

ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА ПО СТЕРЕОСНИМКАМ

В.А. Бобков, А.А. Шупикова

Рассмотрена задача автоматического прослеживания подводного трубопровода (ПТП) по стереоизображениям с использованием автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Отмечено, что традиционные методы распознавания границ на векторизованных изображениях часто неэффективны в подводной среде из-за низкого качества снимков, частичного погружения трубопровода в грунт и высокой вычислительной трудоёмкости. Предложена модификация ранее разработанного авторами метода вычисления осевой линии ПТП, основанного на генерации 3D облака точек, которая включает два усовершенствования: варьирование начальной точки текущего участка осевой линии в малой окрестности для снижения погрешности и замена полного перебора угловых положений оптимизацией по алгоритму Нелдера–Мида. Эксперименты проведены на модельных данных в виртуальной среде с реалистичной текстурой морского дна при различных разрешениях снимков, высотах движения АНПА и степени заиливания ПТП. Показано, что модифицированный метод обеспечивает более высокую точность локализации осевой линии и существенно превосходит базовый вариант по вычислительной производительности. Установлено, что метод сохраняет работоспособность при заиливании трубопровода, а также устойчив к кривизне трассы. В заключении отмечено, что дальнейшие исследования будут направлены на тестирование метода на реальных данных.

Ключевые слова: инспекция, подводный трубопровод (ПТП), автономный подводный аппарат, распознавание, стереоизображение, осевая линия

Введение

Актуальной и практически важной задачей сегодня является регулярный контроль состояния подводных коммуникаций (газовые и нефтяные трубопроводы и др.). В последнее время для этих целей всё чаще применяются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), поскольку они не требуют использования дорогостоящих специализированных обеспечивающих судов, а также сокращают сроки обследования подводных коммуникаций. Для решения задач инспекции подводных трубопроводов (ПТП) АНПА должен быть оборудован надёжными средствами идентификации объекта с возможностью точного маневрирования относительно него. Одним из эффективных подходов к решению задачи прослеживания ПТП с использованием АНПА является визуальная навигация, которая в интеграции со штатными средствами навигации потенциально может обеспечить высокоточную координацию АНПА относительно ПТП.

Методы, алгоритмы распознавания объектов по снимкам хорошо развиты сегодня для наземных сценариев. Но для подводной среды эти методы не всегда эффективны из-за специфических для нее проблем, к которым относятся: невозможность использовать спутниковые измерения; низкое качество подводных изображений, обусловленное неравномерной освещенностью, мутностью воды, возможными помехами в виде водорослей и обрастания объекта ракушками; занесение ПТП песком и скоплением мусора вдоль ПТП. Поэтому технологии, ориентированные, в частности, на распознавание и прослеживание подводных ПТП по видеоинформации, постоянно развиваются.

Как правило, алгоритмы распознавания ПТП основываются на поиске видимых границ ПТП. Сегментация является неотъемлемой частью обработки изображений, которая закладывает основу для последующего анализа изображения путем выделения на нем информационно значимых областей с различными

ми характеристиками [1]. Для выделения объектов на подводных снимках чаще всего используются градиентные методы: Кэнни-детектор [2], оператор Собеля [3], или кластерные – Отсу [4], К-средних [5]. Для поиска границ ПТП на бинарном изображении чаще всего применяют метод Хафа [6], реже фильтр частиц [7].

Во многих предлагаемых методах выделения границ объектов на изображениях успешно используется комбинация преобразования Хафа с детектором границ Кэнни. А в работе [8] был предложен модифицированный алгоритм Хафа в комбинации с методом Оцу для повышения вычислительной производительности при построении прямолинейных границ ПТП на изображении.

В статье [9] дается сравнительный анализ видеоориентированных систем, предназначенных для слежения за ПТП и кабелями, а обзор [10] охватывает наиболее часто используемые технологии подводных инспекций и мониторинга.

В основном в описываемых технологиях предлагаются методы определения границ ПТП и кабелей с применением преобразования Хафа. Однако применение этих методов в задачах инспекции ПТП не всегда эффективно по нескольким причинам:

- характерная трудоемкость вычислений препятствует обеспечению режима реального времени;
- ПТП может быть частично погружен в грунт (песок), в этом случае метод Хафа неприменим для выделения границ ПТП, поскольку они утрачивают прямолинейный характер;
- упомянутое выше низкое качество подводных изображений, обусловленное разными помехами, препятствует надежному распознаванию ПТП.

В предыдущих работах авторов настоящей статьи [11, 12] был описан альтернативный подход с обработкой видеoinформации, направленный на преодоление отмеченных трудностей. В настоящей работе предлагается дальнейшее развитие этого подхода в целях повышения его эффективности.

■ Постановка задачи

Решается задача автоматического прослеживания ПТП по стереоизображениям с использованием АНПА. Предполагается, что в процессе движения АНПА ведет видеосъемку ПТП с заданной частотой. Диаметр трубопровода известен. Траектория АНПА вычисляется с помощью авторского метода визуальной навигации (МВН) [13]. Поскольку побочным результатом работы МВН является генерация по стереопаре изображений 3D облака точек, этот ре-

зультат может использоваться в алгоритме распознавания трубопровода. Предполагается, что выход в район инспекции ПТП осуществляется штатными навигационными средствами АНПА, а первоначальная привязка к трубопроводу выполняется с помощью метода локального распознавания, основанного на вычислении осевой линии трубопровода, с использованием векторизованной формы подводных изображений [11]. А в [12] была предложена более эффективная в вычислительном отношении модификация метода слежения с критерием достоверности, использующим 3D облако точек. Вместе с тем результаты тестирования выявили необходимость и возможности повышения эффективности метода как в части повышения точности локализации ПТП, так и в части скорости вычислений. Поэтому в настоящей работе ставилась задача разработки модификации метода с лучшими показателями эффективности в сравнении с теми, которые были получены в указанных выше работах, за счет оптимизации вычислительной схемы.

■ Оптимизация метода отслеживания ПТП

Базовый вариант метода слежения

Локализация ПТП при отслеживании реализуется посредством вычисления осевой линии видимого камерой участка трубопровода в каждой текущей (расчетной) позиции траектории движения АНПА. Вычисленное положение ПТП в системе координат АНПА позволяет одновременно получить и все необходимые для управления параметры взаимного расположения АНПА и ПТП (отстояние от трубопровода, скорость приближения к нему и др.). Идея метода заключается в вариабельном поиске истинного положения осевой линии текущего участка ПТП с учетом знания о непрерывности осевой линии и вычисленном положении предыдущего участка. Тогда: а) начальная точка искомого участка осевой линии совмещается с концевой точкой предыдущего участка осевой линии; и б) выполняется итеративный поиск истинного положения осевой линии в пространстве углов в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Критерием достоверности при поиске истинного положения служит проверка принадлежности видимых 3D точек поверхности трубопровода. Принципиальная вычислительная схема выглядит следующим образом.

В каждой расчетной /текущей позиции:

1. Генерация 3D облака точек в процессе работы МВН.

2. Пересчет координат концевой точки осевой линии предыдущего участка в систему координат (СК) текущей позиции и совмещение с ней начальной точки осевой линии текущего участка.

3. Итеративный перебор вариантов положения осевой линии с заданным шагом и ограничением в угловом пространстве.

4. Применение критерия достоверности варианта.

5. Выбор наилучшего варианта.

Модификация метода

Предлагаемая модификация включает две позиции усовершенствования:

а) вместо жесткой привязки начальной точки текущего участка осевой линии ПТП к конечной точке предыдущего участка (см. п. 2 вычислительной схемы) осуществляется вариация координат начальной точки в малой окрестности точки совмещения. Данный подход позволяет повысить сходимость алгоритма на начальном этапе оптимизации, когда в качестве начального приближения выступает осевая линия, полученная методом векторизации изображения, а также снизить влияние погрешности в процессе генерации 3Д точек. Экспериментальным путем установлено, что оптимальный размер данной окрестности составляет 10 % от поперечного радиуса ПТП;

б) вместо «переборного» варианта (см. п.3 вычислительной схемы) реализуется метод оптимизации поиска на основе применения алгоритма Нелдера–Мида [14].

Минимизируется функция среднеквадратичного расстояния точек от поверхности ПТП:

$$RMSE = (d_i - R)^2,$$

где d_i – расстояние от точки до осевой линии ПТП, R – радиус ПТП. Здесь рассматриваются точки 3D облака, относящиеся к ПТП. Они находятся между двумя касательными плоскостями к ПТП. Как показали вычислительные эксперименты, схема с применением алгоритма Нелдера–Мида имеет существенное преимущество в скорости и точности перед «переборным» вариантом.

Заметим, что метод, по-прежнему сохраняет свойство «отсутствия накопления ошибки локализации ПТП» при прохождении по протяженной траектории.

Эксперименты

Вычислительные эксперименты по оценке эффективности предложенной модификации метода отслеживания ПТП были проведены на модельных данных.

Виртуальная сцена с подводным ПТП (с диаметром 60 см) и АНПА, оснащенного видеостереокамерой, была сгенерирована в среде программного моделирующего комплекса [15]. Траектория прохождения ПТП по морскому дну (с перепадом высот до 5м) включала в себя плавные повороты (и изгибы в вертикальной плоскости) и участки с частичным погружением трубопровода в песок. Радиус кривизны осевой линии трубопровода на разных участках варьировался от 300 м до 1000 м. Использовалась текстура реальной съемки морского дна. Эксперименты проводились на компьютере с характеристиками: Intel Core i7-1160G7 @ 1.20GHz (он рассматривается в качестве гипотетического бортового вычислителя АНПА).

На виртуальной сцене была получена последовательность стереоснимков ПТП длиной 600 м. При выполнении экспериментов оценивалась эффективность (точность и вычислительная производительность метода) предложенной модификации метода прослеживания ПТП в сравнении с базовым вариантом с учетом влияния настроечных параметров сцены и алгоритмов. А именно, учитывались:

- зависимость от геометрических характеристик сцены (геометрия траектории ПТП – прямолинейный характер или повороты/изгибы, высота прохождения АНПА над дном);
- зависимость от разрешения используемых снимков;
- влияние погрешности точек сгенерированного 3D облака в применяемом критерии принадлежности точек поверхности ПТП.

Результаты вычислительных экспериментов

В таблице приведены результаты тестирования (усредненные по всей траектории АНПА) по оценке эффективности (точность локализации ПТП, вычислительная производительность) предложенной модификации метода в сравнении с базовым вариантом в зависимости от высоты АНПА над трубопроводом и разрешения снимков. Поскольку в обеих модификациях применяется МВН, также приведена оценка вычислительной производительности метода МВН.

На рис.1, 2 показано распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП базовым и модифицированным методом при движении АНПА вдоль трубопровода на высоте 2 м для трех разрешений снимков: — 2400x1800, ..., 1800x1200, -- 1200x900. Для базового метода средняя погрешность составила: 5 мм для снимков 1200x900; 2,2 мм для 1800x1200; и 1,9 мм для 2400x1800 (рис. 1). Для модифицированного метода средняя погрешность составила соответ-

Сравнительная эффективность модификации метода с базовым вариантом

Высота АНПА над ПТП	Разрешение снимков	Метод визуальной навигации: скорость (fps)	Модифицированный метод: скорость (fps), погрешность (мм) (макс. ошибка (мм))		Базовый вариант: скорость (fps), погрешность(мм) (макс. ошибка (мм))	
1 м	1200×900	11.9	1142,4	0,8 (4,1)	205,7	3,6(10)
	1800×1200	4.6	777	0,6 (4)	54,4	1,5(4)
	2400×1800	1.6	369	0,4 (2,4)	8,5	1(2,9)
2 м	1200×900	11.5	1870	2,5 (7)	146,2	5(9)
	1800×1200	4.5	964	1,7 (4,7)	16,5	2,2(5,7)
	2400×1800	1.5	464	1 (3,2)	2,2	1,9(4,7)
3 м	1200×900	11.1	2210	6 (20)	77,8	6(34)
	1800×1200	4.4	1074,4	4 (9)	8,8	4(11)
	2400×1800	1.4	437	2,2 (5,7)	2,2	3,2(9)

ственно {2,5 / 1,7 / 1,0} мм для разрешений {1200×900 / 1800×1200 / 2400×1800} (рис.2).

А на рис. 3,4 показано распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП базовым и модифицированным методами при движении АНПА вдоль трубопровода на различных высотах для разрешения снимков 1800×1200. Для базового варианта средняя погрешность составила: 1,5 мм для 1м; 2,2 мм для 2 м; 4,3 мм для 3 м (рис. 3). Для модифицированного метода средняя погрешность составила соответственно {0,6 / 1,7 / 4,0} мм для высот {1 / 2 / 3} м (рис.4).

Как видно из таблицы, при всех комбинациях параметров (высота траектории АНПА над ПТП {1 м, 2 м, 3 м}; разрешение используемых снимков {1200×900, 1800×1200, 2400×1800} модифицированный метод значительно превосходит в эффективности базовый вариант.

Скорость работы модифицированного метода в несколько раз превышает скорость работы базового алгоритма за счет оптимизации поиска локального минимума. Количество итераций в среднем составля-

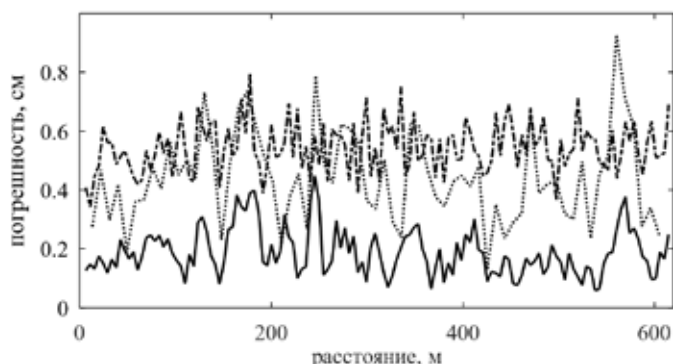


Рис. 1. Распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП базовым методом при движении АНПА вдоль трубопровода на высоте 2 м для трех разрешений снимков: — 2400×1800, 1800×1200, -- 1200×900

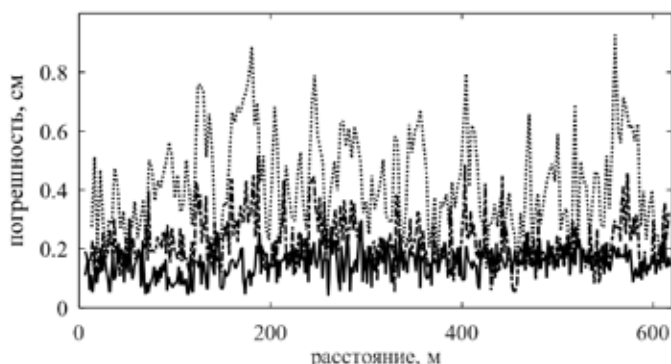


Рис. 3. Распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП базовым методом для разрешения снимков 1800×1200 при движении АНПА вдоль трубопровода на высотах: 3 м, -- 2 м, — 1 м

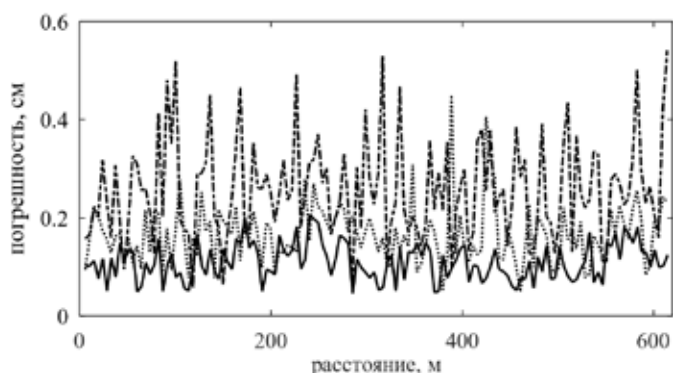


Рис. 2. Распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП модифицированным методом при движении АНПА вдоль трубопровода на высоте 2 м для трех разрешений снимков: — 2400×1800, 1800×1200, -- 1200×900

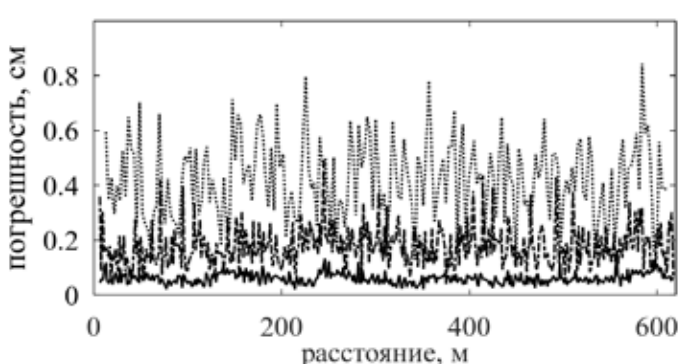


Рис. 4. Распределение погрешности вычисления осевой линии ПТП модифицированным методом для разрешения снимков 1800×1200 при движении АНПА вдоль трубопровода на высотах: 3 м, -- 2 м, — 1 м

ет 110 для Нелдера–Мида и не зависит от положения АНПА над ТП. Для базового алгоритма количество итераций зависит от шага дискретизации и варьируется от 800 на высоте 1 м до 12000 на высоте 3 м. Например, при разрешении снимков 1800x1200 для высот {1 м, 2 м, 3 м} скорость вычислений модифицированного метода выше базового соответственно {в 14 раз, в 58 раз, в 121 раз} (см. табл.). При этом чем выше разрешение снимков, тем больше преимущество модифицированного метода в скорости вычислений. При этом более высокое разрешение обеспечивает более высокую точность.

Количество обрабатываемых 3D точек зависит от области, которую ПТП занимает на снимках. Чем ближе АНПА к ПТП, тем точек больше, что увеличивает время вычисления на каждом шаге для малых высот. Поэтому модифицированный метод работает быстрее на большой высоте.

На рис. 5, 6 демонстрируется влияние кривизны ПТП на погрешность вычисления его осевой линии. Увеличение погрешности на криволинейных участках объясняется тем, что метод вычисления осевой

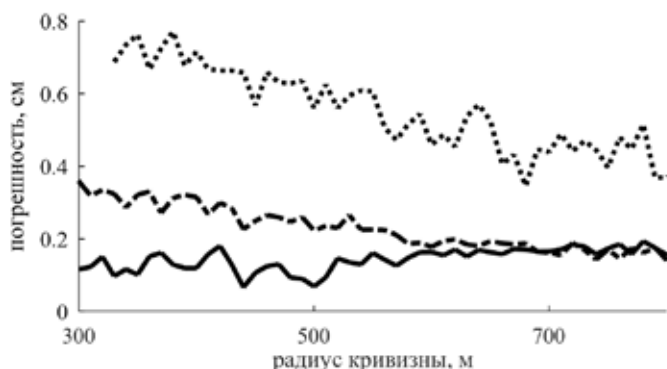


Рис 5. Погрешность вычисления осевой линии ПТП базовым методом в зависимости от изменения радиуса кривизны трубопровода. Для высот АНПА ... 3 м, -- 2 м, — 1 м. Разрешение снимков 1800x1200

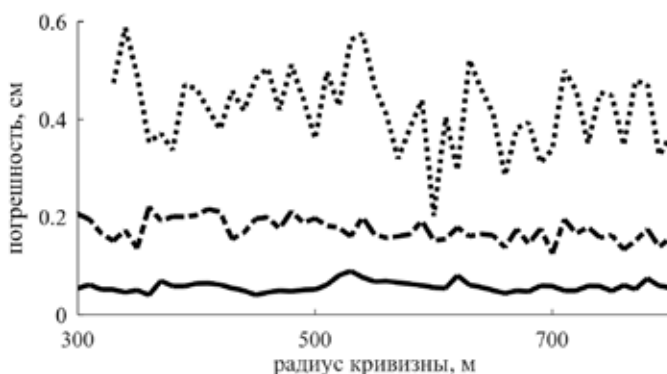


Рис 6. Погрешность вычисления осевой линии ПТП модифицированным методом в зависимости от изменения радиуса кривизны трубопровода. Для высот АНПА ... 3 м, -- 2 м, — 1 м. Разрешение снимков 1800x1200

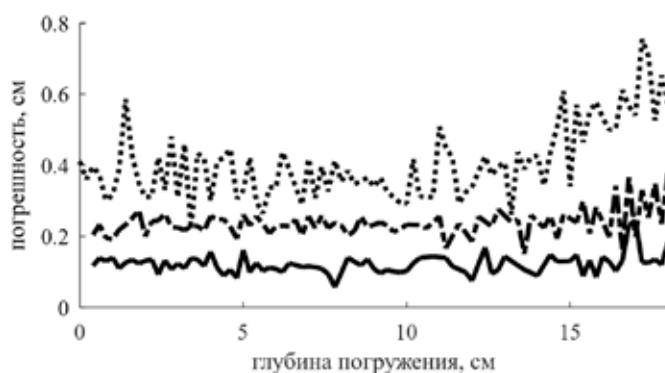


Рис 7. Погрешность вычисления осевой линии ПТП базовым методом в зависимости от степени заиливания трубопровода. Для высот АНПА ... 3 м, -- 2 м, — 1 м. Разрешение снимков 1800x1200

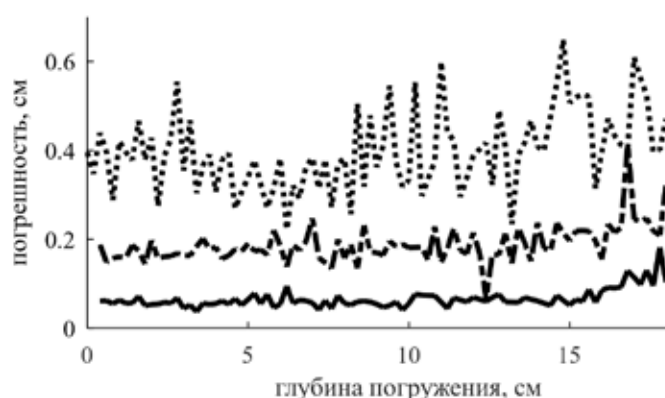


Рис 8. Погрешность вычисления осевой линии ПТП модифицированным методом в зависимости от степени заиливания трубопровода. Для высот АНПА ... 3 м, -- 2 м, — 1 м. Разрешение снимков 1800x1200.

линии основывается на предположении прямолинейности видимых камерой участков трубопровода (например, длина видимого вычисляемого участка при высоте камеры 3 м равна 4 м). Кривизна за счет поворотов / изгибов на таких коротких участках незначительная, но влияет на точность вычисления осевой линии. Для базового метода (рис. 5) увеличение погрешности при увеличении кривизны проявляется наглядным образом для высот АНПА 2 м и 3 м. Это объясняется тем, что на большой высоте видимый участок осевой линии становится длиннее и кривизна проявляется сильнее. Для модифицированного метода влияние кривизны сглаживается благодаря варьированию обеих конечных точек текущего участка осевой линии (в базовом методе варьируется только конечная точка участка) (рис. 6).

На рис. 7 и 8 представлена зависимость погрешности вычисления осевой линии от степени заиливания ПТП. Установлено, что погружение трубопровода в ил на 75 % не оказывает влияния на точность определения осевой линии обоими рассматриваемыми методами. В отличие от методов, основанных на вы-

делении видимых границ ПТП (например, Хафа или Кэни), которые характеризуются высокой погрешностью при определении вертикального положения осевой линии, методы, использующие трёхмерное облако точек, обеспечивают надёжное обнаружение объекта при выступании ПТП над поверхностью дна всего на 25 %.

Заключение

Выполнено исследование по оптимизации ранее разработанного авторами метода прослеживания

ПТП по стереоснимкам с использованием АНПА. Результаты тестирования на модельных данных показали преимущество в точности и в вычислительной скорости разработанной модификации метода прослеживания ПТП в сравнении с базовым вариантом. Также была подтверждена работоспособность метода в ситуациях заиливания ПТП. В ближайшей перспективе планируется тестирование метода с оценкой эффективности на реальных данных.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы ИАПУ ДВО РАН № FFW-2026-0008.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yu Y. et al. Techniques and Challenges of Image Segmentation: A Review // *Electronics*. 2023. No. 12(5). P. 1199. <https://doi.org/10.3390/electronics12051199>
2. Canny J.F. A Computational Approach to Edge Detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. 8. P. 679–698.
3. Kanopoulos N., Vasanthava N., Baker R.L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1988. Vol. 23(2). P. 358–367.
4. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. Vol. 9, No. 1. P. 62–66.
5. Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // *Bull. Acad. Polon. Sci.* 1956. Vol. 4. P. 801–804. (in French).
6. Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // *Communications of the ACM*. 1972. Vol. 15(1). P. 11–15.
7. Elfring J., Torta E., van de Molengraft R. Particle Filters: A Hands-On Tutorial // *Sensors*. 2021. Vol. 21(2). P. 438.
8. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. Vol. 11(10).
9. Alex Raj S.M., Abraham R.M., Supriya M.H. Vision-Based Underwater Cable/Pipeline Tracking Algorithms in AUVs: A Comparative Study // *Int. J. Eng. Adv. Technol. (IJEAT)*. 2016. Vol. 5. P. 48–52.
10. Ho M., El-Borgi S., Patil D., Song G. Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper // *Review. Structural Health Monitoring*. 2020. Vol. 19(2). P. 606–645.
11. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. Vol. 11(10).
12. Бобков В.А., Шупикова А.А. Метод слежения за подводным трубопроводом по стереоизображениям с использованием автономного подводного аппарата // *Информационные технологии*. 2024. № 10. С. 528–536.
13. Bobkov V.A., Kudryashov A.P., Inzartsev A.V. Technology of AUV High-Precision Referencing to Inspected Object // *Gyroscopy and Navigation*. 2019. Vol. 10, No. 4. P. 322–329. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040060>.
14. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // *Computer Journal*. 1965. Vol. 7 (4). P. 308–313.
15. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // *Proc. of the OCEANS'15 MTS/IEEE Washington DC*. October 19–22, 2015. ISBN DVD:978-0-933957-43-5.

Сведения об авторах

БОБКОВ Валерий Александрович, доктор технических наук, главный научный сотрудник
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
Почтовый адрес: 690041 Владивосток, ул. Радио, 5, к 408
Область научных интересов: Компьютерная графика, Машинное зрение, Автономные подводные аппараты
Тел.: 89147967295
E-mail: bobkov@dvo.ru
ORCID: 0000-0001-9722-5158

ШУПИКОВА Антонина Аркадьевна, ведущий инженер-программист
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
Почтовый адрес: 690041 Владивосток, ул. Радио, 5, к 408
Область научных интересов: Компьютерная графика, Машинное зрение, Автономные подводные аппараты
Тел.: (+74232)313776
E-mail: antoninash@inbox.ru
ORCID: 0000-0003-4308-9191



Для цитирования:

Бобков В.А., Шупикова А.А. ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОСЛЕЖИВАНИЯ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА ПО СТЕРЕОСНИМКАМ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 43–49. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_05. EDN: DPUWAX.

OPTIMIZED UNDERWATER TRACKING METHOD PIPELINE BASED ON STEREO IMAGES

V.A. Bobkov, A.A. Shupikova

The problem of automatic tracking of an underwater pipeline (UP) from stereo images using an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUV) is considered. It is noted that traditional methods of boundary recognition on vectorized images are often ineffective in an underwater environment due to poor image quality, partial immersion of the pipeline in the ground, and high computational complexity. A modification of the method previously developed by the authors for calculating the centerline of UP based on the generation of a 3D point cloud is proposed, which includes two improvements: varying the starting point of the current section of the centerline in a small neighborhood to reduce the error and replacing the complete enumeration of angular positions with optimization using the Nelder–Meade algorithm. The experiments were carried out on model data in a virtual environment with a realistic seabed texture at different image resolutions, the heights of the AUV movement and the degree of siltation of the UP. It is shown that the modified method provides higher accuracy of localization of the centerline and significantly exceeds the basic version in computational performance. It has been established that the method remains operational when the pipeline is silted, and is also resistant to the curvature of the route. In conclusion, it is noted that further research will be aimed at testing the method on real data.

References

1. Yu Y. et al. Techniques and Challenges of Image Segmentation: A Review // *Electronics*. 2023. No. 12(5). P. 1199. <https://doi.org/10.3390/electronics12051199>
2. Canny J.F. A Computational Approach to Edge Detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. 8. P. 679–698.
3. Kanopoulos N., Vasanthavada N., Baker R.L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1988. Vol. 23(2). P. 358–367.
4. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. Vol. 9, No. 1. P. 62–66.
5. Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // *Bull. Acad. Polon. Sci.* 1956. Vol. 4. P. 801–804. (in French).
6. Duda R.O., Hart P.E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures // *Communications of the ACM*. 1972. Vol. 15(1). P. 11–15.
7. Elfring J., Torta E., van de Molengraft R. Particle Filters: A Hands-On Tutorial // *Sensors*. 2021. Vol. 21(2). P. 438.
8. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. Vol. 11(10).
9. Alex Raj S.M., Abraham R.M., Supriya M.H. Vision-Based Underwater Cable/Pipeline Tracking Algorithms in AUVs: A Comparative Study // *Int. J. Eng. Adv. Technol. (IJEAT)*. 2016. Vol. 5. P. 48–52.
10. Ho M., El-Borgi S., Patil D., Song G. Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper // *Review. Structural Health Monitoring*. 2020. Vol. 19(2). P. 606–645.
11. Bobkov V., Shupikova A., Inzartsev A. Recognition and Tracking of an Underwater Pipeline from Stereo Images during AUV-Based Inspection. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. Vol. 11(10)
12. Bobkov V.A., Shupikova A.A. A method for tracking an underwater pipeline from stereo images using an autonomous underwater vehicle. *Informacionnye Tehnologii*. 2024. Vol. 30. No. 10. P. 528–536. doi:10.17587/it.30.528-536

13. Bobkov V.A., Kudryashov A.P., Inzartsev A.V. Technology of AUV High-Precision Referencing to Inspected Object // *Gyroscopy and Navigation*. 2019. Vol. 10, No. 4. P. 322–329. <https://doi.org/10.1134/S2075108719040060>.

14. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // *Computer Journal*. 1965. Vol. 7 (4). P. 308–313.

15. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' Real-Time Behavior // *Proc. of the OCEANS'15 MTS/IEEE Washington DC*. October 19–22, 2015. ISBN DVD:978-0-933957-43-5.

Information about the authors

BOBKOV Valery Alexandrovich, д-р техн. наук, глав. науч. сотр. Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences

Work address: Russia, Vladivostok, st. Radio 5

Research Interests: computer graphics, computer vision, image processing and pattern recognition

E-mail: bobkov@iacp.dvo.ru

Тел. паб.: (+74232)313776

ORCID: 0000-0001-9722-5158

SHUPIKOVA Antonina Arkadyevna, вед. инженер-программист, Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences

Work address: Russia, Vladivostok, st. Radio 5

Research Interests: computer graphics, computer vision, image processing and pattern recognition

E-mail: antoninash@inbox.ru

Тел. паб.: (+74232)313776,

ORCID: 0000-0003-4308-9191