

基于单目视觉激光成像的水下圆目标三维位姿检测

鲁 静^{1,2} 杨克成² 夏 珉² 李 微²

(¹ 湖北第二师范学院计算机学院, 湖北 武汉 430205
² 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 为了探索海洋资源,必须对水下目标进行精确定位。提出了一种利用单目视觉进行水下圆目标三维位姿检测的方法。该方法仅需要单摄像机拍摄的一幅水下图像,便能从中快速地识别出圆特征,并对水下光折射造成的图像畸变进行补偿,从而估计圆目标的三维方向和位置。实验表明,利用该方法对水下圆柱体目标的方向检测误差为 1.33%,位置检测误差为 4.37%;通过移动和重定位该圆柱物体,证实了该方法的稳定性。

关键词 成像系统;三维位姿检测;单目视觉;圆特征;激光水下成像

中图分类号 TP391; TP274.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.101103

Position-Pose Estimation for Underwater Circular Objects Based on Monocular Laser Imaging

Lu Jing^{1,2} Yang Kecheng² Xia Min² Li Wei²

¹ Department of Computer Science and Technology, Hubei University of Education,
Wuhan, Hubei 430205, China

² College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Localization of underwater objects is essential for exploring the vast ocean resources. We present a monocular-vision-based method for estimating three-dimensional (3D) position-pose of underwater circular features. Using a single camera image, underwater circular features are extracted. After that, the image distortion caused by the underwater environment is compensated, and both the orientation and position of the underwater circular features are estimated. Laboratory experiments demonstrate that the method is capable of estimating the 3D position-pose of a cylindrical object in clean water with the accuracy of orientation and position estimation of 1.33% and 4.37%, respectively. The stability of the method is also analyzed by moving and relocating the cylinder.

Key words imaging systems; three-dimensional position-pose estimation; monocular vision; circular feature; laser underwater imaging

OCIS codes 110.2990; 150.6910; 150.0155

1 引言

水下环境是人类探索与发现的新领域之一,广袤的海洋深处隐藏着巨大的潜能。为了探索海洋资源,必须对水下目标进行精确定位。这体现在许多方面,例如水下自主机器人和拖鱼的定位与导航^[1],水下自主机器人在勘探时对抓取目标位置的估计^[2]以及远程监控海洋生物的状态^[3]等。目前的定位技术主要分为两种:基于声波的方法^[4-5]和基于视觉^[6]的方法。基于声波的方法的主要问题在于它极易受噪声影响^[7]并且精度普遍都不高^[8];而基于视觉的方法局限性在于远距离的水下成像十分困难,水体对光的散射会对成像质量造成十分不利的影晌^[9]。

激光水下成像被广泛应用于海洋、江河及湖泊探测等领域,这给基于视觉的水下目标探测提供了可能。利用二维(2D)图像信息和三维(3D)空间目标之间的映射关系,可以反演目标相对于摄像机的方向和位置,

收稿日期: 2013-06-03; 收到修改稿日期: 2013-06-13; 网络出版日期: 2013-08-26

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划(Q20133007)、湖北省高等学校青上教师深入企业行动计划(XD2012423)

作者简介: 鲁 静(1981—),女,博士,讲师,主要从事计算机视觉和图像分析方面的研究。E-mail: lujing8102@126.com

从而估计目标的运动方向、速度和轨迹等信息。目前水下目标的视觉定位系统有几种:多目视觉系统^[10],单目视觉系统^[11]以及结构光扫描系统^[12]。其中远距离多目视觉系统和结构光扫描系统都要求提供两个以上的电源,系统规模庞大、成像模型复杂。在我们的项目中,需要获取在某个小水域中出现的圆柱目标的位置和姿态。通过比较,采用了连续激光成像的单目视觉定位方法,因为:1) 需要监控的水域较小,并且圆柱物体出现在水下 10 m 以内的浅水区域;2) 基于视觉的定位方法对近距离物体的定位精度较高;3) 非接触的定位方式;4) 单目视觉系统的结构简单、体积小、成本低。

圆特征作为最常见的几何特征之一,出现在多种形状的目标上,如球形、环形、圆柱形、圆锥形目标、带圆孔的目标、有圆形标记的目标等。在大气环境中,基于圆特征的目标定位的应用十分广泛。例如足球机器人对足球的自主识别和跟踪^[13]、户外机器人跟踪圆形标记进行自主定位和导航^[14]、无人飞行器利用圆形标记自动校正飞行方向^[15]、以及利用圆特征对飞机舵面的角位移进行标定^[16]等。此外,还有学者利用涂有圆形标记的定标板获取摄像机的内外参数。从这些研究可知,在大气环境中利用单目视觉系统定位圆目标可以得到较为理想的结果^[17-19]。然而,将单目视觉模型应用到水下圆目标定位的研究非常少,基本上是一个空白。本文就是基于这样的背景和需求,提出了一种利用单目视觉进行水下圆目标三维位姿检测的方法,只需要水下圆目标的单幅图像,就可以估计该目标的三维方向和位置。该方法成像模型简单,计算量小,能够提供闭合解,并且适用于所有圆特征可见的圆目标。

2 水下圆特征的单目视觉成像模型

下面通过分析水下圆特征的几何成像模型,解释图像椭圆的形成原因。水下拍摄时,相机需密封在水密容器中拍摄目标图像,光在容器内部通过的是空气介质,而在容器外部通过的是水介质。不同介质的交界面的光折射会使水下成像产生畸变。假设使用玻璃材质的水密容器,其表面靠近相机镜头并与光轴垂直,则水下圆特征的几何成像模型由图 1 所示,其中 O_c 为相机镜头中心, z 轴为相机光轴。

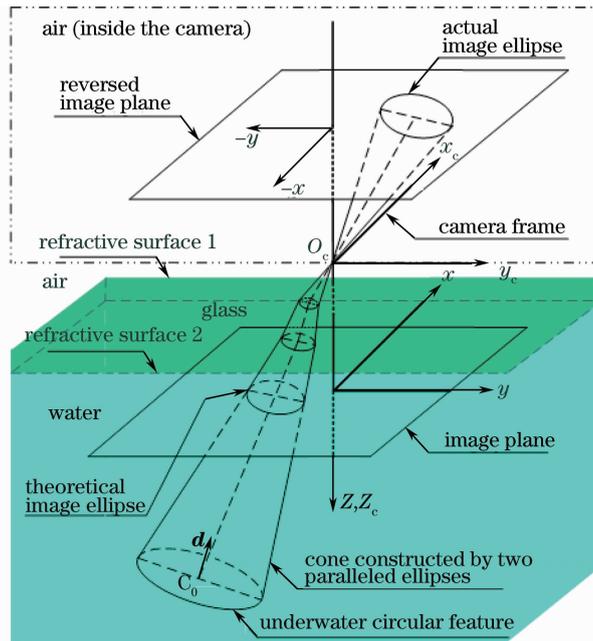


图 1 水下圆特征的单目视觉成像模型:圆锥模型

Fig. 1 Imaging model for underwater circular features; a cone model

由图 1 可见,理论上像椭圆是三维圆锥特征在二维图像平面上的投影,然而实际的像椭圆却由于光折射而发生了畸变。为了表述清晰,将实际像椭圆放置在反转的像平面上。成像过程中光折射共发生了两次,一次发生在空气与玻璃的交界面,另一次发生在玻璃与水的交界面。由实际像椭圆发射出的光线在经过这两个交界面时分别留下了两个椭圆,而在图像平面上留下了第三个椭圆,即理论像椭圆。这三个椭圆彼此平行,且在已知实际像椭圆方程的前提下,利用斯涅耳折射定律可以推导出其他三个椭圆的方程。因此,由玻

璃-水交界面椭圆和理论像椭圆所构造的圆锥方程也可推导出来,这个圆锥和三维圆特征之间有着十分紧密的联系:1) 任何一个与圆锥相交且截线为圆的平面,都有着和圆特征相同的方向法矢量;2) 在已知圆特征半径 R 及其方向法矢时,可以得到其圆心坐标。由此可以通过圆锥方程推导水下圆特征的方向和位置。

3 水下圆目标的位姿检测

3.1 问题的分解

圆特征的位置由其方向(法矢量)和圆心坐标决定。由第2节的成像模型可知,与圆锥相交呈圆的平面有着和圆特征相同的法矢量,因此求解水下圆目标的定位问题分解为以下三个步骤:

- 1) 由实际像椭圆推导理论像椭圆方程,补偿光折射造成的图像失真;
- 2) 推导圆锥方程;
- 3) 由圆锥方程,推导水下圆特征的方向(法矢量)和圆心坐标。

3.2 理论像椭圆与圆锥方程

假设已从水下图像中提取出了实际像椭圆,即已经得到了实际像椭圆的方程。令 $A_1: (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ 为实际像椭圆上的任意一点,下面推导理论像椭圆和圆锥方程。入射光 $\overrightarrow{A_1O_c}$ 由空气进入玻璃并与玻璃平面相交于 A_2 , 然后透过玻璃进入水中并与水面交于 A_3 , 最终在像平面成像于 A_4 , 如图2所示。由折射定理, $\overrightarrow{A_1A_2}$, $\overrightarrow{A_2A_3}$ 和 $\overrightarrow{A_3A_4}$ 都处于由点 A_1 和 z_c 轴所决定的平面 L 上。

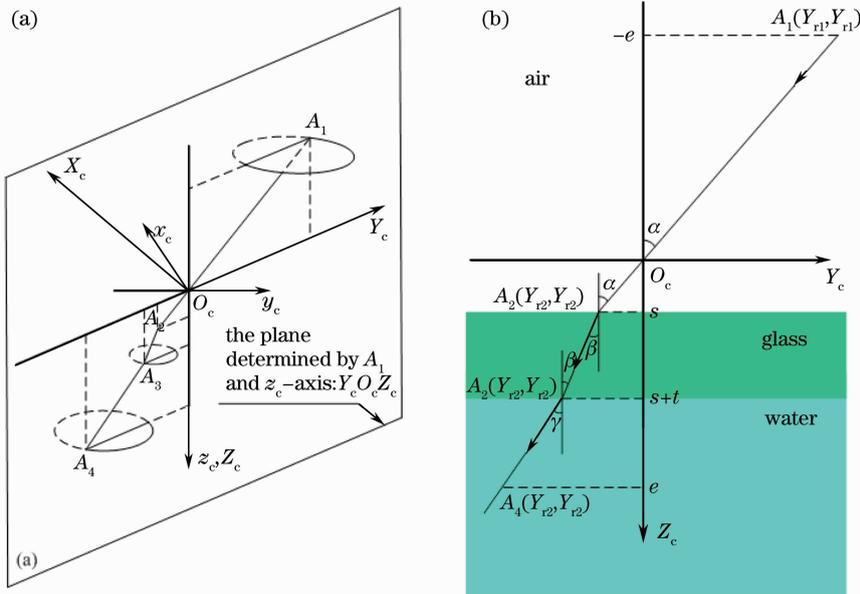


图2 光折射对圆目标成像的影响,入射光线 $\overrightarrow{A_1O_c}$ 依次通过空气、玻璃和水。(a) 在相机坐标系; (b) 在平面 L

Fig. 2 Refraction effects of an incident light. (a) With respect to camera frame; (b) in plane L

为便于计算,绕 z_c 正半轴逆时针旋转 $x_cO_cy_c$ 直到它与平面 L 重合,并将新的 $x_cO_cy_c$ 平面记为 $Y_cO_cZ_c$ 。此旋转变换可表示为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \equiv \mathbf{T} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{c1}}{\sqrt{x_{c1}^2 + y_{c1}^2}} & \frac{x_{c1}}{\sqrt{x_{c1}^2 + y_{c1}^2}} & 0 & 0 \\ -\frac{x_{c1}}{\sqrt{x_{c1}^2 + y_{c1}^2}} & \frac{y_{c1}}{\sqrt{x_{c1}^2 + y_{c1}^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

设 $(Y_{c1}, Z_{c1}), (Y_{c2}, Z_{c2}), (Y_{c3}, Z_{c3}), (Y_{c4}, Z_{c4})$ 为点 A_1, A_2, A_3, A_4 在 $Y_cO_cZ_c$ 面上的坐标, n_a, n_g, n_w 分别为空气、玻璃和水的折射率,由斯涅耳定律,有下式成立:

$$\begin{cases} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Y_{c1} \sqrt{(Y_{c2} - Y_{c3})^2 + t^2}}{(Y_{c2} - Y_{c3}) \sqrt{Y_{c1}^2 + e^2}} = \frac{n_g}{n_a}, \\ \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = \frac{(Y_{c2} - Y_{c3}) \sqrt{(Y_{c3} - Y_{c4})^2 + (s+t-e)^2}}{(Y_{c3} - Y_{c4}) \sqrt{(Y_{c2} - Y_{c3})^2 + t^2}} = \frac{n_w}{n_g} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 s 为相机镜头距玻璃表面的距离, t 为玻璃厚度, e 为相机焦距。图 2 中考虑了 $s+t < e$ 的情况, 实际上对于 $s+t \geq e$, (2) 式也成立。因此, $(x_{ci}, y_{ci}) (i=3,4)$ 可由 $[x_{ci} \ y_{ci} \ z_{ci} \ 1]^T = \mathbf{T} [0 \ Y_{ci} \ Z_{ci} \ 1]^T$ 计算得到。由 A_1 的任意性, 构造圆锥的两个平行圆上所有点都可以确定, 这样可得到圆锥方程, 记为

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2gzx + 2hxy + 2ux + 2vy + 2wz + d = 0. \quad (3)$$

3.3 水下圆目标的三维方位检测

解决圆目标定位问题的基本思路是变换坐标系使得圆锥方程精简为中心形式, 并在此坐标系中计算圆特征的方向和圆心坐标。令 XYZ 为圆锥的主坐标系^[20], Z 轴为圆锥主轴, $X'Y'Z'$ 为旋转 XYZ 直到 Z' 垂直于圆特征平面得到。总的变换关系可表示如下:

$$X'Y'Z' \xrightarrow{\mathbf{T}_3} XYZ \xrightarrow{\mathbf{T}_2} x'y'z' \xrightarrow{\mathbf{T}_1} xyz \xrightarrow{\mathbf{T}_0} x_c y_c z_c, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_0 \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_3 \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \mathbf{T}_3 \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{T}_0, \mathbf{T}_2$ 为平移变换, $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_3$ 为旋转变换。

在 XYZ 坐标系中, (3) 式可写为

$$K_1 X^2 + K_2 Y^2 + K_3 Z^2 = \mu. \quad (6)$$

文献[20]指出, 令 $K_j (j=1,2,3)$ 为如下三次判别方程的解 (K_1, K_2 为正数解, K_3 为负数解):

$$K^3 - K^2(a+b+c) + K(bc+ca+ab-f^2-g^2-h^2) - (abc+2fgh-af^2-bg^2-ch^2) = 0, \quad (7)$$

则 $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2$ 可由 K_j 推导得到。除此之外, 圆特征关于坐标系 XYZ 的单位法矢 (l, m, n) 也由 K_j 所决定:

$$1) \text{ 当 } K_1 < K_2 \text{ 时, } l = 0, m = \pm \sqrt{\frac{K_2 - K_1}{K_2 - K_3}}, n = \sqrt{\frac{K_1 - K_3}{K_2 - K_3}};$$

$$2) \text{ 当 } K_1 = K_2 \text{ 时, } l = 0, m = 0, n = 1;$$

$$3) \text{ 当 } K_1 > K_2 \text{ 时, } l = \pm \sqrt{\frac{K_1 - K_2}{K_1 - K_3}}, m = 0, n = \sqrt{\frac{K_2 - K_3}{K_1 - K_3}}.$$

旋转 (l, m, n) , 就可得到圆特征关于摄像机坐标系 $x_c y_c z_c$ 的单位法矢 $\mathbf{d}: (l_0, m_0, n_0)$, 即 $[l_0 \ m_0 \ n_0 \ 1]^T = \mathbf{T}_1 [l \ m \ n \ 1]^T$ 。下面计算圆心坐标。旋转 XYZ 直到 Z 轴垂直于圆特征平面, 并将新坐标系记为 $X'Y'Z'$ 。此旋转变换为

$$\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} -\frac{m}{\sqrt{l^2 + m^2}} & -\frac{ln}{\sqrt{l^2 + m^2}} & l & 0 \\ \frac{l}{\sqrt{l^2 + m^2}} & -\frac{mn}{\sqrt{l^2 + m^2}} & m & 0 \\ 0 & \sqrt{l^2 + m^2} & n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & 0 \\ u_2 & v_2 & w_2 & 0 \\ u_3 & v_3 & w_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

则圆特征关于 $X'Y'Z'$ 的圆心坐标为

$$[X'_0 \ Y'_0 \ Z'_0] = \left[-\frac{B}{A}Z'_0 \quad -\frac{C}{A}Z'_0 \quad \pm \frac{Ar}{\sqrt{B^2 + C^2 - AD}} \right], \quad (9)$$

式中 r 为圆半径, $A = K_1 u_1^2 + K_2 u_2^2 + K_3 u_3^2$, $B = K_1 u_1 v_1 + K_2 u_2 v_2 + K_3 u_3 v_3$, $C = K_1 v_1^2 + K_2 v_2^2 + K_3 v_3^2$, $D = K_1 w_1^2 + K_2 w_2^2 + K_3 w_3^2$ 。将(9)式代入(5)式, 就可得到圆特征关于摄像机坐标系 $x_c y_c z_c$ 的圆心坐标 $C_0: (x_{c0}, y_{c0}, z_{c0})$ 。

4 实验与分析

4.1 实验装置

实验在一个 $8\text{ m} \times 6\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的船池中进行。如图 3 所示,一个涂有黑白条纹(圆特征)的圆柱体由绳索悬挂于池底,激光器投射光斑于圆柱体表面,密封摄像机以俯角 θ (由相机定标预先得到)拍摄目标图像。三次改变圆柱体的方位和姿态,采集了三组图像,并测量了圆柱体上每条条纹距离水面的深度作为参考值。

在本实验中,圆心在圆柱体内部,难以测量,因此我们将圆特征距离水面的深度作为衡量其位置的标准。这是完全合理的,因为圆特征的深度仅由其圆心坐标决定。实验用到的主要组件有圆柱体、定标板、密封圆筒、激光器、摄像机和玻璃水密容器,如图 4 所示。

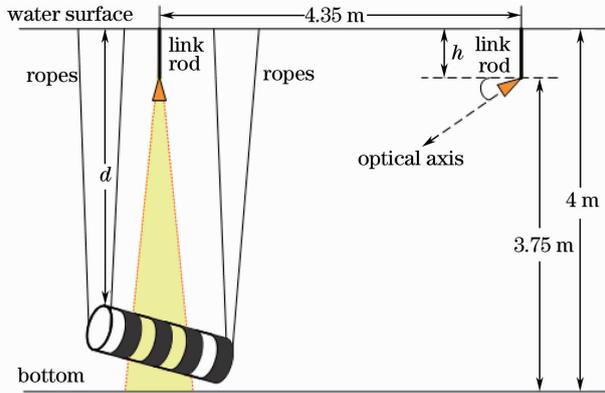


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup



图 4 主要实验组件

Fig. 4 Major components used in experiments

4.2 实验结果与分析

图 5(a)为采集得到的圆柱体图像。应用文献[21]提出的亚像素边缘检测方法,图 5(a)中像椭圆的边缘被提取出来,得到了一个亚像素边缘点的数据集合。由于椭圆只有部分可见,进行了直接最小二乘椭圆拟合^[22]以得到椭圆方程的 5 个参数。图 5(b)展示了从图 5(a)中提取的三个实际像椭圆,两图中的边缘点是一一对应的。可以看出,每个边缘点和拟合得到的椭圆方程的误差在 1 pixel 以内,拟合效果较好。图 6 为利用图 5(b)最上面的像椭圆构造得到的圆锥模型(见第 2 节),其中与圆锥相交的平面为计算得到的圆特征法矢方向。

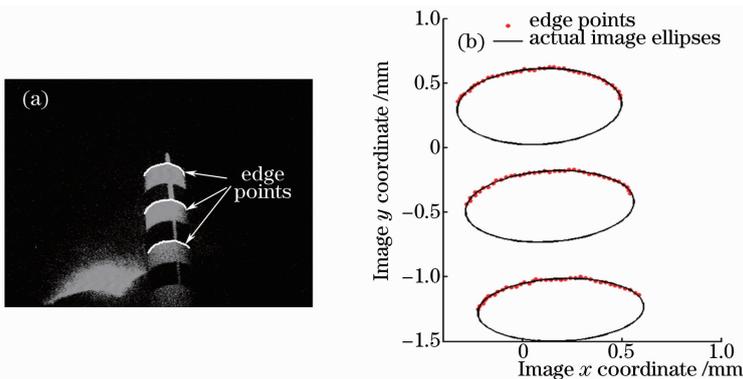


图 5 (a)圆柱体图像以及(b)提取出的实际像椭圆。两图中边缘点一一对应

Fig. 5 (a) A raw image; (b) fitted actual image ellipses. The edge points in these two images are corresponding

表 1 为计算得到的圆柱目标的三维方向。 α 、 β 和 γ 分别为圆特征法矢量与 x_c 、 y_c 和 z_c 轴的夹角。从采集得到的图像中随机挑出三幅姿态不一的圆柱体图像,每幅图像上提取三个圆特征。注意到同一幅图像上的圆特征相互平行,并有相同的方向角,因此可将三个圆特征每个方向上的夹角的平均值定义为平均夹角。通过圆柱目标上预先标定的直线和相机进行定标[图 5(a)],可以得到参考夹角。对每幅图像计算了绝对误差和相对误差,表 1 最下方的平均绝对误差和平均相对误差为三幅图像的算术平均值。可以看出,无论圆柱体

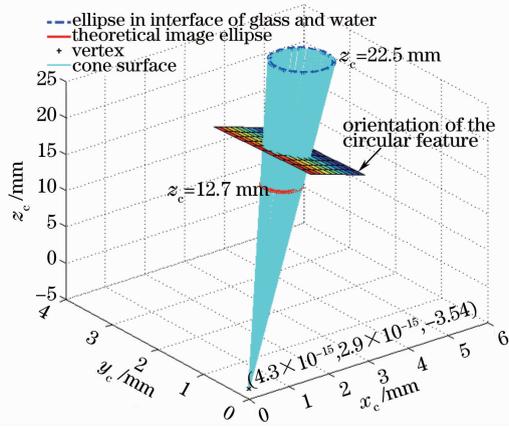


图 6 由图 5(b)最上方的像椭圆构造的圆锥。与圆锥相交的平面和圆特征有着相同的法矢量(0.065,0.804,-0.591)
 Fig. 6 Cone constructed in camera frame by the two parallel ellipses derived from the upside ellipse in Fig. 5 (b).
 A plane that intersects the cone is parallel to the circle with the surface normal vector of (0.065, 0.804, -0.591)

如何运动,相对误差都稳定在 1.12%~1.57%之间,三个方向上的平均相对误差仅有 1.33%,1.23%和 1.44%,方向检测总体误差为 1.33%,实验结果比较理想。

表 1 圆柱目标的方向检测结果

Table 1 Estimated orientation angles of the surface normal to the cylindrical object

Group No.	Angles	α	β	γ
1	Circle 1 /($^{\circ}$)	88.27	55.64	34.42
	Circle 2 /($^{\circ}$)	88.73	54.78	35.25
	Circle 3 /($^{\circ}$)	87.84	56.17	33.92
	Average angle /($^{\circ}$)	88.28	55.53	34.53
	Reference angle /($^{\circ}$)	87.13	56.16	35.08
	Absolute error /($^{\circ}$)	1.15	0.63	0.55
	Relative error /%	1.32	1.12	1.57
2	Circle 4 /($^{\circ}$)	86.29	36.48	53.77
	Circle 5 /($^{\circ}$)	87.10	37.19	52.96
	Circle 6 /($^{\circ}$)	85.14	35.63	54.80
	Average angle /($^{\circ}$)	86.18	36.43	53.84
	Reference angle /($^{\circ}$)	87.54	36.88	53.13
	Absolute error /($^{\circ}$)	1.36	0.45	0.71
	Relative error /%	1.55	1.22	1.34
3	Circle 7 /($^{\circ}$)	82.22	56.05	35.06
	Circle 8 /($^{\circ}$)	81.63	57.10	34.22
	Circle 9 /($^{\circ}$)	81.91	56.20	35.02
	Average angle /($^{\circ}$)	81.92	56.45	34.77
	Reference angle /($^{\circ}$)	81.01	57.22	34.28
	Absolute error /($^{\circ}$)	0.91	0.77	0.49
	Relative error /%	1.12	1.35	1.43
Average absolute error /($^{\circ}$)		1.14	0.62	0.58
Average relative error /%		1.33	1.23	1.44

表 2 为圆柱目标位置检测的结果。将目标距离水面的深度作为衡量其位置的标准。表 1 中 9 个圆特征的位置误差由估算距离和参考距离之间的绝对误差和相对误差描述。可以看出,相对误差稳定在 3.42%到 5.38%之间,平均相对误差为 4.37%,在容许范围之内。

表2 圆柱目标的位置检测结果

Table 2 Estimated water depths of the cylindrical object

Circle No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Reference depth /mm	3680	3680	3680	3262	3387	3511	3680	3680	368
Estimated depth /mm	3534	3526	3502	3414	3523	3700	3523	3554	3510
Absolute error /mm	146	154	178	152	136	189	157	126	170
Relative error /%	3.97	4.18	4.84	4.66	4.02	5.38	4.27	3.42	4.62
Average absolute error /mm						157			
Average relative error /%						4.37			

观察表2发现,圆6的相对误差(5.38%)相对较高,这对整体检测结果的影响较大。如果剔除圆6,平均相对误差将下降0.12个百分点。观察原始图像[图7(a)]可以看出,由于激光从左侧投射,圆柱体右侧存在光照不足的区域,而圆6(由箭头标注)正好处于这一区域。这导致它们右侧的边缘不清晰,得到的像椭圆参数不精确,从而产生较大误差。采用同态滤波的方法解决水下激光成像的不均匀光照问题。图7(b)和(c)分别是不使用和使用同态滤波的边缘检测结果,可以看出在图7(b)的圆柱体右侧有明显的轮廓丢失现象,而7(c)的轮廓相对完整。利用图7(c)进行位置检测的结果为3637,相对误差为3.59%,远小于之前的5.38%。

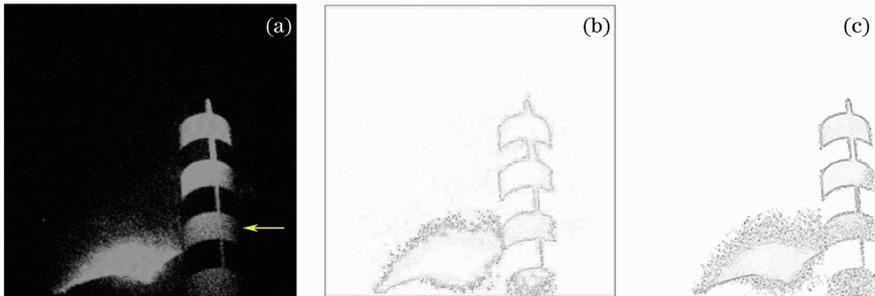


图7 同态滤波对光照的改进。(a)圆6光照不足,导致较大误差;(b),(c)不采用和采用同态滤波的边缘检测结果
Fig.7 Improvement on light by homomorphic filtering. Circle 6 in (a) is lack of light, which causes large deviations;
(b), (c) edge detection results without and with using homomorphic filtering, respectively

5 结 论

提出了一种检测水下圆目标位姿的方法,只需要一幅水下图像,就能从中快速地识别出圆特征,并估计圆目标的三维方向和位置。通过对不同方位的水下圆柱目标的实验表明,该方法的方向检测精度为1.33%,位置检测精度为4.37%,具有正确性和稳定性。方法的优势在于:1)基于简单的单目视觉模型;2)仅需要单幅水下图像;3)数学推导有闭合解;4)精度高;5)适用于所有圆特征可见的物体,如球体、圆柱体、有洞的物体、有圆形标记的物体等等。

今后的工作应集中在以下几个方面:1)改进水下图像的质量,进一步提高像椭圆参数估计和圆特征方位检测的精度;2)推导类似方法,检测圆半径未知的水下圆目标的方位;3)考虑水下环境的典型问题,如光的吸收和散射。

参 考 文 献

- 1 A Negre, C Pradalier, M Dunbabin. Robust vision-based underwater homing using self-similar landmarks[J]. J Field Robot, 2008, 25(6-7): 360-377.
 - 2 D Carevic. Automatic estimation of multiple target positions and velocities using passive TDOA measurements of transients [J]. IEEE Trans Signal Proces, 2007, 55(2): 424-436.
 - 3 D Lirman, N R Gracias, B E Gintert, *et al.*. Development and application of a video-mosaic survey technology to document the status of coral reef communities[J]. Environ Monit Assess, 2007, 125(1-3): 59-73.
 - 4 Chai Min, Yu Hui, Song Weihong, *et al.*. Joint positioning method for data fusion of photo-electric theodolite and radar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1212002.
- 柴敏,余慧,宋卫红,等.光学无线电测量信息融合定位方法[J].光学学报,2012,32(12):1212002.

- 5 Zhao Zhilong, Wu Jin, Li Feifei, *et al.*. Calculations and simulations on vibrating targets imaging in strip-map mode synthetic aperture lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828006.
赵志龙, 吴 谨, 李斐斐, 等. 条带模式合成孔径激光雷达振动目标成像的计算与仿真[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828006.
- 6 Wu Fangping, Zhang Xi, Li Peijun, *et al.*. Monte carlo simulation analysis of underwater target detection by oceanic lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 121401.
吴方平, 章 曦, 李配军, 等. 海洋激光雷达水下目标探测的蒙特卡罗仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 121401.
- 7 M R Arshad. Recent advancement in sensor technology for underwater applications[J]. *Indian J Mar Sci*, 2009, 38(3): 267–273.
- 8 J A Catipovic. Performance limitations in underwater acoustic telemetry[J]. *IEEE J Oceanic Engineering*, 1990, 15(3): 205–216.
- 9 Liu Zhonghua, Li Yunmei, Tan Jing, *et al.*. Simulation of backscattering properties of particles in taihu lake based on optical closure principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0701002.
刘忠华, 李云梅, 檀 静, 等. 基于光学闭合原理的太湖水体颗粒物后向散射特性模拟[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0701002.
- 10 S Negahdaripour, P Firoozfam. An ROV stereovision system for ship-hull inspection[J]. *IEEE J Oceanic Engineering*, 2006, 31(3): 551–564.
- 11 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen, *et al.*. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312001.
晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0312001.
- 12 J Lu, S Wu, Y Shi. Algorithm for automatic 3-D scanned bullet identification based on the principle of human vision[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 29-32: 2585–2590.
- 13 E Menegatti, A Pretto, A Scarpa, *et al.*. Omnidirectional vision scan matching for robot localization in dynamic environments[J]. *IEEE Trans Robotics*, 2006, 22(3): 523–535.
- 14 J Lu, Y Shi, S Wu, *et al.*. Monocular vision-based sensor for autonomous mobile robot localization by circular markers[J]. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2013, 89(1b): 131–133.
- 15 L Meier, P Tanskanen, L Heng, *et al.*. PIXHAWK: a micro aerial vehicle design for autonomous flight using onboard computer vision[J]. *Autonomous Robots*, 2012, 33(1-2): 21–39.
- 16 He Sen, Hou Honglu, Wang Yao. The calibration technology of the angular rotation of airplane rudders based on characteristic circle in monocular vision[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(4): 524–526.
何 森, 侯宏录, 王 尧. 基于特征圆单目视觉的飞机舵面角位移标定技术[J]. *光学技术*, 2006, 32(4): 524–526.
- 17 R Safaei-Rad, K C Smith, B Benhabib. Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision[J]. *IEEE Trans Robotic Autom*, 1992, 8(5): 624–639.
- 18 C J Wu, W H Tsai. Location estimation for indoor autonomous vehicle navigation by omni-directional vision using circular landmarks on ceilings[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, 57(5): 546–555.
- 19 J Lu, M Xia, K Yang. Experiments on 3-D localization of circular features by monocular vision[C]. *Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM)*, 2012.
- 20 R J T Bell. *An Elementary Treatise on Coordinated Geometry of Three Dimensions (3rd Edition)* [M]. London: MacMillan, 1944.
- 21 J Lu, M Xia, W Li, *et al.*. An improved bilinear interpolation algorithm using center coordinates of pixels[J]. *Sensors & Transducers J*, 2013, 19(1): 89–93.
- 22 A Fitzgibbon, M Pilu, R B Fisher. Direct least square fitting of ellipses[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell*, 1999, 21(5): 476–490.