

РАСПОЗНАВАНИЕ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА ПО СТЕРЕОСНИМКАМ С БОРТА АНПА В ЗАДАЧАХ ИНСПЕКЦИИ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

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

Актуальной практической задачей сегодня является инспекция подводных коммуникаций, (газовые и нефтяные трубопроводы (ТП) и др.) с применением автономных необитаемых подводных роботов – аппаратов. Инспекция подводных объектов требует высокой точности локализации подводного аппарата относительно подводного объекта при выполнении рабочей миссии. Такая точность не всегда может быть обеспечена штатными акустическими средствами навигации. Одним из решений повышения точности навигации является использование оптических изображений, обрабатываемых с помощью методов компьютерного зрения. Настоящая статья посвящена решению задачи распознавания подводного трубопровода по стереоизображениям. Предлагаемый метод основывается на распознавании видимых границ ТП на 2D снимках с последующим восстановлением пространственных параметров сцены, включая положение и ориентацию ТП в системе координат АНПА. При этом применяются методы, алгоритмы компьютерного зрения: сопоставление характерных особенностей на изображениях, эпиполярные ограничения, триангуляция лучей, пороговые методы фильтрации, вычисление матричных преобразований координат, а также стандартные средства обработки статистических данных. Вычислительные эксперименты по оценке эффективности метода проводились на реальных данных в наземных условиях с помощью стереокамеры Karmin2 (Nerian's 3D Stereo Camera, baseline 25 cm). Полученные результаты по оценке точности вычисляемой локализации ТП показали, что предложенный метод обработки стереоизображений может обеспечить требуемую при инспекции навигационную точность АНПА.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, трубопровод, инспекция, стереоизображения, распознавание

Введение

Эффективность применения автономных необитаемых подводных роботов – аппаратов (АНПА) для инспекции подводных коммуникаций – зависит от выполнения ряда требований, предъявляемых к средствам идентификации инспектируемых объектов и динамическим свойствам аппарата при выполнении рабочей миссии. Общие вопросы, относящиеся к инспекции подводных инфраструктур, рассматривались в работе [1]. Отметим некоторые особенности решения данного класса задач, характерные для АНПА. На этапе сближения АНПА с инспектируемым объектом обычно применяются акустические дальнедействующие средства. Алгоритмы распознавания донных объектов на акустических изображениях, а также организации выхода АНПА к этим объектам достаточно хорошо проработаны [2–5]. В

меньшей степени исследован этап прецизионного обследования, особенно когда необходимо точное маневрирование АНПА в пространстве протяженного объекта или распределенного подводного комплекса. Во многих работах делается акцент на интеграции различных сенсоров для повышения точности движения АНПА относительно подводных объектов. К основному набору сенсоров относятся лазерные системы с разными режимами сканирования, донный профилограф, магнитный сенсор и вспомогательные датчики (геохимические сенсоры и др.). Почти всегда используются и цифровые видеокамеры но, как правило, в режиме фиксации 2D изображений.

Методы управления подводным аппаратом на основе объединения данных от различных сенсоров представлены, например, в [6–9], а в [10, 11] описаны современные средства обработки акустических и видеоданных на основе методов машинного обучения

при решении задач обнаружения границ трубопровода и повышения точности локализации АНПА. Обработка видеoinформации дает возможность повысить точность навигации на близких расстояниях от объекта. В первых работах задача прослеживания ТП решалась на основе обработки 2D моноизображений в предположении, что высота движения АНПА над дном измеряется с достаточно высокой точностью и значение высоты автоматически стабилизируется системой управления подводного аппарата [12, 13]. В [14] задача навигации аппарата в 3D пространстве решалась на основе обработки стереоизображений с применением авторских алгоритмических модификаций визуальной одометрии и алгоритма 3D восстановления сцены. В [15] был предложен алгоритм, базирующийся на комбинации стереокамеры и эхолота, что позволяет определить позицию АНПА по отношению к ТП в 3D пространстве. Однако существенным ограничением здесь являлось предположение, что трубопровод лежит горизонтально на морском дне. Как следствие, в случае невыполнения этого ограничения возможен большой разброс в определении навигационной точности. В [16] дается обзор наиболее часто используемых технологий подводных инспекций и тенденций их развития.

В настоящей статье предлагается метод распознавания ТП на основе выделения его границ на изображениях стереопары методами компьютерного зрения и вычисления осевой линии ТП. В отличие от решений, аналогичных предложенному в [15], здесь не используется предположение о горизонтальном положении ТП на морском дне. Также в отличие от решений, базирующихся на применении фильтра Собеля и преобразования Хафа для детектирования линий (как в [15]), в предлагаемом подходе реализован менее вычислительно затратный, оригинальный алгоритм «голосования» для выделения границ ТП. Другое преимущество заключается в использовании «очищенных» изображений с применением алгоритма вычисления карты диспаратности. Это позволяет снизить вероятность потенциальных ошибок сопоставления характерных особенностей на растровых сетках и повысить скорость вычислений.

1. Постановка задачи. Общий подход

Задача в целом состоит в разработке метода распознавания и слежения за подводным трубопроводом по видеопотоку, фиксируемому установленной на борту АНПА стереокамерой. Предлагаемый метод основывается на выделении на векторизованных стереоизображениях, получаемых в фиксируемых пози-

циях траектории АНПА, видимых границ ТП (контуров) на фоне рельефа морского дна. Для локализации ТП с помощью обработки видеoinформации требуется решить ряд взаимосвязанных задач:

- расчет движения АНПА вдоль ТП методом визуальной навигации (визуальная одометрия);
- выделение контуров ТП на векторизованных изображениях стереопары;
- вычисление направления ТП с помощью сопоставления характерных точек на изображениях стереопары (сравнение дескрипторов точек);
- вычисление осевой линии ТП;
- вычисление параметров взаимного положения АНПА и ТП в системе координат АНПА, обеспечивающих надежное управление движением АНПА вдоль ТП (положение АНПА относительно видимой части ТП, минимальное расстояние до ТП и скорость приближения АНПА к ТП).

В работе рассматриваются первые четыре задачи из перечисленных выше, которые составляют основу предлагаемого подхода в целом. Идентификация ТП базируется на выделении его линий контуров (видимых границ) на каждом снимке стереопары. Последующая обработка исходных изображений и полученных линий контуров на векторизованных изображениях методами компьютерного зрения (сопоставление точек на левом и правом изображении, триангуляция лучей) позволяет вычислить пространственную геометрию сцены, в том числе направление ТП на анализируемом видимом участке и его локализацию в системе координат (СК) АНПА. Трудность сопоставления здесь заключается в том, что:

а) пара пространственных линий границ ТП, видимых левой камерой, не совпадает с парой пространственных линий границ, видимых правой камерой. Поэтому на левом и правом снимках стереопары эти видимые пары контуров не соответствуют друг другу (рис. 1);

б) каждый контур ТП (левый и правый на каждом снимке стереопары) в общем случае представлен последовательностью отдельных отрезков, выстроенных в линию по направлению оси видимого участка ТП. Разрывность контура возникает в процессе векторизации снимков из-за неизбежного влияния шума и дискретного характера изображения (рис. 2).

Предлагаемый метод идентификации ТП и его прослеживания с помощью АНПА, с учетом сделанных замечаний, основывается на следующей вычислительной схеме:

- векторизация изображений стереопары (осуществляется с помощью одной из стандартных программ-векторизаторов (библиотека OpenCV));

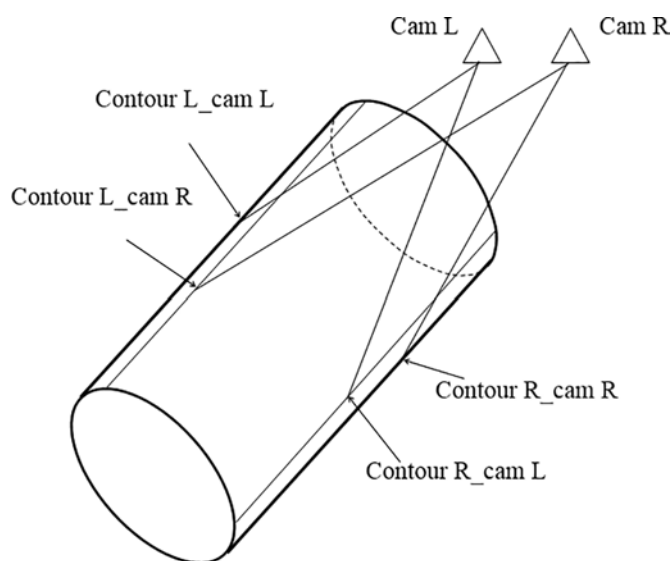


Рис.1. Контурсы ТП, видимые левой и правой камерами. Левая камера «видит»: Contour L_cam L – контур левый – камера левая и Contour R_cam L – контур правый – камера левая. Правая камера «видит»: Contour L_cam R – контур левый – камера правая и Contour R_cam R – контур правый – камера правая. Контурсы Contour R_cam L и Contour L_cam R видимы на обоих снимках стереопары

- формирование 2D контуров на снимках из принадлежащих им отрезков;
 - вычисление направления ТП на основе обработки линий на поверхности ТП по направлению осевой линии ТП. Обработка линии заключается в сопоставлении ее точек на левом снимке с их образами на правом снимке с использованием эпиполярных ограничений и дескрипторов точек;
 - генерация 3D точек, принадлежащих ТП;
 - вычисление осевой линии ТП.
- Ограничением метода является ситуация, когда ТП не лежит полностью на поверхности морского

дна, а часть его скрыта, присыпана. В этом случае отсутствуют видимые границы ТП, параллельные его направлению, и необходимо применять другие средства идентификации ТП.

2. Выделение контуров на снимках алгоритмом «голосования»

В целом ТП можно представить как состоящий из небольших последовательно стыкуемых цилиндрических участков, каждый из которых видим камерой в конкретной позиции траектории АНПА. Каждый участок ТП имеет свое направление в 3D пространстве. Цель алгоритма – выделять отрезки, формирующие контур участка ТП из множества, получаемых на этапе векторизации стереоизображений на каждом шаге движения АНПА (рис. 3, а). Будем описывать участок контура ТП с помощью вычисляемого вектора направления и базового отрезка. Координаты отрезков задаются в СК изображения. Отрезки сортируются по группам со сходными геометрическими параметрами (направление и местоположение). Введем понятие «длинного» отрезка, у которого длина больше заданной величины L . Будем исходить из предположения, что вероятность соответствия контуру для длинных отрезков будет выше, чем у коротких отрезков. Поэтому первоначальное положение линии контура в группе задается первым отрезком (длинным). Каждый очередной анализируемый отрезок из множества проверяется на соответствие одной из уже существующих групп отрезков и включается в группу, если выполнены два условия:

- отклонение направления отрезка от направления группы не больше заданной величины (угол);
- отрезок близок к линии группы (расстояние).

Расстояние берется от середины отрезка до линии.

После включения отрезка в группу делается корректировка линии группы. Новый вектор направления D вычисляется по схеме «взвешенное усреднение». Взвешивание делается с учетом двух коэффициентов: $k1$ – коэффициент учета длины отрезка, т.е. если длина отрезка равна длине базового отрезка, то $k1 = 1$; $k2$ – коэффициент учета расстояния от середины отрезка до линии, т.е. если расстояние больше или равно дельта, то $k2 = 0$, а если расстояние равно 0, то $k2 = 1$.

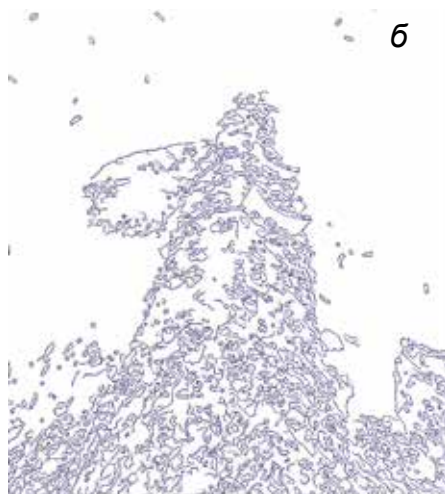


Рис. 2. Пример векторизации подводного снимка: а – исходное изображение; б – векторизованное изображение

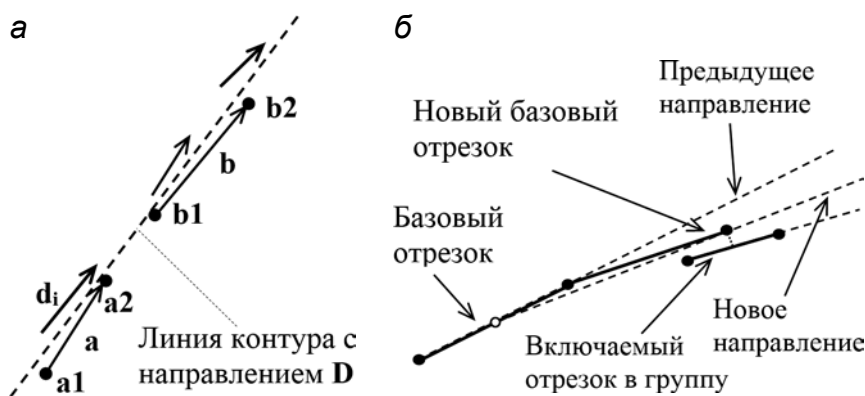


Рис. 3. Формирование контура видимого участка ТП:
 а – сформированная линия контура по отрезкам; б – корректировка базового отрезка

Считаем, что кроме направления, которое корректируется после каждого нового отрезка, включаемого в группу, есть и базовый отрезок линии контура, задаваемый точкой начала и конца. Он тоже корректируется. Вначале этим базовым отрезком контура является первый отрезок. Влияние отрезка на формирование нового положения линии учитывается следующим образом. Новая линия проходит через среднюю точку базового вектора с новым вектором направления. После вычисления нового направления (как указано выше) корректируется базовый отрезок контура следующим образом. Конечная точка нового базового отрезка контура строится как проекция середины нового включаемого в группу отрезка на луч, проходящий через начальную точку предыдущего базового отрезка контура; а начальной точкой нового базового отрезка контура становится конечная точка предыдущего базового отрезка контура (рис. 3, б). После формирования групп отрезков на каждом снимке (левый и правый) осуществляем выделение групп отрезков, отвечающих контурам Contour R_cam L и Contour L_cam R. Выбираем две группы с наибольшим числом отрезков («голосов»), предположительно отвечающие двум видимым камерой контурам ТП. Различить левый и правый контур на снимке можно следующим образом: правый контур на левом снимке будет отсекал меньшую по площади часть снимка, примыкающую к правой границе снимка. Для правого снимка ситуация симметричная. Для каждого изображения стереопары выделяются указанным образом левый и правый контуры. Дополнительная проверка выполня-

ется на совпадение направлений обоих контуров. Результат – множество 2D отрезков, представляющих контур (для каждого контура).

В качестве искомого направления линии контура ТП в СК изображения, т.е. направления **D** данного участка ТП, выбирается согласованное направление групп отрезков, представляющих два контура ТП.

3. Вычисление направления ТП в СК АНПА

Рассмотрим вначале общий случай, когда используются не «очищенные» изображения стереопары («очищенные» изображения лежат в одной плоскости, параллельной базовой линии), а в качестве линий, определяющих направление ТП, используются контуры ТП на каждом изображении ТП. Тогда предлагается следующий алгоритм

Алгоритм 1. Ищется сопоставление для контуров Contour R_cam L и Contour L_cam R, которые видимы левой и правой камерами и соответственно присутствуют на изображениях стереопары (рис. 1, рис. 4). Поскольку контур может быть представлен несколькими отрезками после векторизации снимков, то для каждого отрезка P1P2, представляющего контур ТП Contour R_cam L на левом снимке, ищется его образ P1'P2', видимый на правом снимке (рис. 4). Сопоставление выполняется по конечным точкам отрезка и его образа путем сравнения их дескрипторов. Поиск точки P1', сопоставленной точке P1, осуществ-

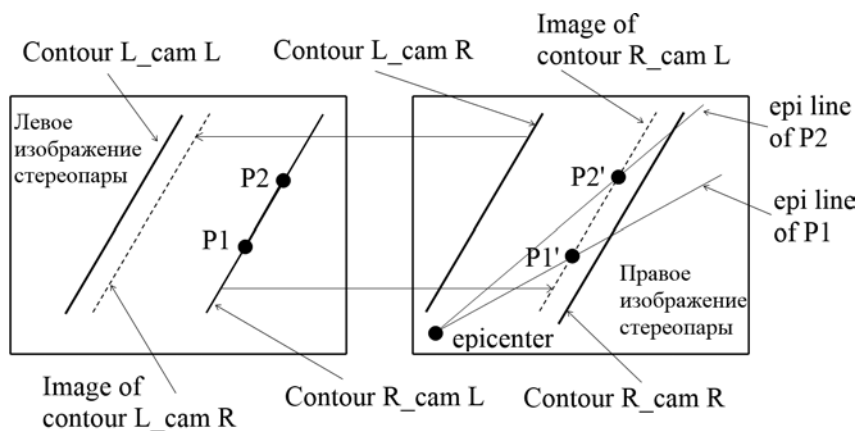


Рис. 4. Сопоставление 2D отрезков контуров с их видимыми образами:
 Contour R_cam L → правый контур ТП, видимый левой камерой; Image of contour R_cam L – образ контура contour R_cam L на правом изображении; Contour L_cam R → левый контур ТП, видимый правой камерой; Image of contour L_cam R – образ контура L_cam R на левом изображении; epi line of P1 – эпилиния для точки P1; epi line of P2 – эпилиния для точки P2; точка P1' сопоставлена точке P1 отрезка P1P2; точка P2' сопоставлена точке P2 отрезка P1P2

вляется проверкой точек на эпилинии $epi\ line\ of\ P1$ (соответствующей точке $P1$). Проверка заключается в сканировании эпилинии с маленьким шагом и вычислении дескрипторов точек. Условием сопоставления является равенство дескрипторов точек $P1$ и $P1'$. Заметим, что прямоугольную площадку для расчета дескриптора следует брать слева от контура $Contour\ R_cam\ L$ (учитывая, что контур является границей поверхности ТП).

Поиск точки $P2'$, сопоставленной точке $P2$, осуществляется аналогичным образом на эпилинии $epi\ line\ of\ P2$ (соответствующей точке $P2$). После сопоставления всех отрезков контура $Contour\ R_cam\ L$ формируется их 3D представление стандартным образом (метод триангуляции лучей для стереопары). Усреднение 3D отрезков дает направление контура $Contour\ R_cam\ L$ в 3D пространстве СК камеры. Аналогичным образом вычисляется направление контура $Contour\ L_cam\ R$. Усреднение направлений обоих контуров дает направление ТП в СК АНПА.

Однако у этого алгоритма есть недостаток. Участок поверхности ТП, прилегающий к точке на линии границы, наблюдается из центра проекций камеры под косым лучом (близким к касательной). Поэтому его сопоставление с текстурным образом на правом снимке может порождать значительную корреляционную ошибку из-за большого угла (близкого к 90 градусам) между лучом наблюдения и нормалью к поверхности в районе линии границы).

Поэтому был реализован другой алгоритм, где в качестве линии, определяющей направление ТП, используется «средняя линия» между контурами ТП на 2D изображении. В этом случае участок анализируемой поверхности просматривается камерой под углом, близким к нормали к поверхности, и соответственно указанная выше ошибка при сопоставлении точек минимизируется. Второе упрощение заключается в том, что используются так называемые «очищенные» стереоизображения (оси координат левой и правой камер параллельны). В этом случае алгоритм существенно упрощается.

Алгоритм 2.

2D поиск линии направления.

Используя полученные данные о найденных границах трубы на 2D снимках, вычисляем «среднюю линию» от этих границ для левого снимка. Эта линия будет 2D-проекцией линии направления на левом снимке. Образ этой линии на правом снимке будет находиться между соответствующими линиями границ. Заметим, что для случая параллельных стереокамер эпилеполарные ограничения сводятся к тому, что для точки на левом снимке ее образ на правом на-

ходится на прямой, параллельной оси X и имеющей такую же Y -координату. Следовательно, переходя к растровой СК, пиксель изображения слева может перейти в любой пиксель справа, расположенный на той же строке. Далее вычисляются пиксельные координаты «средней линии» для каждой строки левого изображения и им в соответствие ставятся пиксельные же ограничения для области поиска образа на правом изображении. Для каждой строки стереоизображения слева строим один SURF-дескриптор в позиции «средней линии», а справа строим множество SURF-дескрипторов в каждом пикселе области поиска. Вычисляем наилучшее соответствие левого дескриптора его образу справа по минимуму расстояния в пространстве признаков SURF. После обработки всех строк получаем множество соответствий левый–правый.

Выделение точечных особенностей на поверхности ТП, видимых обеими камерами.

Точечные особенности на поверхности ТП, видимые обеими камерами, необходимы для последующего вычисления осевой линии ТП. Генерация множества таких точек обеспечивается последовательным выполнением трех операций:

- генерация 2D сопоставленных точек на изображениях стереопары с помощью детектора SURF;
- выделение из этого множества точек, которые принадлежат ТП. Это делается с использованием вычисленных ранее образов контуров. На левом снимке эти точки находятся между линией $Contour\ R_cam\ L$ и линией $Image\ of\ contour\ L_cam\ R$. На правом снимке эти точки находятся между линией $Contour\ L_cam\ R$ и $Image\ of\ contour\ R_cam\ L$;
- для выделенного множества сопоставленных точек строится методом триангуляции лучей их 3D представление.

4. Вычисление осевой линии ТП

Считаем, что направление D ТП определено на предыдущем этапе (3D направление границ ТП). Имеется множество 3D точек $\{P_k\}$, принадлежащих поверхности ТП. Построим систему координат $СК_k^{ТП}$ $\{X', Y', Z'\}$, связанную с сечением ТП, проходящим через произвольно выбранную точку P_k (лежит на поверхности ТП) перпендикулярно осевой линии ТП (рис. 5):

- $C_k (cx_k, cy_k, cz_k)$ – точка на осевой линии, центр кругового сечения ТП, начало $СК_k^{ТП}$, cx_k, cy_k, cz_k – неизвестные координаты в $СК^{АНПА}$. Условие перпендикулярности кругового сечения, проходящего через точку P_k и точку C_k : скалярное произведение двух

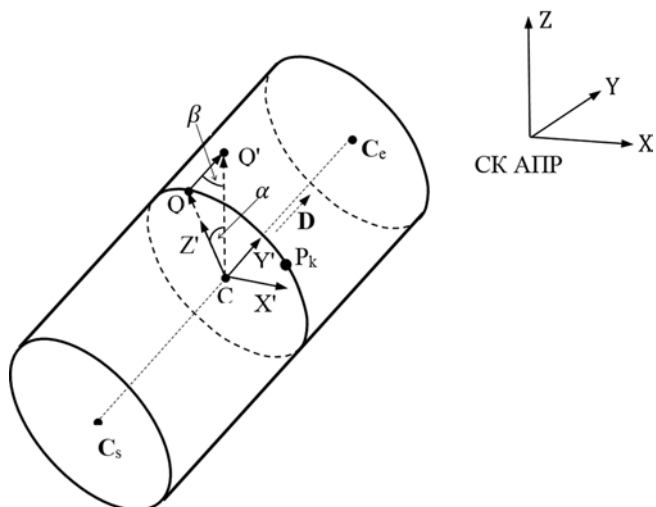


Рис. 5. Вычисление геометрических параметров ТП. Точка С находится на осевой линии, точки Q и Q' лежат на «верхней» линии поверхности

векторов $((P_k - C_k) \cdot d) = 0$. Здесь $d(dx, dy, dz)$ – единичный вектор по направлению D . Это условие связывает неизвестные координаты cx_k, cy_k, cz_k ;

– ось Y' направлена по осевой линии ТП – к вектору D ;

– ось X' направлена перпендикулярно плоскости, образуемой осью Y' и вектором CQ' .

Вектор CQ' коллинеарен оси Z СК_k^{АПП} (точка Q' лежит на поверхности ТП);

– ось Z' направлена перпендикулярно плоскости X', Y' ; z' – единичный вектор по Z' .

Пусть $e1, e2, e3$ – единичные орты системы координат ТП (СК_k^{ТП}), заданные в системе координат текущей позиции АНПА (СК^{АПП}).

$$e2 = d; \quad e1 = [e2 \times (0,0,1)] / ||e2 \times (0,0,1)||;$$

$$e3 = [e1 \times e2] / ||e1 \times e2||.$$

Тогда матрица преобразования координат $H_{СК^{АПП}, СК^{ТП}}$ из СК_k^{ТП} в СК^{АПП} будет:

$$H_{СК^{АПП}, СК^{ТП}} = \begin{pmatrix} e1x & e1y & e1z & 0 \\ e2x & e2y & e2z & 0 \\ e3x & e3y & e3z & 0 \\ cx_k & cy_k & cz_k & 1 \end{pmatrix}$$

Алгоритм:

1. Поместим все точки $\{P_i\}$ (лежащие на поверхности ТП) в построенную СК^{ТП} (связанную с выбранной точкой P_k):

$$P_i' (x', y', z') = P_i \cdot (H_{СК^{АПП}, СК^{ТП}})^{-1}$$

и спроецируем их на плоскость $Z'X'$, т.е. получим множество точек $\{P_i'' (x_i', 0, z_i')\}$, где x_i', z_i' – координаты в СК_k^{ТП}.

2. Построим систему уравнений по множеству $\{P_i''\}$ для нахождения неизвестных (cx_k, cy_k, cz_k) :

$$|P_i'' (x', 0, z')| - R = 0;$$

Ее можно решить методом наименьших квадратов:

$$\text{MIN} \sum (|P_i'' (x', 0, z')| - R)^2$$

Результат – координаты точки $C (cx_k, cy_k, cz_k)$, лежащей на осевой линии (в СК^{АПП}). Считаем, что радиус ТП R известен.

3. Имея вычисленную точку $C (cx_k, cy_k, cz_k)$, через которую проходит осевая линия ТП, и вектор направления D , получаем уравнение видимого участка осевой линии (прямая).

5. Эксперименты

Вычислительные эксперименты проводились с реальными данными, получаемыми с помощью стереокамеры Karmin2 (Nerian's 3D Stereo Camera, baseline 25 cm) в условиях наземной видеосъемки. На рис. 6, а показана исходная стереопара изображений, полученная камерой в конкретной позиции, а на рис. 6, б показаны эти же изображения с полученными после векторизации снимков границами ТП. Для получения сравнительных оценок точности локализации ТП (в системе координат камеры) были измерены и вычислены расстояния от камеры до нанесенных меток (контрольные точки на поверхности ТП) (рис. 6, б).

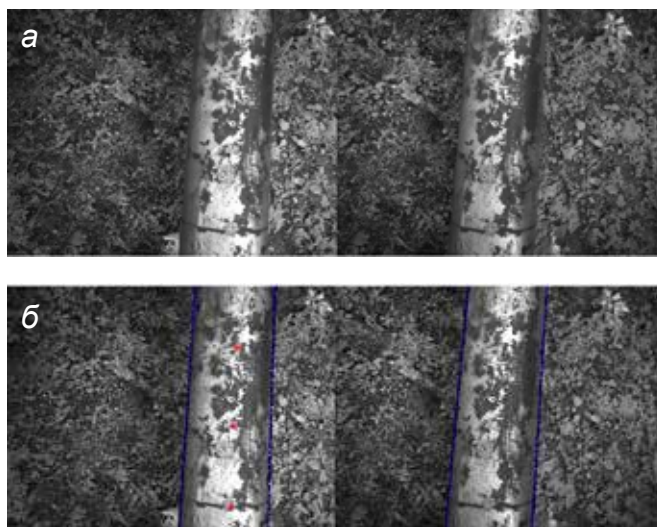


Рис. 6. Выделение границ ТП на векторизованных снимках: а – исходные изображения стереопары. Диаметр ТП 30 см; б – изображения стереопары с нанесенными вычисленными границами ТП

Полученные результаты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Расстояния от камеры до контрольных точек, м

Номер точки	Расчетное расстояние от камеры до ТП	Измеренное расстояние от камеры до ТП	Расхождение
1	1,068	1,063	0,005 (0.5 %)
2	1,036	1,028	0,008 (0.8%)
3	1,092	1,07	0,022 (2%)

Таблица 2. Расстояния между контрольными точками, м

Точки	Расчетное	Измеренное	Ошибка, %
1 и 2	0,2973	0,3	< 1
2 и 3	0,2968	0,3	< 1

Как видно из табл. 1, погрешность метода расчета расстояний от камеры до точек поверхности ТП (без учета погрешности измерений) находится в пределах 0.5–2%. Однако с учетом погрешности непосредственных измерений в данном эксперименте (до 0.5 %,) получаем окончательную погрешность метода в пределах 1–2.5 %.

Заключение

В работе представлен метод распознавания объектов типа ТП по стереоизображениям, ориентированный на идентификацию и прослеживание подводных ТП. Метод основывается на алгоритмическом выделении границ видимости ТП на векторизованных снимках с последующим вычислением координаты АНПА относительно ТП методами компьютерного зрения. Проведенные эксперименты с реальной стереокамерой в условиях наземной съемки показали принципиальную применимость метода для идентификации протяженных линейных объектов. В продолжение работы планируется развитие метода слежения за ТП с учетом частичной видимости ТП на снимках, расчет параметров взаимного положения АНПА и ТП, необходимых при выполнении инспекционных операций. Также планируется использование данных реальной подводной съемки для получения более достоверных оценок эффективности метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mai C., Pedersen S., Hansen L., Jepsen K., Yang Z. Subsea Infrastructure Inspection: A Review Study // Proceedings of IEEE 6th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications. – Penang, Malaysia, 2016. P. 71–76.
2. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications / Underwater Vehicles, ed. by Alexander V. Inzartsev. Intech Publishers, Vienna, January 2009. P. 215-234. open access: http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles
3. 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.
4. Inzartsev A., Pavin A., Rylov N. Development of the AUV Automatic Docking Methods Based on Echosounder and Video Data // Proceedings of 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 29–31 May 2017. Saint Petersburg, 2017. P. 178–184.
5. Инзарцев А.В., Павин А.М., Лебедко О.А., Панин М.А. Распознавание и обследование малоразмерных подводных объектов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2(22). С. 36–43.
6. Jianhua Bao, Daoliang Li, Xi Qiao, Thomas Rauschenbach Integrated Navigation for Autonomous Underwater Vehicles in Aquaculture: A Review // Information Processing in Agriculture. 2020. V. 7, is. 1. P. 139–151.
7. Marco Jacobi, Divas Karimanzira. Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs // *Oceans - St. John's*. 2014. P. 1–6.
8. Hou, Yong Zou, Shao Pan, Chao Dai. A Novel Underwater Simultaneous Localization and Mapping Online Algorithm Based on Neural Network // International Journal of Geo-Information. 2020. V. 9, No. 5. – <https://doi.org/10.3390/ijgi9010005>
9. Damian Ling. Subsea Survey Engineer Chevron – ETC. AUV Pipeline Inspection // Chevron North Sea Limited | Company Confidential – <https://www.sut.org/wp-content/uploads/2017/05/Damian-Ling-Chevron-AUV-21062017.pdf>. 2017.
10. Breno C. Pinheiro, Ubirajara F. Moreno, Joao T. B. de Sousa, Orlando C. Rodriguez Kernel-Function-Based Models for Acoustic Localization of Underwater Vehicles // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2017. V. 42. P. 603–618.
11. F.R. Petraglia, R. Campos, J. G. R. C. Gomes and M.R. Petraglia Pipeline tracking and event classification for an automatic inspection vision system // *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2017. P. 1–4.
12. Scherbatyuk A., Boreyko, A. & Vaulin Yu. AUV Operation Based on Video Data Processing: Some IMTP Experience // Workshop on Sensors and Sensing Technology for Autonomous Ocean Systems. Hawaii, 2000.
13. Ваулин Ю.В., Щербатюк А.Ф. Система отслеживания протяженных объектов на основе телевизионной информации для подводного робота. В сб. “Морские технологии”. Вып. 3. Владивосток, 2000. С. 80–91.
14. 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. V. 9. No. 1. P. 67–75.
15. Goril M. Breivik, Sigurd Aksnes Fjerdingen, Øystein Skotheim. Robust Pipeline Localization for an Autonomous Underwater Vehicle using Stereo Vision and Echo Sounder Data // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2010. V. 7539.
16. Michael Ho, Sami El-Borgi, Devendra Patil, Gangbing Song. Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper // Review. Structural Health Monitoring 2020. V. 19. No. 2. P. 606–645. – <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1475921719837718>.

Для цитирования:

Бобков В.А., Морозов М.А., Шушикова А.А., Инзарцев А.В. РАСПОЗНАВАНИЕ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА ПО СТЕРЕОСНИМКАМ С БОРТА АНПА В ЗАДАЧАХ ИНСПЕКЦИИ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 3(37). С. 36–45. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_04.

Об авторах

БОБКОВ Валерий Александрович, д.т.н., главный научный сотрудник,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН

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

Тел.: +7(423) 231-37-76

E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

Область научных интересов: компьютерная графика, компьютерное зрение, автоматизация научных исследований и параллельные вычисления

ORCID ID: 0000-0001-9722-5158

МОРОЗОВ Михаил Александрович, ведущий инженер-программист

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН

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

Тел.: +7(423) 231-37-76

E-mail: morozov@dvo.ru

Область научных интересов: компьютерная графика, компьютерное зрение

ORCID ID: 0000-0002-0767-9218

ШУПИКОВА Антонина Аркадьевна, старший инженер
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН

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

Тел.: +7(423) 231-37-76

E-mail: antoninash@inbox.ru

Область научных интересов: компьютерная графика, компьютерное зрение

ORCID ID: 0000-0003-4308-9191

ИНЗАРЦЕВ Александр Вячеславович, д.т.н, главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

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

Тел.: +7(423) 231-37-76

E-mail: inzar@marine.febras.ru

Область научных интересов: технология подводных роботов, искусственный интеллект для автономных мобильных роботов, задачи управления движением и системное моделирование.

ORCID ID: 0000-0002-1842-9951



UNDERWATER PIPELINE RECOGNITION USING AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE BY STEREO IMAGES IN THE TASKS OF INSPECTION OF UNDERWATER OBJECTS

V.A. Bobkov, M.A. Morozov, A.A. Shupikova, A.V. Inzartsev

Today, an inspection of underwater communications (gas and oil pipelines, etc.) using autonomous uninhabited underwater robots (vehicles) is an urgent practical task. Inspection of underwater objects requires high accuracy of the underwater vehicle's localization relative to the target object when performing an operational mission. Standard acoustic navigation means cannot always ensure sufficient accuracy. One way to improve navigation accuracy is the use of optical images processed using computer vision methods. The article is devoted to solving the problem of recognizing underwater pipelines using stereo images. The proposed method is based on identifying the visible boundaries of the pipeline on 2D images with the subsequent restoration of the scene's spatial parameters, including the pipeline's position and orientation in the AUV coordinate system. This process relies on the following methods and algorithms of computer vision: comparison of characteristic features in images, epipolar constraints, ray triangulation, threshold filtration methods, calculation of matrix transformations of coordinates, as well as standard tools for processing statistical data. Computational experiments to assess the method's effectiveness were carried out on actual data in laboratory conditions using a Karmin2 stereo camera (Nerian's 3D Stereo Camera, baseline 25 cm). Obtained results of assessing the accuracy of the calculated localization of the pipeline showed that the proposed method for processing stereo images can provide the AUV navigation accuracy required during an inspection.

Keywords: autonomous unmanned underwater vehicle, pipeline, inspection, stereo images, recognition.

References

1. Mai C., Pedersen S., Hansen L., Jepsen K., Yang Z. Subsea Infrastructure Inspection: A Review Study. 6th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications. Penang, Malaysia, 2016. P. 71–76.
2. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications. Underwater Vehicles, ed. by Alexander V. Inzartsev. In-Tech Publishers, Vienna, January. 2009. P. 215–234. open access: http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles.
3. Bagnitskiy A.V., Inzartsev A.V., Pavin A.M., Melman S.V., Morozov M.A. Model'noye resheniye zadachi avtomaticheskoy inspektsii podvodnykh truboprovodov s pomoshch'yu gidrolokatora bokovogo obzora (A model solution of an automatic underwater pipelines inspection problem using side scan sonar). Underwater Investigation and Robotics. 2011. No. 1(11). P. 17–23.
4. Inzartsev A., Pavin A., Rylov N. Development of the AUV Automatic Docking Methods Based on Echosounder and Video Data. Proceedings of 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 29–31 May 2017. Saint Petersburg, Russia. P. 178–184.
5. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Lebedko O.A., Panin M.A. Raspoznavaniye i obsledovaniye malorazmernykh podvodnykh ob'ektov s pomoshchyu avtomomnykh nebitamykh podvodnykh apparatov (Small object detection and survey using autonomous underwater vehicle). Underwater Investigation and Robotics. 2016. No. 2(22). P. 36–43.
6. Jianhua Bao, Daoliang Li, Xi Qiao, Thomas Rauschenbach Integrated Navigation for Autonomous Underwater Vehicles in Aquaculture: A Review. Information Processing in Agriculture. 2020. Vol. 7. Issue 1. P. 139–151.
7. Marco Jacobi, Divas Karimanzira Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs. *Oceans - St. John's*. 2014. P. 1–6.
8. Hou, Yong Zou, Shao Pan, Chao Dai. A Novel Underwater Simultaneous Localization and Mapping Online Algorithm Based on Neural Network. International Journal of Geo-Information. 2020. Vol. 9. No. 5. – <https://doi.org/10.3390/ijgi9010005>.
9. Damian Ling, Subsea Survey Engineer Chevron – ETC. AUV Pipeline Inspection. Chevron North Sea Limited | Company Confidential. – <https://www.sut.org/wp-content/uploads/2017/05/Damian-Ling-Chevron-AUV-21062017.pdf>, 2017.
10. Breno C. Pinheiro, Ubirajara F. Moreno, João T. B. de Sousa, Orlando C. Rodríguez Kernel-Function-Based Models for Acoustic Localization of Underwater Vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2017. Vol. 42. P. 603–618. ISSN 0364-9059.
11. Petraglia F. R., Campos R., J. G. R. C. Gomes and M. R. Petraglia Pipeline tracking and event classification for an automatic inspection vision system. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2017. P. 1–4.
12. Scherbatyuk A., Boreyko A. & Vaulin Yu. AUV Operation Based on Video Data Processing: Some IMTP Experience. Workshop on Sensors and Sensing Technology for Autonomous Ocean Systems. Hawaii. 2000.
13. Vaulin Yu.V., Shcherbatyuk A.F. Sistema ustanovki protyazhennykh ob'yektov na televizionnoy informatsii dlya podvodnogo robota (Installation system of extended objects on TV information for an underwater robot). *Morskije Tehnologii*. Vladivostok. 2000. P. 80–91.
14. 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.
15. Goril M. Breivik, Sigurd Aksnes Fjerdingen, Øystein Skotheim Robust Pipeline Localization for an Autonomous Underwater Vehicle using Stereo Vision and Echo Sounder Data. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2010. Vol. 7539.
16. Michael Ho, Sami El-Borgi, Devendra Patil, Gangbing Song Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper. Review. Structural Health Monitoring 2020. Vol. 19. No. 2., P. 606–645. – <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1475921719837718>.

About the authors

BOBKOV Valery Aleksandrovich. Doctor of Science, Chief Researcher
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 5, Radio Street, Vladivostok, 690021, Russia
Scientific interests: computer graphics, computer vision, automation of scientific research, and parallel computing
ORCID ID: 0000-0001-9722-5158

MOROZOV Michael Alexandrovich, lead software engineer.
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 5, Radio Street, Vladivostok, 690021, Russia
Scientific interests: computer graphics, computer vision
ORCID ID: 0000-0002-0767-9218

SHUPIKOVA Antonina Arkadyevna, Senior engineer
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 5, Radio Street, Vladivostok, 690021, Russia
Scientific interests: computer graphics, computer vision
ORCID ID: 0000-0003-4308-9191

INZARTCEV Aleksandr Vyacheslavovich. Doctor of Science, Chief Researcher
Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 5a, Suhanova Street, Vladivostok, 690091, Russia
Scientific interests: underwater robot technology, artificial intelligence for autonomous mobile robots, motion control problems and system modeling
ORCID ID: 0000-0002-1842-9951

Recommended citation:

Bobkov V.A., Morozov M.A., Shupikova A.A., Inzartcev A.V. UNDERWATER PIPELINE RECOGNITION USING AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE BY STEREO IMAGES IN THE TASKS OF INSPECTION OF UNDERWATER OBJECTS. Underwater investigation and robotics. 2021. No. 3(37). P. 36–45. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_04.

