

# 基于视觉系统的双介质下目标定位

王 俊 朱战霞 贾国华<sup>1</sup> 张旭阳<sup>1</sup>

(西北工业大学航天学院,西安 710072;西安易菲特视觉系统有限公司<sup>1</sup>,西安 710049)

**摘 要** 针对传统的摄像机三角测量原理无法实现光线折射情况下物体位置准确测量的问题,在双目定位原理和折射定理的基础上,提出了一种双介质下目标定位的理论方法。运用安装在空气介质中的双目相机对玻璃水缸中实验体进行测量定位,考虑了光线通过不同介质在临界面发生一次折射的情况,建立物点双介质成像数学模型,并用该方法完成水中实验体的定位解算,求得物体质心坐标。试验结果表明该方法可用于双介质下的视觉定位测量,具有较高的测量精度和良好的稳定性。

**关键词** 双介质 双目视觉 目标定位 光线折射 水下实验体

**中图分类号** TP242.62; **文献标志码** A

中性浮力设施是进行各种空间技术和操作过程的模拟和实验的主要地面设施之一<sup>[1,2]</sup>。实验体在中性浮力状态下进行实验时,必须对相关的参数进行测量。本文选用目前广泛应用的视觉系统实现物体的定位,它是基于理论成熟的双目立体视觉<sup>[3]</sup>的一种被动测量方法,不需要消耗大量的能源去产生或发射主动信号,能由传感器直接感受周围场景的信息,在可靠性和信息量等方面有很大的优势。

视觉测量在大气环境中的应用已相当成熟,杨武<sup>[4]</sup>等把双目立体视觉系统应用于机器人目标导航抓取中,其过程中无需人的干预,抓取目标精度达5 mm以内;与此相比,水下视觉技术遇到的一个很大困难就是成像质量差,定位精度低。即使是在静水中,由于光传播过程中会受到水的吸收效应、散射效应和卷积效应,水下图像的对比度低、均匀性差、信噪比小。尽管如此,视觉技术应用于水下运动体的定位已取得了许多研究成果。如法国蒙贝利埃大学的 Wasielewski S<sup>[5]</sup>。研究的实现机器人

定位的方法;马里兰大学的 Peasco R S<sup>[6]</sup>。提出了基于视觉的水平下运动体三维定位问题,Smithanik J R<sup>[1,2]</sup>。研究了利用 VPS(视觉定位系统)实现水下飞行器位姿确定的问题,其静态定位的精度达(3—4) cm;若被测物体运动始终处于相机视野范围内,光照环境理想,且不考虑水的阻尼以及波动干扰时,动态定位精度同静态一样<sup>[1,2]</sup>,在此基础上,Rosendall P E<sup>[7]</sup>提出5种水下运动体视觉定位的改进算法;美国迈阿密大学的 Negahdaripour S<sup>[8]</sup>。研究的利用光流场方程及水底自然景物估计水下机器人的运动并保持动力的方法,并在实验室的水池中完成了模拟动力试验<sup>[5]</sup>。上述水下视觉技术都是相机应用在水下,在我们实验的实际情况下,由于环境的限制,需要把相机安装于玻璃水缸外,以便达到所需的视场要求,测量过程中光线依次通过空气、水两种介质到达目标,因此需要解决双介质下的目标定位问题。

针对以上问题进行研究,在双目视觉和折射定理的基础上推导了一种双介质下定位的新方法,并将其应用于试验中,实现物体质心坐标的测量。试验结果表明,该方法对于双介质下目标的定位,具有较高的测量精度和良好的稳定性。

2010年8月18日收到,8月24日修改

国家自然科学基金  
(10772145)资助

第一作者简介:王 俊(1985—),女,陕西三原人,硕士生,研究方向:飞行器设计(视觉导航)。

## 1 视觉定位系统

视觉定位系统针对液体中实验体的三维空间坐标进行测量。系统采用双目立体视觉原理,考虑光线在不同介质内的折射,通过对高速工业数字相机获取的物体空间图像进行分析,计算出物体质心的空间坐标。

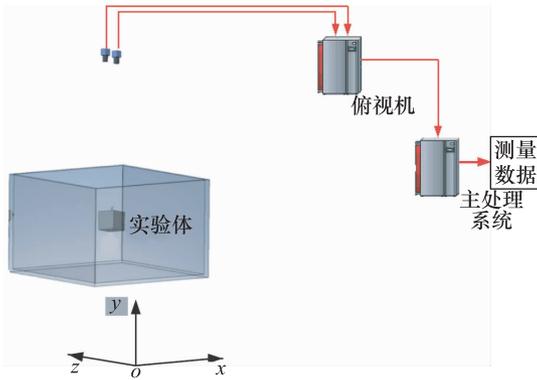


图1 系统结构示意图

如图1所示为系统结构的示意图。现阶段,运动体可以在垂直方向上下运动。为便于检测,在运动体的上表面安装一个发光体标识点运动体的质心。本文利用一组俯视相机直接从水面外对水中的实验体进行测量。系统同时获得由两个相机获得的两幅图像,对两个图像分别进行运动目标跟踪识别定位获得目标的位置,再对两幅图像进行立体匹配获得同一标识点在两幅图像内的坐标值,根据双目立体测量原理计算出标识点的三维坐标,最后求得运动体质心的三维空间坐标。水缸坐标系如图1中的 $O-XYZ$ 所示, $O$ 为水缸坐标系的原点, $X$ 轴表示水平方向, $Y$ 轴正向表示实验体从底面垂直上升的高度, $Z$ 轴正向表示实验体在水中前进的方向。

## 2 双介质视觉测量数学模型

图2中 $O_L$ 和 $O_R$ 分别表示左右相机的光心。 $p_L$ 和 $p_R$ 分别表示空间三维坐标点 $P$ 在左右相机上的

成像点。 $a_L$ 和 $a_R$ 分别表示成像光线的单位向量。 $Q_L$ 和 $Q_R$ 分别表示空间三维坐标点 $P$ 成像时在临界界面处发生折射的坐标点,即由向量 $a_L$ 、 $a_R$ 与空气—水折射面平面方程的交点计算得到。 $a'_L$ 和 $a'_R$ 分别表示光线折射后的单位向量。 $h_L$ 和 $h_R$ 分别表示临界界面在左右相机中的单位法向量。 $\alpha_L$ 和 $\beta_L$ 分别表示左相机成像光线的入射角和折射角。 $\alpha_R$ 和 $\beta_R$ 分别表示右相机成像光线的入射角和折射角。 $n_1$ 和 $n_2$ 分别表示空气和水的折射率。

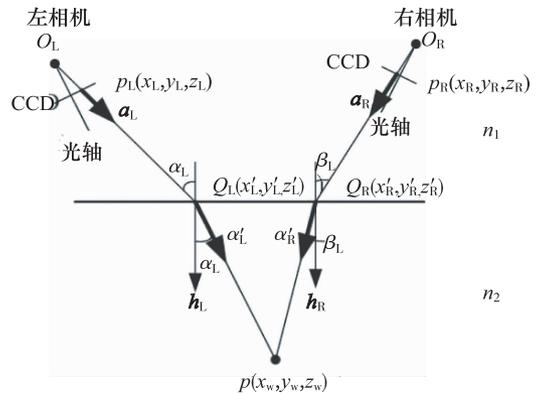


图2 双介质视觉测量数学模型

$h_L$ 、 $h_R$ 、 $a_L$ 、 $a_R$ 、 $aa'_L$ 及 $a'_R$ 向量具体如下

$$\begin{aligned} h_L &= \begin{pmatrix} h_{L1} \\ h_{L2} \\ h_{L3} \end{pmatrix}, h_R = \begin{pmatrix} h_{R1} \\ h_{R2} \\ h_{R3} \end{pmatrix}, a_L = \begin{pmatrix} a_{L1} \\ a_{L2} \\ a_{L3} \end{pmatrix}, \\ a_R &= \begin{pmatrix} a_{R1} \\ a_{R2} \\ a_{R3} \end{pmatrix}, a'_L = \begin{pmatrix} a'_{L1} \\ a'_{L2} \\ a'_{L3} \end{pmatrix}, a'_R = \begin{pmatrix} a'_{R1} \\ a'_{R2} \\ a'_{R3} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

左相机 CCD 成像点  $p_L(x_L, y_L, z_L)$  在左相机坐标系中的三维坐标值可由其图像坐标点  $(u_L, v_L)$  及摄像机内部参数获得

$$\begin{cases} x_L = (u_L - c_{Lx}) dx \\ y_L = (v_L - c_{Ly}) dy \\ z_L = f_L \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $c_{Lx}, c_{Ly}$ 为左相机图像中心的坐标值, $dx, dy$ 为左相机 CCD 像元尺寸, $f_L$ 为左相机的焦距大小。

根据两向量的向量积可得

$$\cos(\alpha_L) = h_{L1} a_{L1} + h_{L2} a_{L2} + h_{L3} a_{L3} \quad (3)$$

$$\sin^2(\alpha_L) = (h_{12}a_{13} - h_{13}a_{12})^2 + (h_{13}a_{11} - h_{11}a_{13})^2 + (h_{11}a_{12} - h_{12}a_{11})^2 \quad (4)$$

同理

$$\cos(\beta_L) = h_{11}a'_{11} + h_{12}a'_{12} + h_{13}a'_{13} \quad (5)$$

$$\sin^2(\beta_L) = (h_{12}a'_{13} - h_{13}a'_{12})^2 + (h_{13}a'_{11} - h_{11}a'_{13})^2 + (h_{11}a'_{12} - h_{12}a'_{11})^2 \quad (6)$$

根据折射定律

$$\frac{\sin(\alpha_L)}{\sin(\beta_L)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (7)$$

$a_L, h_L$  和  $a'_L$  在同一个平面内,因此  $a'_L$  可以表示为

$$a'_L = \begin{pmatrix} a'_{L1} \\ a'_{L2} \\ a'_{L3} \end{pmatrix} = p \begin{pmatrix} a_{L1} \\ a_{L2} \\ a_{L3} \end{pmatrix} + q \begin{pmatrix} h_{L1} \\ h_{L2} \\ h_{L3} \end{pmatrix},$$

$$p = \frac{n_1}{n_2}, q = \cos(\beta_L) - \frac{n_1}{n_2} \cos(\alpha_L) \quad (8)$$

空间三维坐标点  $p(x_w, y_w, z_w)$  可以表示为:

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} a'_{L1} \\ a'_{L2} \\ a'_{L3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x'_L \\ y'_L \\ z'_L \end{pmatrix} \quad (9)$$

同理对于右相机:

$$a'_R = \begin{pmatrix} a'_{R1} \\ a'_{R2} \\ a'_{R3} \end{pmatrix} = p \begin{pmatrix} a_{R1} \\ a_{R2} \\ a_{R3} \end{pmatrix} + q \begin{pmatrix} h_{R1} \\ h_{R2} \\ h_{R3} \end{pmatrix},$$

$$p = \frac{n_1}{n_2}, q = \cos(\beta_R) - \frac{n_1}{n_2} \cos(\alpha_R) \quad (10)$$

空间三维坐标点  $p(x_w, y_w, z_w)$  可表示为:

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} a'_{R1} \\ a'_{R2} \\ a'_{R3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x'_R \\ y'_R \\ z'_R \end{pmatrix} \quad (11)$$

根据式(9)和式(11)联立可得

$$\begin{bmatrix} a'_{L1} & -a'_{R1} \\ a'_{L2} & -a'_{R2} \\ a'_{L3} & -a'_{R3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_R - x'_L \\ y'_R - y'_L \\ z'_R - z'_L \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过求解线性方程组(12),即可得到  $s, t$  的值。

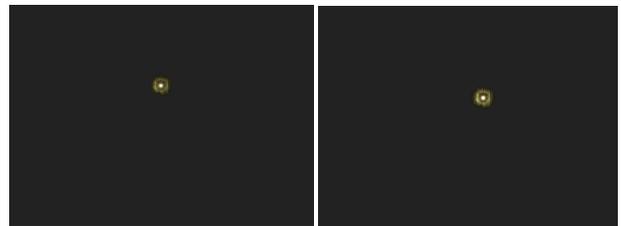
从而利用公式(9)或式(11),求得像点对应的空间三维坐标点  $p(x_w, y_w, z_w)$ 。

通过分析双介质视觉测量的数学模型,有两组量是未知的,左右光心  $O_L$  和  $O_R$ ,空间三维坐标点  $P$  在左右相机上的成像点  $p_L$  和  $p_R$ 。未知量通过如下方法求解:单相机标定,可以得到图像中心坐标  $(c_x, c_y)$ ,倾斜因子  $s$ ,焦距  $f$  以及镜头一次畸变系数  $k$ ,再根据  $P$  在左右相机中成像点式(2)计算得到;以左相机坐标系为测量坐标系,根据双目标定结果得到右相机光心  $O_R$  在测量坐标系中的位置关系。此外,要标定玻璃缸在左相机坐标系中的位置关系。

### 3 试验及结果分析

#### 3.1 静态定位

在同一时刻,触发左右相机对水下静态实验体进行观测,采集到的图像如图3所示,其中图3(a)所示为左相机采集图像,图3(b)所示为右相机采集图像。对采集到的图像做处理,再利用双介质视觉测量的方法,对玻璃水缸中静态实验体进行测量。



(a) 左相机采集图像

(b) 右相机采集图像

图3 俯视机采集图像

将实验体固定于玻璃水缸内某点,利用玻璃缸和实验体的外形尺寸计算得到实验体静态时的真实位置为  $(1\ 015, 300, 1\ 235)$  mm,对其进行静态测量,采集数据 934 组,将实验体静态时测量得到的相对于水缸坐标系质心各坐标的测量值与其真实值做差,进行误差统计如表 1 所示。

对 934 组数据进行误差分析,可以看出  $x, y, z$  轴的统计数据具有相同的趋势,且定位精度达 1 cm,说明该方法具有较好的测量精度和稳定性,可以用于多介质下运动物体的定位。

表1 静态定位误差统计

误差范围/mm	X/%	Y/%	Z/%
<5	20.877 94	24.197	39.293 36
<7	84.368 31	76.017 13	76.873 66
<8	96.573 88	92.291 22	89.935 76
<10	100	99.785 87	99.357 6
<11	100	100	100

### 3.2 动态定位

俯视机是通过光线在水面的折射数学模型建立的测量模型,水的波动会对测量系统造成一定影响,因此动态定位时,实验体运动速度不能过大,避免引起水面大的波动,产生较大的测量误差。

利用上述方法对玻璃水缸中的动态实验体进行测量。现阶段,由于实验体功能限制,其只能在竖直方向做垂直运动。给定输入控制信号,使物体做垂直运动( $y$ 方向),控制水下实验体从最低位置运动到最高位置然后再回到最低点作为一次测量,进行四次重复试验,由于物体只在 $y$ 方向上运动,在 $x$ 、 $z$ 水平面方上的位置变化幅度不大,因此只对物体质心在 $y$ 方向上的重复性进行实验,将测量到的 $y$

坐标值绘成曲线,横轴坐标代表输入的控制信号,纵轴坐标代表运动体质心坐标,单位为 $\text{mm}$ ,如图4所示。多次测量对比重复性,从图4中数据的大体走势基本一致,可以看出每次实验数据具有良好的

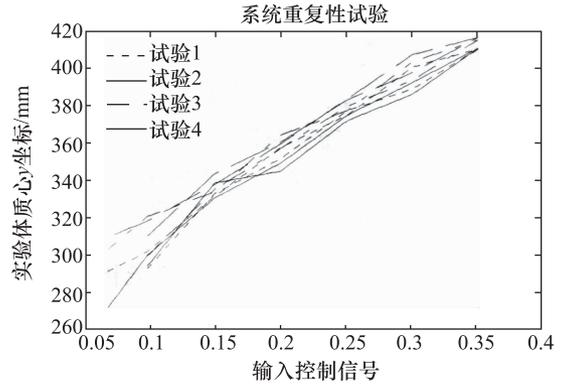


图4 重复性试验结果走势图

重复性。统计对四次试验的 $y$ 坐标值,消除掉一个偏离最大的值(消除偶然误差)求平均值,数据见表2所示,认为所求平均值是物体此位置的真实值,然后求每次试验的误差,并对测量误差进行统计,如表3所示。

表2 动态定位 $y$ 坐标的平均值(单位 $\text{mm}$ )

第一次试验	第二次试验	第三次试验	第四次试验	平均值
294.471 46	295.798 45	301.035 23	310.994 57	297.101 7
333.443 21	339.039 64	335.755 89	343.413 44	336.079 6
351.507 83	344.904 7	356.489 93	359.925 88	355.974 5
376.200 36	371.298 08	378.449 57	381.733 83	378.794 6
387.489 3	384.614 16	392.117 42	395.866 49	391.824 4
407.975 12	408.737 04	412.640 54	414.097 82	409.784 2
398.578 9	390.719 43	401.545 52	405.180 76	401.768 4
373.816 66	373.981 97	376.484 56	382.542 08	374.761 1
357.156 87	348.912 4	363.577 61	358.889 57	359.874 7
331.877 89	331.021 73	334.313 88	337.665 1	332.404 5
303.109 54	301.339 24	321.660 32	319.066 57	307.838 5
293.179 01	274.301 87	304.176 86	310.534 1	302.63

表 3 四次试验 y 坐标的误差值分布

误差范围	数值个数	所占整体数据的比例/%
10 mm 以上	7	14.58
(5-10) mm	8	16.67
(3-5) mm	10	20.83
3 mm 以下	23	47.92

可以看出满足误差精度在 5 mm 以内的数据占 68.75%, 误差在 10 mm 以内的数据占 85.42%, 说明该方法具有较好的测量精度和稳定性, 可以用于双介质下运动物体的定位。

经过对实验过程的分析, 发现造成误差的可能因素有: a) 现场环境对测量发光标识点的亮度造成影像, 产生较大的随机误差; b) 实验体在运动过程中惯性和水的阻尼等影响因素也会造成一定的测量误差; c) 水的波动和干扰使光线的光路更加复杂, 会使测量结果存在随机误差。

## 4 结论

本文针对相机在双介质环境下对运动物体的定位展开研究, 在双目立体视觉的基础上, 考虑成像过程中光线的一次折射, 推导了双介质下视觉测量的理论方法, 并将其应用于试验中, 结果表明, 该方法可以实现双介质下实验体的测量定位, 精度达

1 cm 以内, 且具有良好的稳定性。但是本文在研究过程中没有考虑水的阻尼、水波干扰和环境干扰等因素对测量精度的影响, 这有待进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- 1 Smithanik J R. Optimal vision-based position estimation of an underwater space simulation vehicle. University of Maryland, College Park, 2004
- 2 Smithanik J R, Atkins E M, and Sanner R M. Visual positioning system for an underwater space simulation environment. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006;29(4):858—869
- 3 王建华, 韩红艳, 王春平, 等. CCD 双目立体视觉测量系统的理论研究. *电光与控制*, 2007;14(4):94—96
- 4 杨 武, 姚锡凡, 范路桥. 基于双目视觉定位的排爆机器人控制系统. *机器人技术*, 2008;24(12):255—256
- 5 Wasielewski S, Aldon M J. Dynamic vision for ROV stabilization. *OCEANS'96 MTS/ IEEE Prospects for the 21st Century Conference Proceedings*, 1996: 1082—1087
- 6 Peasco R S. A vision-based underwater three-dimensional positioning system. University of Maryland, College Park, 2002
- 7 Rosendall P E. Enhanced algorithms for an underwater visual positioning system. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007;161(11):
- 8 Negahdaripour S, Xu X, Jin L. Direct estimation of motion from sea floor images for automatic station-keeping of submersible platforms. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(3):370—382

## Double-medium Target Positioning Based on Vision System

WANG Jun, ZHU Zhan-xia, JIA Guo-hua<sup>1</sup>, ZHANG Xu-yang<sup>1</sup>

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China;

Xi'an EvenFit Vision System Co., Ltd<sup>1</sup>, Xi'an 710049, P. R. China)

**[Abstract]** Whereas the traditional camera triangulation principle can not accurately be applied to the situation of light refraction, the theoretical method of target positioning in multi-medium based on the binocular vision theory and refractive theorem is put forward. This method uses binocular cameras installed in air medium to measure the centroid of target in a glass water tank, considering the condition that light goes through different mediums and refraction occurs on the critical surface. Then this method is applied to target positioning in the water, and has obtained the centroid of target in multi-medium. The result shows that the method has high accuracy and good stability, also can be applied to vision positioning measure in multi-medium.

**[Key words]** double-medium binocular vision target positioning light refraction underwater experiment object