АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ 3D ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Б.А. Скороход, П.В. Жиялков, А.В. Стаценко, С.И. Фатеев

Севастопольский государственный университет,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: boris.skorohod@mail.ru, yany@mail.ru, lex00x1@mail.ru, fateev-si@ya.ru

В настоящее время ведутся интенсивные исследования, направленные на разработку удаленно управляемых и автономных подводных роботов, использующих системы технического зрения. Типичными примерами задач, решаемых с помощью них, являются: мониторинг окружающей среды; обнаружение объектов и препятствий; сближение робота с объектом; выполнение операций с предметами. В статье рассматриваются задачи построения изображений рабочего пространства подводного робота, предназначенного для выполнения операций с предметами по информации, поступающей со стереокамеры. Предложены и тестированы на реальных данных робастные алгоритмы построения 3D изображений рабочего пространства робота, основанные на перспективной модели камер и использовании методов триангуляции и кластеризации. В алгоритмах обработки изображений учитывается присутствие водонепроницаемой оболочки.

Ключевые слова: подводные роботы, стереозрение, перспективная модель камеры, 3D реконструкция рабочего пространства подводного робота, кластеризация.

Поступила в редакцию: 15.06.2020. После доработки: 22.11.2020.

Введение. Типичными примерами задач, решаемых с помощью подводных робототехнических комплексов (РТК), являются: мониторинг окружающей среды; обнаружение объектов и препятствий, их локализация; сближение РТК с объектом; выполнение операций с предметами. Для решения подобных задач с помощью системы технического зрения (СТЗ) необходима 3D реконструкция рабочего пространства (РП) РТК с последующей классификацией объектов на изображении, их видеосопровождением, оцениванием положения, скорости и ориентации [1, 2].

Известно, что непосредственное использование в подводных условиях алгоритмов стереозрения, применяемых в воздушной среде, может вызывать серьезные трудности [3, 4]. Так, изменчивость подводного окружения и специфика передачи и приема сигналов под водой существенно осложняют разработку алгоритмов обработки изображений. Помимо физических особенностей подводной среды, необходим учет технической реализации самой СТЗ РТК. Это связано с тем, что стереокамера должна находиться в водонепроницаемой оболочке, заполненной воздухом со стек-

лянным интерфейсом. Использование такой конструкции приводит к рефракции сначала в интерфейсе вода-стекло и затем в интерфейсе стекло-воздух и как следствие к искажению, получаемых изображений. Еще одна проблема приобретает особое значение при разработке СТЗ подводного робота, ориентированного на работу с предметами. Имеются в виду ограниченные возможности анализа точности построения 3D координат объектов интереса из-за сложности организации и проведения контролируемых экспериментов в подводной среде [5].

В этой статье предлагаются алгоритмы построения 3D изображений рабочего пространства подводного робота, ориентированного на работу с предметами, по информации, поступающей с установленной на нём стереокамеры. Наш подход опирается на подводную калибровку камер, оценку центров изображений камер с учетом водонепроницаемой оболочки, выбор алгоритмов предобработки, ключевых точек изображений и триангуляцию с использованием кластеризации для придания робастности алгоритмам.

Постановка задачи. Предполагается, что подводный робот оснащен стереокамерой, описание характеристик которой приведено в предыдущей нашей публикации [6].

Нас будет интересовать задача построения 3D изображений РП робота, решение которой включает следующие этапы:

- подводная калибровка камер с определением их внутренних и внешних параметров;
- определение центров изображений камер с учетом параметров воздушного зазора и стеклянного интерфейса;
- предобработка полученных 2D изображений;
- построение 3D координат объектов с помощью триангуляции и оценка их точности;
- кластеризация РП робота.

Вопросы подводной калибровки, предобработки, определение центров изображений перспективных моделей камер с учетом водонепроницаемой оболочки были подробно рассмотрены в [6], а особенности построения ключевых точек подводных изображений рассматривались в [7]. С учетом этого, они далее не обсуждаются. Верификация разработанных алгоритмов проводилась в аквариуме и бассейне для ближней и дальней зон РП РТК, соответственно до 1,5 м и 5 м.

Оценка 3D координат объектов в РП робота. Разработаны два робастных алгоритма построения 3D изображений РП робота, основанные на использовании известных подходов в стереозрении [8, 9]. Оба алгоритма позволяют контролировать процесс выполнения различного рода операций удаленно управляемым роботом, используя поступающую информацию о его РП. Первый алгоритм (алгоритм разряженного стереозрения (АРС)) находит 3D координаты только пикселей, определенных детектором на обоих изображениях в качестве сопряженных ключевых точек. Второй (алгоритм плотного стереозрения (АПС)) – определяет 3D координаты пикселей принадлежащих некоторой окрестности ключевых точек. На вход алгоритмов

подаются изображения I_1, I_2 стереопары после предобработки, калибровки и координаты центров изображений камер, которые содержат всю необходимую информацию для построения проективной модели камеры.

Для построения 3D координат точек АРС использует представление:

$$\begin{cases} ux_1 = K_1[R_1|t_1] \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} = P_1 \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} \\ vx_2 = K_2[R_2|t_2] \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} = P_2 \begin{pmatrix} X \\ 1 \end{pmatrix} \end{cases},$$

где x_1, x_2 – однородные координаты проекций на левое и правое изображение стереопары некоторой пространственной точки X , $K_1, K_2, R_1, R_2, t_1, t_2$ – матрицы внутренних параметров камер, матриц вращений и смещений; P_1, P_2 – матрицы проекций левой и правой камер; u, v – положительные действительные числа, представляющие проекции глубины X левой и правой камер.

Так как начало абсолютной системы координат связано с левой камерой стереокамеры, то матрица перехода $[R_1|t_1]$ имеет вид:

$$[R_1|t_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

а матрица $[R_2|t_2]$ – задает положение правой камеры в пространстве относительно левой камеры.

АРС включает следующую последовательность операций:

- поиск, и получение ключевых пар особых точек на изображениях стереопары, принадлежащих объекту;
- определение 3D координат точек по координатам их проекций;
- выделение РП робота и кластеризация объектов.

Для поиска особых точек использовался алгоритм KAZE, позволяющий обнаруживать большее количество особых точек на подводных изображениях по сравнению с другими известными алгоритмами [7]. Для постобработки, полученных данных, может быть использована процедура, описанная в [10].

На вход АПС, в отличие от АРС, подаются ректифицированные изображения стереопары. АПС включает следующую последовательность операций:

- построение карты диспаратности;
- построение 3D координат точек РП с помощью карты диспаратности;
- выделение РП робота и кластеризация объектов.

Были тестированы два алгоритма для нахождения диспаратности. Это быстрый и простой классический алгоритм и полуглобальный [9]. Алгоритмы находят степень соответствия блоков (обычно квадратных) в левом и правом изображениях. Соответствия ищутся вдоль горизонтальных линий и соответствующим блоком является блок с наиболее высокой степенью схожести. Мера схожести сама по себе оказывает влияние на вычислительную сложность и качество соответствий. В случае первого алгоритма мера задается суммой абсолютных разностей (Sum of Absolut Differences (SAD)). Т.е., для заданной пары квадратных блоков пикселей A и B , оба размером $n \times n$

$$SAD(A, B) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} - b_{ij}|.$$

Полуглобальный алгоритм использует взаимную энтропию в качестве меры сходства, которая определяется выражением

$$E(D) = \sum_p C(P, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_2 T\{|D_p - D_q| = 1\} + \sum_{q \in N_p} P_2 T\{|D_p - D_q| > 1\}.$$

Здесь первое слагаемое есть сумма всех значений критерия соответствия пикселей по всему изображению D . Второй член добавляет слагаемое с множителем P_1 для всех пикселей q в окрестности N_p пикселей p для которых изменения диспаратности есть максимум 1 пиксел. Третий член добавляет слагаемое с множителем P_2 для которых она превышает 1. На имеющихся экспериментальных данных было обнаружено,

что SAD алгоритм заметно уступает по точности полуглобальному алгоритму.

Робастность обоих алгоритмов достигалась выбором их параметров, аккуратной подводной калибровкой, фильтрацией помех с помощью предобработки и кластеризацией 3D точек. В качестве алгоритмов кластеризации использовались алгоритм связанных компонент (СК) [11] и DBSCAN алгоритм [12], которые, не требуют предварительного назначения количества кластеров и позволяющие отсеивать точки, интерпретируемые как шум.

Для задач, решаемых подводным РТК, когда вычислительные ресурсы ограничены и требуется быстрая реакция на изменение РП, важным является использование алгоритмов, эффективных в вычислительном плане. С этой точки зрения более приемлемым представляется АРС, позволяющий достаточно быстро получать информацию, когда детали самого объекта не столь важны. Алгоритм фокусируется на основных характеристиках изображения, оставляя скрытыми слабо покрытые особыми точками области изображения. Кроме того, точность оценки глубины изображения,

полученная с помощью АПС, может быть меньше из-за операций осреднения, выполняемых при определении матрицы диспаратности. Вместе с тем, для задач, где требуется более детальная характеристика 3D РП или время построения не критично (например, для квазистатических сцен), использование АПС может оказаться более предпочтительным.

Экспериментальное исследование свойств АРС и АПС было выполнено для специально подготовленной сцены, показанной на рис.1, включающей аналогии объектов подводной инфраструктуры, созданной человеком. Предполагаются известными расстояния объектов по координате Z , измеренного от внутренней стенки аквариума линейкой. Сделаем некоторые замечания относительно полученных результатов. Прежде всего остановимся на анализе точности определения глубины изображения – расстояния по оси Z от полюса левой камеры до объектов, расположенных в

аквариуме. Для оценки результатов работы алгоритмов брались ближайшие точки, принадлежащие объектам (рис. 2, 3). Измеренные расстояния и их оценки, скорректированные с учетом оценки медианы 27,7 мм (расстояния от полюса до внутренней стенки аквариума), полученной в [6] показаны в табл. 1.

Отметим следующее. Во-первых, АРС позволяет оценивать расстояние до объектов более точно в сравнении с АПС, причем для всех рассмотренных объектов. С учетом сделанного ранее замечания это ожидаемый результат. Во-

вторых, ошибка в определении расстояния АРС возрастает по мере удаления объекта от стереокамеры: от 1 мм для красного шара до 12 мм на границе рабочей зоны в 130 см, где располагается желтый конус. Вместе с тем, полученные значения ошибок превышают соответствующие значения ошибок, полученных с использованием эталонного образца, в [6]. Мы объясняем это тем, что точность определения особых точек и, как следствие, точность триангуляции выше для эталона, благодаря особым требованиям, предъявляемым к его конструкции.

Рис. 1. Исходные изображения левой и правой камер
Fig. 1. Source images of the left and right cameras

Рис. 2. Изображения 3D рабочего пространства после кластеризации
Fig. 2. 3D images of the workspace after clusterization

Рис. 3. Вывод результатов на экран оператора
Fig. 3. The output of results to the operator screen

Таблица 1. Точность оценки расстояния до объектов

Объекты	Измерен- ные значения Z (мм)	Оценки Z (АПС) (мм)	Оценки Z (АРС) (мм)	Ошибка δZ (АПС) (мм)	Ошибка δZ (АРС) (мм)
Шар	250	280	279	2	1
Красный куб	400	435	432	7	4
Зеленый параллелепипед	600	635	634	7	6
Шестигранник	750	783	780	5	2
Синий параллелепипед	1000	1036	1035	8	7
Черный куб	1150	1189	1185	11	7
Желтый конус	1300	1347	1340	19	12
Серый цилиндр	1420	1463	1459	15	11

Анализ точности алгоритмов был выполнен также при различных уровнях освещенности РП робота. Изображениям, показанным на рис. 4, соответствуют следующие условия проведения экспериментов: (а) – аквариум открыт и включены две лампы (+ Солнце); (б) – включен внешний свет и открыта крышка аквариума, солнца нет; (в) – включен

внешний свет, крышка закрыта, солнца нет; (г) – аквариум закрыт и включена одна лампа. Результаты обработки приведены в табл. 2. Видно, что алгоритмы позволяют получить близкие по точности координаты 3D сцены для всех вариантов освещения, а погрешность по Z не превышает 15 мм.

Рис. 4. Подводная сцена при различной освещенности
Fig. 4. The underwater scene with different lighting conditions

Таблица 2. Точность оценки расстояния до объектов

Объект	Z, мм	Ошибка δZ мм							
		АРС				АПС			
		(а)	(б)	(в)	(г)	(а)	(б)	(в)	(г)
Красный шар	250	4	9	4	4	9	8	6	3
Красный куб	400	6	6	7	11	5	6	10	—
Параллелепипед	600	3	4	3	4	4	5	—	—
Шестигранник	750	2	3	4	—	-1	-1	-1	0
Параллелепипед	1000	4	2	16	4	2	2	5	6
Черный куб	1150	1	-2	—	—	0	0	0	—
Конус	1300	13	11	10	—	13	12	14	15

Для оценки точности работы алгоритмов в дальней зоне РП РТК был проведен эксперимент в бассейне. Полученные изображения левой камерой показаны на рис. 5, а, б. В качестве объекта интереса рассматривался эталонный объект – шахматная доска с квадратами 4×4 см. Цель эксперимента – оценить точность определения расстояния (по оси Z) от полюса левой камеры до объекта, расположенного на периферии рабочего пространства и подтвердить воз-

можность обнаруживать объекты с линейными размерами более 0,03 м. На рис. 6 а, б показаны результаты построения 3D изображения для расстояний 4 и 5 м, соответственно. Видно, что с учетом корректировки медианой 2,77 см ошибка составляет порядка 2,6 см для дальности 4 м и 5,9 см для дальности 5 м. Кроме того, клетки шахматной доски 4×4 см без труда обнаруживаются визуально после 3D реконструкции сцены для обоих изображений.

Рис. 5. Изображение эталонного объекта на а) расстоянии 4 м, б) расстоянии 5 м
Fig. 5. The image of the reference object at a) distance of 4 m, b) distance of 5 m

Рис. 6. Реконструированное 3D изображение: а) дальность 4 м, б) дальность 5 м
Fig. 6. Reconstructed 3D image: a) range of 4 m, b) range of 5 m

Использование априорной информации о подводных объектах для их идентификации. Оценка параметров объектов, имеющих достаточно простую форму (такие предметы принято называть примитивами), является одним из важных направлений в робототехнике. В качестве примитивов обычно рассматривают цилиндры, сферы, плоскости, конусы и т.п. Наш подход состоит в последовательном использовании АПС (или APC), и одного из алгоритмов кластеризации DBSCAN [12], СК [11], K-средних++ [13] для достаточно грубого выделения примитивов и аппроксимации каждого из построенных кластеров наиболее подходящей моделью с помощью робастного алгоритма MLESAC [14].

На рис. 7 показано изображение специально подготовленной подводной сцены для тестирования алгоритмов.

Рис. 7. Исходное изображение левой камеры
Fig. 7. The original image of the left camera

Объектами интереса являются: сфера диаметром 5 см, расположенная на расстоянии 35 см; цилиндр с диаметром основания 4 см на расстоянии 40 см; прямоугольная плоскость со сторонами 42x12,5 см примерно на расстоянии 100 см. Результаты моделирования при-

ведены на рис. 8 и в табл. 3. Видно, что оценки соответствующих параметров тремя алгоритмами практически не различаются. Ошибка в определении контролируемых параметров радиусов цилиндра и шара не превысила 16,5 и 5% соответственно.

Рис. 8. Результат кластеризации объектов с помощью алгоритма DBSCAN: а) 3D изображение с выделенными объектами, б) выделенная плоскость, в) выделенный цилиндр, г) выделенный шар
Fig. 8. The result of objects clusterization by the DBSCAN algorithm: a) 3D image with selected objects, b) selected plane, c) selected cylinder, d) selected ball

Таблица 3. Параметры моделей объектов

Результат работы алгоритма	DBSCAN	Kmeans++	СК
Центр цилиндра, м	(0.107, 0.064, 0.297)	(0.104,0.062,0.392)	(0.102,0.056,0.3)
Радиус цилиндра, м	0.0167	0.0179	0.0191
Центр сферы, м	(0.11, 0.06, 0.31)	(0.111,0.06,0.308)	(0.111,0.062,0.307)
Радиус сферы, м	0.0263	0.0271	0.0267
Время работы, с	3.53	3.5	0.43

Заключение. Основные результаты, полученные в этой статье, состоят в следующем. Разработаны два робастных алгоритма построения 3D изображений рабочего пространства подводного робота, по информации, поступающей со стереокамеры, установленной на нем. Алгоритмы основаны на перспективной модели камер и совместном использовании методов триангуляции и кластеризации. Робастность обоих алгоритмов достигается выбором их параметров, аккуратной подводной калибровкой, фильтрацией помех с помощью предобработки и кластеризацией 3D точек. Проведенные экспериментальные исследования показали, что ошибка по глубине при построении 3D изображения не превышает 1,6 см и 6 см для ближней и дальней зон рабочего пространства робота (до 1,5 м и 5 м, соответственно).

Исследования выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (соглашение № 14.578.21.0264, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57818X0264).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dario L., Kallasi F., Aleotti J., Oleari F. and Caselli S. Underwater vehicle for pipe manipulation tasks // Computers & Electrical Engineering. 2017. Vol. 58 February. P. 560–571.
2. Bonin F., Burguera A., Oliver G. Imaging Systems for Advanced Underwater //

Vehicles Journal of Maritime Research. 2011. Vol. VIII (1). P. 65–86.

3. Долин Л.С., Левин И.М. Теория подводной видимости // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 2. С. 22–35.

4. Schechner Y., Karpel N. Clear underwater vision // In Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Washington, DC, USA, 27 June–2 July 2004. P. 536–543.

5. Drap P., Seinturier J., Scaradozzi D. Photogrammetry for virtual exploration of underwater archeological sites // In Proceedings of the 21st International Symposium, CIPA 2007: AntiCIPAting the Future of the Cultural Past, Athens, Greece, 1–6 October 2007. P. 1–6.

6. Анализ точности построения 3d координат рабочего пространства подводного робота / Б.А. Скороход, П.С. Жиликов, А.В. Стаценко [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3 (41). С. 163–170.

7. Скороход Б.А., Стаценко А.В., Фатеев С.И. Влияние предобработки и алгоритмов выбора ключевых точек в задаче одновременной 3d реконструкции подводных объектов и построения траектории движения камеры // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 2 (36). С. 30–36.

8. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2003. Computers. 655 p.

9. *Szeliski R.* Computer Vision. Springer, 2010. 655 p.

10. *Стаценко А.В., Фатеев С.И.* Программа нахождения пар соответствующих точек на подводных изображениях // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663217. Заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет (RU). № 2019661991; Оpubл. 11.10.2019. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

11. *Воронцов К.В.* Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования. М.: МГУ, 2007.

12. *Ester M.* A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large

Spatial Databases with Noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // Third AAAI Conference on Human Computation and Crowdsourcing. 2015.

13. *Arthur D., Vassilvitskii S.* k-means++: The Advantages of Careful Seeding // SODA '07: Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. New Orleans, LA, January 2007. P. 1027–1035.

14. *Torr P.H.S., Zisserman A.* MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry // Computer Vision and Image Understanding. 2000.

ALGORITHMS FOR CONSTRUCTING 3D IMAGES OF OBJECTS IN PROBLEMS OF UNDERWATER ROBOTICS

B.A. Skorohod, P.V. Zhiyakov, A.V. Statsenko, S.I. Fateev

Sevastopol State University,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

Currently, intensive research is underway to develop remotely controlled and autonomous underwater robots that use technical vision systems. Typical examples of tasks that can be solved using them are: monitoring the environment; detecting objects and obstacles; approaching the robot with an object; performing operations with objects. The article focuses on the problems of constructing images of the working space of an underwater robot designed to perform operations with objects based on information received from a stereo camera. Robust algorithms for constructing 3D images of the robot's workspace based on a perspective camera model and using triangulation and clustering methods are proposed and tested on real data. Image processing algorithms take into account the presence of a waterproof shell.

Keywords: underwater robots, stereo vision, perspective camera model, 3D reconstruction of the working space of an underwater robot, clustering.