УДК 004.896+629.58+001.891.57 DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_03

МОДЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИНСПЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ АНПА НА БАЗЕ МЕТОДИКИ ВИДЕОРАСПОЗНАВАНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧЕК

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

Автоматизированная инспекция объектов донного промышленного оборудования с помощью АНПА предполагает его навигационную привязку к объекту инспекции с субметровой точностью. Такая точность не может быть достигнута стандартными бортовыми навигационными средствами. Для решения этой задачи предлагается использование методики видеораспознавания характерных точек на обследуемом оборудовании. Характерные точки предварительно определяются на моделях объектов и заносятся в систему управления АНПА в виде трёхмерных наборов (облаков). Обеспечение необходимой высокой точности при непрерывном движении АНПА в пространстве объектов инспекции осуществляется за счет регулярного обновления координатной привязки к объектам. Процедура инспекции с применением этого подхода состоит из этапов спецификации миссии АНПА (включая загрузку описаний характерных точек), запуска АНПА и предварительного сближения с объектами инспекции, определения оптимальной последовательности осмотра объектов, выполнения процедуры поиска характерных точек на навигационной привязки к ним и последующей инспекции заданных фрагментов оборудования. При этом логика выполнения миссии предусматривает динамическое изменение плана обследования в случае неудачи при обнаружении каких-либо из запланированных характерных точек. В статье представлены алгоритмы работы системы управления АНПА, реализующие описанный сценарий проведения инспекции. Корректность подхода исследовалась с применением методов математического моделирования.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), характерная точка (ХТ), обследуемая точка (ОТ), видеораспознавание, планирование последовательности действий, точная навигационная привязка к объекту, инспекция заданных фрагментов объекта.

Введение

Решению задач автоматизированного регулярного обследования подводных добычных комплексов (ПДК) с помощью АНПА в мире уделяется всё больше внимания. Типичный круг задач обследования ПДК включает [1]:

– контактную (детальную) инспекцию с использованием близкодействующей аппаратуры (звуковизоры, фотооборудование);

– контроль планово-высотного состояния объектов с использованием дальнодействующей аппаратуры;

– экологическое инспектирование водной массы и дна вокруг комплекса;

– комбинированное обследование: обнаружение и дообследование посторонних малоразмерных объектов на морском дне вблизи комплекса.

Одним из возможных применений АНПА при выполнении инспекции является фиксация состояния заданных фрагментов ПДК, например, индикаторов, элементов управления (рис. 1), точек электрохимического контроля и т.д. Необходимым условием для выполнения этих работ является обеспечение точной навигации АНПА по отношению к объекту инспекции.

Первоначально задача инспекции решалась в контексте контроля состояния протяженных коммуникаций ПДК (кабелей, шлангокабелей, трубопроводов /ТП/). Для выполнения таких операций необходимо обеспечить определение направления прокладки ТП в среднем, а также дистанции между АНПА и объектом. При этом для определения дистанции может использоваться информация о форме поперечного сечения объекта (как правило – это окружность). В

Рис. 1. Подводный компрессор и его приборная панель [2]

большинстве случаев для решения этой задачи выполняется комплексирование информации от датчиков, работающих на основе различных физических принципов. В работе [3] предлагается метод управления АНПА при обследовании трубопровода, основанный на интеграции данных от видеокамеры, многолучевого эхолокатора (МЛЭ), донного профилографа и магнитного сенсора. Авторы приводят положительные результаты эксперимента в тестовом бассейне. В работе [4] описана подводная инспекционная система с АНПА, оснащённым триангуляционной лазерной системой и камерой с высоким разрешением. Лазерная система обеспечивает определение дистанции до ТП и его ориентации, в то время как камера получает перекрывающиеся снимки для их последующего мозаицирования. В публикациях [5–7] описана система, основанная на обработке измерений магнитометра для обнаружения и сопровождения подводного кабеля. Авторами проведены вычислительные эксперименты, демонстрирующие работоспособность предлагаемых подходов. В работах [8–10] представлены результаты обследования протяжённых объектов на морском дне с использованием различного оборудования. В 2014 и 2016 годах компания "Oceaneering" с использованием АНПА обследовала участки трубопроводов длиной 511 и 467 км [8]. АНПА был оснащен фотосистемой, лазерным профилографом и МЛЭ, однако автоматическое сопровождение трубопровода не выполнялось. В работе [9] приведены результаты обследования трубопровода посредством АНПА "Chercheur", оснащённого устройством "iCP" для замеров магнитного и потенциального полей с целью оценки уровня катодной защиты металлических изделий. В работе [10] приведены результаты автоматического обследования нескольких десятков километров морского металлического кабеля с использованием АНПА MT-98. Для выполнения отслеживания кабеля использовалось комплексирование данных от электромагнитного искателя и видеосистемы. В работах [11, 12] приведены положительные результаты моделирования метода позиционирования АНПА относительно ТП на основе анализа видимой формы лазерной линейки, с помощью которой робот «подсвечивает» объект.

Попытки выполнения инспекции локальных объектов ПДК начались несколько позже, поскольку потенциально обеспечение навигации АНПА относительно этих объектов представляет собой более трудную задачу. Это связано с необходимостью распознавания объектов сложной формы (рис. 1), а также с обеспечением субметровой точности позиционирования АНПА возле таких объектов. Использование для этих целей штатных бортовых автономных навигационных устройств в совокупности с гидроакустическим навигационным оборудованием АНПА не позволяет обеспечить требуемую точность. Для выполнения точной первоначальной навигационной привязки может быть использовано высокочастотное гидроакустическое или лазерное сканирование объекта с последующим анализом полученного изображения. Далее работа вблизи объекта может выполняться с использованием бортовой высокоточной ИНС и доплеровского лага [4, 13]. Однако накапливающаяся навигационная ошибка и «шумная» работа доплеровского лага вблизи объекта ПДК сложной формы в итоге не обеспечивают нужной точности.

Высокоточной навигации относительно локального объекта можно добиться за счет обработки видеоизображений, получаемых на борту АНПА в режиме реального времени (предполагается, конечно, что прозрачность воды позволяет использовать фотокамеру). Ключевой задачей здесь является распознавание подводного объекта и/или его фрагментов. В работе [14] представлена система для решения задачи автоматического выполнения с помощью АНПА манипуляционных операций с объектами. Для этого АНПА Girona 500 оснащался манипулятором с 4 степенями свободы. После обучения его системы управления, действующей на основе алгоритма «обучение по демонстрации», была продемонстрирована работа АНПА с переключением механических тумблеров. Стабилизация аппарата у цели (панели управления подводным оборудованием) производилось по видеоданным, в экспериментальном бассейне. При этом распознавание заданной картинки также производилось после обучения.

Однако задача в более общей постановке (включая первоначальный выход аппарата к объекту и обнаружение цели в его составе) в упомянутом выше эксперименте не решалась. Для этого могут быть использованы поисковые движения АНПА с целью

обнаружения известных фрагментов объекта (локальных ориентиров). В работе [15] описан подход к решению задачи обследования малоразмерных объектов на дне сначала по данным ГБО с распознаванием объектов на борту аппарата, а затем – выполнение детального обследования фотосистемой. Несколько по-другому задача первоначального выхода решается в работе [16], где предложен подход, основанный на комбинированном использовании УКБ ГАНС и видеосистемы для точного позиционирования АНПА относительно объекта (в данном случае – для автоматического входа АНПА в док). В работе [17] авторы рассматривают подход к реализации желаемой траектории (в том числе вблизи объектов) с использованием визуальных ориентиров, глобальные координаты которых точно известны, а также адаптивных нейронных сетей для их распознавания.

Проблема, однако, состоит в том, что глобальные координаты объектов ПДК могут быть известны недостаточно точно из-за ошибок их определения во время установки, а также ввиду возможных подвижек этих объектов после установки. Поэтому инспекционные работы целесообразно выполнять в системе координат, связанной с объектом. Далее в статье рассматривается модельное решение задачи автоматизированной инспекции фрагментов подводных добычных комплексов, основной подход к выполнению которой изложен в [1]. Среди особенностей описанного подхода можно выделить использование близкодействующих датчиков для проведения обследования, что подразумевает обеспечение субметровой точности определения положения АНПА по отношению к объекту инспекции. Для навигационной привязки к объекту используется методика видеораспознавания характерных точек (ХТ) на фото/видеоизображениях [18]. Далее для перемещения вблизи объекта используются методы визуальной стереоодометрии [19, 20]. В водной среде область видимости может быть существенно ограничена, поэтому работа с такой системой предполагает процедуру поиска ХТ точек. Для выполнения инспекции предполагается использование АНПА с движительно-рулевым комплексом, обеспечивающим управление по 5 степеням свободы, что даёт возможность стабилизировать заданное положение аппарата возле обследуемого оборудования.

1. Обеспечение координатной привязки АНПА к объекту инспекции

Методика прецизионной координатной привязки к искусственным подводным объектам при наличии их модели подробно рассмотрена в [1, 18]. Отметим основные черты этого подхода.

В качестве модели, однозначно идентифицирующей объект, рассматривается множество его характерных точек (ХТ) $P\{P_1, \ldots P_N\}$ и множество измеренных расстояний $D^{model}\{d_{1,2}^{model},\ldots d_{N-1,N}^{model}\}$ 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. 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. Число таких точек зависит от размеров и геометрической сложности объекта.

Координатная привязка основывается на трехэтапной схеме обработки стереоизображений с использованием описанной модели объекта:

– выделение и сопоставление на снимках стереопары 2D-точечных особенностей. Построение по сопоставленным точкам множества 3D точек $C\{C_1, \ldots C_M\}$ (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;

– распознавание в 3D облаке точек, принадлежащих объекту, с помощью алгоритма идентификации точек объекта, использующего геометрическую модель объекта. Алгоритм основан на принципе структурной когерентности, согласно которому сходство двух групп точек определяется сохраняющимся взаиморасположением точек в обеих группах. Входной информацией для работы алгоритма служат сформированное 3D облако точек и геометрическая модель объекта;

– 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.

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.

Привязка заключается в вычислении матрицы геометрического преобразования $H^{АНПА,объект}$, обеспечивающей преобразование координат точек из СК АНПА в СК объекта. Задача нахождения указанной матрицы решается традиционным методом минимизации суммарного расхождения двух сопоставленных множеств точек, совмещенных в одном координатном пространстве: $\min \sum_{k=1}^{n} \left\| P_k - C_k H^{АНПА,объект} \right\|$, 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, заданной в СК АНПА.

Как показали эксперименты, проведённые в лабораторных условиях, точность одномоментной навигационной привязки к объекту с использованием описанного метода составляет 1,6–4 см при проведении фотосъемки с расстояния 2–5 м. При движении вдоль объекта со скоростью 0.25 м/с с использованием метода визуальной одометрии накопление навигационной ошибки не превышало 2 см. При этом предполагалось, что навигационная ошибка сбрасывалась при прохождении очередной ХТ в среднем каждые 40 с (что соответствует среднему расстоянию между ХТ в 10 м). Таким образом, итоговая точность используемого метода навигационной привязки составляет примерно 3,6–6 см.

2. Организация управления АНПА

Описанная в [1] методика обследования была реализована на базе гибридной трёхуровневой системы управления, используемой в разработках ИПМТ ДВО РАН [21]. Наращивание функционала этой системы достигается путём добавления модулей-агентов, работающих на тактическом уровне, а координирование работы агентов достигается за счёт использования механизма приоритетов. В основе работы каждого агента лежит цикл обработки событий, возникающих при работе модуля. Таковыми являются срабатывания таймеров, приход сообщений, выполнение определённых логических условий и т.п. Цикл обработки событий запускается после инициализации переменных и работает с заданным временным интервалом.

При декомпозиции общей задачи миссии на подзадачи-алгоритмы для агентов необходимо соблюдать баланс между реактивным поведением и планированием. В рамках решаемой задачи совокупность взаимодействующих агентов должна обеспечить следующую последовательность действий АНПА:

– планирование последовательности обхода объектов (если их количество более одного);

– подход к очередному объекту с использованием стандартных навигационных средств;

– выполнение поисковых движений возле объекта (с учётом условий видимости в районе работ) с целью обнаружения заранее заданных собраний ХТ;

– коррекция (сброс) ошибки навигационной системы при обнаружении облака ХТ;

– инспекция заданного объекта, т.е. переход в режим зависания и последующее сближение с объектом на заданное расстояние. Во время зависания производится инспектирование объекта, которое подразумевает сбор фото/видео и прочих данных.

Для решения описанных задач создаётся группировка агентов, функции которых описаны ниже (агенты перечислены в порядке возрастания приоритета).

«Планировщик» загружает описание миссии, планирует и реализует перемещения АНПА между объектами (точнее, между их ХТ). В случае неудачи при выполнении навигационной привязки к очередному объекту «Планировщик» перепланирует миссию таким образом, чтобы в дальнейшем ещё раз повторить попытку обследования этого объекта.

«Искатель» загружает описание миссии для получения сведений о месте нахождения ХТ. «Искатель» планирует и выполняет поисковую траекторию («цветок») в окрестности очередной ХТ для её обнаружения и выполнения навигационной привязки. Выполнение поисковой траектории необходимо из-за ошибки, которую имеет навигационная система АНПА, используемая во время перемещения между объектами ПДК, а также вследствие стохастичности временной задержки между попаданием ХТ в объектив камеры и обнаружением её видеораспознавателем. Если обнаружение очередной ХТ окончилось неудачей, то об этом сообщается «Планировщику».

«Инспектор» загружает описание миссии для получения сведений о месте нахождения обследуемых точек (ОТ). После выполнения навигационной привязки к объекту «Инспектор» перемещает АНПА к ОТ, а затем выполняет её обследование («зависание» над ОТ и её фотографирование). Если на объекте ПДК находится более одной ОТ, то «Инспектор» возвращается к ХТ и активирует процедуру её поиска для минимизации накапливающейся ошибки.

3. Описание миссии

Миссия для АНПА по обследованию объектов ПДК задаётся в декларативном стиле [22] и включает описание объектов и задач инспекции.

Объекты инспекции описываются в виде трёхмерных собраний/облаков ХТ совместно с их поло-

жениями в системе координат, связанной с объектами инспекции. Характерные точки также привязаны к мировой системе координат (впрочем, со значительной ошибкой) и имеют индивидуальные текстовые метки. На одном объекте могут быть несколько наборов ХТ, располагающихся в разных местах. Задачи инспекции формулируются через обследуемые точки, которые привязаны к системе координат объекта и также имеют собственные индивидуальные текстовые метки.

Описание миссии строится в виде совокупности ХТ и связанных с ними ОТ, а также действий по обследованию, которые АНПА должен выполнить для каждой из ОТ. В рамках модельных экспериментов действия АНПА ограничивались фотообследованием ОТ, поэтому в задании миссии не детализировались.

В целом такое задание миссии предполагает, что АНПА самостоятельно будет определять последовательность обхода ХТ и ОТ в зависимости от складывающихся условий и навигационной обстановки. Описание миссии АНПА по обследованию фрагментов объектов ПДК схематично представлено на рисунке 2.

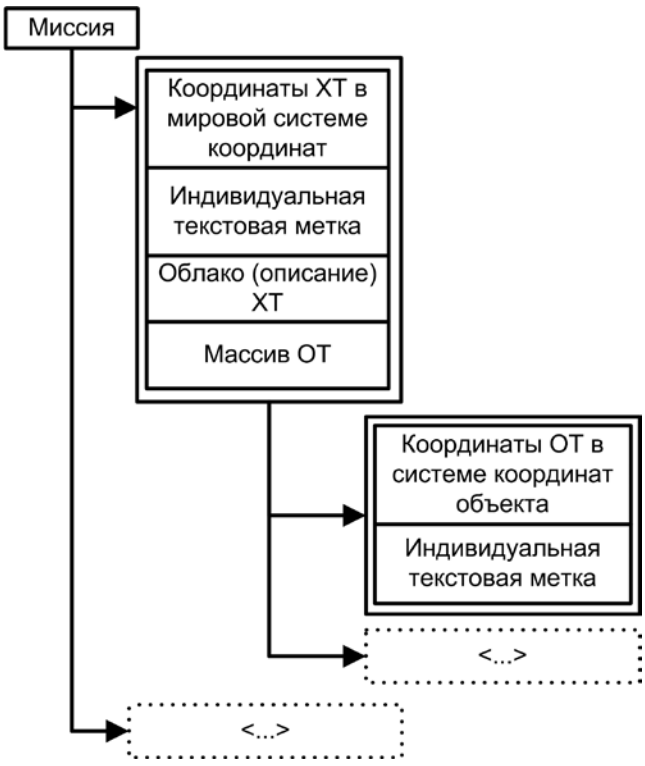

Рис. 2. Описание миссии

4. Логика работы агентов

Как отмечалось выше, желаемое поведение при обследовании объектов АНПА получается как результат взаимодействия управляющих агентов в группе. Остановимся на алгоритмах работы агентов подробнее.

4.1. Планировщик

«Планировщик» (planner) после загрузки массива координат обследуемых точек строит (планирует) галсы для прохода через каждую точку. При планировании маршрута используется «жадный алгоритм», т. е. в качестве следующей точки берётся ближайшая из необследованных. Агент выполняет три основных действия (рис. 3):

– управление перемещением аппарата от точки к точке;

– загрузку координат обследуемых собраний характерных точек;

– перепланирование маршрута в том случае, если найти собрание характерных точек не удалось.

«Планировщик» учитывает неудачу поиска очередной ХТ (когда заканчивается массив галсов, запланированных для этой ХТ). Тогда эта ХТ помещается в массив необследованных точек и уже после завершения первоначального плана по данным этого массива строится новый план движения. В логике работы агента отведено 2 попытки для обследования одного собрания ХТ.

4.2. Искатель

«Искатель» (finder) при достижении аппаратом окрестности заданной точки (размер окрестности зависит от накопившейся погрешности навигационной системы) реализует одну из поисковых траекторий над предполагаемым положением собрания ХТ. В качестве такой траектории в рамках эксперимента используется траектория «цветок». При активизации агент «перехватывает» управление у «Планировщика», поскольку имеет более высокий приоритет. Логика работы агента предполагает выполнение четырёх действий (рис. 4):

– перемещение АНПА по рассчитанному в виде «цветка» массиву поисковых галсов;

– загрузка данных миссии;

– проверка на приближение к какой-либо из необследованных точек;

– приём сообщения о завершении обследования «Инспектором» (а также о неудачах поиска).

4.3. Инспектор

«Инспектор» (inspector) при поступлении данных от видеораспознавателя осуществляет стабилизацию положения аппарата относительно ХТ, а затем отно-

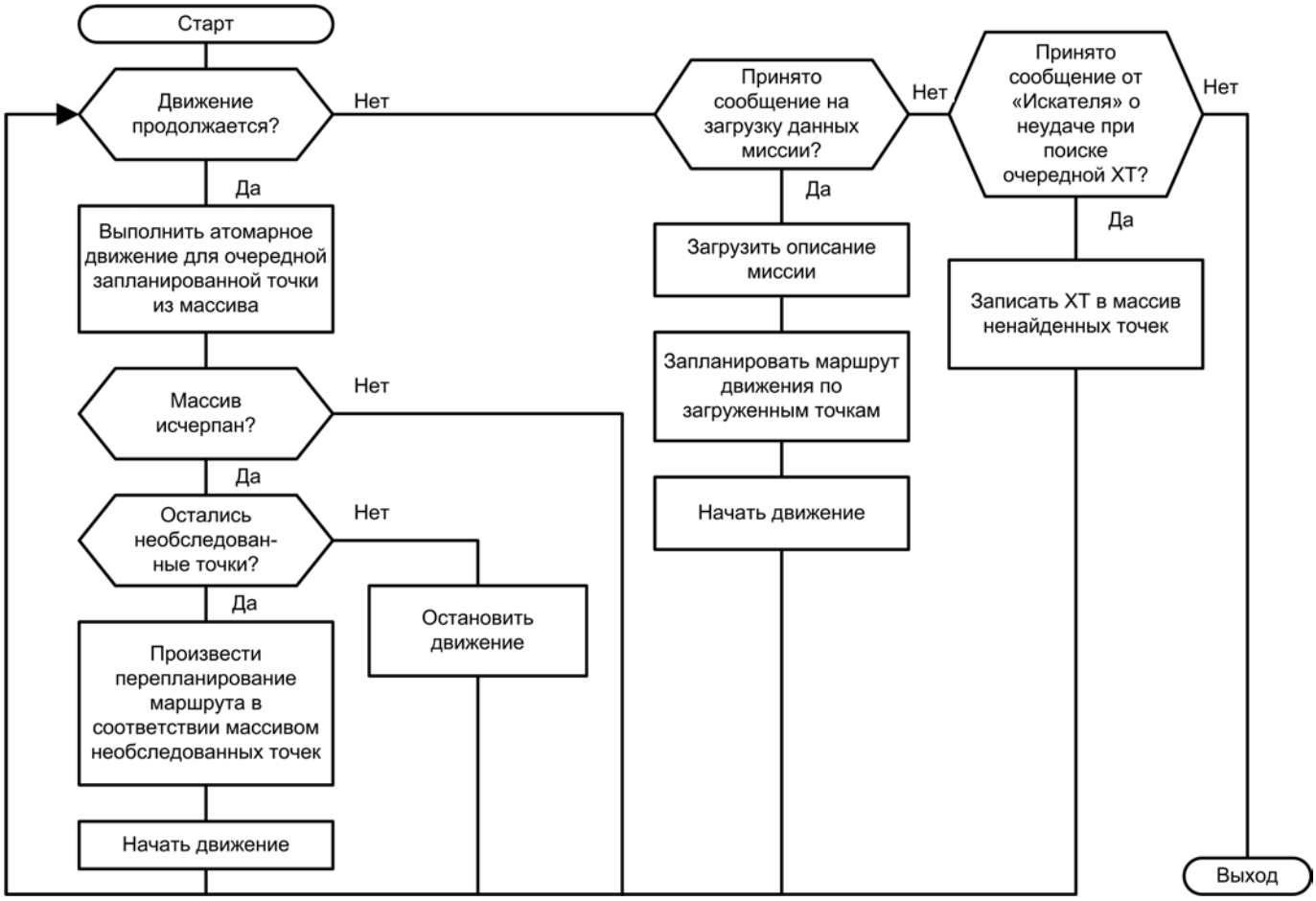

Рис. 3. Алгоритм работы агента «Планировщик»

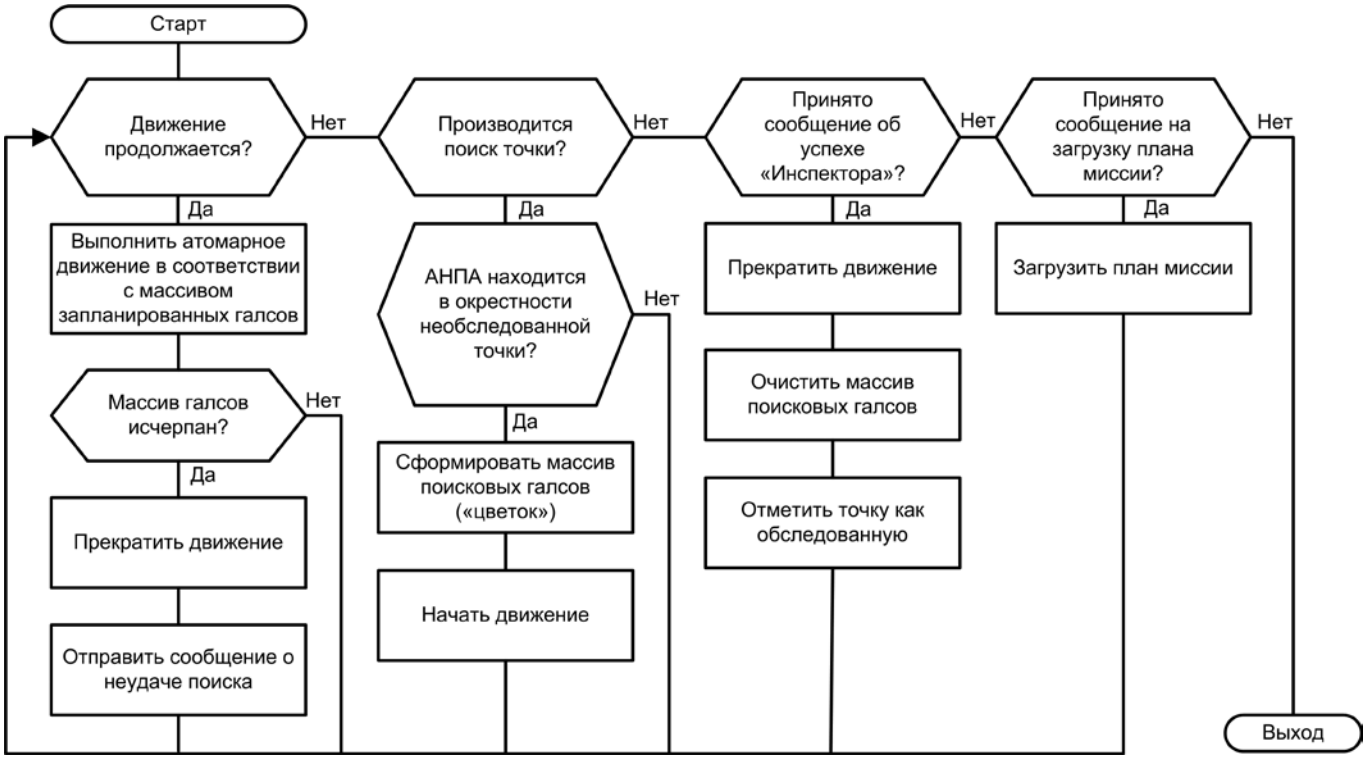

Рис. 4. Алгоритм работы агента «Искатель»

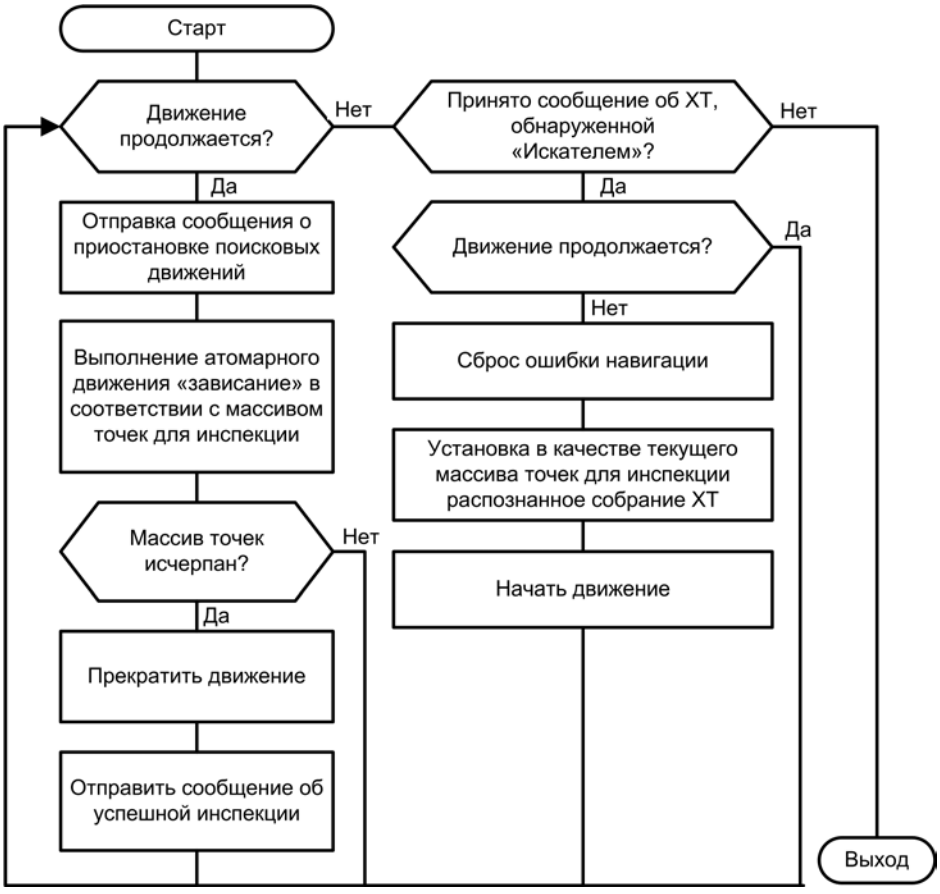

Рис. 5. Алгоритм работы агента «Инспектор»

сительно ОТ (перемещая аппарат от ХТ к ОТ и обратно). «Инспектор» осуществляет следующие действия (рис. 5):

– производит навигационную привязку к распознанной точке (т.е. переходит к системе координат, связанной с объектом, с нулевой начальной ошибкой);

– стабилизирует положение АНПА относительно распознанной точки в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также его ориентацию.

О завершении обследования агент сообщает «Искателю».

5. Модельные эксперименты

Тестирование алгоритмов обследования производилась с использованием разработанного ранее моделирующего комплекса [23]. Для исследования поведения АНПА была подготовлена модель внешней среды (рис. 6), состоящая из донной поверхности (300×300 м) и четырёх расположенных на ней добычных установок (размером 16×16×10 м)

Используемый виртуальный АНПА оборудовался имитатором системы видеораспознавания [18] и эхолокационной системой (ЭЛС). Для определения глобальных координат АНПА применялась стандартная система комплексирования [24], использующая навигационные данные от ГАНС и системы счисления пути. Ошибка системы счисления пути имитировалась путём добавления нормально рас-

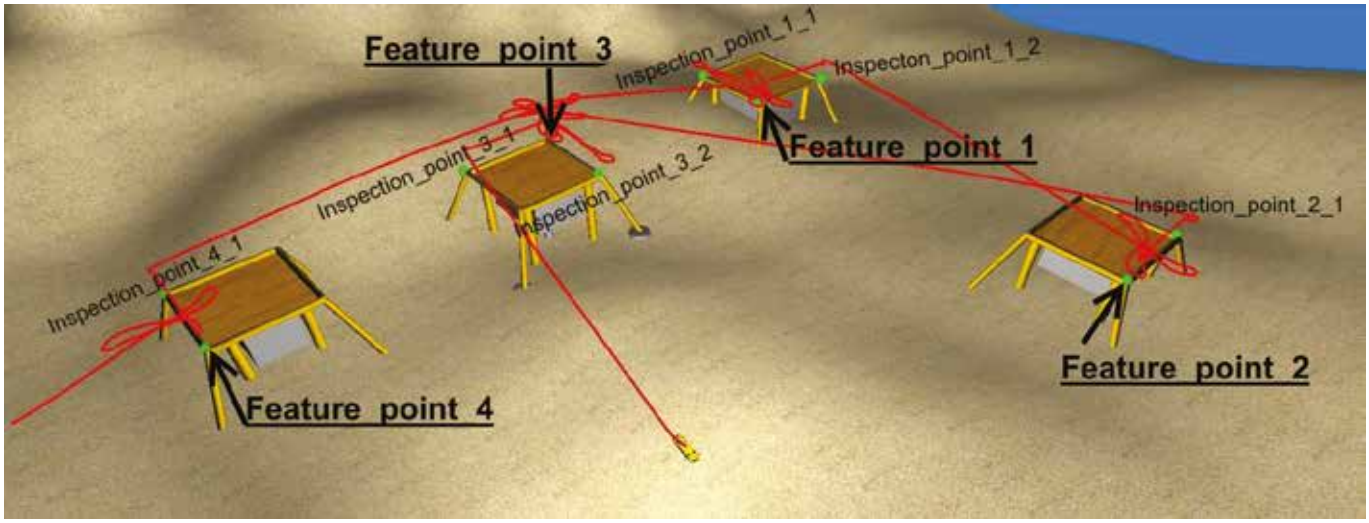

Рис. 6. Модельная карта местности с оборудованием, а также траектория обследования в привязке к моделям объектов

пределённого шума с нулевым средним и среднеквадратичным отклонением 0.00025 м на 1 м движения аппарата, что соответствует типовым характеристикам подобных систем в современных АНПА. Моделируемые ошибки ГАНС подробно изложены в [25].

Задачи модельных экспериментов включали:

- оценку адекватности работы группировки управляющих агентов, реализующих заложенную модель поведения АНПА;
- отладку процедуры обнаружения ХТ и осуществления навигационной привязки;
- проверку хода выполнения обследовательской миссии в штатной ситуации (когда миссия развивается в соответствии с первоначально разработанным сценарием);
- проверку хода выполнения миссии в нештатной ситуации (в случае сбоев при распознавании ХТ).

Миссия АНПА заключалась в обследовании набора ОТ, обозначенных на рис. 6 как «Inspection_point_Nobj_Nip» (где Nobj – номер объекта, а Nip – номер ОТ на объекте). База данных об объектах обследования включала набор ХТ объектов, представленных на рис. 6 как «Feature_point_Nobj».

После запуска и сближения с районом расположения объектов ПДК аппарат произвёл планирование последовательности обхода объектов исходя из текущей навигационной обстановки (запланированная траектория представлена на рис. 7 прерывистой линией). Запланированная траектория включала последовательный обход объектов 1–4 с возвращением в точку старта. Следует отметить, что на каждом из объектов определено разное количество ОТ, что находит своё отражение на форме траектории. Также запланированная траектория не включает поисковые движения АНПА, которые он совершает для обнару-

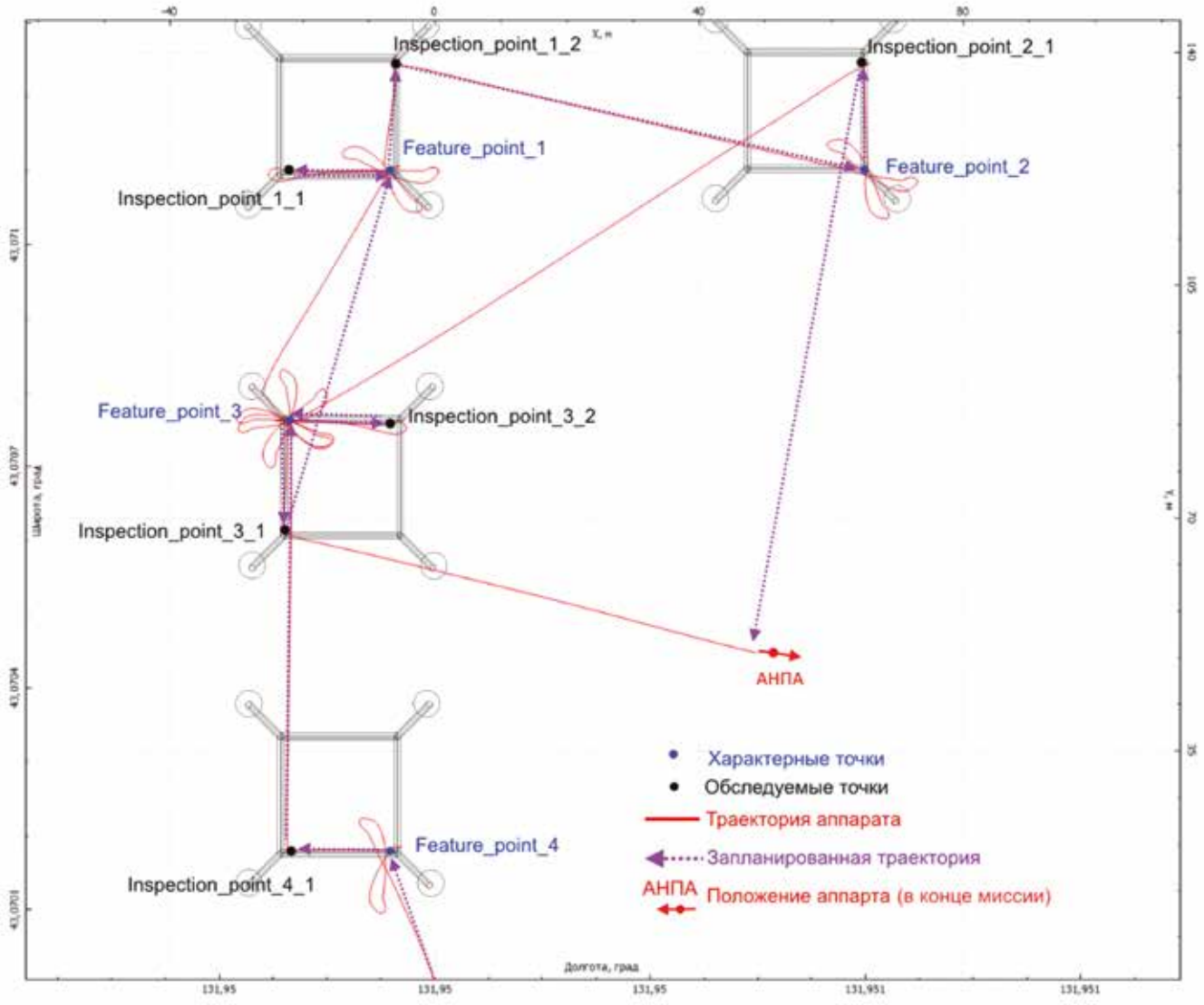

Рис. 7. Запланированная и реализованная траектории АНПА

жения и распознавания очередной ХТ – эти движения формируются соответствующим агентом автоматически, исходя из складывающейся ситуации.

В ходе экспериментов аппарат двигался по траектории, обозначенной на рис. 7 сплошной линией. ХТ на объекте 4 (первом по счёту) была обнаружена в соответствии с планом, при этом её распознавание произошло практически сразу, что позволило не реализовывать поисковую траекторию целиком. После осуществления навигационной привязки была проинспектирована запланированная для данного объекта ОТ, после чего АНПА двинулся к ХТ на объекте 3 (второй по счёту). Обнаружение ХТ для этого объекта не удалось, несмотря на выполненную в полном объеме поисковую траекторию (рис. 6 и 7). Далее АНПА перешёл к обследованию следующих объектов (1 и 2), которое прошло в штатном режиме.

Для выполнения целей миссии в полном объеме было осуществлено перепланирование траектории. В результате было добавлено возвращение ко второму объекту с повторной попыткой обнаружения ХТ, которая увенчалась успехом. После инспекции ОТ, определенных для данного объекта, АНПА вернулся в запланированную точку финиша.

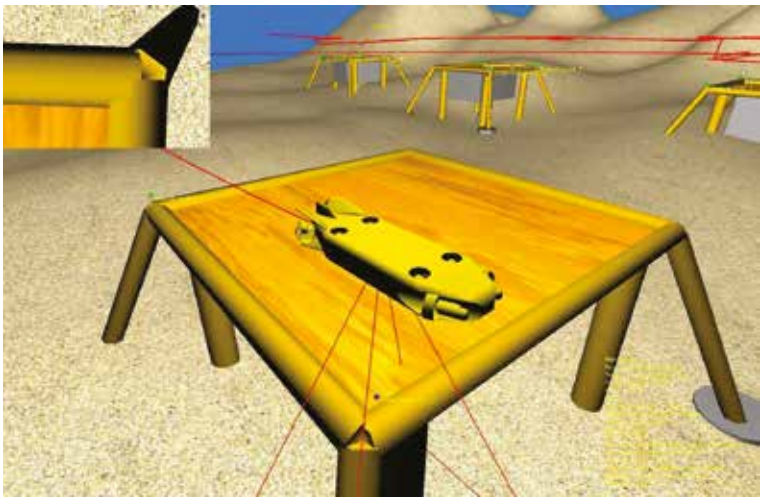

Рис. 8. Инспекция заданной точки

Следует отметить, что на плане траектории движения АНПА не видны моменты позиционирования аппарата над обследуемым объектом и инспекции ОТ. Скриншот «зависающего» аппарата, а также вид в поле зрения камеры показан на рис. 8.

В процессе выполнения экспериментов ошибка привязки АНПА к объектам не превышала 20 см, что иллюстрируется графиком динамических ошибок на рис. 9. Это позволило выполнить фотообследование ОТ с необходимой для этого точностью.

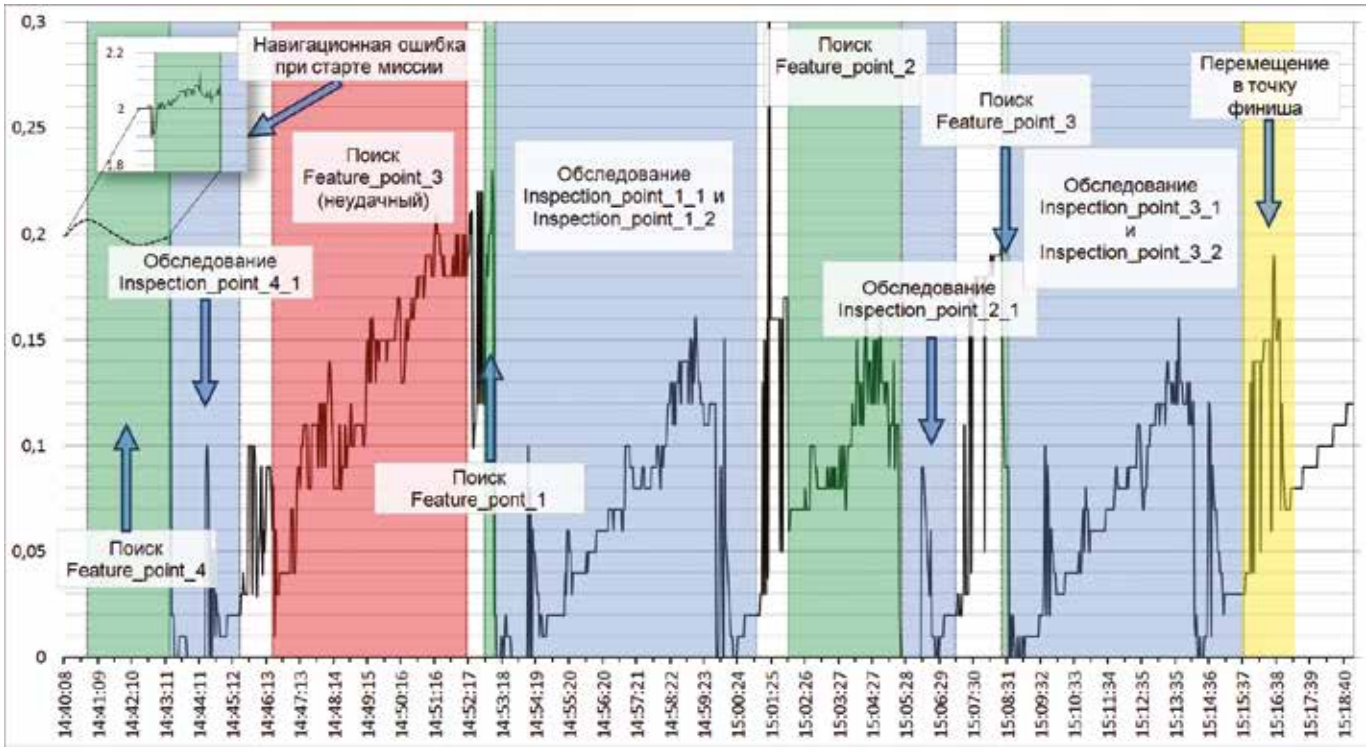

Рис. 9. Ошибки навигационной привязки АНПА к объектам инспекции

Заключение

В работе представлены результаты моделирования процесса автоматической инспекции объектов подводного добычного комплекса с помощью АНПА. Особенностью разработанных методов является использование стереокамеры для точной навигационной привязки АНПА к обследуемым объектам. При этом предполагается, что геометрические характеристики объектов (их модели) известны заранее. В ходе экспериментов была подтверждена функциональность алгоритмов управления АНПА, обеспечивающих работу в автономном режиме. Результаты экспериментов показали практическую реализуемость примененных подходов.

Основная трудность в осуществлении навигационной привязки с помощью используемых методов связана с тем, что процесс выбора (человеком) ХТ на этапе формирования модели ПДК и процесс выявления особенностей на снимках являются относительно независимыми друг от друга. Как показали эксперименты, это приводит к возможным ситуациям с небольшим количеством идентифицированных точек модели ПДК, что негативно сказывается на вероятности обнаружения ХТ и точности привязки.

Решением проблемы может являться формирование модели в результате предварительного прохода АНПА 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. Указанные задачи определяют направления дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. 23–37.
2. Aker Solutions. Subsea Structures. – https://www.akersolutions.com/what-we-do/subsea-production-systems-and-lifecycle-services/subsea-structures/ (дата обращения: 06.07.2021).
3. Marco Jacobi, Divas Karimanzira. Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs // MTS/IEEE OCEANS 2014 - St. John's. Canada, September 14–19, 2014. P. 1–6.
4. Underwater inspection system using an autonomous underwater vehicle ("AUV") in combination with a laser micro bathymetry unit (triangulation laser) and high-definition camera. – https://patents.google.com/patent/WO2015134473A2 (дата обращения: 18.06.2021).
5. Caoyang Yu, Xianbo Xiang, Mingjiu Zuo, Hui Liu. Underwater cable tracking control of under-actuated AUV // 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), 6–9 December 2016. Tokyo, Japan. P. 324–329.
6. Jialei, Zhang, Zhang, Qin, Xiang, Xianbo. Automatic inspection of subsea optical cable by an autonomous underwater vehicle // MTS/IEEE OCEANS 2017. 19–22 June Aberdeen, UK, 2017. P. 1–6.
7. Jialei, Zhang, Xiang, Xianbo. Subsea cable tracking by a 5–DOF AUV // 36th Chinese Control Conference. 2017. P. 4796–4800.
8. Ghis, S & Fischer, Eric. Record-Setting AUV Pipeline Inspection in Deepwater West Africa // Proceedings of Offshore Technology Conference, 1-4 May, 2017, Houston, Texas, USA. –https://doi.org/10.4043/27688-MS.
9. Kowalczyk M., Claus B., Donald C. AUV Integrated Cathodic Protection iCP Inspection System – Results from a North Sea Survey // Proceedings of Offshore Technology Conference, 6–9 May, 2019, Houston, Texas. – https://doi.org/10.4043/29524-MS.
10. Inzartsev A., Pavin A., Matvienko V. AUV Application for Inspection of Partly Silted Underwater Cables // Proceedings of 6th International Symposium on Underwater Technology (UT2009), April 21–24. Wuxi, China, 2009. P. 284–292.
11. Inzartsev A., Eliseenko G., Panin M., Pavin A., Bobkov V., Morozov M. Underwater pipeline inspection method for AUV based on laser line recognition: simulation results // IEEE OES International Symposium on Underwater Technology 2019 (UT'19 Kaohsiung). Kaohsiung, Taiwan, 2019.
12. Бобков В.А., Морозов М.А., Инзарцев А.В., Елисеенко Г.Д. Метод визуальной навигации для организации инспекции подводного трубопровода автономным роботом // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 3, № 3(45). С. 143–151.
13. Vidal E., Palomeras N., Istenic K. and Hernández J.D. and Carreras M. Two-Dimensional Frontier-Based Viewpoint Generation for Exploring and Mapping Underwater Environments // Sensors. 2019. V. 19, No. 1460 – https://www.mdpi.com/1424-8220/19/6/1460 (дата обращения: 22.07.2021).
14. 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 // OCEANS 2016. Shanghai, China, 2016.
15. 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.
16. Fan S., Liu C., Li B. et al. AUV docking based on USBL navigation and vision guidance // Journal of Marine Science and Technology. 2019. V. 24. P. 673–685 – https://doi.org/10.1007/s00773-018-0577-8
17. Gao, J., Wu, P., Yang, B. et al. Adaptive neural network control for visual servoing of underwater vehicles with pose estimation // Journal of Marine Science and Technology. 2017. V. 22. P. 470–478 – https://doi.org/10.1007/s00773-016-0426-6
18. Bobkov, V.A., Kudryashov, A.P. & Inzartsev, A.V. Technology of AUV High-Precision Referencing to Inspected Object // Gyroscopy and Navigation. 2019. V. 10, No. 4. P. 322–329. –https://doi.org/10.1134/S2075108719040060
19. Jun Zhang, Voirela Ila, Laurent. Kneip-Robust visual odometry in underwater environment // Proceedings of 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) Conference & Exhibition. Kobe, Japan, 2018. P. 1–9.
20. Bobkov V.A., Mel'man S.V. and Kudryashov A.P. Fast computation of local displacement by stereo pairs // Pattern Recognition and Image Analysis. 2017. V. 27. No. 3. P. 458–465.

21. Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Павин А.М. Реконфигурируемая система управления для многофункциональных подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1(23). С. 4–13.

22. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Представление заданий для автономного подводного робота на базе поведенческих методов // Труды XII Всерос. совещ. по проблемам управления. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 3980–3990.

23. Мельман С.В., Бобков В.А., Инзарцев А.В., Павин А.М., Черкашин А.С. Программный моделирующий комплекс для автономных подводных аппаратов на базе многопроцессорной архитектуры // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1(19). С. 23–32.

24. 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: ИПМТ ДВО РАН, 2018. 368 с.

25. Павин А.М. Автоматическое приведение автономного подводного робота к гидроакустическому маяку // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 1(5). С. 32–38.

Сведения об авторах

ИНЗАРЦЕВ Александр Вячеславович, д.т.н., главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН)
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А.
Научные интересы: автономный подводный робот; информационно-управляющая система; программная архитектура; миссия робота; планирование миссии; формирование поведения робота
Тел.: +7(924)240-62-30
E-mail: inzar@marine.febras.ru
ORCID ID: 0000-0002-1842-9951

ПАНИН Михаил Андреевич, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН)
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А.
Научные интересы: информатика, системное программирование, подводная робототехника.
Тел.: +7(951)021-12-48
E-mail: kars25rus@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-3548-3618

БОБКОВ Валерий Александрович, д.т.н., главный научный сотрудник
Федеральное государственное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН)
Адрес: 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5
Научные интересы: компьютерное зрение, компьютерная графика, обработка изображений, робототехника
Тел.: +7(914)796-72-95
E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0001-9722-5158

МОРОЗОВ Михаил Александрович, ведущий инженер-программист
Федеральное государственное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН)
Адрес: 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5
Тел.: +7(902)506-39-74
E-mail: morozov@iacp.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0002-0767-9218

Для цитирования:

Инзарцев А.В., Панин М.А., Бобков В.А., Морозов М.А. МОДЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИНСПЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ АНПА НА БАЗЕ МЕТОДИКИ ВИДЕОРАСПОЗНАВАНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧЕК // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 3(37). С. 23–35. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_03.