АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ 3D КООРДИНАТ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПОДВОДНОГО РОБОТА

Б.А. Скороход, П.В. Жилияков, 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 этой статье предложен новый подход к анализу точности построения 3D координат рабочего пространства подводного робота. Важной его особенностью является возможность оценивать влияние всех источников возмущений в совокупности, включая конструкцию водонепроницаемой оболочки, опираясь только на экспериментальные данные, полученные в подводной среде. Кроме того, в рамках этого же подхода могут быть получены оценки положения центров изображений камер, позволяющие учесть, для повышения точности в алгоритмах обработки изображений, присутствие водонепроницаемой оболочки. Предложенный подход был тестирован на реальных данных.

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

Поступила в редакцию: 02.06.2020. После доработки: 07.08.2020.

Введение. Известно, что непосредственное использование в подводных условиях алгоритмов стереозрения, применяемых в воздушной среде, может вызывать серьезные трудности [1, 2]. 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 системы технического зрения (СТЗ) робототехнического комплекса (РТК). Изображения камер и объектива показаны на рис 1. Это связано с тем, что стереокамера должна находиться в водонепроницаемой оболочке, заполненной воздухом со стеклянным 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.

В этой статье предложен новый подход к анализу точности построения 3D координат рабочего пространства подводного робота. Наш подход опирается на подводную градуировку камер, оценку центров изображений камер с учетом водонепроницаемой оболочки. Мы используем статистический подход, позво-

ляющий оценить влияние всех в совокупности источников возмущений (как аппаратных, так и программных) опираясь только на экспериментальные данные. В отличие от [3, 4], мы показываем, как получить распределение ошибки, используя измеренные значения градуировочного образца и полученные триангуляцией в подводных условиях. Это дает возможность одновременно оценить систематическую ошибку и характеристики распределения случайной составляющей ошибки восстановления 3D координат рабочего пространства (РП).

Постановка задачи. Предполагается, что подводный робот оснащен стереокамерой, которая включает в себя две камеры Basler acA1920-50gc, жестко закрепленные параллельно относительно друг друга со стереобазой длиной 10 см (рис. 1). Камеры имеют интерфейс GigE с матрицей Sony IMX174 CMOS, частоту 50 кадров в секунду при разрешении 2,3 мегапикселя, размер сенсора 11,3 мм x 7,1 мм, Full HD, идентичные объективы TS0814-MP F1.4 f 8 мм 1" с фиксированным фокусным расстоянием 8 мм и апертурой F1.4-F16. Предполагается также, что стеклянный интерфейс водонепроницаемой оболочки стереокамеры плоский.

Рис. 1. Стереокамера
Fig. 1. The stereo camera

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

- подводная градуировка 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.

Вопросы предобработки и построения ключевых точек подводных изображений рассматривались в [5]. С учетом этого, они далее не обсуждаются. Верификация разработанных алгоритмов проводится в аквариуме, показанном на рис. 2.

Рис. 2. Аквариум
Fig. 2. The aquarium

Градуировка стереокамеры в подводных условиях. На рис. 3 показана геометрия, используемая при построении перспективной модели камеры. Здесь C – центр изображения, p – главная точка изображения, f – фокусное расстояние, $Z = f$ – плоскость изображения, перпендикулярная главной опти-

ческой оси, x – точка в 3D пространстве, $CX_wY_wZ_w$ – системы координат камеры и p_xu – системы координат изображения.

Рис. 3. Геометрия перспективной модели камеры

Fig. 3. The geometry of the perspective camera model

С учетом рис. 3 точка $x = (X, Y, Z)^T$, заданная в системе координат камеры, отображается в точку $x = (x, y)^T$ изображения, заданную в его координатной системе с помощью выражения

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = KR \begin{pmatrix} \frac{X}{Z} \\ \frac{Y}{Z} \\ 1 \end{pmatrix} + KT,$$

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где K – матрица камеры, c_x , c_y – координаты главной точки относительно начала координат камеры, R – матрица, описывающая поворот системы координат камеры относительно абсолютной системы координат, T – вектор смещения начала абсолютной системы координат относительно системы координат камеры.

Для описания радиальных (x_r, y_r) и тангенциальных (x_t, y_t) искажений, позволяющих учесть влияние нелинейной оптики, мы используем выражения [6]

$$\begin{aligned} x_r &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6), \\ y_r &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6), \\ x_t &= x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)], \\ y_t &= y + [2p_2xy + p_1(r^2 + 2y^2)], \end{aligned}$$

где x, y – неискаженные положения пикселей в нормализованных координатах изображения, k_1, k_2, k_3 – коэффициенты радиального искажения, p_1, p_2 – коэффициенты тангенциального искажения, $r^2 = x^2 + y^2$.

На рис. 4 показан стенд для подводной градуировки.

Рис. 4. Стенд для подводной градуировки

Fig. 4. The stand for underwater calibrations

Расположения градуировочной доски (КД) в процессе градуировки показаны на рис. 5. Красным и синим цветом помечены левые и правые камеры. Отметим, что ближняя зона РП РТК располагается в пределах 0,25–1,25 м, а передняя боковая стенка аквариума толщиной 10 мм интерпретируется в качестве плоского стеклянного интерфейса колапа стереопары.

Рис. 5. Расположения градуировочной доски

Fig. 5. Calibration Board Locations

Процедура градуировки определяет: коэффициенты матрицы камеры f_x, f_y, c_x, c_y, s ; матрицу поворота R и вектор смещения T ; коэффициенты дисторсии k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 .

Оценки внутренних и внешних параметров стереокамеры в водной среде проводились с помощью программных средств среды MATLAB в приложении Stereo Camera Calibrator. Результаты градуировки приведены на рис. 6–9 и в

табл. 1, 2 для используемых в процессе градуировки изображений. На рис. 6 показана ошибка перепроецирования в водной среде. Видно, что ее среднее значение не превышает 0,4 пикселя. Из рис. 7 следует, что оптика камер в подводной среде меняет вид дисторсии с отрицательной («подушкообразной») на положительную («бочкообразную»).

Из табл. 1 следует, что коэффициенты дисторсии левой и правой камер, в водной среде (как и в воздушной среде), немного отличаются. Это объясняется тем, что оптические оси камер имеют небольшое смещение и не параллельны друг другу (табл. 2). Отметим, что это обстоятельство не влияет на точность получения 3D координат. Важным является жесткая фиксация положения одной камеры относительно другой и аккуратная градуировка, позволяющая оценить внешние и внутренние параметры камер. Вместе с тем, величина воздушного зазора уменьшает точность, поэтому его стараются сделать минимально возможной при технической реализации подводного стереомодуля. Из табл. 1 также следует, что соотношение фокусных расстояний в воздухе и воде примерно равно 1,33 (закон Снелла).

Рис. 6. Ошибка перепроецирования стереокамеры в водной среде

Fig. 6. The re-projection error of the stereo camera in the water environment

Рис. 7. Радиальная дисторсия стереокамеры в воздушной и водной средах

Fig. 7. The radial distortion of the stereocamera in air and water environments

Рис. 8. Дисторсия левой камеры в водной среде: а) радиальная; б) тангенциальная
Fig. 8. The distortion of the left camera in the water environment: a) radial; b) tangential

Рис. 9. Дисторсия правой камеры в водной среде: а) радиальная; б) тангенциальная
Fig. 9. The distortion of the right camera in the water environment: a) radial; b) tangential

Таблица 1. Сравнение результатов градуировки в разных средах

Параметры		Среда			
		воздушная		водная	
		камера 1 (левая)	камера 2 (правая)	камера 1 (левая)	камера 2 (правая)
Фокальное расстояние, (пиксель)	f_x	1399.90	1402.70	1870.51	1877.17
	f_y	1401.35	1401.60	1871.56	1878.81
Фокальное расстояние, (мм)	f_x	8.2034	8.2198	10.9612	11.0002
	f_y	8.2119	8.2134	10.9674	11.0098
Главная точка, (пиксель)	c_x	973.61	965.13	966.54	959.44
	c_y	598.41	581.10	602.66	591.67
Наклон матрицы камеры, (пиксель)	s	1.9511	1.9036	2.1567	2.4679
Коэффициенты радиальной дисторсии	k_1	-0.1737	-0.1780	0.0667	0.0308
	k_2	0.1174	0.1328	0.1348	0.3307
	k_3	-0.0243	-0.0391	0.5258	0.2075
Коэффициенты тангенциальной дисторсии	p_1	0.0008	0.0003	0.0042	0.0048
	p_2	0.0001	0.0009	0.0007	0.0009

Таблица 2. Сравнение результатов градуировки в разных средах

Параметры		Среда	
		воздушная	водная
Углы поворота камеры 2 относительно осей X_w, Y_w, Z_w камеры 1 (градусы)	α	-0.075098	0.095958
	β	-0.36173	-0.31579
	γ	0.085815	0.091879
Вектор перемещения камеры 2 относительно камеры 1 (мм)	x_d	-100.3152	-100.3409
	y_d	0.0028	-0.2089
	z_d	-1.2879	-0.7364

Анализ точности работы стереокамеры и оценка положения полюса в контролируемых подводных условиях. Суть предлагаемого подхода заключается в следующем. КД располагается параллельно плоскости изображения на различных фиксированных расстояниях от внешней плоскости стеклянного интерфейса в пределах РП. Абсолютная система координат стереокамеры связана с левой камерой, а ее начало находится в точке полюса, который удален от апертуры объектива в отрицательном направлении на расстояние, равное фокусному расстоянию. Расположение КД во время экспериментов и нумерация ее углов показаны на рис. 10, 11, соответственно.

Рис. 10. Иллюстрация эксперимента в водной среде

Fig. 10. The illustration of the experiment in the water environment

Рис. 11. Нумерация угловых точек на градуировочной доске

Fig. 11. Numbering corner points on the calibration board

Пусть выполнены эксперименты, в которых фиксируются изображения РП РТК для N заданных расстояний КД от внешней плоскости стеклянного интерфейса $Z_l, l = 1, 2, \dots, N$ и для каждой угловой точки известны оценки координат

$$X_{l,i,j}, Y_{l,i,j}, Z_{l,i,j}, \\ i = 1, 2, \dots, M, \\ j = 1, 2, \dots, K, l = 1, 2, \dots, N,$$

где M, K – количество угловых точек в горизонтальной и вертикальной плоскостях, соответственно, N – количество повторных измерений в каждой такой угловой точке. Выражение для ошибки в определении Z в соответствии с имеющимися экспериментальными данными может быть представлено в виде

$$e_{l,i,j} = Z_{l,i,j} - Z_l - d,$$

где d – расстояние от внешней плоскости стеклянного интерфейса до полюса. Величина d зависит от толщины ла d_g , ширины воздушного зазора d_a и расстояния от полюса до воздушного зазора d_p . Параметр d_g определяется с точностью до 1 мм, значения параметров d_a и d_p неизвестны и определяются характеристиками линз и подводной среды. В качестве оценки величины d предлагается использовать медиану m имеющихся выборочных значений

$$Z_{1,1,1} - Z_1, \dots, Z_{N,M,K} - Z_N,$$

а разброс относительно нее оценивать выражением

$$\begin{aligned} \delta Z_{l,i,j} &= Z_{l,i,j} - Z_l - m \\ i &= 1, 2, \dots, M, \\ j &= 1, 2, \dots, K, \quad l = 1, 2, \dots, N. \end{aligned}$$

Выборочные значения ошибки по координатам X, Y определим выражениями:

$$\begin{aligned} \delta X_{l,i,j} &= X_{l,i+6,j} - X_{l,i,j}, \\ \delta Y_{l,i,j} &= Y_{l,i+1,j} - Y_{l,i,j}, \quad i \leq M - 6, \\ \delta X_{l,i,j} &= X_{l,i+6,j} - X_{l,i,j}, \end{aligned}$$

а разброс

$$\delta Z_{l,i,j}, \delta X_{l,i,j}, \delta Y_{l,i,j}, \\ l = 1, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots, L,$$

будем характеризовать гистограммами и процентиями.

Было проведено шесть экспериментов в аквариуме, наполненном водой. В каждом эксперименте КД располагалась параллельно плоскости изображений на определенной дистанции 0,3; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5 м (в пределах РП РТК) от внутренней поверхности стекла аквариума, к которому крепилась стереокамера. Съемка проводилась с частотой 1 кадр в секунду на протяжении 1 часа. Таким

образом, были получены 3600 изображений для каждого эксперимента. С помощью алгоритма определения угловых точек на КД и алгоритмов перехода от 2D координат изображения к 3D пространственным координатам определялись 3D координаты точек КД. Пусть, например, Z_l , $l = 1, 2, \dots, 6$ – измеренные значения расстояний от 28-ой угловой точки (рис. 11) до внутренней плоскости стекла аквариума, $\hat{Z}_{l,i}$, $l = 1, 2, \dots, 6$, $i = 1, 2, \dots, 3600$ – оценки расстояний от этой же угловой точки до центральной точки изображения левой камеры. На рис. 12 приведены гистограммы распределений ошибки δZ по Z , используя значения $Z_{l,i} - Z_l$, $l = 1, 2, \dots, 6$, $i = 1, 2, \dots, 3600$ для 28-ой угловой точки. При построении гистограмм использовалась нормированная вероятность p_i , определяемая соотношением $p_i = c_i / (N \cdot w_i)$, где c_i – количество элементов в интервале, N – общее количество элементов, w_i – ширина интервала. Визуальный анализ гистограмм показывает: законы распределения ошибок для всех дальностей близки к нормальным; средние значения для всех дальностей примерно одинаковые (различия до 3 мм); с увеличением дальности до КД разброс значений ошибки увеличивается; наблюдаемые значения ошибки положительны. На рис. 13 показана гистограмма распределения величин $Z_{l,i} - Z_l$, $l = 1, 2, \dots, 6$, $i = 1, 2, \dots, 3600$ объединенной выборки, медиана которой равна примерно 27,7 мм (расстояние от внутренней поверхности стекла до полюса). Из рис. 13 следует, что распределение отличается от нормального закона и ошибка по всем расстояниям, принадлежащим РП, не превышает 6 мм. Отметим, что проведенный анализ ошибок по координатам X, Y показал, что их максимальные выборочные значения заметно меньше, чем по Z и не превышают 1 мм.

Рис. 12. Гистограммы ошибки δZ по Z для различных расстояний z для точки № 28
Fig. 12. Histograms of the error δZ by Z for different distances z for point № 28

Рис. 13. Гистограмма объединенной выборки
Fig. 13. The histogram of the combined sample

Заключение. Основной результат, полученный в этой статье, состоит в следующем. Предложен новый подход к анализу точности построения 3D координат рабочего пространства подводного робота по информации, поступающей со стереокамеры. Важной его особенностью является возможность оценивать влияние всех источников возмущений в совокупности, включая конструкцию водонепроницаемой оболочки, опираясь только на экспериментальные данные, полученные в подводной среде. Кроме того, в рамках этого же подхода могут быть получены оценки положения центров изображений камер, позволяющие учесть в алгоритмах обработки изображений присутствие водонепроницаемой оболочки.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долин Л.С., Левин И.М. Теория подводной видимости // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2015. Т. 8, № 2. С. 22–35.
2. Schechner Y., Karpel N. Clear underwater vision // *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.
3. Cabrera Elizabeth V., Ortiz Luis E., da Silva Bruno M.F., Clua Esteban W.G., Gonçalves Luiz M. A Versatile Method for Depth Data Error Estimation in RGB-D Sensors // *Sensors (Basel)*. 2018 Sep. Vol. 18(9): 3122.
4. Ortiz Luis E., Cabrera Elizabeth V., Gonçalves Luiz M. Depth Data Error Modeling of the ZED 3D Vision Sensor from Stereolabs // *Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis*, 2018. Vol. 17(1). P. 1–15.
5. Скороход Б.А., Стаценко А.В., Фатеев С.И. Предобработка и алгоритмы 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.
6. Hartley R., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2003 - Computers. 655 p.

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF BUILDING 3D COORDINATES OF THE UNDERWATER ROBOT WORKSPACE

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

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

This article offers a new approach to analyzing the accuracy of constructing 3D coordinates of the work space of an underwater robot. Its important feature is the ability to evaluate the impact of all sources of disturbances in the aggregate, including the design of the waterproof shell, based only on experimental data obtained in the underwater environment. In addition, estimates of the position of camera image centers can be obtained using the same approach, which allows taking into account the presence of a waterproof shell in order to improve the accuracy of image processing algorithms. The proposed approach was tested on real data.

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