

**В. А. Бобков**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., e-mail: bobkov@iacp.dvo.ru,

**М. А. Морозов**, вед. инженер-программист, e-mail: morozov@iacp.dvo.ru,

**А. П. Кудряшов**, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: alkud1981@mail.ru,

Институт автоматки и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток,

**А. В. Инзарцев**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., inzar@marine.febras.ru,

Институт проблем морских технологий дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток

## Инспекция корпуса судна с использованием автономного подводного робота, оснащенного стереофотокамерой\*

*Регулярный визуальный осмотр подводной поверхности корпуса судна в целях проверки его целостности и степени биообрастания необходим для обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации судна. В статье предлагается метод автоматизированного решения этой задачи с использованием автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), оснащенного стереокамерой, управляемой поворотным механизмом. Движение АНПА осуществляется по эквидистантам вдоль корпуса судна с одновременной видеосъемкой поверхности корпуса. Траектория движения АНПА рассчитывается с применением метода визуальной навигации (визуальная одометрия). Расчетные данные о локализации аппарата относительно корпуса судна используются в методе управления движением аппарата для обеспечения устойчивого движения аппарата на заданном расстоянии от inspectируемой поверхности. Непосредственное вычисление данных о локализации АНПА делается с помощью предлагаемого оригинального алгоритма, который реализован в виде программного средства "стереодальномер". Работа стереодальномера основана на сопоставлении особенностей на изображениях с помощью детектора SURF с последующим построением 3D-облака точек. Описана методика выполнения автоматической инспекции судна в целом. Фиксируемые стереоизображения используются также для построения 3D-модели осматриваемой поверхности. Применяемый метод построения глобальной пространственной модели поверхности основывается на объединении 3D-облаков точек, получаемых для локальных видов. Построение 3D-облака точек для отдельного вида выполняется на основе сопоставления 2D-точечных особенностей на изображениях стереопары (детектор SURF/вычисление корреляции) с последующим применением метода триангуляции лучей для получения пространственных координат точек. Наличие 3D-модели дает возможность провести детальный визуальный анализ состояния корпуса судна. Проведено имитационное моделирование функционирования разработанных средств на виртуальных сценах. Полученные в результате тестирования количественные и качественные оценки эффективности показали приемлемость предложенной методики для автоматической инспекции подводной части корпуса судна.*

**Ключевые слова:** визуальная инспекция, подводная поверхность корпуса судна, автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), стереокамера, 3D-модель

### Введение

Задача визуального осмотра/инспекции подводной части корпуса судна актуальна для оценки его эксплуатационной безопасности и повышения эффективности дальнейшей эксплуатации судна. Идея применения автоматического необитаемого подводного аппарата/робота (АНПА) для автоматической инспекции корпусов судов возникла как альтернатива применяемой технологии с использованием водолазов, телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) [1] или контактных

мобильных платформ (краулеров), "ползающих" по поверхности корпуса [2, 3]. Следует отметить, что АНПА не может полностью заменить упомянутые средства, поскольку последние в состоянии выполнять детальную контактную дефектоскопию корпуса судна или работать в условиях мутной воды. Однако неоспоримым преимуществом АНПА является его мобильность и отсутствие громоздкого кабельного оборудования, необходимого для обеспечения работы ТНПА и краулеров. АНПА позволяет оперативно получить общую визуальную картину состояния подводной части судна, что во многих случаях является достаточным.

Например, в работе [4] описан специально сконструированный АНПА для автоматической

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

инспекции корпусов судов. АНПА оснащен доплеровским лагом скорости и специальным сонаром (Dual Frequency Identification Sonar). Система навигации и управления АНПА позволяет держать аппарат на должном расстоянии от корпуса судна и осуществлять сканирование под нужным углом к поверхности корпуса.

В статье [5] представлены методы инспекции с использованием онлайн-информации от датчиков АНПА для эффективного и безопасного управления им. Рассматриваемый проект "CView" решает проблему инспекции порта. Но алгоритмы, представленные в этой статье, по мнению авторов, можно адаптировать ко многим другим задачам инспекции. Одной из основных целей этого проекта является поиск трещин или поврежденных участков в подводных постройках или наблюдение за критическими участками под водой. Платформой для разработки управляющих алгоритмов является АНПА "SeaCat". Этот подводный аппарат имеет управляющую программу с пользовательским интерфейсом для планирования миссии, систему управления миссией, точную навигационную систему, оптимизированное управление двигателем с автопилотом и датчиками для обнаружения и осмотра препятствий. Для обнаружения препятствий и досмотровых целей используется сканирующий гидролокатор.

В работе [6] предложены алгоритмы акустического и визуального картографирования таких особенностей на корпусе корабля, как линии сварки и биообрастания.

В работе [7] для решения этой инспекционной задачи предлагается применение моновидеокамеры. Особенность предложенного монокулярного алгоритма SLAM (simultaneous localization and mapping) — введение оригинальной меры (saliency) для оценки изображений на базе метода bag-of-words. Алгоритм, по мнению авторов, повышает надежность локализации в условиях плохой текстурированности поверхностей.

Авторы статьи [8] предложили использовать роботизированную платформу с сенсорами (мощный лазерный 3D-сканер и гидролокатор бокового обзора) для сканирования морских сооружений, как выше, так и ниже ватерлинии. Кроме того, были разработаны метод и программная система, использующая алгоритм Ball Pivoting и алгоритм реконструкции Пуассона для реконструкции 3D-моделей поверхности морских сооружений по данным сканирования. Предложенный алгоритм реконструкции

исключает использование GPS, DVL (doppler velocity log) или INS (inertial navigation system). Программно-аппаратная система была успешно протестирована в водах Сингапура в условиях, где скорость течения составляла от 1 до 2 м/с.

В статье [9] описывается разработка автономной системы визуального осмотра в воде и ее применение для обследования корпуса полноразмерного корабля. Разработанная система состоит из аппаратной платформы и программных алгоритмов автономной работы аппарата, включающих алгоритмы навигации и управления работой АНПА вблизи корпуса судна в режиме реального времени. Восприятие окружающей среды разработанной системой основано на изображениях с оптических камер и применении алгоритмов компьютерного зрения и оптимизации для навигации и визуального картирования. В частности, на подводном аппарате установлена стереокамера для оценки мгновенных векторов нормали к поверхности, что обеспечивает высокоточную навигацию и надежное визуальное картографирование не только на плоских участках, но и на умеренно искривленных участках поверхности корпуса.

В работе [10] рассматривается метод визуального картирования для трехмерной реконструкции поверхности корпуса подводного судна с использованием монокулярной камеры в качестве основного картографического датчика. Основная идея предлагаемого подхода заключается в моделировании умеренно искривленной поверхности корпуса в виде комбинации кусочно-плоских панелей и создании глобальной карты путем выравнивания локальных изображений в двумерной системе отсчета. Оценочные 3D-панели, связанные с локальными изображениями, используются для извлечения относительных измерений loop-closure в рамках метода SLAM для точной оценки траектории камеры и результатов 3D-реконструкции.

В статье [11] предлагается метод оценки положения на основе зрения для осмотра подводной части корпуса судна с использованием данных трехмерного облака точек, полученных системой стереозрения.

В работе [12] обсуждается метод обследования состояния поверхностей корпуса судна по подводным изображениям с использованием шести известных моделей сверточной нейронной сети.

В данной статье предлагается решение задачи инспекции корпуса судна с использованием АНПА и оригинального алгоритма управ-

ления движением АНПА. Алгоритм основан на обработке стереоизображений, получаемых видеокамерой, управляемой поворотным механизмом, и применении авторского метода визуальной навигации (ВН). Предлагаемый подход близок к описанному в работах [9, 10]. Отличие состоит в разработке алгоритмической базы, реализующей управление движением АНПА (алгоритм управления, оригинальный SLAM-алгоритм, стереодальномер), и в реализации трехмерной реконструкции поверхности корпуса судна (построение глобальной 3D-модели по стереоизображениям в отличие от использования оценочных 3D-панелей, построенных по моноизображениям).

### 1. Постановка задачи. Описание подхода

Инспекция подводной части корпуса судна выполняется с помощью АНПА, оснащенного стереовидеокамерой и стандартным навигационным оборудованием, включающим эхолокационную систему (ЭЛС), доплеровский лаг и навигационно-пилотажные датчики. Стереокамера смонтирована на поворотной платформе, что позволяет менять угол ее возвышения и ориентировать камеру под нужным углом к инспектируемой поверхности корпуса при движении АНПА. Миссия инспекции состоит в последовательной фотосъемке поверхности корпуса в процессе движения АНПА вокруг подводной части судна с последующим построением в режиме off-line 3D-модели его подводной части. Наличие 3D-модели дает возможность по завершении миссии оперативно осуществить визуальный анализ состояния корпуса.

Предполагается, что используемый для целей инспекции АНПА обладает развитым движительно-рулевым комплексом, обеспечивающим управление, как минимум, по пяти степеням свободы (три поступательных и два вращательных по курсу и дифференту). Также в расчет принимается тот факт, что ЭЛС может давать сбой при работе АНПА вблизи металлического корпуса судна. По этой причине для определения отстояния вместо данных от ЭЛС используется видеoinформация.

В предлагаемом подходе решаются следующие основные задачи:

а) разработка метода локализации АНПА по отношению к корпусу судна по стереоизображениям с использованием авторского метода

ВН (визуальный SLAM (simultaneous localization and mapping)) [13, 14];

б) разработка алгоритма управления движением АНПА по траектории в контексте выполнения досмотровой миссии;

в) построение 3D-модели подводной части корпуса обследуемого судна;

г) имитационное моделирование инспекционной миссии с использованием разработанных методов/алгоритмов для подтверждения правильности подхода.

Движение АНПА вокруг подводной части корпуса судна осуществляется по траектории, которая является множеством эквидистант по отношению к корпусу судна (рис. 1). Каждая эквидистанта находится на определенной глубине. Такой обход корпуса позволяет провести визуальную инспекцию всей поверхности подводной части корпуса. При движении АНПА по траектории определяется локализация АНПА методом ВН и вычисляется требуемая ориентация камеры по отношению к поверхности подводной части корпуса судна. Ориентация камеры вычисляется с частотой, соответствующей времени однократного изменения угла поворота платформы и учитывающей протяженность судна. С учетом этой информации и измерений датчика глубины алгоритм управления корректирует направление движения АНПА на следующем шаге траектории таким

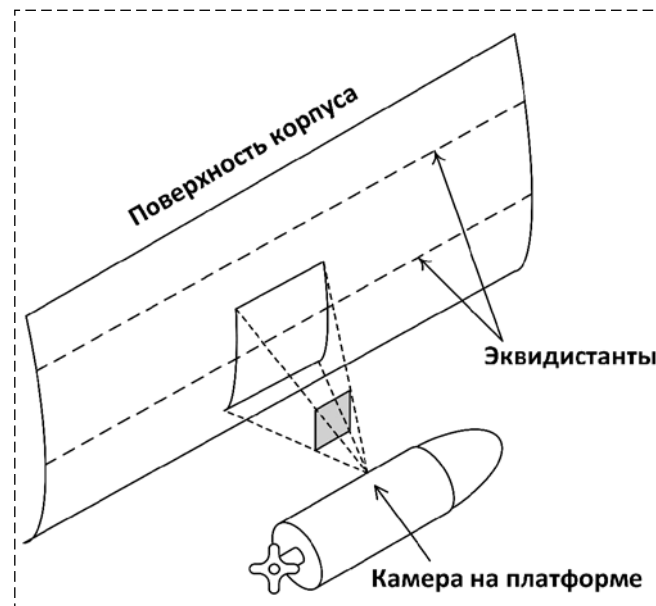


Рис. 1. Сканирование корпуса судна по эквидистантам. Камера установлена на поворотной платформе АНПА

Fig. 1. Scanning of the ship's hull along equidistant lines. The camera is mounted on the AUV turntable

образом, чтобы АНПА двигался на заданном расстоянии от корпуса и на заданной глубине.

Отметим основные моменты предлагаемой методики осмотра корпуса судна:

1. Для визуального покрытия подводной части корпуса выполняется несколько проходов на разных глубинах. Число проходов и глубин вычисляется предварительно с учетом размеров судна. Погружение АНПА осуществляется вблизи борта для более быстрого получения визуального контакта. Под обнаружением борта в рамках метода ВН понимается выявление плотного облака точек после обработки стереоснимков.

2. Движение АНПА в рамках одного прохода осуществляется с постоянной скоростью на заданной глубине и с фиксированным расстоянием до борта. В общем виде управление движением может осуществляться по курсу и дифференту аппарата, в сочетании с лаговыми перемещениями. Однако в данной реализации лаговые перемещения не рассматриваются. Для определения целевого курса АНПА используется метод ВН. В процессе движения выполняется съемка с частотой, определяемой скоростью движения АНПА и полем зрения камеры.

3. Стереочамера направлена на борт судна перпендикулярно движению АНПА и в направлении нормали к корпусу судна в данной точке (рис. 1). Во время одного прохода (обход всего периметра корпуса) на фиксированной глубине положение угла камеры изменяется, как было отмечено выше, с заведомо фиксированной частотой в зависимости от вычисляемой нормали к поверхности корпуса. При смене глубины движения АНПА угол камеры также изменяется.

4. Глубина прохода определяется датчиком глубины. Также относительные перемещения АНПА по глубине могут определяться методом ВН по стереоснимкам.

Моделирование миссии выполнялось средствами разработанного авторами имитационного моделирующего комплекса [15].

## 2. Метод инспекции корпуса судна на основе обработки стереоизображений

В процессе обработки визуальных данных используются три системы координат (СК) (рис. 2).

Непосредственно с АНПА связана локальная СК<sup>АНПА</sup>. С камерой, установленной на поворотной платформе, связана СК<sup>кам</sup>. В качестве ми-

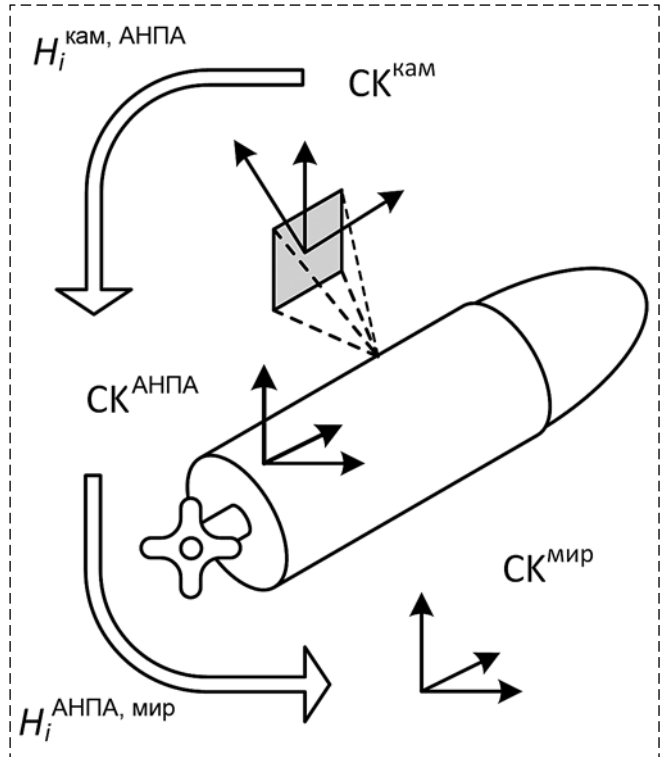


Рис. 2. Используемые системы координат  
Fig. 2. Used coordinate systems

ровой СК (СК<sup>мир</sup>) выбрана СК<sup>АНПА</sup> в начальный момент времени. Преобразования между СК<sup>кам</sup> и СК<sup>АНПА</sup> в позиции  $i$  будем обозначать как  $H_i^{\text{кам, АНПА}}$ , между СК<sup>АНПА</sup> и СК<sup>мир</sup> — как  $H_i^{\text{АНПА, мир}}$ . Траектория АНПА состоит из позиций, в которых осуществляется съемка стереочамерой. С каждой позицией связана стереопара снимков. Позиции, в которых выполняется алгоритмическая обработка видеоданных, будем называть узловыми позициями. Шаг — это расстояние между узловыми позициями, которое можно измерять числом снятых кадров (оно является эквивалентом времени, поскольку известна частота съемки). Результирующие данные локализации АНПА передаются в систему управления по завершении обработки текущего шага. К ним относятся:  $S$  — вектор направления движения АНПА в текущий момент времени;  $n$  — нормаль к поверхности участка, видимого камерой на данном шаге траектории;  $R$  — минимальное расстояние до корпуса;  $V$  — скорость приближения к корпусу судна.

### 2.1. Алгоритм выполнения инспекции

Выполнение миссии по инспекции судна включает следующие шаги:

1. Погружение АНПА на очередной заданный уровень.

2. Поиск борта судна (для начального погружения с поверхности). Для этого осуществляется движение АНПА с постоянной скоростью, а курс выбирается под острым углом к борту. Стереокамера ориентирована перпендикулярно борту с углом возвышения, соответствующим уровню обхода. В процессе движения проводятся замеры дистанции до борта, которые вычисляются по облаку 3D-точек, полученных по стереоизображениям (см. раздел ниже). По достижению заданной дистанции происходит переход к фазе обхода корпуса судна.

3. В начале обхода корпуса запоминается кадр стереокамеры для вычисления точки отсчета галса, привязанной к борту обследуемого судна. Расчет положения АНПА во время обхода выполняется методом ВН. Управление движением заключается в поддержании заданной дистанции до борта по стереодальномеру. Одновременно осуществляется обзорная съемка борта (т. е. накопление кадров стереокамеры) и фиксируется событие замыкания траектории (завершение галса обхода). Здесь возможны два варианта:

- восстановление траектории методом ВН по мере продвижения АНПА и детектирование события замыкания траектории (например, с точностью 1 м);
- начальный кадр галса из предыдущего пункта используется как маркер замыкания при обнаружении совпадения начального и текущего кадров галса. Далее происходит переход к следующему пункту. Совпадение можно определять с применением детектора SURF (Speeded up Robust Features). Критерий совпадения строится на основе сопоставления определенного процента особых точек начального и текущего кадров. При этом кадры, следующие за начальным кадром галса, будут с ним перекрываться, и их необходимо игнорировать.

4. Завершение обследования на заданном уровне. Если список необследованных уровней глубин еще не исчерпан, то происходит переход к пункту 1. Если все глубины обследованы, то миссия завершается, и АНПА всплывает. Далее выполняется обработка полученной информации и строится 3D-модель корпуса судна.

## 2.2. Вычисление исходных данных для управления движением АНПА

2.2.1. Стереодальномер. Работа стереодальномера основана на поиске и сопоставлении

особенностей на изображениях с помощью детектора SURF. Промежуточным результатом работы стереодальномера является облако трехмерных точек  $P(xyz)$  в системе координат камеры (рис. 3, см. вторую сторону обложки).

По этому облаку можно получить оценку расстояния  $d$  до препятствия:

$$d = \sum_{i=1}^n |p_i| / n. \quad (1)$$

Касательная линия к борту с углом  $\alpha$  вычисляется в системе координат камеры. Для этого облако точек делится на две части — с положительными и отрицательными координатами  $Y$  (рис. 4). Для каждой из частей вычисляется средняя точка и через них строится прямая. Камера закреплена так, что ось  $Y$  системы координат камеры параллельна осевой линии АНПА.

Вычисление угла возвышения камеры в СК<sup>АНПА</sup> для текущего положения АНПА выполняется следующим образом. Начальное значение угла возвышения может быть задано константой (например, равной 0), и коррекция должна проводиться только в установившемся режиме обхода, когда аппарат выдерживает заданное расстояние до борта. Коррекция угла выполняется с предварительно заданной частотой. Пусть на текущем шаге средствами стереодальномера получено облако точек в СК<sup>кам</sup> и вычислена касательная плоскость к этому облаку (рис. 5). Возьмем нормаль  $\mathbf{n}$  к касательной плоскости и убедимся, что она ориентирована на наблюдателя (камеру). Затем вычислим  $\mathbf{n}_{xz}$  —

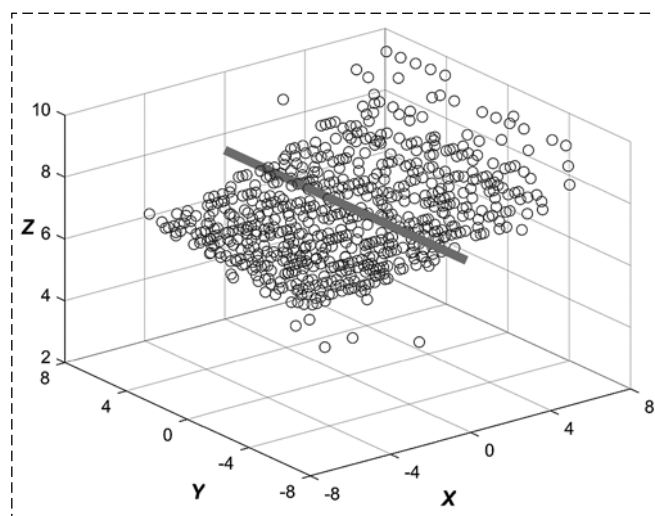


Рис. 4. Облако 3D-точек стереодальномера в системе координат камеры и касательная линия к борту судна

Fig. 4. 3D points cloud of a stereo rangefinder in the camera coordinate system and a tangent line to the ship's side

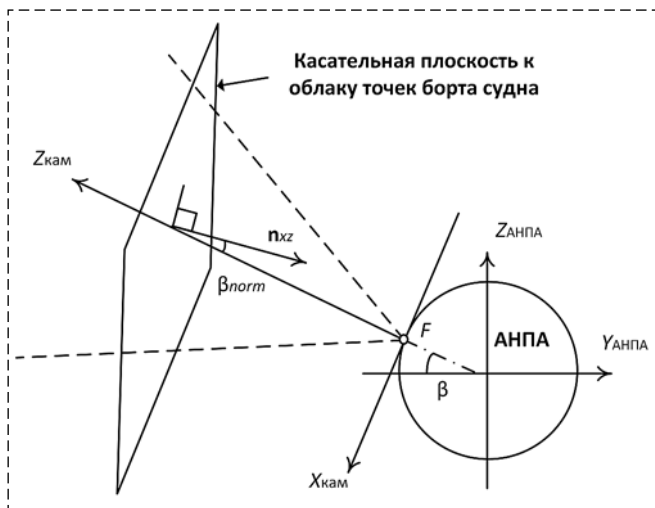


Рис. 5. Вычисление угла возвышения камеры  
Fig. 5. Calculating the elevation angle of the camera

проекцию нормали на плоскость  $YZ$  в  $СК_{кам}$ . Угол  $n_{xz}$  к оси  $Z_{кам}$  обозначим  $\beta_{norm}$ .

Угол возвышения камеры для следующего шага в  $СК_{АНПА}$ :  $\beta_{i+1} = \beta_i - \beta_{norm}$ .

2.2.2. Расчет параметров положения АНПА относительно корпуса судна. Используемое преобразование координат пространственных точек  $H_i^{кам, АНПА}$  является преобразованием поворота  $СК_{АНПА}$  вокруг оси  $Y$  (направление продольной оси АНПА). Значение угла поворота передается системой визуальной навигации в систему управления после расчета ориентации камеры. Вектор  $S$  относительного перемещения камеры на шаге  $i$  определяется в связанной с камерой системой координат  $СК_i^{кам}$  как  $S = P(0, 0, 0, 1)H_{i-1, i}^{кам}$ , где  $P(0, 0, 0, 1)$  — точка начала  $СК_i^{кам}$  в позиции  $(i - 1)$ . Соответственно, в  $СК_{АНПА}$  этот вектор равен  $SH_i^{кам, АНПА}$ . В качестве минимального расстояния можно рассматривать вычисленное среднее расстояние (см. (1)) — эксперимент показал, что этого достаточно для надежного управления движением АНПА. Другой вариант:  $d_{min} = \min |R_k|$ ,

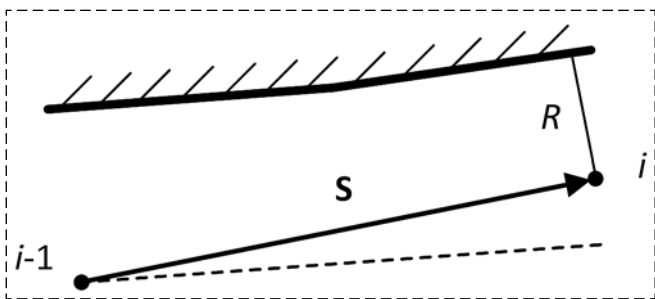


Рис. 6. Вычисление скорости приближения АНПА к корпусу судна  
Fig. 6. Calculation of the speed of the AUV approach to the ship's hull

где  $\{R_k\}$  — множество точек 3D-облака в позиции  $i$  после фильтрации с учетом дисперсии.

Скорость приближения к корпусу судна вычисляется как (рис. 6)

$$V = V_{АНПА}(\mathbf{R} \cdot \mathbf{S}) / (|\mathbf{R}| \cdot |\mathbf{S}|), \quad V_{АНПА} = \mathbf{S} / t = \mathbf{S}f / n,$$

где  $n$  — длина шага в кадрах,  $f$  — частота съемки.

Тогда  $V = f(\mathbf{R} \cdot \mathbf{S}) / n(|\mathbf{R}| \cdot |\mathbf{S}|)$ .

Нормаль  $\mathbf{n}$  к поверхности вычисляется по нескольким точкам  $R_k$ , полученным на этапе построения 3D-облаков (все точки принадлежат поверхности корпуса).

### 2.3. Управление движением АНПА при обходе судна

При обходе судна аппарат движется с постоянной скоростью на фиксированной глубине. Необходимый для работы нулевой дифферент обеспечивается работой вертикальных подруливающих устройств АНПА. Управление осуществляется путем изменения курса. Целью является удержание аппарата на постоянном расстоянии  $D$  от борта обследуемого судна. Расстояние выбирается исходя из оптимальных условий съемки, а также из условий обеспечения безопасности обхода.

Для стабилизации заданного отстояния АНПА от борта судна использовался ПД закон регулирования:

$$\Delta\varphi = \left( K_d \frac{d - D}{D} + K_\alpha \alpha \right) \Delta t, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi$  — угол коррекции курса;  $d$  — текущее измерение расстояния до борта по стереодальномеру;  $D$  — целевое расстояние до борта;  $\Delta t$  — период между измерениями;  $K_d$  — коэффициент при позиционной составляющей закона управления. Для оценки скорости изменения регулируемого параметра  $d$  используется касательная к борту с углом  $\alpha$ , которая также вычисляется по облаку точек (см. раздел "Стереодальномер"). В уравнение (2) угол касательной к борту  $\alpha$  входит с коэффициентом демпфирования по скорости  $K_\alpha$ .

Пример обхода корпуса судна с использованием описанного закона регулирования приведен на рис. 7 (см. вторую сторону обложки).

### 2.4. Метод визуальной навигации

Определение параметров 6 DOF (degrees of freedom) траектории выполняется в каждой

узловой позиции методом ВН (визуальный SLAM-алгоритм) по двум стереопарам снимков. Обработка изображений выполняется по классической схеме визуальной одометрии:

1. Сопоставление точечных особенностей на четверке изображений двух соседних узловых позиций (применяется детектор SURF).

2. Построение двух множеств 3D-точек (3D-облака) по сопоставленным особенностям.

3. Вычисление локального геометрического преобразования  $H_{i-1,i}^{\text{кам}}$  между СК<sup>кам</sup> двух соседних узловых позиций методом минимизации расхождений между двумя 3D-облаками.

### 2.5. Построение 3D-модели поверхности корпуса судна

Всю поверхность подводной части корпуса судна целесообразно условно разбить на четыре части (учитывая геометрию судна): две боковые, носовая и кормовая части. Тогда глобальная точечная модель одной части формируется объединением 3D-облаков, получаемых на каждом шаге обработки траектории [13]. Объединение осуществляется в СК<sup>мир</sup>. Перевод координат точек в СК<sup>мир</sup> выполняется с помощью  $H_i^{\text{АНПА,мир}}$ . Заметим, что накопленные ошибки метода ВН на расстоянии длины одной части будут незначительными.

Построение 3D-облака точек для отдельного вида выполняется на основе сопоставления 2D-точечных особенностей на изображениях стереопары с последующим применением метода триангуляции лучей для получения про-

странственных координат точек. Сопоставление особенностей выполняется одним из двух реализованных способов: а) использование уже традиционно применяемого детектора SURF; б) с помощью непосредственного подсчета корреляции двух сравниваемых окрестностей точки. В качестве окрестности берется прямоугольная площадка вокруг точки на каждом снимке стереопары. Если работать с "очищенными" изображениями, то алгоритмическая обработка существенно упрощается. В этом случае применяется так называемый алгоритм расчета карты диспаратности.

Построение полигональной поверхности осуществляется с помощью ранее разработанных авторами программ.

### 3. Вычислительные эксперименты и обсуждение результатов

Вычислительные эксперименты по оценке эффективности описанного метода проводились на модельных сценах в среде имитационного моделирующего комплекса [15]. Оценивалась устойчивость/надежность алгоритма управления движением АНПА и точность локализации АНПА при движении по траектории обхода.

Точность оптического стереодальномера оценивалась путем сравнения полученного среднего расстояния до борта судна двумя методами. Первый метод — применение стереодальномера. Второй метод — использование буфера глубины видеокарты, заполняемого при рендеринге

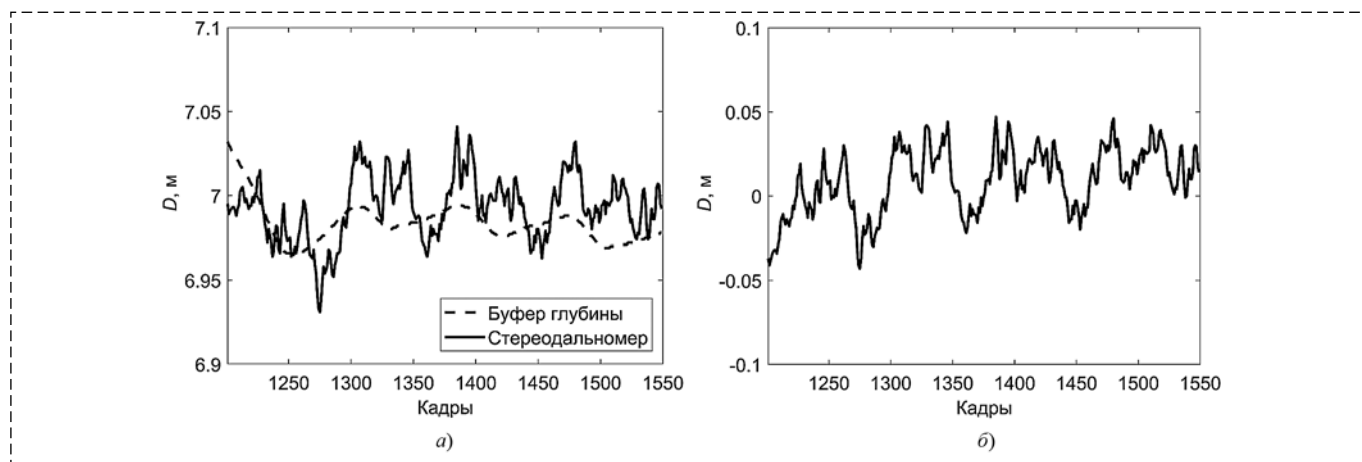
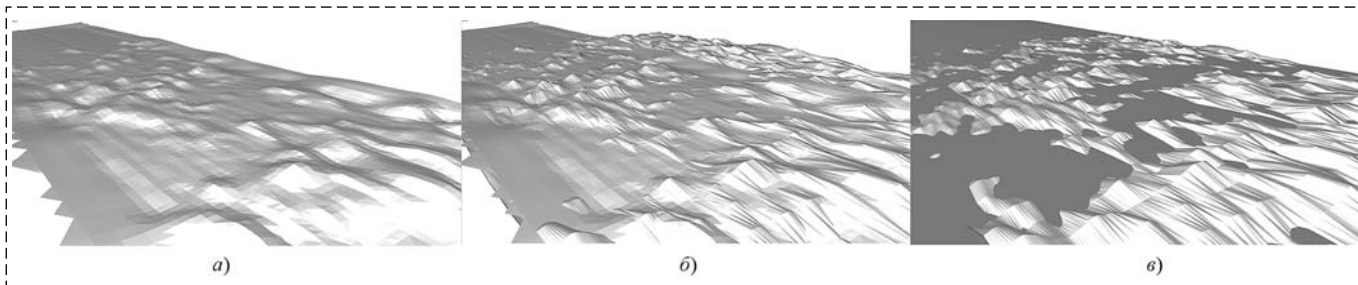


Рис. 8. Оценка эффективности стереодальномера:

а — сравнение среднего расстояния до борта судна, полученного двумя методами (расстояние по буферу глубины и по стереодальномеру); б — распределение ошибки на прямолинейном участке

Fig. 8. Evaluation of the efficiency of the stereo range finder:

а — comparison of the average distance to the ship's side, obtained by two methods (distance by the depth buffer and by the stereo range finder); б — distribution of the error in a straight section



**Рис. 9. 3D-реконструкция участка поверхности корпуса судна:**

*a* — результат 3D-реконструкции разработанными программными средствами; *b* — совмещение реконструкции с моделью; *в* — модель. Высота выпуклостей до 10 см

**Fig. 9. 3D reconstruction of a section of the ship's hull surface:**

*a* — the result of 3D reconstruction by the developed software; *b* — matching the reconstruction with the model; *в* — model. The height of the bulges is up to 10 cm

сцены — рассматривался в качестве эталонного. В методе со стереодальномером после сопоставления особенностей и геометрических вычислений мы получаем 3D-облако точек, расположенных на наблюдаемой части борта судна (см. рис. 3 на второй стороне обложки). По этому облаку вычисляется среднее расстояние до борта. Поскольку метод неизбежно подвержен ошибкам сопоставления, оценивалась погрешность в вычислении этого расстояния. В методе с буфером глубины получается точное расстояние до каждого пиксела изображения, и тоже вычисляется среднее расстояние.

Для получения надежной статистики при сравнении использовался набор кадров, полученных при полном обходе бортов судна по замкнутой траектории. При обходе судна получено свыше 2500 кадров. На графике (рис. 8) приведены расстояния для прямолинейного участка движения вдоль борта (кадры 1200—1550).

Среднеквадратичная ошибка определения дистанции (в метрах) для всей траектории обхода составила 0,1537 м. Общий характер изменения расстояния объясняется неустойчивостью динамики аппарата в процессе обхода. На графике (рис. 8, *a*) показана разность между оценками расстояния предлагаемым и эталонным методами. На рис. 8, *b* показана ошибка по расчету расстояния до борта более наглядно. Для участка, представленного на рис. 8, среднеквадратичная ошибка составила 0,0215 м.

На рис. 9 показано сравнение выполненной 3D-реконструкции участка поверхности корпуса судна с эталонной поверхностью (моделью) применительно к виртуальной сцене.

Полученные количественные оценки (форма и высота выпуклостей/вогнутостей на поверхности корпуса) подтверждают хорошее совмещение реконструкции с моделью, а по-

казанная на рис. 9 визуализация реконструированной поверхности (рис. 9, *a*) наглядно демонстрирует ее сходство с моделью-эталон (рис. 9, *в*). Для более наглядного сравнения показана визуализация совмещения реконструкции и модели (рис. 9, *b*), где видно хорошее совпадение обеих поверхностей.

### Заключение

В работе представлено решение задачи автоматической инспекции подводной части корпуса судна с использованием АНПА и стереокамеры, управляемой поворотным механизмом. Подробно рассмотрена предлагаемая методика управления движением АНПА при выполнении миссии осмотра поверхности корпуса судна. Предложены оригинальные программно-алгоритмические средства обработки стереоизображений, обеспечивающие устойчивое, надежное движение АНПА по эквидистантам относительно инспектируемой поверхности. Для оценки результатов досмотровой миссии предусмотрено построение 3D-модели обследуемой поверхности судна. Проведенное тестирование разработанных средств на модельных сценах показало перспективность их применения при решении практических задач. Дальнейшее развитие работы связано с проведением реальных экспериментов.

Вместе с тем, на следующем этапе развития работы (до проведения реальных экспериментов) планируется проведение цикла моделирования для оптимизации основных решений:

- поиск более эффективного закона управления движением;
- имитация поворота камеры и закон управления этим поворотом;
- автоматическое выполнение полномасштабной съемки корпуса судна сложной формы.

## Список литературы

1. **Shahriar Negahdaripour, Pezhman Firoozfam.** An ROV Stereovision System for Ship-Hull Inspection // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2006. Vol. 31, Iss. 3. P. 551–564.
2. **The Magg** miniature magnetic crawler. URL: <https://eddyfi.com/en/product/magg-magnetic-inspection-robotic-crawler>, date of access: 17.06.2022
3. **Utility Crawlers.** Purpose-built underwater robotic equipment. URL: <https://www.deeptrekker.com/products/utility-crawlers>, date of access: 17.06.2022
4. **Vaganay J., Elkins M., Esposito D., O'Halloran W., Hover F., Kokko M.** Ship hull inspection with the HAUV: U.S. Navy and NATO demonstrations results // Proc. IEEE/MTS OCEANS Conf. Exhib., Boston, MA. 2006. P. 1–6.
5. **Jacobi M.** Autonomous inspection of underwater structures // Robotics and Autonomous Systems. 2015. Vol. 67. P. 80–86.
6. **Hover F. S., Eustice R. M., Kim A., Englot B., Johannsson H., Kaess M., Leonard J. J.** Advanced perception, navigation and planning for autonomous in-water ship hull inspection // International Journal of Robotics Research. 2012. Vol. 31, Iss. 12. P. 1445–1464.
7. **Kim A., Eustice R. M.** Eustice. Real-Time Visual SLAM for Autonomous Underwater Hull Inspection using Visual Saliency // IEEE Transactions on Robotics. 2013. Vol. 29, Iss. 3. P. 719–733.
8. **Papadopoulos G., Kurniawati H., Shariff A. S. B. M., Wong L. J., Patrikalakis N. M.** Experiments on Surface Reconstruction for Partially Submerged Marine Structures // Journal of Field Robotics. 2014. Vol. 31, Iss. 2. P. 225–244.
9. **Hong S., Chung D., Kim J., Kim Y., Kim A., Yoon H. K.** In-water visual ship hull inspection using a hover-capable underwater vehicle with stereo vision // Journal of Field Robotics. 2019. Vol. 36, N. 3. P. 531–546.
10. **Hong S., Kim J.** Three-dimensional Visual Mapping of Underwater Ship Hull Surface Using Piecewise-planar SLAM // International Journal of Control, Automation and Systems. 2020. Vol. 18, N. 3. P. 564–574.
11. **Chung D., Kim J.** Pose Estimation Considering an Uncertainty Model of Stereo Vision for In-Water Ship Hull Inspection // IFAC-Papers OnLine. 2018. Vol. 51. P. 400–405.
12. **Kim B. C., Kim H. C., Han S., Park D. K.** Inspection of Underwater Hull Surface Condition Using the Soft Voting Ensemble of the Transfer-Learned Models // Sensors. 2022. Vol. 22. P. 4392.
13. **Bobkov V. A., Kudryashov A. P., Melman S. V., Scherbatyuk A. F.** Visual navigation and 3D reconstruction of underwater objects with autonomous underwater vehicle // Integrated Navigation Systems (ICINS). 2017 24th Saint Petersburg International Conference, 29–31 May 2017. St. Petersburg, Russia. P. 185–192.
14. **Bobkov V., Kudryashov A., Inzartsev A.** Method for the Coordination of Referencing of Autonomous Underwater Vehicles to Man-Made Objects Using Stereo Images // J. Mar. Sci. Eng. 2021. N. 9. P. 1038.
15. **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. October 19–22. 2015.

## Ship Hull Inspection Using Autonomous an Underwater Vehicle with a Stereo Camera

**V. A. Bobkov**, bobkov@iacp.dvo.ru, **M. A. Morozov**, morozov@iacp.dvo.ru, **A. P. Kudryashov**, alkud1981@mail.ru, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation,  
**A. V. Inzartsev**, inzar@marine.febras.ru, Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690091, Russian Federation

*Corresponding author: Bobkov V. A., Dr. Sc., Chief Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: bobkov@iacp.dvo.ru*

*Accepted on November 16, 2022*

### Abstract

*Regular visual inspection of the underwater surface of the ship's hull to check its integrity and the degree of biofouling is necessary to ensure the safety and efficient operation of the ship. The article proposes a method for the automated solution of this problem using an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUV) equipped with a stereo camera controlled by a tilt actuator. The movement of the AUV is carried out along equidistant lines along the ship's hull with simultaneous video filming of the hull surface. The AUV trajectory is calculated using the visual navigation method (visual odometry). Estimated data on the localization of the AUV relative to the ship's hull are used in the method of controlling the movement of the vehicle to ensure the stable movement of the vehicle at a given distance from the inspected surface. Direct calculation of AUV localization data is done using the proposed original algorithm, which is implemented in the form of a software tool "stereo rangefinder". The operation of the "stereo rangefinder" is based on the matching of features in images using the SURF detector, followed by the construction of a 3D point cloud. The technique for performing automatic inspection of the ship as a whole is described. Fixed stereo images are also used to build a 3D model of the surface being examined. The applied method of constructing a global spatial model of the surface is based on the union of 3D point clouds obtained for local views. The construction of a 3D point cloud for a particular view is based on a matching of 2D point features on images of a stereo pair (SURF detector / correlation calculation), followed by the use of the ray triangulation method to obtain the spatial coordinates of the points. The presence of a 3D model makes it possible to conduct a detailed visual analysis of the state of the ship's hull. Simulation modeling of the functioning of the developed tools on virtual scenes was carried out. Quantitative and qualitative performance evaluations obtained as a result of testing showed the acceptability of the proposed method for automatic inspection of the underwater part of the ship's hull.*

**Keywords:** visual ship hull inspection, autonomous uninhabited underwater vehicle, stereo camera, 3D model

For citation:

**Bobkov V. A., Morozov M. A., Kudryashov A. P., Inzartsev A. V.** Ship Hull Inspection Using Autonomous an Underwater Vehicle with a Stereo Camera, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 4, pp. 206–215.

DOI: 10.17587/mau.24.206-215

## References

1. **Shahriar Negahdaripour, Pezhman Firoozfam.** An ROV Stereovision System for Ship-Hull Inspection, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, vol. 31, iss. 3, pp. 551–564.
2. **The Magg** miniature magnetic crawler, available at: <https://eddyfi.com/en/product/magg-magnetic-inspection-robotic-crawler>, date of access: 17.06.2022
3. **Utility Crawlers.** Purpose-built underwater robotic equipment, available at: <https://www.deeptrekker.com/products/utility-crawlers>, date of access: 17.06.2022.
4. **Vaganay J., Elkins M., Esposito D., O'Halloran W., Hover F., Kokko M.** Ship hull inspection with the HAUV: U.S. Navy and NATO demonstrations results, *Proc. IEEE/MTS OCEANS Conf. Exhib.*, Boston, MA, 2006, pp. 1–6.
5. **Jacobi M.** Autonomous inspection of underwater structures, *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, vol. 67, pp. 80–86.
6. **Hover F. S., Eustice R. M., Kim A., Englot B., Johannsson H., Kaess M., Leonard J. J.** Advanced perception, navigation and planning for autonomous in-water ship hull inspection, *International Journal of Robotics Research*, 2012, vol. 31, iss. 12, pp. 1445–1464.
7. **Kim A., Eustice R. M.** Eustice. Real-Time Visual SLAM for Autonomous Underwater Hull Inspection using Visual Saliency, *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, vol. 29, iss. 3, pp. 719–733.
8. **Papadopoulos G., Kurniawati H., Shariff A. S. B. M., Wong L. J., Patrikalakis N. M.** Experiments on Surface Reconstruction for Partially Submerged Marine Structures, *Journal of Field Robotics*, 2014, vol. 31, iss. 2, pp. 225–244.
9. **Hong S., Chung D., Kim J., Kim Y., Kim A., Yoon H. K.** In-water visual ship hull inspection using a hover-capable underwater vehicle with stereo vision, *Journal of Field Robotics*, 2019, vol. 36, no. 3, pp. 531–546.
10. **Hong S., Kim J.** Three-dimensional Visual Mapping of Underwater Ship Hull Surface Using Piecewise-planar SLAM, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, vol. 18, no.n3, pp. 564–574.
11. **Chung D., Kim J.** Pose Estimation Considering an Uncertainty Model of Stereo Vision for In-Water Ship Hull Inspection, *IFAC-Papers OnLine*, 2018, vol. 51, pp. 400–405.
12. **Kim B. C., Kim H. C., Han S., Park D. K.** Inspection of Underwater Hull Surface Condition Using the Soft Voting Ensemble of the Transfer-Learned, *Sensors*, 2022, vol. 22, pp. 4392.
13. **Bobkov V. A., Kudryashov A. P., Melman S. V., Scherbatyuk A. F.** Visual navigation and 3D reconstruction of underwater objects with autonomous underwater vehicle, *Integrated Navigation Systems (ICINS). 2017 24th Saint Petersburg International Conference*, 29–31 May 2017, St. Petersburg, Russia, pp. 185–192.
14. **Bobkov V., Kudryashov A., Inzartsev A.** Method for the Coordination of Referencing of Autonomous Underwater Vehicles to Man-Made Objects Using Stereo Images, *J. Mar. Sci. Eng.*, 2021, no. 9, pp. 1038.
15. **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, October 19–22, 2015.



16 июня 2023 г. в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) состоится

## IV Международная конференция по нейронным сетям и нейротехнологиям (NeuroNT'2023)

### ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Математические основы построения искусственного интеллекта
- Технологии искусственного интеллекта
- Сильный искусственный интеллект
- Гибридный интеллект
- Искусственные нейронные сети
- Нейроморфные вычисления и технологии
- Этика и безопасность применения искусственного интеллекта
- Прикладные системы с искусственным интеллектом
- Аппаратное обеспечение систем искусственного интеллекта

### СЕКЦИИ

- Концепции построения гибридного интеллекта
- Технологии искусственного интеллекта и их приложения
- Управление данными и организация вычислений в интеллектуальных системах

Рабочие языки конференции – русский, английский

Контактная информация  
E-mail: [IRVC.eltech@mail.ru](mailto:IRVC.eltech@mail.ru)  
Тел.: +7 812 346-46-37