

Удк 551.46.077:629.584

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

А.А. Борейко, А.В. Воронцов,
А.А. Кушнерик, А.Ф. Щербатюк

Институт проблем морских
технологий ДВО РАН¹

Рассмотрен подход к решению двух задач для автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) на основе обработки видеоизображений. Одна из них связана с организацией приведения АНПА к стыковочному модулю (СМ) донной станции в зоне визуальной видимости на основе выделения искусственных ориентиров, расположенных на СМ. Другой задачей является обеспечение точной локальной навигации АНПА вблизи объекта работ на основе обработки последовательных видеоизображений, содержащих случайные объекты. Описаны алгоритмы и приведены некоторые результаты их работы с модельными и реальными подводными изображениями.

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение некоторых задач, таких как океанографические исследования, экологический мониторинг и охрана морских акваторий, связано с длительным пребыванием АНПА под водой. Для обеспечения возможности длительного функционирования АНПА под водой необходимо, чтобы он в автоматическом режиме периодически приводился к одной из донных (или находящихся на поверхности) моря станций, стыковался с ней и выполнял процедуры подзарядки бортовых аккумуляторных батарей, передачи накопленных данных и получения нового задания. Сеть станций должна обеспечивать связь между АНПА и пунктом управления либо посредством кабельных линий, либо с помощью системы радиосвязи через вынесенную на поверхность антенну.

В последние годы исследованию алгоритмов подводной стыковки для АНПА на основе

обработки видеоизображений посвящено много работ [1-6, 11, 14]. В работе [1] рассмотрена разработанная в KORDI (Корея) система приведения для АНПА ISiMI, которая использует вертикальную плоскую мишень, содержащую пять светящихся точек, расположенных определенным образом на окружности. В работах [2-4] описаны исследования по созданию системы приведения для НПА, выполняемые в рамках европейской программы GREX. В данной системе также используется плоская вертикальная мишень с контрастными окружностями, расположенными таким образом, чтобы повысить вероятность их выделения и точность позиционирования НПА. В работе [6] описана система ориентирования для АНПА Tri-Dog1, разработанная в Institute of Industrial Science, University of Tokyo. Данная система использует пространственную мишень, содержащую четыре шарика оранжевого цвета, раз-

мещенных в углах куба, образуя треугольную пирамиду. Цвет используется для повышения вероятности выделения мишени.

Еще одной важной задачей, для решения которой используется обработка изображений, является точная локальная навигация НПА вблизи объекта работ в условиях воздействия внешних возмущений в виде подводного течения, морского волнения, а также силовых реакций со стороны кабеля или собственных механизмов для телеуправляемых НПА. Высокоточное определение параметров движения необитаемого подводного аппарата является важной задачей при проведении операций, связанных с осмотром подводных сооружений, при работе манипуляторами или выполнении подводной сварки с использованием телеуправляемых НПА, а также

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел.: (4232)432647, e-mail: scherba@marine.febras.ru

при маневрировании среди подводных конструкций.

В данном случае система определения параметров движения НПА, использующая для работы видеоинформацию, должна устойчиво функционировать на основе обработки изображений, содержащих случайные объекты на морском дне. Для решения задачи определения движения мобильных роботов с использованием обработки видеоизображений без применения искусственных маркеров в основном используются два подхода. Один из них основан на оценке оптического потока [9, 10]. Другой подход заключается в выделении одних и тех же объектов на последовательных изображениях [7, 8, 12, 13]. Метод оценки оптического потока весьма чувствителен к колебаниям яркости и для устойчивой работы накладывает жесткие ограничения на значение перемещения объекта между последовательными моментами съемки. Метод, использующий выделение объектов, менее чувствителен к колебаниям яркости изображения, так как в нем используются признаки, основанные на геометрических характеристиках объектов. Он не накладывает ограничений на значение перемещения между последовательными тактами работы, необходимо лишь, чтобы объекты, по которым производится сопоставление, присутствовали на двух последовательных кадрах изображения.

В данной работе полагается, что камера расположена в центре связанной системы координат НПА и направлена вертикально вниз, при этом кадр ориентирован по ходу движения НПА. В части 1 статьи рассмотрена задача автоматического приведения АНПА к стыковочному модулю донной станции из ближней зоны вокруг ДС. Основная задача данного (прецизионного) этапа состоит в подходе к ДС с заданного направления и обеспечении необходимой взаимной ориентации АНПА относительно стыковочного устройства ДС. Предварительно АНПА совершает круговой маневр вокруг ДС, обнаруживает на дне контрастную маркерную линию (например, натянутый трос) и вдоль неё подходит к ДС (рис. 1) [11].

Бортовая система технического зрения (СТЗ) подводного аппарата, включающая цифровую фотосистему, используется для обработки изображений в реальном времени. На основе результатов обработки формируются команды для системы программного управления АНПА. В части 2 статьи рассмотрена задача, связанная с обеспечением точной локальной навигации АНПА вблизи объекта работ, на основе обработки последовательных видеоизображений, содержащих случайные объекты. Описаны алгоритмы и приведены некоторые результаты их работы с модельными и реальными подводными изображениями.

1. Использование искусственных маркеров для ориентирования АНПА вблизи стыковочного модуля ДС

Для выполнения точных перемещений подводного аппарата вблизи стыковочного устройства после прихода его в зону визуальной видимости ДС используются визуальные ориентиры (маркеры). На основе визуальной информации АНПА должен распознать такой маркер и определить относительно него свои местоположение и ориентацию. Были рассмотрены три варианта эталонных маркеров - крестообразный, круговой и прямоугольный.

Процедура выделения маркеров на изображении включает предварительную фильтрацию, выделение границ объектов, группировку элементов границы, определение их положения и ориентации в кадре. В системе реализован метод выделения границы объекта на изображении, основанный на формировании усредненного значения градиента интенсивности с использованием стандартного оператора Собела. Полагается, что граница расположена в области с высоким значением градиента, превышающим некоторый порог.

Крестообразный маркер. Крестообразный маркер представляет собой две контрастные прямые линии, пересекающиеся под прямым углом. Для выделения такого маркера было разработано алгоритмическое обеспечение, основанное на обнаружении прямых на изображении с использованием преобразования Хоу [15]. При этом каждому пикселу изображения, принадлежащему границе объекта, приписывается пара значений - угол θ , который имеет граница в данной точке, и расстояние r от центра изображения до линии

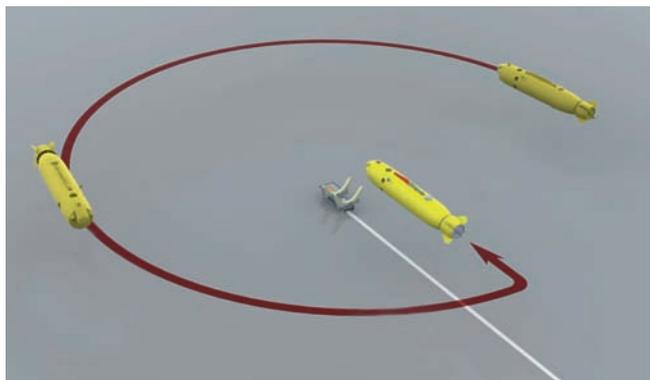


Рис. 1
Круговой маневр АНПА вокруг ДС для обнаружения на дне контрастной маркерной линии

границы в соответствии с выражением:

$$r = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta),$$

где (x, y) - координаты текущего пиксела.

Далее формируется соответствующее преобразованное изображение в плоскости (r, θ) , представляющее собой по сути гистограмму, где значение в каждой точке пропорционально длине линии с параметрами (r, θ) на исходном интенсивном изображении. В процессе выделения протяженного объекта на изображении в текущей версии системы выбирается восемь наиболее длинных линий, соответствующих восьми максимальным значениям в полученном после преобразования Хоу пространстве. При определении максимумов вводится минимально допустимое расстояние между максимумами для того, чтобы избежать ситуации, когда спад одного из максимумов принимается за другой максимум. Для отсеивания коротких «шумовых» отрезков линий длина каждого из восьми выделенных протяженных объектов сравнивается с заданным порогом, и если она меньше порога, то соответствующий протяженный объект удаляется из рассмотрения.

Дальнейшая обработка состоит в попарной проверке перпендикулярности найденных отрезков, начиная с самых длинных, с учетом допуска, необходимого для компенсации погрешности определения ориентации отрезков. При обнаружении пары перпендикулярных отрезков рассчитываются координаты точки их пересечения, которые и определяют возможное положение маркера на изображении.

Данный маркер может иметь точечный вариант представления, при этом контрастные прямые линии, пересекающиеся под прямым углом, заменя-

ются на линейки светодиодов, равномерно расположенных на соответствующих прямых. Для выделения такого маркера выполняются следующие шаги:

- обнаружение на изображении ярких пятен, соответствующих светящимся источникам света (используется сравнение с порогом для преобразования исходного изображения в бинарное);
- определение координат центров найденных пятен;
- нахождение двух взаимно перпендикулярных линий, соответствующих выделенным точкам.

Полярные координаты точки пересечения (r, φ) двух прямых, заданных параметрами (ρ_1, θ_1) и (ρ_2, θ_2) , вычисляются на основе соотношений (рис.2):

$$\varphi = \theta_2 - \arctg\left(\frac{\rho_1 - \rho_2 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_1)}{\rho_2}\right),$$

$$\rho = \rho_2 / \cos(\theta_2 - \varphi).$$

Достоинством данного маркера является относительная вычислительная простота выделения его на изображении.

Круговой маркер. Круговой маркер представляет собой контрастную круговую линию. В общем случае подобная мишень проецируется на плоскость изображения как эллипс. Для выделения данного маркера было разработано алгоритмическое обеспечение, основанное на обнаружении на изображении эллипсов с использованием преобразования Хоу [16]. Данный маркер также может иметь точечный вариант представления. На рис. 3 изображен круговой точечный маркер, который представляет собой структуру из 10 точечных источников света, равномерно расположенных на дуге окружности в 270° . Оставленный пустым сектор служит для определения ориентации АНПА относительно маркера. Представленная форма позволяет определить действи-

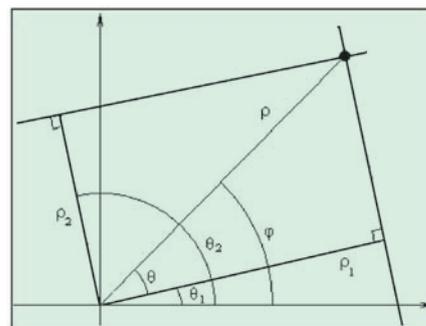


Рис. 2. Определение точки пересечения двух взаимно перпендикулярных прямых

тельную взаимную ориентацию АНПА и маркера во всем диапазоне $0-360^\circ$. Алгоритм выделения данного маркера включает следующие шаги:

- 1) выделение на изображении ярких пятен, соответствующих светящимся источникам света (используется сравнение с порогом для преобразования исходного изображения в бинарное);
- 2) определение координат центров найденных пятен;
- 3) решение системы из i линейных уравнений вида:

$$Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F = 0,$$

где x_i, y_i - координаты полученных точек, А-F - неизвестные. Количество уравнений должно быть не менее 6. При обнаружении менее 6 точек вычисления не производятся. Указанная система уравнений решается с

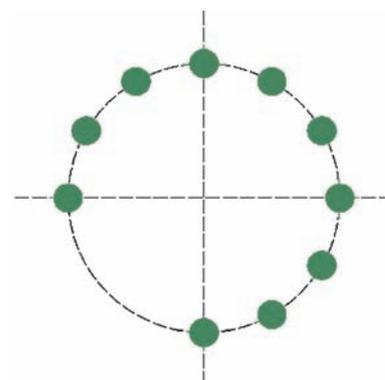


Рис. 3. Точечный вариант кругового маркера из десяти точечных источников света, равномерно расположенных на дуге окружности в 270°

помощью алгоритма определения параметров эллипса методом наименьших квадратов [3];

4) определение угла поворота эллипса по формуле

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{B}{A-C}\right);$$

5) пересчет коэффициентов A–F по формулам:

$$A' = A \cdot \cos^2\alpha + B \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha + C \cdot \sin^2\alpha$$

$$C' = A \cdot \sin^2\alpha + C \cdot \cos^2\alpha - B \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha$$

$$D' = D \cdot \cos\alpha + E \cdot \sin\alpha$$

$$E' = E \cdot \cos\alpha - D \cdot \sin\alpha;$$

6) Определение координат центра эллипса по соотношениям

$$x_0 = (E'/2C')\sin\alpha - (D'/2A')\cos\alpha,$$

$$y_0 = -(E'/2C')\cos\alpha + (D'/2A')\sin\alpha.$$

Следует отметить, что для выделения данного маркера требуется выполнить значительно больший объем вычислений по сравнению с маркером, состоящим из прямолинейных отрезков.

Прямоугольный маркер.

Данный маркер представляет собой фигуру на круговом фоне из двух контрастных прямоугольников, один из которых вложен в другой в виде несимметричных букв «О» или «П» (рис. 4). Введение несимметричности позволяет устранить неоднозначность в определении ориентации маркера. Подобный вариант маркера позволяет осуществлять его обнаружение, используя подход, основанный как на выделении краев (границ), так и на основе сегментации областей.

Программное обеспечение, осуществляющее обнаружение данного маркера с помощью определения границ составляющих его прямоугольников, реализует следующий алгоритм:

- выделение границ с помощью обобщенного оператора Собела;
- поиск замкнутых контуров среди границ посредством прослеживания границ и отбрасывания тех из них, которые не представляют собой замкнутый контур;
- аппроксимация найденных контуров четырехугольниками;
- выбор таких четырехугольников, которые являются прямоугольниками с заданным отношением сторон, с учетом допуска для компенсации возможных геометрических искажений изображений;
- определение размеров прямоугольников, координат их центров, ориентации и взаимного расположения с целью выделения искомого маркера.

Алгоритм на основе сегментации областей включает следующие шаги:

- преобразование изображения из полутонового в бинарное на основе порога, полученного

автоматически путем обработки гистограммы интенсивностей изображения;

- фильтрация полученного сегментированного изображения для устранения изолированных точек и с учетом ограничения на минимальную допустимую площадь объекта;
- поиск связанных областей и определение для каждой из областей выпуклой оболочки и описанного прямоугольника, отбор областей, которым соответствует описанный прямоугольник с требуемыми параметрами;
- определение положения и ориентации маркера.

Цветная сегментация. Использование окрашенного определенным цветом маркера доставляет дополнительную информацию для более надежного выделения маркера. При этом выбор цвета имеет большое значение. Во-первых, цвет маркера должен отличаться от фона, который под водой в основном имеет зелено-голубую окраску. Во-вторых, цветной маркер должен гарантированно обнаруживаться с заданного расстояния с учетом того, что разные световые длины волн имеют разное затухание под водой. Как показывают эксперименты, наиболее подходящим в этом смысле является желтый цвет.

Сегментация цветных изображений основана на выделении пространственно связанных областей, пиксели которых удовлетворяют критерию однородности. Такие связанные области соответствуют реальным объектам и могут быть выделены, например, на основе метода выращивания областей. Выращивание областей производится присоединением соседних пикселей к некоторому ядру, если они удовлетворяют критерию однородности. Также сегментация может быть достигнута путем определения границ между областями. Функции градиента

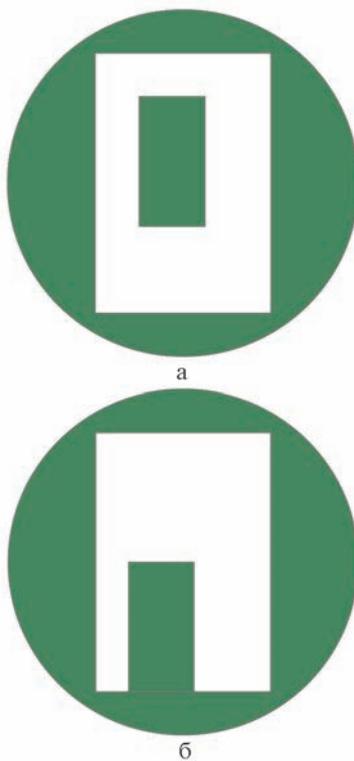


Рис. 4. Варианты прямоугольного маркера

на цветных изображениях могут быть определены либо объединением в одной величине изменения всех каналов цветности, или комбинацией градиентов по каждому из каналов в отдельности. Для определения границ могут быть использованы методы активных контуров.

В данной работе процедура сегментации основана на определении расстояния между векторами цветовых значений пикселей изображения и эталонного цвета в цветовом пространстве $L^*a^*b^*$. Если расстояние меньше заданного порога, пиксели считаются принадлежащими к искомому цветовому классу или целевому объекту.

Управление АНПА при выполнении стыковки с доковым устройством. Формирование управления при выполнении стыковки с доковым устройством заключается в выработке программных значений курса, скорости и высоты движения АНПА таким образом, чтобы удерживать центр маркера в центре изображения цифровой фотокамеры и ориентацию подводного аппарата – вдоль главной оси маркера в положительном направлении. Программное значение дифферента АНПА принимается равным нулю. При достижении требуемых положения и ориентации АНПА выполняет процедуру стыковки с доковым устройством. При этом в режиме стабилизации курса и горизонтального поло-

жения он переходит с текущей высоты на высоту, обеспечивающую стыковку, и активизирует работу механизма захвата докового ловителя. Блок-схема алгоритма управления АНПА при выполнении стыковки с доковым устройством показана на рис. 5.

Некоторые результаты моделирования и морских испытаний. Для проверки работоспособности алгоритма с использованием крестообразного маркера были выполнены компьютерное моделирование и натурный лабораторный эксперимент. Точность определения положения крестообразного маркера на изображении оценивалась посредством генерирования случайным образом изображения перекрестья и определения положения маркера на основе разработанного алгоритма. На рис. 6 показаны результаты выделения крестообразного маркера и его центра на модельных и реальном изображениях. Эксперименты показали удовлетворительную работоспособность алгоритма. Однако при обработке реальных изображений возникает достаточно большое количество ложных кандидатов. Для оценки точности выделения эллипса генерировались списки точек, расположенных на дуге эллипса, к координатам которых были добавлены случайные величины, имитирующие погрешность определения

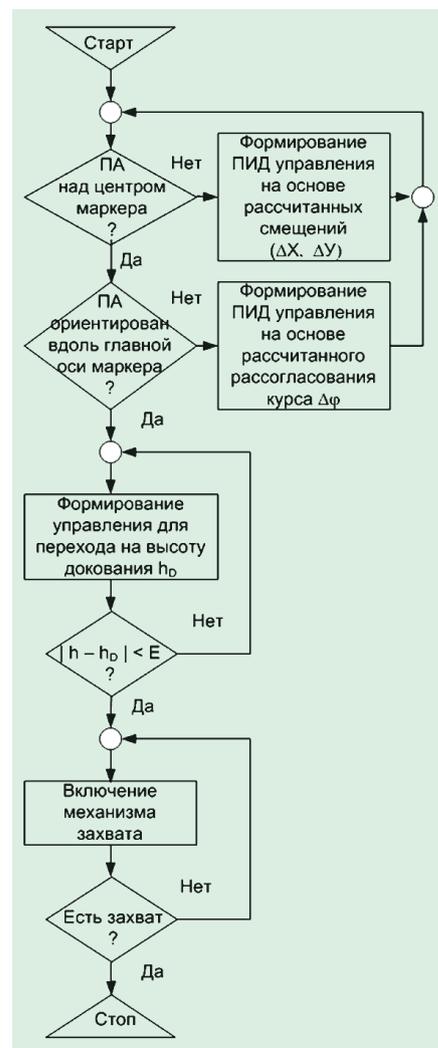


Рис. 5. Блок-схема алгоритма управления АНПА при выполнении стыковки с доковым устройством

их координат. Эксперименты показали удовлетворительную работоспособность используемого алгоритма (рис. 7), но при этом следует отметить высокую

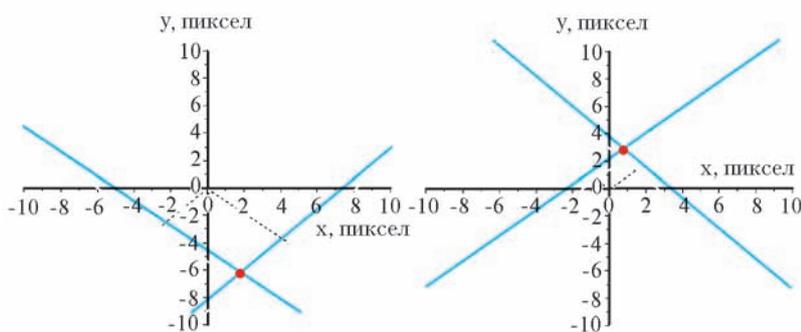
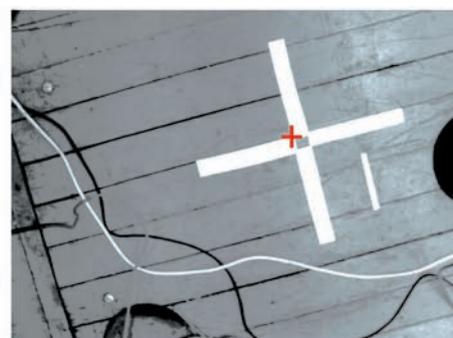


Рис. 6. Результаты выделения крестообразного маркера и его центра



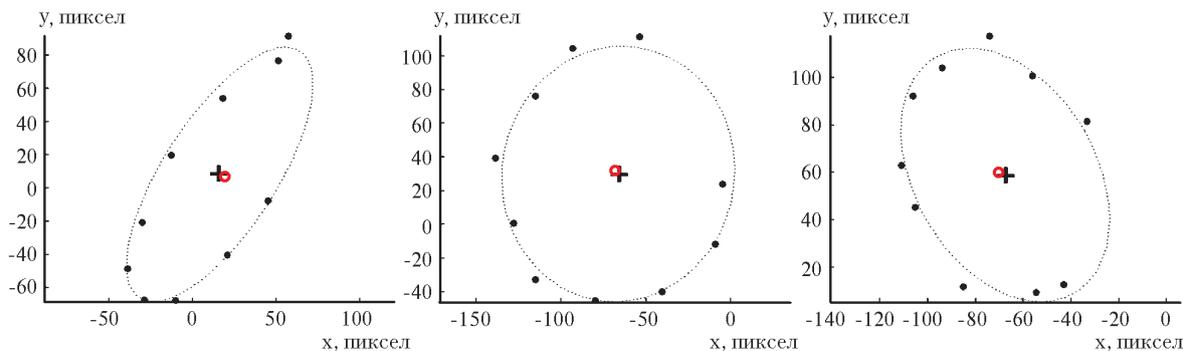


Рис. 7. Результаты выделения эллипса и его центра

вычислительную нагрузку, связанную с реализацией данного подхода.

Моделирование алгоритма определения прямоугольного маркера заключалось в генерировании изображения, содержащего заданным образом вложенные прямоугольники, и обработке этого изображения алгоритмом определения маркера. Для оценки влияния шума на результат обработки около 2% точек на модельном изображении искажались случайным значением от 0 до 255. На зашумленном изображении максимумы погрешностей определения координат центра маркера и ориентации составили 4 пиксела и $3,4^\circ$ соответственно.

На следующем этапе эксперимент проводился с использованием модельных изображений, снятых камерой в лаборатории. Маркером служила фигура, лежащая на полу, застеленном линолеумом с нерегулярной текстурой. В ходе проведения эксперимента было обработано свыше 50 изображений, снятых с разных высот. На рис. 8 показаны результаты поэтапной обработки исходного изображения, включающие выделение границ, нахождение прямых линий, построение вложенных прямоугольников, определение центра фигуры и высоты камеры над маркером.

Для отладки алгоритма цветовой сегментации предвари-

тельно на компьютере моделировался прямоугольный маркер с оранжевым внутренним прямоугольником, а затем использовалась фотография маркера, полученная в лабораторных условиях. Результаты обработки приведены на рис. 9. На основе компьютерного моделирования и обработки лабораторных фотографий было принято решение в морских испытаниях использовать только прямоугольный маркер как наиболее информативный, помехозащищенный и не налагающий высоких вычислительных требований на бортовой компьютер.

Морские испытания описываемой системы проводились с использованием ПА TSL в за-

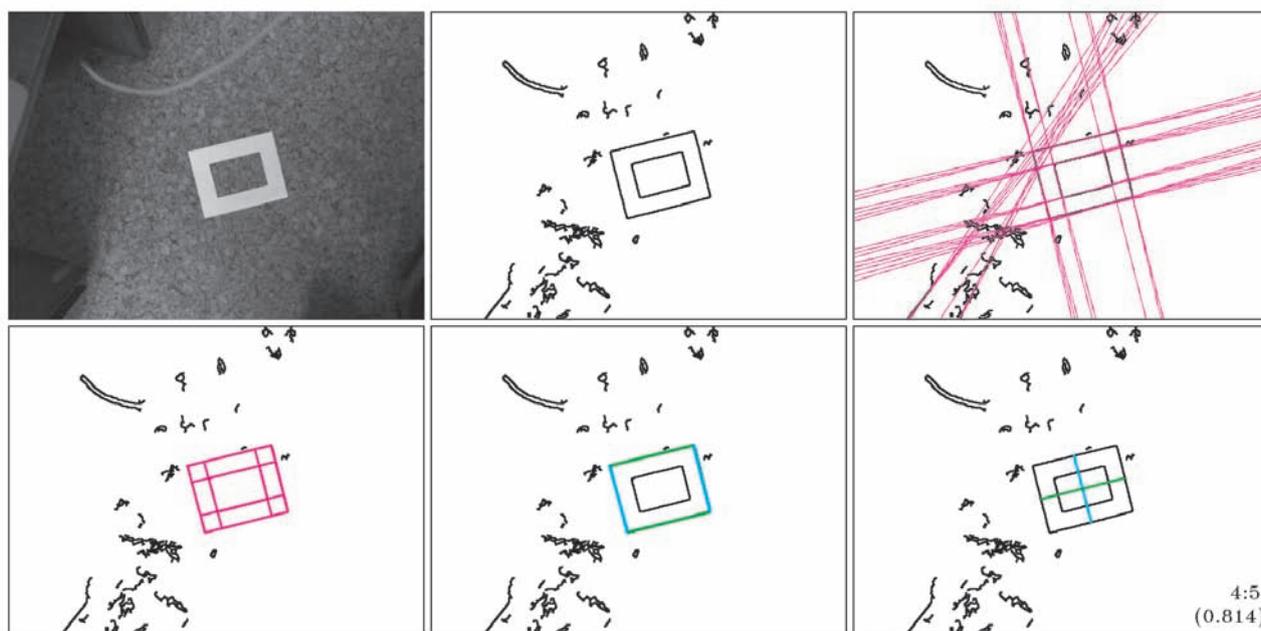


Рис. 8. Выделение прямоугольного маркера на изображении, полученном в лаборатории

ливе Петра Великого (Японское море). Эксперименты выполнялись при естественном дневном освещении. На небольшой глубине был развернут испытательный полигон, состоящий из прямоугольного маркера и белого капронового фала толщиной 8 мм, растянутого так, чтобы образовать прямую линию длиной несколько десятков метров. Высота съемки, при которой белый фал был виден достаточно отчетливо при имеющейся прозрачности воды, составляла 1 – 1,5 метра.

ПА TSL был оснащен программным обеспечением, предназначенным для организации движения над фалом в требуемом направлении до обнаружения маркера. После попадания в область визуальной видимости маркера ПА стабилизировал курс в соответствии с ориентацией маркера и положение над маркером таким образом, чтобы последний находился в центре кадра. В ходе испытаний маркер был корректно обнаружен в 96,7% случаев. На рис. 10 приведен в качестве примера один из кадров, снятых во время стабилизации ПА над маркером (слева), и тот же кадр с наложенным результатом распознавания маркера. Синим цветом обозначены прямоугольники, составляющие маркер, а красный круг отмечает центр маркера. При проведении экспериментов данный маркер был размещен на черной круговой подложке. Цвет внешнего прямоугольника был выбран белым, а вложенного прямоугольника - черным или оранжевым, в зависимости от того, монохромная или цветная камера использовалась для обнаружения маркера. После стабилизации положения над маркером подводный аппарат TSL осуществлял автоматическую посадку на раму, имитирующую доковое устройство (рис. 11).

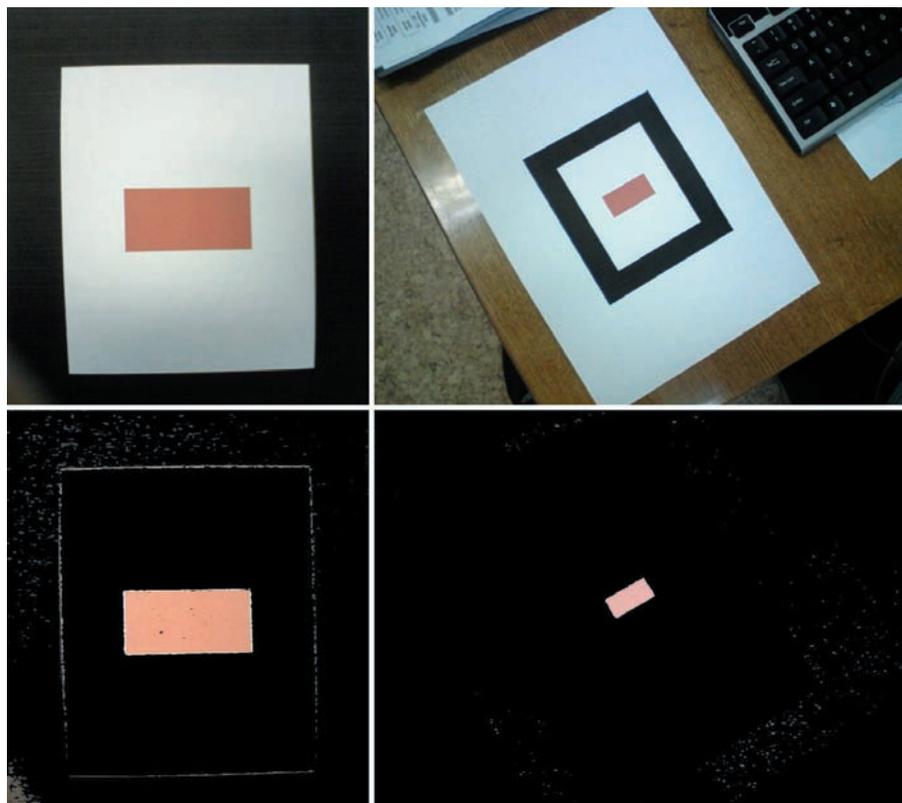


Рис. 9. Результаты выделения внутреннего оранжевого прямоугольника в центре маркера

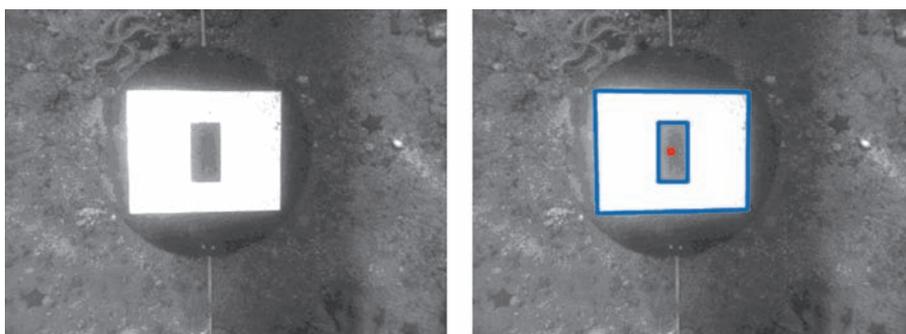


Рис. 10. Результаты распознавания прямоугольного маркера на борту ПА TSL



Рис. 11. ПА TSL выполняет посадку на раму, имитирующую доковое устройство

2. Определение параметров движения НПА на основе обработки видеоизображений

Алгоритм определения параметров движения НПА основан на обработке последовательных цифровых фотоизображений. Предполагается, что высота движения НПА над дном измеряется с достаточной точностью и ее программное значение автоматически стабилизируется системой управления подводного аппарата. Рассмотрена задача оценивания перемещения и разворота НПА в горизонтальной плоскости.

Процедура вычисления перемещения пары последовательных изображений в данном подходе включает этапы:

- выделение особенностей на сравниваемых изображениях;
- определение соответствия этих особенностей;
- расчет перемещения выбранной пары изображений.

В данной системе для извлечения особенностей используется детектор Харриса, который выделяет угловые элементы границы на изображении. При этом для каждого пикселя изображения вычисляется значение функции отклика, оценивающей степень схожести окрестности точки на угол. Для этого рассчитывается матрица:

$$M = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 & \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial y}\right) \\ \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial y}\right) & \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix},$$

где $I(x, y)$ – яркость изображения в точке (x, y) .

Функция отклика записывается в следующем виде: $R = \det M - k(\text{trace} M)^2$. Особой считается точка, для которой R больше установленного поро-

вого значения Rm . Так как на подводных изображениях, как правило, отсутствуют объекты искусственного происхождения, то нет и границ с четкими углами. Для того чтобы количество особых точек лежало в заданном диапазоне, необходимо автоматически формировать разные пороговые значения Rm для различных типов и текстур изображений дна. Также следует отметить, что поиск точек производится неравномерно по изображению, что приводит к избыточной концентрации особых точек в небольших областях сопоставляемых изображений. Для решения указанной проблемы поиск особых точек производится на локальных областях размером $N \times N$ (N зависит от размера изображения). В каждой локальной области выбирается не более одной точки с максимальным значением R . При избыточном количестве особых точек, превосходящем установленное ограничение, точки с минимальным значением R отбраковываются. В результате получается набор точек-кандидатов на последовательных изображениях.

Для сопоставления выделенных на двух последовательных изображениях особенностей для всех особых точек первого ($m = 1, \dots, M$) и второго ($n = 1, \dots, N$) изображений рассчитываются признаки F_s ($s = 1, \dots, S$), например, с использованием алгебраических инвариантов Ну. Для всех возможных пар точек на сопоставляемых изображениях находятся невязки $Q(m, n)$:

$$Q(m, n) = \sum_{k=0}^S k_s \cdot \left| F_k(x_m, y_m) - F_k(x_n, y_n) \right|,$$

где k_s – весовые коэффициенты, характеризующие значи-

мость соответствующих инвариантов.

На основе полученных невязок создается таблица J размером $N \times M$. Для формирования соответствий между точками в таблице выбирается минимальное значение $J(m^*, n^*)$ и устанавливается соответствие между точками m^* и n^* . Затем из таблицы J удаляются столбец и строка, соответствующие точкам m^* и n^* и аналогичная процедура применяется к получившейся $(N-1) \times (M-1)$ таблице. Данная операция выполняется до тех пор, пока очередное значение $J(\alpha^*, \beta^*)$ не станет больше заданного порога Jm . Таким образом формируется список пар-кандидатов, для которого требуется произвести проверку на правильность (рис. 12).

В данной системе для проверки правильности образованных пар используется модификация метода LMedS (Least Median of Squares). Сначала определяются все смещения R_{ij} между сформированными парами точек на двух изображениях:

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}.$$

Затем определяется медиана для этих смещений R_{med} и выполняется проверка. Если $R_{med} \cdot 1,25 > R_{ij} > R_{med} / 1,25$, то пара ij принимается. Далее на основе полученных пар точек производится оценивание смещения изображений (рис. 12). Моделирование показало, что для данного алгоритма в 88% случаев ошибка определения перемещения не превышает 2 пикселей при прочих равных условиях с моделированием первого алгоритма (рис. 13).

На заключительном этапе исследований разработанная

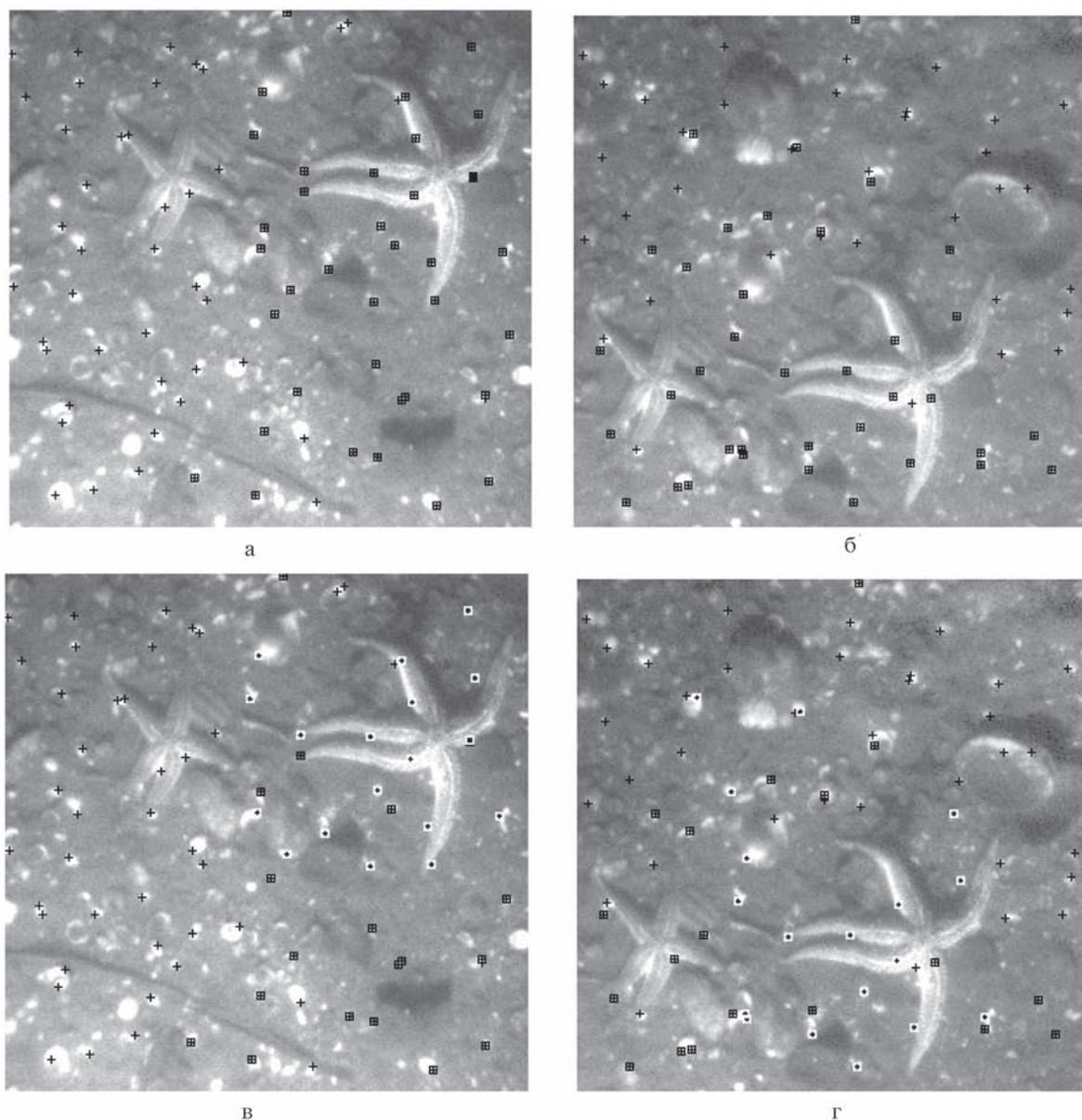


Рис. 12. Проверка соответствий (черными квадратами выделены точки, сопоставленные на предыдущем этапе, а белыми – те, которые прошли проверку)

система определения параметров движения была интегрирована в состав системы технического зрения НПА TSL. Было выяснено, что один такт работы системы на борту АНПА TSL занимает в среднем 1,2-1,6 секунды при использовании в качестве бортового компьютера для системы технического зрения PENTIUM LIPPERT 1,4 ГГц.

Для оценки точности определения параметров движения на основе работы системы, ис-

пользующей последовательные видеоизображения, НПА фиксировался жестко к неподвижному основанию и производилась запись показаний горизонтальных проекций скорости. Одновременно для сравнения производилось накопление показаний аналогичных значений от доплеровского лага (ДЛ) NavQuest 600 (Link-Quest Inc США), являющегося на данный момент одним из современных высокоточных малогабаритных ДЛ, предна-

значенных для использования в составе НПА. На рис. 14,а показаны графики ошибок определения скорости (1) и суммарной ошибки в определении местоположения НПА (2) в зависимости от времени с использованием разработанной системы, а на рис. 14,б – аналогичные ошибки с использованием доплеровского лага.

Дисперсия ошибки определения модуля скорости для разработанной системы составила 0,07 мм/с и среднее

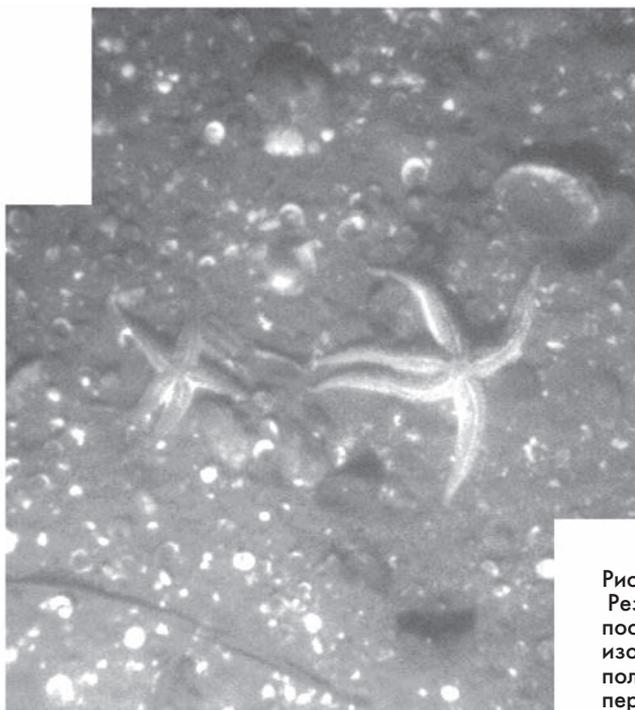


Рис. 13. Результат наложения последовательных изображений на основе полученных оценок перемещения

значение ошибки – 0,11 мм/с, а аналогичные характеристики для ДЛ составили 0,6 мм/с и 1 мм/с соответственно. Таким образом, точность разработанной системы на порядок превосходит точность одного из современных ДЛ. Разработанная система позволяет не только оценивать относительное перемещение НПА на основе обработки последовательных изображений, но и реализовывать режим работы, обеспечивающий получение оценки перемещения НПА относительно заданного фиксированного кадра, указанного, например, оператором в процессе работы НПА. Данный режим необходим для организации процедуры автоматического зависания НПА над заданными объектами в процессе выполнения подводно-технических работ. Указанный режим работы системы был реализован на борту НПА TSL. Для выполнения эксперимента НПА вывешивался на тали и частично погружался в бассейн. Затем НПА фиксировался в положении равновесия и захватывался кадр, который принимался за исходный. В процессе эксперимента искусственно вводились возмущения в виде отклонения НПА от исходного положения. Результаты эксперимента подтверждают, что ошибка в определении смещения и ориентации НПА фиксирована и определяется небольшими остаточными колебаниями НПА относительно точки подвеса. На рис.15 показано отклонение местоположения НПА от исходной точки в зависимости от времени в режиме аperiодических искусственных возмущений. Продолжительность эксперимента составила около 20 минут. Видимая в кадре область дна равнялась около 80 см

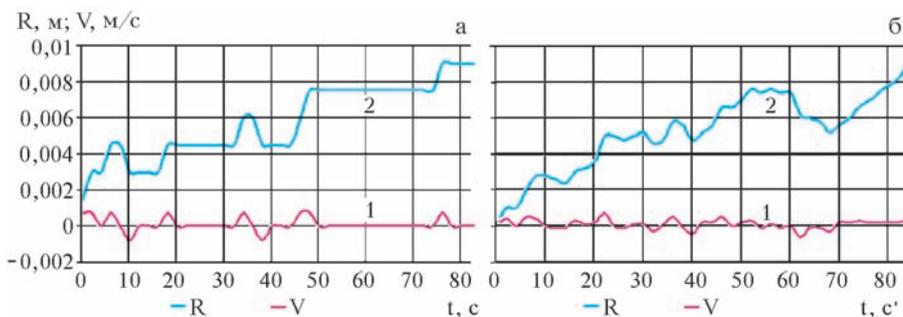


Рис. 14. Графики ошибок определения скорости (1) и суммарной ошибки в определении местоположения НПА (2) в зависимости от времени для разработанной системы (а) и аналогичные ошибки для доплеровского лага (б)

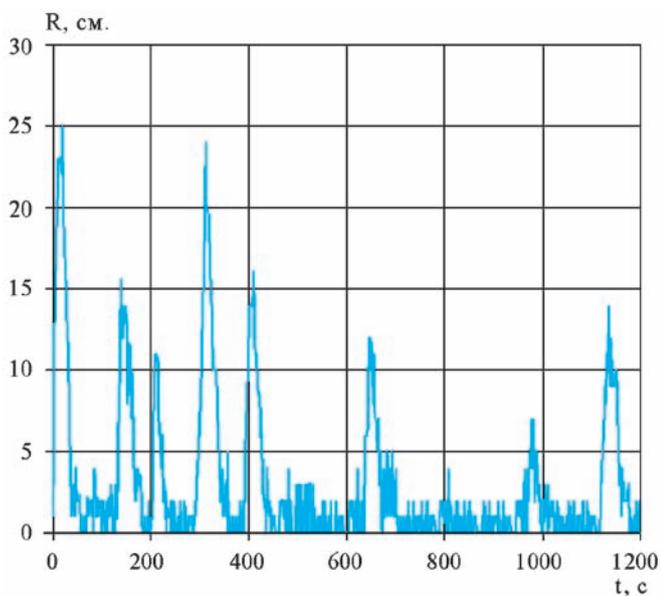


Рис. 15. Отклонение местоположения НПА от исходной точки в зависимости от времени

(диагональ прямоугольника). Максимальные отклонения не превышали 30 см, т.е. область перекрытия последовательных кадров всегда составляла более 50%. После возвращения НПА в положение равновесия ошибки в определении перемещения относительно исходного кадра составляли несколько миллиметров и не превышали

1 см. Следует отметить, что прецизионные высокочастотные гидроакустические системы позиционирования, предназначенные для работы на коротких дистанциях (от десятков до единиц метров), обеспечивают точность стабилизации положения НПА порядка нескольких сантиметров [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы выражают свою признательность всем сотрудникам ИПМТ ДВО РАН, принявшим участие в подготовке и проведении натурных экспериментов, результаты которых были использованы в данной статье. Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 100800249.

ЛИТЕРАТУРА

1. Park J.Y. et al. Improvement of vision guided underwater docking for small AUV ISiMI. Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference, October 26-29, 2009, Biloxi, USA. Biloxi, 2009.
2. Palmer T. et al. Vision Based Localization System for AUV Docking on Subsea Intervention Panels // Proceedings of the OCEANS 2009 IEEE Conference, May 11-14, 2009, Bremen, Germany. Bremen, 2009.
3. Krupinski S. et al. Towards AUV docking on sub-sea structures // Proceedings of the OCEANS 2009 IEEE Conference, May 11-14, 2009, Bremen, Germany. Bremen, 2009.
4. Sotiropoulos P., Grosset D. et al. AUV docking system for existing underwater control panel. Proceedings of the OCEANS 2009 IEEE Conference, May 11-14, 2009, Bremen, Germany. Bremen, 2009.
5. Evans J. et al. Autonomous docking for intervention-aUVs using sonar and video-based real-time 3d pose estimation // Proceedings of the UUST 2003, August 24 - 27, 2003, Durham, New Hampshire, USA. New Hampshire, 2003.
6. Yu S. et al. Navigation of Autonomous Underwater Vehicle based on image recognition of Artificial Underwater Landmarks // Proceedings of the UUST 2001, August 24 - 27, 2001, Durham, New Hampshire, USA. New Hampshire, 2001.
7. Eustice R., Pizarro O., Singh H. Visually Augmented Navigation for Autonomous Underwater Vehicles // *IEEE J. Oceanic Eng.* 2008. Vol. 33, No. 2. P. 103-122.
8. Maki T., Kondo H., Ura T. and Sakamaki T. Navigation of an autonomous underwater vehicle for photo mosaicing of shallow vent areas // *Proc. IEEE OCEANS'06 Asia Pacific*. 2006.
9. Gracias N.R., Zwaan S., Bernardino A. and Santos-Victor J. Mosaic based navigation for autonomous underwater vehicles // *IEEE J. Oceanic Eng.* 2003. Vol. 28. P. 609-624.
10. Negahdaripour S. et al. An Integrated Vision-Based Positioning System for Video Stabilization and Accurate Local Navigation and Terrain Mapping // *Proc. of the OCEANS'03*, Sept. 22-26, San Diego, USA, 2003. San Diego, 2003.
11. Inzartsev A.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Vaulin Yu.V. and Scherbatyuk A.Ph. Investigation of Autonomous Docking System Elements for Long Term AUV [Electronic resource] // *Proc. of the OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference*, September 18-23, 2005, Washington, USA. 1 CD-ROM. ISBN 0-933957-33-5.
12. Борейко А.А., Щербатюк А.Ф. Об одном алгоритме определения параметров движения на основе обработки телевизионных изображений // *Морские технологии*. Вып. 3. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 68-79.
13. Борейко А.А., Мун С.А., Щербатюк А.Ф. Определение движения подводного аппарата на основе обработки видео изображений // *Мехатроника, автоматизация и управление*. 2008. № 8. С. 2-8.
14. Kushnerik A.A., Scherbatyuk A.Ph., Vorontsov A.V. Some algorithms for small AUV docking based on visual data // *Proc. of 16th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST09)*, August 23-26, 2009, Durham, New Hampshire, USA. New Hampshire, 2009.
15. Scherbatyuk A.Ph. Comparison of Methods for Identifying Objects with Rectilinear Edges on Underwater Video Images // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1998. Vol. 8, No. 3. P. 467-469.
16. Fitzgibbon A.W., Pilu M., Fisher R.B. Direct Least Squares Fitting of Ellipses // *IEEE Trans. PAMI*. 1999. Vol. 21. P. 476-480.
17. Allen B., Austin T. et al. Autonomous Docking Demonstrations with Enhanced REMUS Technology // *Proc. of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference*, September 18-21, 2006, Boston, USA. Boston, 2006.

