного моделирующего комплекса [31] подтвердили эффективность описанного подхода.

3.4. Методика выполнения фотосъемки заданных фрагментов на объектах ПДК

Перед запуском в ИУС АНПА вводятся следующие исходные данные, приведенные ниже (эти данные могут априорно содержаться в БД стратегического уровня).

Наборы характерных точек («Объект–1.ХТ–1»,... «Объект–N.ХТ–M»). На одном объекте могут быть несколько наборов ХТ, располагающихся в разных местах.

Координаты целей для обследования («Объект–1.Цель–1»,... «Объект–N.Цель–L»). Координаты целей задаются в локальных системах координат соответствующих объектов и привязаны к соответствующим ХТ. На одном объекте может быть несколько целей.

Схематично иерархия данных показана на рис. 11.

Группировка агентов тактического уровня ИУС АНПА, предназначенная для фотосъемки заданных фрагментов объектов ПДК, выполняет следующую циклическую последовательность действий.

Выход АНПА к очередному объекту ПДК с использованием гидроакустической навигационной системы (ГАНС).

Осуществление поисковых движений для обнаружения хотя бы одного набора ХТ этого объекта.

Выполнение координатной привязки АНПА к объекту (вычисление матрицы преобразования мировой системы координат в локальную систему координат объекта). При этом автоматически учитываются возможные подвижки объекта, изменение его наклона и т.п. При наличии в памяти АНПА нескольких

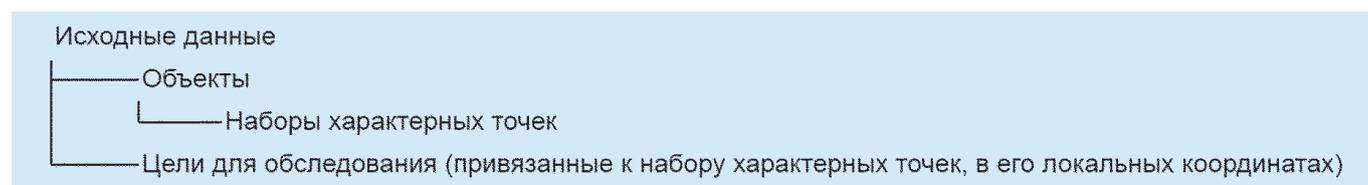


Рис. 11. Иерархия входных данных для ИУС АНПА

множеств ХТ, связанных с данным объектом, для координатной привязки выбирается ближайшее к точке интереса.

Движение в локальной системе координат объекта в заданную точку (точку интереса) для выполнения предписанных действий (фотографирования). Прецизионная навигация относительно объекта осуществляется с использованием видеосчисления.

Указанная последовательность действий выполняется до исчерпания списка объектов, подлежащих инспекции. Схематично алгоритм показан на рис. 12.

Программа действий АНПА (последовательность посещений ХТ и целей) может задаваться заранее. Однако лучше выбирать последовательность посещений ХТ автоматически, исходя из минимизации количества переходов и пройденного расстояния (рис. 13). Такое поведение АНПА более приемлемо в случае, если очередное множество ХТ не будет распознано.

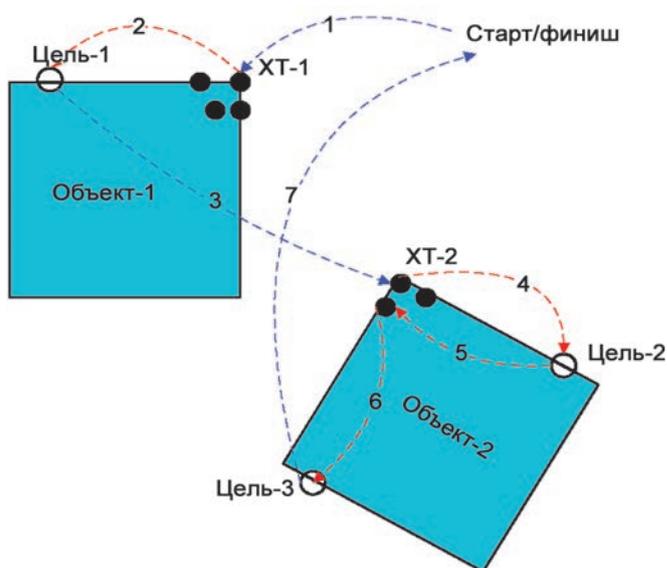


Рис. 13. Пример обхода двух объектов с несколькими целями и характерными точками (перемещения АНПА с использованием ГАНС имеют синий цвет, перемещения с использованием видеосчисления – красный)

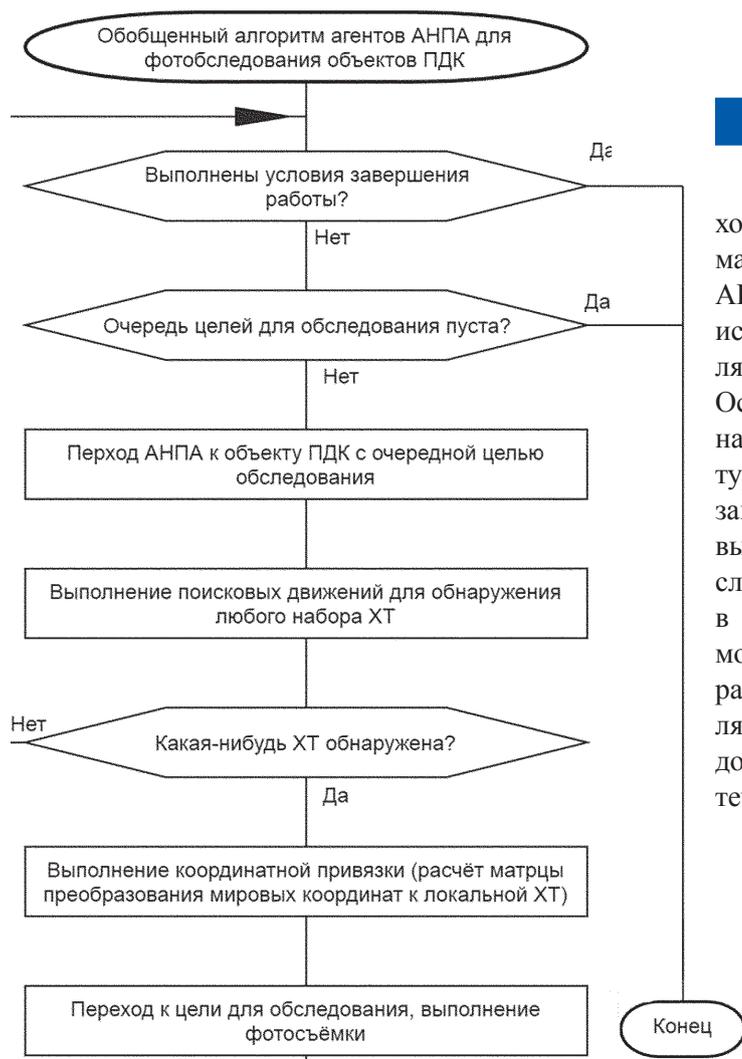


Рис. 12. Обобщенный алгоритм агентов АНПА для фотообследования объектов ПОИ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в мире разрабатываются подходы, позволяющие реализовать процедуру автоматической инспекции объектов ПОИ с помощью АНПА. В работе предложена методика комплексного использования некоторых из этих подходов, позволяющая решить большинство задач инспекции ПОИ. Основная масса разрабатываемых методов находится на этапе моделирования и выполнения начальных натурных экспериментов. Их полномасштабная реализация требует наличия на борту АНПА значительных вычислительных мощностей, что, в большинстве случаев, связано с необходимостью осуществления в реальном времени процедур построения/анализа моделей обследуемых объектов. Однако тенденции развития современной вычислительной базы позволяют надеяться на то, что эти разработки могут быть доведены до практически приемлемого состояния в течение 3–5 лет.

Работа выполнена при частичной поддержке программы «Приоритетные научные исследования в интересах комплексного развития Дальневосточного отделения РАН» (проекты 18-5-014 и 18-5-054) и программы Президиума РАН № 1.7 “Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю.В., Новиков А.И., Ремезков А.В. Концепция создания роботизированного комплекса обследования и мониторинга технического состояния объектов подводной добычи // *Материалы восьмой всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-8)*. Владивосток, 2019. С. 6–10.
2. Marco J., Divas K. Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs // *Oceans*. 2014. St. John's, 2014. P. 1–6.
3. Marco J., Divas K. Guidance of AUVs for Autonomous Underwater Inspection // *Automatisierungstechnik*. 2015. Vol. 63 (5). P. 380–388.
4. Underwater inspection system using an autonomous underwater vehicle (“auv”) in combination with a laser micro bathymetry unit (triangulation laser) and high-definition camera. – URL: <https://patents.google.com/patent/WO2015134473A2> (дата обращения: 10.07.2020).
5. Dalei Wu, Kamal Youcef-Toumi, Rached Ben-Mansour. Node Localization in Robotic Sensor Networks for Pipeline Inspection // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2016. Vol. 12, Is. 2. P. 809–819.
6. Caoyang Yu, Xianbo Xiang, Mingjiu Zuo, Hui Liu. Underwater cable tracking control of under-actuated AUV // *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*. 2016. P. 324–329.
7. Jialei Z., Qin Z., Xianbo X. Automatic inspection of subsea optical cable by an autonomous underwater vehicle // *OCEANS 2017*. Aberdeen, UK, 2017. P. 1–6.
8. Jialei Z., Xiang X. Subsea cable tracking by a 5–DOF AUV // *36th Chinese Control Conference*. Shenyang, China, 2017. P. 4796–4800.
9. Jun Zhang, Viorela Ila, Laurent Kneip. Robust Visual Odometry in Underwater Environment // *OCEANS 2018 – MTS/IEEE Conf. KOBE*, 2018. P. 1–9.
10. Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Рыллов Н.И. Мониторинг морского дна с применением технологий интеллектуальной обработки данных поисковых устройств на борту АНПА // *Подводные исследования и робототехника*. 2015. № 2 (20). С. 20–27.
11. Инзарцев А.В., Борейко А.А., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Сидоренко А.В., Спорышев М.С., Щербатюк А.Ф. Опыт использования АНПА типа МТ-2010 для экологических исследований в бухте Золотой Рог // *Экологические системы и приборы*. 2018. № 12. С. 38–45.
12. Record-Setting AUV Pipeline Inspection in Deepwater West Africa. – URL: <https://doi.org/10.4043/27688-MS> (дата обращения: 20.07.2020).
13. AUV Integrated Cathodic Protection iCP Inspection System – Results from a North Sea Survey. – URL: <https://doi.org/10.4043/29524-MS> (дата обращения: 20.07.2020).
14. Inzartsev A., Pavin A., Matvienko V. AUV Application for Inspection of Partly Silted Underwater Cables // *Proceedings of 6th Int. Symp. on Underwater Technology (UT2009)*. Wuxi, Chin, 2009. P. 284–292.
15. Maurelli F., Carreras M., Salvi J., Lane D., Kyriakopoulos K., Karras G., Fox M., Long D., Kormushev P., Caldwell D. The PANDORA project: a success story in AUV autonomy // *Proceedings of OCEANS 2016*. Shanghai, China, 2016.
16. Manley J.E., Halpin S., Radford N., Ondler M. Aquanaut: A New Tool for Subsea Inspection and Intervention // *Proceedings of OCEANS2018–MTS/IEEE Conf. Charleston, SC, USA*, 2016.
17. Инзарцев А.В., Павин А.М., Лебедко О.А., Панин М.А. Распознавание и обследование малоразмерных подводных объектов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов // *Подводные исследования и робототехника*. 2016. № 2 (22). С. 36–43
18. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // *Подводные исследования и робототехника*. 2013. № 1 (15). С. 4–16.
19. Борейко А.А., Инзарцев А.В., Машошин А.И., Павин А.М., Пашкевич И.В. Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // *Подводные исследования и робототехника*. 2019. № 2 (28). С. 23–31.
20. Голубев В.А. Деятельность ОАО «Газпром» по освоению ресурсов углеводородов на шельфе Российской Федерации. – URL: http://rao-offshore.ru/netcat_files/userfiles/03_golubev.pdf (дата обращения: 10.07.2020).
21. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / под. ред. Л.В. Киселева. Владивосток: Дальнаука, 2018. 367 с.
22. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // *Подводные исследования и робототехника*. 2016. № 2 (22). С. 25–35.
23. Two-Dimensional Frontier-Based Viewpoint Generation for Exploring and Mapping Underwater Environments. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/6/1460> (дата обращения: 10.07.2020).
24. Vaibhav K. Viswanathan, Zayra Lobo, Jessica Lupanow, Sebastian Seibert von Fock, Zoë Wood, Timmy Gambin, Christopher Clark. AUV Motion-Planning for Photogrammetric Reconstruction of Marine Archaeological Sites // *Proceedings of 2017 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. Singapore, 2017.
25. The open motion planning library. – URL: <http://ompl.kavrakilab.org> (дата обращения: 10.07.2020).
26. Multi-AUV motion planning for archeological site mapping and photogrammetric reconstruction. – URL: <https://doi.org/10.1002/rob.21905> (дата обращения: 10.07.2020).
27. Metashape — photogrammetric processing of digital images and 3D spatial data generation. – URL: <https://www.agisoft.com/> (дата обращения: 10.07.2020).
28. Narc'is Palomeras, Natalia Hurtós, Eduard Vidal, Marc Carreras. Autonomous Exploration of Complex Underwater Environments Using a Probabilistic Next-Best-View Planner // *Proceedings of IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019. Vol. 4, No. 2.
29. Dorian Buksz, Michael Cashmore, Benjamin Krarup, Daniele Magazzeni, Bram Ridder. Strategic-tactical planning for autonomous underwater vehicles over long horizons // *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Madrid, Spain, 2018.
30. Bobkov V.A., Kudryashov A.P., Inzartsev A.V. Technology of AUV High-Precision Referencing to Inspected Object // *Gyroscopy and Navigation*. 2019. Vol 10, No. 4. P. 322–329.
31. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // *Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE*. Washington DC, 2015.

ОБ АВТОРАХ

ИНЗАРЦЕВ Александр Вячеславович – главный научный сотрудник, заведующий лабораторией систем управления, профессор.

Область научных интересов: информатика, системное программирование, программные архитектуры систем управления, подводная робототехника.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а.

Тел.: +7 (423) 243-25-78, +7 (423) 243-24-16.

E-mail: inzar@marine.febras.ru

Orcid ID: 0000-0002-1842-9951

ПАНИН Михаил Андреевич – младший научный сотрудник.

Область научных интересов: информатика, системное программирование, подводная робототехника.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а.

Тел.: +7 (423) 243-25-78, +7 (423) 243-24-16.

E-mail: pma92@marine.febras.ru

Orcid ID: 0000-0002-3548-3618

Для цитирования:

Инзарцев А.В., Панин М.А., Бобков В.А. Алгоритмы инспекции локальных объектов донного промышленного оборудования с применением АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 3 (33). С. 18–30. DOI: 10.37102/24094609.2020.33.3.003.

БОБКОВ Валерий Александрович – доктор технических наук, главный научный сотрудник.

Область научных интересов: компьютерное зрение, компьютерная графика, обработка изображений, робототехника.

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Адрес: 690041, Владивосток, ул. Радио, 5.

Тел.: +7 (423) 231-04-39.

E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

Orcid ID: 0000-0001-9722-5158

Статья поступила в редакцию 05.07.2020
Опубликована 25.03.2020



ALGORITHMS OF SEAFLOOR INDUSTRIAL MACHINERY INSPECTION USING AUV

A.V. Inzartsev, M.A. Panin, V.A Bobkov

Autonomous underwater vehicles (AUV) can be used for automatized inspection of the objects of marine mining complexes. If a priori information about the object (or its model) is available, the examination can be aimed at detailed photographing the given fragments of the object. Routing AUV to these fragments relies on algorithms of precise navigation referencing to the object based on analysis of the sequence of stereo images and available information about specific points of the object. In case of the necessary information absence, the inspection may target the goal of building the detailed 3D model of the object (using a laser scanner or multibeam echosounder). In that case, AUV performs the initial detection (localization) of the object at first. Then its motion trajectory is generated dynamically from one view position to another as new information about the object becomes available. A criterion of the viewing position selection used is its informational value (i.e., the amount of further information received about the object). The final model is built using gathered information processed with methods of photogrammetry. The paper considers approaches and algorithms applicable for object inspection in two above described cases.

Key words: autonomous underwater vehicle (AUV), three-dimensional model construction, a precise navigational reference to an object, photographing specified fragments of the object.

Recommended citation:

Inzartsev A.V., Panin M.A., Bobkov V.A. Algorithms of seafloor industrial machinery inspection using AUV // Underwater Investigation and Robotics. 2020. No. 3 (33). P. 18–30. DOI: 10.37102/24094609.2020.33.3.003.

REFERENCES

1. Matvienko Yu.V., Novikov A.I., Remezov A.V. *Kontseptsiya sozdaniya robotizirovannogo kompleksa obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya ob"ektov podvodnoy dobychi // Materialy vos'moy vseros. nauch.-tekh. konf. «Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana» (TPOMO-8)*. Vladivostok, 2019. P. 6–10.
2. Marco J., Divas K. Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs // *Oceans*. 2014. St. John's, 2014. P. 1–6.
3. Marco J., Divas K. Guidance of AUVs for Autonomous Underwater Inspection // *Automatisierungstechnik*. 2015. Vol. 63 (5). P. 380–388.
4. Underwater inspection system using an autonomous underwater vehicle ("AUV") in combination with a laser micro bathymetry unit (triangulation laser) and high-definition camera. – URL: <https://patents.google.com/patent/WO2015134473A2> (usage date: 10.07.2020).
5. Dalei Wu, Kamal Youcef-Toumi, Rached Ben-Mansour. Node Localization in Robotic Sensor Networks for Pipeline Inspection // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2016. Vol. 12, Is. 2. P. 809–819.
6. Caoyang Yu, Xianbo Xiang, Mingjiu Zuo, Hui Liu. Underwater cable tracking control of under-actuated AUV // *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*. 2016. P. 324–329.
7. Jialei Z., Qin Z., Xianbo X. Automatic inspection of subsea optical cable by an autonomous underwater vehicle // *OCEANS 2017*. Aberdeen, UK, 2017. P. 1–6.
8. Jialei Z., Xiang X. Subsea cable tracking by a 5-DOF AUV // *36th Chinese Control Conference*. Shenyang, China, 2017. P. 4796–4800.
9. Jun Zhang, Viorela Ila, Laurent Kneip. Robust Visual Odometry in Underwater Environment // *OCEANS 2018 – MTS/IEEE Conf. KOBE*, 2018. P. 1–9.
10. Inzartsev A.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Rylov N.I. Technologies of seabed monitoring based on intelligent processing of search systems' data onboard the autonomous underwater vehicle // *Underwater Investigations and Robotics*. 2015. No. 2 (20). S. 20–27.
11. Inzartsev A.V., Boreyko A.A., Borovik A.I., Vaulin Yu.V., Kamornyy A.V., Lvov O.Yu., Matvienko Yu.V., Sidorenko A.V., Sporyshev M.S., Shcherbatyuk A.F. Experience of the ecological investigation in Zolotoy Rog Bay using AUV of MT-2010 type // *Ecological Systems and Devices*. 2018. No. 12. P. 38–45.
12. Record-Setting AUV Pipeline Inspection in Deepwater West Africa. – URL: <https://doi.org/10.4043/27688-MS> (usage date: 20.07.2020).
13. AUV Integrated Cathodic Protection iCP Inspection System – Results from a North Sea Survey. – URL: <https://doi.org/10.4043/29524-MS> (usage date: 20.07.2020).
14. Inzartsev A., Pavin A., Matvienko V. AUV Application for Inspection of Partly Silted Underwater Cables // *Proceedings of 6th Int. Symp. on Underwater Technology (UT2009)*. Wuxi, Chin, 2009. P. 284–292.
15. Maurelli F., Carreras M., Salvi J., Lane D., Kyriakopoulos K., Karras G., Fox M., Long D., Kormushev P., Caldwell D. The PANDORA project: a success story in AUV autonomy // *Proceedings of OCEANS 2016*. Shanghai, China, 2016.

16. Manley J.E., Halpin S., Radford N., Ondler M. Aquanaut: A New Tool for Subsea Inspection and Intervention // Proceedings of OCEANS2018–MTS/IEEE Conf. Charleston, SC, USA, 2016.
17. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Lebedko O.A., Panin M.A. Small objects detection and survey using autonomous underwater vehicles // Underwater Investigations and Robotics. 2016. No. 2 (22). P. 36–43
18. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Bagnitskiy A.V. Actions planning and execution in the inspection underwater robot on the basis of behavioral methods // Underwater Investigations and Robotics. 2013. No. 1 (15). P. 4–16.
19. Boreyko A.A., Inzartsev A.V., Mashoshin A.I., Pavin A.M., Pashkevich I.V. Control system of high autonomy AUV on the base of multi-agents technology // Underwater Investigations and Robotics. 2019. No. 2 (28). P. 23–31.
20. Golubev V.A. *Deyatel'nost' OAO «Gazprom» po osvoeniyu resursov uglevodorodov na shel'fe Rossiyskoy Federatsii.* – URL: http://rao-offshore.ru/netcat_files/userfiles/03_golubev.pdf (usage date: 10.07.2020).
21. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Underwater robotics: systems, technologies, application. Vladivostok: IMTP FEB RAS, 2018. 367 p.
22. Inzartsev A.V., Bagnitskiy A.V. Motion path planning and implementation for AUV when monitoring in various types of water areas // Underwater Investigations and Robotics. 2016. No. 2 (22). P. 25–35.
23. Two-Dimensional Frontier-Based Viewpoint Generation for Exploring and Mapping Underwater Environments. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/6/1460> (usage date: 10.07.2020).
24. Vaibhav K. Viswanathan, Zayra Lobo, Jessica Lupanow, Sebastian Seibert von Fock, Zoë Wood, Timmy Gambin, Christopher Clark. AUV Motion-Planning for Photogrammetric Reconstruction of Marine Archaeological Sites // Proceedings of 2017 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). Singapore, 2017.
25. The open motion planning library. – URL: <http://ompl.kavrakilab.org> (usage date: 10.07.2020).
26. Multi-AUV motion planning for archeological site mapping and photogrammetric reconstruction. – URL: <https://doi.org/10.1002/rob.21905> (usage date: 10.07.2020).
27. Metashape — photogrammetric processing of digital images and 3D spatial data generation. – URL: <https://www.agisoft.com/> (usage date: 10.07.2020).
28. Narc'is Palomeras, Natalia Hurtós, Eduard Vidal, Marc Carreras. Autonomous Exploration of Complex Underwater Environments Using a Probabilistic Next-Best-View Planner // Proceedings of IEEE Robotics and Automation Letters. 2019. Vol. 4, No. 2.
29. Dorian Buksz, Michael Cashmore, Benjamin Krarup, Daniele Magazzeni, Bram Ridder. Strategic-tactical planning for autonomous underwater vehicles over long horizons // Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain, 2018.
30. Bobkov V.A., Kudryashov A.P., Inzartsev A.V. Technology of AUV High-Precision Referencing to Inspected Object // Gyroscopy and Navigation. 2019. Vol 10, No. 4. P. 322–329.
31. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE. Washington DC, 2015.

ABOUT THE AUTHORS

INZARTSEV A.V. – doctor of engineering, director of the control systems laboratory

Research interests: computer science, system programming, software architectures of control systems, underwater robotics.

Institute for Marine Technology Problems FEB RAS¹

Address: 5a, Sukhanov Str., 690950, Vladivostok.

Phone: +7 (423) 243-24-16.

E-mail: inzar@marine.febras.ru

Orcid ID: 0000-0002-1842-9951

PANIN M.A. – junior research scientist.

Research interests: computer science, system programming, underwater robotics.

Institute for Marine Technology Problems FEB RAS¹

Address: 5a, Sukhanov Str., 690950, Vladivostok.

Phone: +7 (423) 243-24-16.

E-mail: pma92@marine.febras.ru

Orcid ID: 0000-0002-3548-3618

BOBKOV V.A. – doctor of engineering, chief researcher scientist.

Research interests: computer vision, computer graphics, image processing, robotics.

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS

Address: 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950, .

Phone: +7 (423) 231-04-39.

E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

Orcid ID: 0000-0001-9722-5158

Manuscript received: 05.07.2020

Published: 25.09.2020