УДК 004.896+629.58+001.891.57

ОТЛАДКА АЛГОРИТМОВ ИНСПЕКЦИИ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА БОРТУ АНПА С ПОМОЩЬЮ УДАЛЕННОГО ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

Инзарцев А.В.^{1,2}, Елисеенко Г.Д.¹, Панин М.А.¹, Павин А.М.^{1,2}, Бобков В.А.³, Морозов М.А.³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Дальневосточный федеральный университет² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН³

Рассматривается сценарий автоматизированной инспекции трубопроводной инфраструктуры в подводных добычных комплексах с помощью АНПА. Точная дистанция до объекта инспекции определяется на основе анализа видимой формы лазерной линейки, с помощью которой робот подсвечивает трубопровод. Далее эта информация используется для организации прецизионного целенаправленного движения АНПА вблизи объекта инспекции.

Представлены схема организации отладки и особенности реализации набора навигационно-управляющих алгоритмов, разработанных для целей инспекции. Отладка ведется с использованием распределенной системы моделирования, которая включает удаленный высокопроизводительный вычислительный кластер, сопряженный с программной средой навигационно-управляющего комплекса (НУК) реального АНПА. На стороне вычислительного кластера решается задача моделирования внешней среды и анализа формы лазерной линейки. В среде НУК функционируют модель АНПА и управляющие агенты, которые используют данные распознавания для организации инспекции. Такая схема отладки позволяет проводить ресурсоемкое моделирование без внесения каких-либо изменений в архитектуру программного обеспечения НУК.

Обсуждаются результаты модельных экспериментов по проведению инспекции для различных вариантов размещения трубопровода на донной поверхности.

введение

По мере расширения сферы использования АНПА решаемые ими задачи становятся всё более сложными, а методы решения самих задач – всё более ресурсоемкими в плане использования вычислительных ресурсов. Это относится как к бортовым алгоритмам управления АНПА, так и к средствам моделирования датчиков внешней среды, которые применяются для отладки алгоритмов до их реализации на борту АНПА. Примерами таких ресурсоемких вычислений может служить циклический процесс генерации/обработки реалистичных видеоизображений в реальном времени, который используется в широком спектре задач локальной навигации и управления АНПА. Для решения проблем, связанных с моделированием ресурсоемких вычислений, авторами статьи ранее было предложено использование интегрированной системы, включающей высокопроизводительный моделирующий комплекс (МК) и копию среды системы программного управления реальных АНПА совместно с отлаживаемыми алгоритмами [1, 2]. Во многих случаях оправданным является отладка алгоритмов управления непосредственно в среде навигационноуправляющего комплекса (НУК)

реального аппарата [2], поскольку это радикально сокращает время последующего их внедрения. При этом от моделирующего комплекса может потребоваться пространственно-распределенная организация [3] для сопряжения реального АНПА с удаленным высокопроизводительным кластером, осуществляющим моделирование внешней среды и датчиков робота. Такая

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: 8 (423) 2215545, доб. 616. E-mail: inzar@ marine.febras.ru

² 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: 8 (423) 2215545, доб. 510. E-mail: pavin@ bk.ru

³ 690041, Владивосток, ул. Радио, 5. Тел.: 8 (423) 2313776. E-mail: morozov@iacp.dvo.ru, bobkov@iacp. dvo.ru

организация экспериментов также удобна при совместной работе нескольких исследовательских групп над решением разных аспектов одной задачи управления, однако всё это требует соответствующих архитектурных решений со стороны НУК АНПА и МК. Современная концепция построения программной среды АНПА позволяет использовать данные от устройств, нахоляшихся как в составе АНПА. так и вне его [3, 4]. В последнем случае устройства могут быть виртуальными и реализовываться на базе МК.

Подобная схема отладки алгоритмов была применена при решении практически важной задачи автоматизированной инспекции подводных трубопроводов (ТП) с помощью АНПА. Модель поведения АНПА при обследовании ТП предполагает выполнение этапов предварительной инспекции с использованием дальнодействующих средств обнаружения (этот этап рассматривался авторами ранее [5]) и последующую детальную инспекцию с небольшого расстояния.

В данной работе акцент сделан на решении проблем, связанных с выполнением прецизионного этапа инспекции. Во время инспекции АНПА должен двигаться на небольшом расстоянии от трубопровода (сверху или сбоку от него, в зависимости от задачи инспекции) с выполнением точной навигационной привязки относительно ТП. Во время движения необходимо принимать в расчет особенности расположения ТП на грунте (возможные заиленность и изгибы ТП, наличие промоин). Прецизионное определение расстояния от АНПА до трубопровода представляет собой определенную проблему ввиду того, что штатное навигационное оборудование робота не в состоянии обеспечить

необходимую точность и надежность обнаружения ТП. Этой теме посвящен ряд исследований, в которых предлагается использование разных конфигураций сенсоров и алгоритмов обработки данных. В [6] авторы предлагают метод управления подводным аппаратом на основе объединения данных от различных сенсоров, включая камеру, многолучевой эхолот, донный профилограф и магнитный сенсор. Алгоритмы объединения данных и распознавания трубопроводов/кабелей используют вероятностные карты, в которых содержится информация о локации и рейтинге данных от каждого сенсора. В [7] система локализации АНПА основана на использовании акустических сигналов и применении методов теории машинного обучения для устранения аномальных измерений и повышения точности измерений. В [8] описан алгоритм для сегментации трубопроводов и классификации некоторых событий. Для обнаружения границ трубопровода в различных сценариях применяются несколько методов обработки изображений и стратегий слежения, основанных на технологии глубокого обучения с использованием нейронных сетей и многослойного персептрона на базе вейвлетов. Электромагнитные искатели, использующиеся для организации движения АНПА над тонкими металлосодержащими объектами [9], также применены быть не могут ввиду значительного поперечного сечения ТП.

Одним из удобных способов точного определения дистанции является анализ видимой формы зелёной лазерной линейки, установленной на АНПА и подсвечивающей поверхность трубопровода. Эти недорогие и относительно простые устройства нашли широкое применение в телеуправляемых подводных аппаратах для облегчения восприятия оператором формы видимых предметов [10, 11]. Далее предполагается, что АНПА оснащен этим инструментом.

При постановке модельного эксперимента задачи определения дистанции до трубопровода и организации движения АНПА решались территориально в разных местах. Определение дистанции выполнялось на стороне МК. Используемое виртуальное оборудование включало бинокулярную видеокамеру, лазерную линейку и реализацию алгоритмов визуальной локальной навигации. На стороне АНПА решалась задача организации инспекции с использованием поставляемых от МК данных.

В статье рассматриваются особенности организации модельного эксперимента, а также полученные результаты.

1. Подходы к решению задачи инспекции ТП

1.1. Особенности обнаружения ТП с использованием лазерной линейки

Как говорилось выше, предполагается, что в состав сенсорного оборудования АНПА входят видеокамера (возможно применение как монокулярной, так и стереокамеры) и зеленый лазер, обеспечивающий синхронное с видеосъёмкой сканирование (рис. 1).

Алгоритм обнаружения и слежения за трубопроводом основывается на экстраполяции линии направления ТП на каждом шаге по ранее полученным точкам, принадлежащим ТП [12]. В качестве таких точек рассматриваются характерные точки P_k — точки максимальной высоты на пространственных профилях трубы, получаемых по измерениям лазера. Характерные точки располагаются вдоль направления ТП (рис. 2).



Рис. 1. Схема сканирования лазером объекта съемки. Искомая 3D точка трубопровода вычисляется как пересечение луча (из камеры через P2D) с плоскостью сканирования лазера

Определение характерной точки трубопровода в текущей позиции АНПА выполняется на основе вычисления точек локальных экстремумов на линии полученного профиля и выборе из них точки, наиболее близкой к прогнозируемой линии ТП. Критерий близости строится на оценке кривизны линии направления ТП.

Работа алгоритма прослеживания ТП возможна как с использованием моновидеокамеры, так и с применением стереокамеры. В первом случае характерные точки определяются в результате анализа профиля на 2D изображении с последующим построением соответствующей 3D точки. Если P2D - точка на изображении, принадлежащая профилю, то соответствующая ей 3D точка в сцене, согласно приведенному на рис. 1 геометрическому построению, вычисляется как точка пересечения луча, проведенного из центра проекций камеры через точку P2D, с плоскостью сканирования лазера.

В случае использования стереокамеры характерные точки ТП вычисляются на основе анализа пространственной линии профиля, а пространственные точки локальных экстремумов строятся методом триангуляции лучей после сопоставления их образов на левом и правом снимках.

Локализация АНПА осуществляется с помощью ранее разработанного авторами метода визуальной навигации [13]. Получаемые с помощью этого метода параметры положения АНПА, передаваемые в НУК, включают признак обнаружения точки (среза) трубопровода, её положение в локальной системе координат, а также ориентацию видимого фрагмента трубы.

1.2. Поведение АНПА во время инспекции

Предварительный этап инспекции ТП с использованием дальнодействующих средств обнаружения подробно рассмотрен в [5]. Модель обследования ТП на этом этапе предполагает движение АНПА параллельно трубопроводу на значительном удалении от него. При этом среднее направление движения в горизонтальной плоскости определяется направлением прокладки ТП, в то время как движение АНПА в вертикаль-



Рис. 2. Характерные точки, определяющие направление трубопровода

ной плоскости определяется профилем рельефа вдоль по трассе движения (эквидистантное движение) и организуется с использованием текущей информации от эхолокационной системы (ЭЛС) робота.

Как уже упоминалось ранее, для осуществления прецизионного этапа инспекции АНПА должен двигаться на небольшом отстоянии от трубопровода. В зависимости от целей обследования движение АНПА может производиться как в крейсерском режиме (с организацией управления по трём степеням свободы) [2], так и в режиме медленных перемещений (с управлением по пяти степеням свободы) [13]. К особенностям организации прецизионного движения АНПА (в отличие от предварительного этапа) следует отнести то, что трубопровод не просто лежит на донной поверхности, повторяя её профиль, а может быть частично скрыт грунтом или находиться на некотором расстоянии от дна, образуя так называемые «провисы» или «промоины».

При осуществлении прецизионной инспекции АНПА должен двигаться и определять свое положение по отношению к трубопроводу одновременно в горизонтальной и вертикальных плоскостях. В горизонтальной плоскости движение может быть организовано по аналогии с обследованием протяженных кабельных линий [2] либо как для случая использования дальнодействующих средств обнаружения [5].

Движение в вертикальной плоскости целесообразно организовать в режиме стабилизации заданной глубины, поскольку показания эхолокационной системы могут значительно возмущать АНПА при прохождении его над ТП или в районе «провисов». При этом сама заданная глубина должна формироваться на основе данных от системы технического зрения таким образом, чтобы обеспечить требуемое отстояние АНПА от ТП даже в случае изменения возвышения ТП вдоль по трассе прокладки. При таком движении ЭЛС используется, скорее, как аварийный латчик.

Предполагается, что в вертикальной поперечной плоскости видеосистема определяет положение АНПА по отношению к ТП в полярной системе координат через следующие параметры (рис. 3):

 α — угол между вертикалью и направлением на ближайшую точку поверхности ТП, измеренный из текущего положения АНПА;

r – измеренное расстояние из точки нахождения АНПА до ближайшей точки поверхности ТП.

Как отмечалось выше, в общем случае АНПА должен двигаться вдоль трубопровода с удержанием целевых значений α_{μ} и r_{μ} . Для реализации описанной выше модели поведения АНПА целевые параметры для вертикального и горизонтального каналов исполняющего уровня системы управления формируются следующим образом.

Для вертикального канала управления:

$$H_{\mathcal{U}}^{0} = \begin{cases} H + \Delta H, \text{ если ТП виден} \\ H_{\mathcal{U}}^{-1}, \text{ если ТП не виден} \end{cases}$$

Здесь:

H – текущая глубина движения АНПА;

 $H_{\mathcal{U}}^{0}$ и $H_{\mathcal{U}}^{-1}$ – целевые значения глубины стабилизации АНПА на текущем и предыдущем цикле формирования управления, когда ТП находился в поле зрения видеосистемы;

 $\Delta H = (R + r_{ll}) \cos \alpha_{ll} - (R + r) \cos \alpha -$ разница между текущей и заданной глубиной движения, которая обеспечит необходимое отстояние от ТП при движении АНПА вдоль заданной оси;

R – известный заранее радиус ТП.

Для случая крейсерского движения целевые значения для горизонтального канала управления формируются следующим образом:



Рис. 3. Текущее и целевое расположение АНПА по отношению к ТП в вертикальной поперечной плоскости

$$\varphi_{\mu} = \begin{cases} \varphi + \Delta \varphi_{0} \operatorname{sat} \left(K_{1} \Delta d \right) + K_{2} \Delta d, \\ \text{если ТП виден} \\ \varphi_{\Gamma} + \Delta \varphi_{\Gamma} \operatorname{sign} \left(\Delta d_{\Pi} \right), \\ \text{если ТП не виден} \end{cases}$$

Здесь:

 $arphi_{\mathcal{U}}$ — формируемый целевой курс АНПА;

 $\Delta d = (R + r_{il}) \sin \alpha_{il} - (R + r) \sin \alpha -$ ошибка стабилизации отстояния (разница между заданным и измеренным отстоянием до осевой линии ТП) (рис. 3);

 φ – направление ТП, определенное на основе обработки видеоизображений (распознанное направление ТП);

sat() — функция насыщения, $\Delta \varphi_{0}$ — нормирующий коэффициент;

 Δd – скорость сближения АНПА с ТП в горизонтальной плоскости (знаковая величина, которая может быть определена как по последовательности видеоизображений ТП, так и по данным доплеровского лага);

 φ_{Γ} – генеральное (известное заранее в среднем) направление трубопровода;

 $\Delta \varphi_{\Gamma}$ – угол пересечения с ТП (угол между АНПА и ТП во время подхода АНПА из дальней зоны);

 Δd_{Π} – прогнозируемое расстояние до ТП на момент потери его из поля зрения (знаковая величина);

*K*₁, *K*₂ – коэффициенты при компонентах закона регулирования.

В случае движения вдоль трубопровода с малой скоростью для горизонтального курсового канала и канала поперечных перемещений целевые значения пропорциональны φ и Δd соответственно [2].

Для выполнения прецизионного этапа инспекции ТП в НУК АНПА использовалась управляющая структура из двух агентов тактического уровня:

• поискового агента «зигзаг» (агент приближения к ТП), работающего на низшем приоритете;

• агента-инспектора ТП, имеющего более высокий приоритет.

Активизация того или иного агента управляющей структуры во время инспекции производилась в соответствии с заложенными в архитектуре НУК АНПА принципами выполнения поисковообследовательских операций [2]. В агенте-инспекторе были реализованы описанные выше алгоритмы управления АНПА вблизи объекта. В качестве признака активации выступала соответствующая информация от системы распознавания ТП.

На текущем этапе исследований система распознавания ТП реализована для случая $\alpha_{\mu} = 0$, т. е. в состоянии определять координаты только верхней точки трубопровода. Иными словами, целевым является движение АНПА вдоль «гребня» трубопровода, что существенно упрощает приведенные выше выкладки. Система распознавания ТП генерирует признак обнаружения объекта, а также следующие параметры протяженного объекта в связанной системе координат:

 декартовы координаты верхней точки (Δd и ΔH в приведенной выше нотации);

- направление ($\Delta \varphi$);
- угол возвышения.

Агент-инспектор организует управление АНПА с использованием метода «привязки» регуляторов движения к обследуемому объекту. Для организации такого режима в НУК АНПА предусмотрен модуль сцены, содержащий ряд объектов, с которыми может взаимодействовать АНПА. У каждого объекта на сцене определен вектор координат (его компоненты указаны выше). Распознанный трубопровод является одним из объектов сцены. Полученные в связанной системе координаты ТП перечитываются относительно координат сцены и обновляют предыдущие координаты «объекта ТП».

Далее регуляторы движения АНПА привязываются к «объекту ТП» и стабилизируют параметры, описывающие взаимное положение ТП и АНПА (аналоги Δd , ΔH и $\Delta \varphi$). Такой подход позволяет существенно упростить структуру агента-инспектора, поскольку задача управления движением сводится к эпизодической генерации целевых значений для регуляторов. В функциях агентаинспектора остается собственно реализация алгоритма инспекции, контроль получаемых от системы распознавания данных (медианная фильтрация) с последующим их переводом из связанной системы координат в локальную и генерация целевых точек для курсового канала управления (они обновляются в темпе получения новых данных от системы распознавания ТП).

2. Средства, используемые для моделирования

Для выполнения вычислительных экспериментов по оценке эффективности алгоритмов идентификации трубопровода НУК АНПА сопрягался с удаленным МК, на базе которого выполнялось моделирование внешней среды. В качестве НУК использовалась программная среда АНПА X-200.

Используемый имитационный моделирующий комплекс на базе вычислительного кластера [1] предназначен для моделирования аппаратно-программной части системы управления АНПА, создания виртуальных сцен подводной обстановки и для моделирования рабочих миссий АНПА. Основная поддерживаемая комплексом функциональность включает: • моделирование бортового оборудования;

• моделирование динамики аппарата (опционально);

• визуализацию процесса для оператора;

• сбор и хранение информации о показаниях датчиков для дальнейшего анализа;

• работу алгоритмов планирования траектории и управления (опционально).

Модульная архитектура обеспечивает возможность имитации широкого набора бортового оборудования и датчиков, а реализация распределенных вычислений обеспечивает работу вычислительно сложных алгоритмов в режиме реального времени (рис. 4). Алгоритмы моделирования работы зелёного лазера, а также локализации положения АНПА на этом этапе модельных экспериментов были реализованы в виде модулей МК.

Для организации совместной работы МК и НУК АНПА использовалась разработанная в ИПМТ ДВО РАН программная платформа, которая применяется при создании систем управления роботов [14]. В контексте организации вычислительных экспериментов платформа имеет следующие особенности:

 децентрализованную распределенную архитектуру, в которой отсутствуют выделенные модули для обмена сообщениями и сохранения (логирования) информационного потока;

2) единый механизм информационного взаимодействия как между программными компонентами одного компьютера, так и между компьютерами одного или нескольких аппаратов-роботов (или иных вычислительных систем). Информационный обмен между компонентами системы осуществляется с использованием неблокируемых сообщений



Рис. 4. Схема моделирующего комплекса на базе вычислительного кластера [1]

на основе UDP-протокола. Это существенно уменьшает загруженность информационных каналов системы (по сравнению с TCP/IP), поскольку не требует поддерживать соединение;

3) в информационных сообщениях программной платформы отсутствует адресат-потребитель данных, что обеспечивает максимальную гибкость создаваемого программного обеспечения в части имитации работы реальных устройств (реальное оборудование подменяется симуляционными макетами без изменения остального программного обеспечения). Таким образом, с применением разработанной платформы один и тот же программный компонент может быть использован в нескольких задачах без изменений и перекомпиляции;

4) входящие и исходящие данные в системе объединяются в интерфейсы согласно их логической принадлежности. В совокупности с перечисленными выше свойствами (п.п. 1–3) это позволяет подменять компоненты системы (например, рабочие на моделирующие), сохраняя прежними существующие информационные потоки в системе.

Использование платформы позволяет гибко конфигурировать вычислительную среду НУК и организовывать единое информационное поле внутренних и внешних (по отношению к штатному составу НУК) вычислительных компонентов системы. Эти свойства платформы были использованы для создания единой моделирующей и исполняющей среды, объединяющей НУК реального АНПА и МК. Комплекс использовался в пространственно-распределенной конфигурации, состоящей из двух компонентов (рис. 5).

Компонент системы, обеспечивающий моделирование работы датчиков внешней среды, а также получение и обработку видеоинформации, функционировал в комплексе, объединяющем бортовые компьютеры АНПА (их аналоги) и гибридный вычислительный кластер. При этом МК включался во внешний контур



Puc. 5. Схема взаимодействия моделирующего комплекса и НУК АНПА

управления роботом и поставлял данные от датчиков внешней среды (ЭЛС, ГБО, лазерных дальномеров и т.п.). Задача локализации и обработки информации от лазерных дальномеров решалась на стороне моделирующего комплекса (имитируя тем самым предварительную обработку информации в самих устройствах).

Система управления АНПА работала в режиме симуляции миссии и обеспечивала непосредственное формирование траектории по данным, поступающим от МК. Для этого в состав тактического уровня НУК АНПА была включена группировка программных агентов, использующих данные видеонавигации для организации процесса инспекции ТП. Сопряжение синхронно работающего НУК АНПА и асинхронно работающего МК при удаленном взаимодействии осуществлялось с использованием упомянутого механизма информационного обмена с использованием неблокируемых сообщений.

Пространственное движение АНПА имитировалось с использованием динамической модели, штатно входящей в состав системы управления АНПА [15, 16]. Модель используется для поддержки различных вариантов применения АНПА (выполнение предстартовой симуляции миссии, диагностики АНПА, комплексирования разнородных навигационных данных в процессе выполнения миссии).

3. Вычислительные эксперименты

Используемая подводная инфраструктура включала две параллельные нитки трубопроводов. Одна из ниток имеет двойной Г-образный изгиб, на второй нитке присутствуют «провисы». На модельной сцене трубопроводы контрастируют с донной поверхностью, однако эта информация при распознавании не используется, поскольку анализируется только форма объекта. Инспекция расположенных неподалёку объектов добычного комплекса, включающего оголовки шахт и манифольды, в задачи моделирования на данном этапе не входила.

При проведении экспериментов моделировался заключительный (прецизионный) этап инспекции, т. е. работа АНПА начиналась в непосредственной близости от объекта. Во время выполнения этого этапа осуществлялся непродолжительный допоиск объекта с последующим переходом к его инспекции после обнаружения системой распознавания. В ходе экспериментов удалось добиться гарантированного обнаружения и стабильного движения АНПА над трубопроводом на скорости 0,3 м/с. Для организации движения использовался описанный выше метод «привязки» к обследуемому ТП. Аппарат успешно отрабатывал прохождение над прямолинейными и изогнутыми участками трубопровода, а также над «провисом» (рис. 6).

Проведенные эксперименты показали довольно шумный характер распознаваемого направления ТП, что потребовало введения медианной фильтрации для возможности использования этих данных в управлении (рис. 7). Шумность определения направления ТП связана с эпизодическими ложными срабатываниями системы распознавания, и в последующих версиях распознавателя этот параметр будет улучшен.

Использование метода «привязки» АНПА к ТП позволяет двигаться без возмущений при прохождении «провисов» (рис. 8) или при небольших смещениях вправо или влево от продольной оси объекта. Точность стабилизации отстояния АНПА от ТП составила около 5 см (СКО) при заданном отстоянии 3,5 м. Отстояние такой



Рис. 6. Виртуальная сцена. Прослеживание ТП с помощью АНПА, оснащенного камерой и профильным лазером: *a* – прохождение прямолинейного участка и изгиба трубопровода (на заднем плане видны траектория погружения АНПА и инфраструктура подводного добычного комплекса); *б* – прохождение «провиса»





Рис. 7. Курс АНПА во время прохождения изгиба трубопровода (верхний график) и соответствующее ему направление, выдаваемое системой распознавания в связанной системе координат (нижний график)



Рис. 8. Профиль движения АНПА и положение верхней части ТП, а также соответствующий профиль донной поверхности во время прохождения «провиса»

величины необходимо для того, чтобы поперечное сечение трубопровода попадало в поле зрения видеокамеры целиком.

В ходе экспериментов была подтверждена способность АНПА обнаруживать и двигаться вдоль ТП в полной темноте с использованием только лазерной линейки (что имитирует неконтрастное изображение ТП или его заиленность).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование процесса автоматической инспекции подводного трубопровода с помощью автономного подводного робота основано на возможности совместного применения лазерной линейки и видеокамеры для точного измерения отстояния АНПА от трубопровода. Получены оценки эффективности алгоритмов определения дистанции до трубопровода, а также подтверждена функциональность алгоритмов управления АНПА, обеспечивающих работу в автономном режиме. Методика отладки ресурсоемких алгоритмов управления с использованием удаленного высокопроизводительного вычислительного кластера, сопряженного с НУК АНПА, также подтвердила свою эффективность. Результаты экспериментов показали практическую реализуемость примененных подходов.

На данном этапе исследования предполагалось, что трубопровод в поперечном направлении целиком попадает в поле зрения бортовой видеокамеры АНПА, что накладывает ограничение снизу на допустимое отстояние от трубопровода. Одной из задач инспекции является приближение АНПА к трубопроводу на минимальную дистанцию (или даже посадка на трубопровод) для проведения контактных измерений. Это потребует доработки методов распознавания для случая, когда в поле зрения камеры находится только часть трубопровода. Также потребуется доработка алгоритмов работы управляющих агентов для выполнения посадки АНПА на трубопровод. Указанные задачи определяют направления дальнейших исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 16-07-00350 «Моделирующий программный комплекс для автономных подводных роботов обследовательского класса с реализацией распределенных параллельных вычислений»), программы «Дальний Восток» (проект 18-5-014 «Моделирование рабочих миссий АНПА по решению задач инспекции донной промышленной инфраструктуры и обследования корпусов морских судов (раздел 2)») и программы Президиума РАН № 29 «Актуальные проблемы робототехнических систем». Работа также является частью проекта «Технологии мониторинга и рационального использования морских биологических ресурсов» [17–24] и выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-50-00034 (в части разработки алгоритмов автоматизи-

рованного планирования и коррекции обследовательских траекторий движения АНПА при выполнении мониторинга и обзорно-поисковых операций).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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

2. 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.

3. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // Proc. of the OCEANS'15 MTS/IEEE. Washington DC, 2015.

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

5. Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Павин А.М., Мельман С.В., Морозов М.А. Модельное решение задачи автоматической инспекции подводных трубопроводов с помощью гидролокатора бокового обзора // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 1 (11). С. 17–23.

6. Jacobi M., Karimanzira D. Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs // Proc. of Oceans. St. John's, 14–19 Sept. 2014. St. John's, NL, Canada, 2014. P. 1–6.

7. Pinheiro B.C., Moreno U.F., Sousa João T.B., Rodríguez O.C. Kernel-Function-Based Models for Acoustic Localization of Underwater Vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2017. Vol. 42, Iss. 3. P. 603–618.

8. Petraglia F.R., Campos R., Gabriel J.R., Gomes C., Petraglia M.R. Pipeline tracking and event classification for an automatic inspection vision system // Proc. of (ISCAS) 2017 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems. Baltimore, MD, USA, 2017. P. 1–4.

9. Кукарских А.К., Павин А.М. Электромагнитный искатель для обнаружения и отслеживания металлосодержащих подводных протяженных объектов // Приборы. 2008. № 4. С. 33–38.

10. Nishida Y., Sonoda T., Yasukawa S., Nagano K., Minami M., Ishii K., Ura T. Underwater Platform for Intelligent Robotics and its Application in Two Visual Tracking Systems // Journ. of Robotics and Mechatronics. 2018. Vol. 30, No. 2. P. 238–247.

Ura T. Observation of Deep Seafloor by Autonomous Underwater Vehicle // Indian Journ. of Geo-Marine Sciences. 2013. Vol. 42 (8). P. 1028–1033.
Bobkov V.A., Kudryashov A.P., Mel'man S.V., Shcherbatyuk A.F. Autonomous Underwater Navigation with 3D Environment Modeling Using Stereo Images // Gyroscopy and Navigation. 2018. Vol. 9, No. 1. P. 67–75.

13. Inzartsev A., Pavin A., Rylov N. Development of the AUV Automatic Docking Methods Based on Echosounder and Video Data // Proc. of 24th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg, Russia, 2017. P. 178–184.

14. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform) // Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conf. & Exhibition. Monterey, California, USA, 2016.

15. Елисеенко Г.Д., Павин А.М. Программное обеспечение подготовки и сопровождения миссии АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2 (16). С. 16–23.

16. Инзарцев А.В., Павин А.М., Елисеенко Г.Д., Родькин Д.Н., Сидоренко А.В., Лебедко О.А., Панин М.А. Реконфигурируемая кроссплатформенная среда моделирования поведения необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 28–34.

17. Tuphanov I.E., Scherbatyuk A. Ph. A centralized planner considering task spatial configuration for a group of marine vehicles: field test results // Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2015). Hamburg, Germany, 2015. P. 1679–1684.

18. Scherbatyuk A., Dubrovin F. About Accuracy Estimation of AUV Single-Beacon Mobile Navigation Using ASV, Equipped with DGPS // Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conf. Shanghai, China, 2016.

19. Scherbatyuk A., Sporyshev M. Comparison of Some Algorithms for Centralized Planning of AUV Group Operation for Local Heterogeneities Survey // Proc. of the OCEANS MTS/IEE Conf. Shanghai, China, 2016.

20. Filaretov V., Zhirabok A., Zyev A., Protsenko A., Tuphanov I., Scherbatyuk A. Design and investigation of dead reckoning system with accommodation to sensors errors for autonomous underwater vehicle // Proc. of the OCEANS 2015 MTS/IEEE Conf. Washington, USA, 2015.

21. Bobkov V., Mashentsev V., Tolstonogov A., Scherbatyuk A. Adaptive Method for AUV Navigation Using Stereo Vision // Proc. of the 26th ISOPE Int. Ocean and Polar Eng. Conf. Rhodes, Greece, 2016.

22. Inzartsev A., Pavin A., Kleschev A., Gribova V., Eliseenko G. Application of Artificial Intelligence Techniques for Fault Diagnostics of Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conf. Monterey, USA, 2016.

23. Bagnitckii A., Inzartsev A., Pavin A. Planning and correction of the AUV coverage path in real time // Proc. of the IEEE OES Int. Symp. on Underwater Technology 2017 (UT 2017 Busan). Busan, South Korea, 2017.

24. Bagnitckii A., Inzartsev A., Lebedko O., Panin M., Pavin A. A survey of underwater areas using a group of AUVs // Proc. of the IEEE OES Int. Symp. on Underwater Technology 2017 (UT 2017 Busan). Busan, South Korea, 2017.

