

基于粒子群标定的多介质折射成像定位算法

张文明^{1,2} 王鑫¹ 张强^{1*} 李海滨^{1,2}

(¹ 燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)
(² 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 针对多介质拍摄时高阶畸变折射补偿法存在的误差大、局限性强等问题, 提出一种基于粒子群标定的多介质定位算法。应用 Matlab 软件标定工具箱得到摄像机内、外参数, 在此基础上, 采用粒子群优化算法标定折射平面法向量和光心到折射平面的距离, 然后应用光线追踪方法, 给出了一种多介质条件下的目标精确定位算法。实验结果表明, 当被测物处于直立与倾斜两种位置时, 应用该算法得到的相对定位误差分别为 0.70% 和 0.45%, 而应用高阶畸变折射补偿法得到的相对定位误差分别为 1.71% 和 8.96%。该算法的相对定位误差远远低于高阶畸变折射补偿法, 具有更高的定位精度, 并且有效地减小了景深变化对测量精度的影响, 解决了高阶畸变折射补偿法局限性强的问题。

关键词 机器视觉; 多介质定位; 粒子群优化算法; 摄像机标定

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0515001

Positioning Algorithm in Multi-Media Refractive Imaging System Based on Particle Swarm Optimization Calibration

Zhang Wenming^{1,2} Wang Xin¹ Zhang Qiang¹ Li Haibin^{1,2}

¹ Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

² National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract Due to the unacceptable errors and severe limitations when using high order radial distortion coefficients to compensate refraction in multi-media imaging system, we propose the multi-media positioning algorithm based on the calibration method using particle swarm optimization (PSO). The calibration toolbox in Matlab is employed to calculate intrinsic and external parameters of the two cameras. The normal vector and the distance from optical center to refractive interface are calibrated by using PSO algorithm. A high-precision positioning algorithm is obtained using the method of light tracing. Experimental results show that the relative positioning errors are 0.70% and 0.45% in the proposed algorithm for uprightly and slantwise placed objects, respectively, while those are 1.71% and 8.96% in the method of high order distortion compensating refraction. Compared with the previous method, the proposed algorithm obviously decreases the influence of variation in depth of field on measurement precision and effectively improves the positioning accuracy.

Key words machine vision; multi-media positioning; particle swarm optimization algorithm; camera calibration

OCIS codes 150.0155; 010.4450; 150.1488

1 引 言

近十几年来,随着陆地资源变得紧缺,海洋资源的开发与利用受到了越来越多的关注。针对海洋资

源勘测、考古和 underwater 设备监测^[1~4]等方面的迫切需求,高分辨率的水下探测设备成为当今研究的重要方向。视觉技术凭借其非接触性、信息量大和精度

收稿日期: 2012-12-18; **收到修改稿日期**: 2013-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61007003)、河北省科学技术研究与发展计划(10213572)和高等学校博士学科点专项科研基金(20101333120006)资助课题。

作者简介: 张文明(1979—),男,博士,讲师,主要从事机器视觉和图像处理等方面的研究。

E-mail: zwmwen@ysu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: jhtzq@ysu.edu.cn

高^[5,6]等特点,逐渐成为水下探测设备不可或缺的组成部分。

摄像机系统在进行水下工作时,通常需要加装防水保护罩,此时成像光线会经过水、防水罩和空气三种介质进入相机镜头。由于三种介质的折射率不同,光线在传播过程中会发生折射,使得成像过程的非线性度大大增加,传统成像模型不再成立。针对此问题,文献[7]提出了在特定条件下,水下图像去除折射影响的转换方法,但该方法应用范围有限、局限性强。文献[8~10]提出高阶畸变折射补偿法,即用镜头的高阶畸变系数补偿折射对成像过程的影响。在一般情况下,该方法可以起到一定的补偿作用,但当被测物深度变化范围较大时,畸变系数将无法正确地修正折射带来的影响。另一方面,当引入过多的非线性参数时,有可能引起解的不稳定性^[11]。上述方法都是对折射问题进行的近似化处理,并未考虑光线折射的物理过程,且都存在较强的局限性。针对以上问题,本文提出基于粒子群标定的多介质定位算法。在多介质折射成像原理的基础上,建立了相应的优化评价函数,利用粒子群优化算法标定折射平面法向量与光心到折射面的距离,据此给出了多介质成像时目标精确定位的理论方法。

2 多介质成像系统

目前对水中物体进行拍摄的视觉成像系统大体可以分为两类:1)摄像机密封于防水罩内,与被测物同时位于水中,进行水下拍摄;2)被测物置于水箱内,摄像机在水箱外侧进行拍摄。拍摄水中物体与拍摄正常空气中的物体最大不同在于无论采用上述哪一种方案,都会存在光线穿越多种介质时发生的物理折射,对物体测量造成较大的误差影响。若采

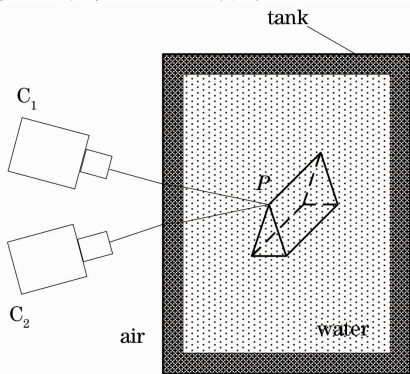


图 1 多介质双目测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of multi-media binocular measurement system

用第二类拍摄方式,如图 1 所示,两摄像机 C_1 和 C_2 固定于水箱外侧,为方便拍摄,水箱侧面采用透明玻璃,物点 P 经过水、玻璃和空气三种介质在两台摄像机中成像。

由于水箱侧面玻璃存在一定厚度,成像光线在其内部会发生一段侧移。一般情况下,由于其厚度与拍摄距离相比相差较大,侧移对整体测量精度影响很小,故忽略玻璃的厚度,近似认为折射只发生在空气与水的交界面处^[12]。

3 多介质成像系统标定

3.1 建立优化模型

在水下成像过程中,由于光线的折射现象,相机不再是单一光心的透视模型,可以等效为虚拟的多光心模型^[13]。图 2 为以 O 为原点的摄像机坐标系折射平面剖面图,当水下环境中物点 P 在光心为 O 的相机中成像时,可以等效为空气中的物点 P 在光心为 O' 的相机中成像。图中 π 为空气与水的交界面, $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 为像点, $P_r(x_r, y_r, z_r)$ 为光线与交界面相交的折射点, θ_w 、 θ_a 分别为光线的入射角与折射角。

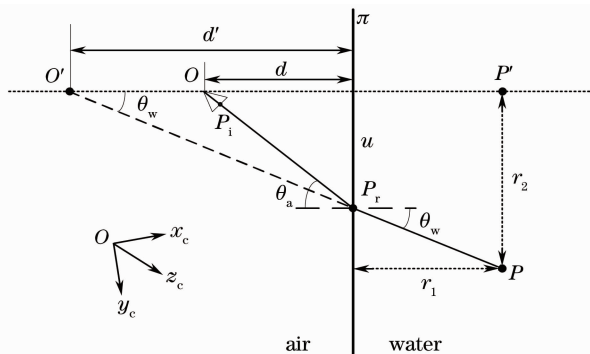


图 2 多光心成像原理图

Fig. 2 Schematic of imaging through multiple optical centers

1) 求取物点 P 在折射平面上的映射点 P_r , 如图 2 所示,由三角几何关系易得

$$u = d' \tan \theta_w, \quad (1)$$

$$\sin \theta_a = \frac{u}{\sqrt{u^2 + d^2}}, \quad (2)$$

$$\tan \theta_w = \frac{\sin^2 \theta_w}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_w}}. \quad (3)$$

空气与水的相对折射率分别记为 n_a 、 n_w , 将折射定律 $n_a \sin \theta_a = n_w \sin \theta_w$ 代入(3)式,并联立(2)式,可得

$$\tan \theta_w = \frac{\sqrt{n_a^2 \cdot u^2}}{n_w^2 (u^2 + d^2) - n_a^2 \cdot u^2}, \quad (4)$$

将(4)式代入(1)得

$$d' = \sqrt{\frac{n_w^2}{n_a^2}(u^2 + d^2) - u^2}. \quad (5)$$

在图2中,由相似三角形可知

$$\frac{d'}{u} = \frac{r_1}{r_2 - u}, \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式中,整理得

$$[n_w^2(u^2 + d^2) - u^2 \cdot n_a^2](r_2 - u)^2 - r_1^2 \cdot u^2 \cdot n_a^2 = 0. \quad (7)$$

由(7)式可解得数值解 u ,进而可以得到点 $P_r(x_r, y_r, z_r)$ 在该摄像机坐标系下的坐标值。

2) 将点 P_r 投影到电荷耦合器件(CCD)成像平面的物理坐标系,得到像点坐标 (X, Y) :

$$z_r \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式中 f 为摄像机的焦距。

3) 修正镜头径向畸变,得到修正后的像点坐标 (\tilde{X}, \tilde{Y}) :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = (1 + k \cdot r_d^2) \cdot \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 k 为镜头一阶径向畸变系数, $r_d^2 = \tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2$ 。

4) 将修正后的像点 (\tilde{X}, \tilde{Y}) 由图像物理坐标系转化到像素坐标系,得到像点坐标 (u, v) :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 d_x, d_y 分别为水平和垂直方向的像元距离; u_0, v_0 分别为摄像机主点的横纵坐标。

由上文可知,根据多介质成像模型求取成像点时,模型受折射平面法向量 \mathbf{n}_π 与光心到折射面的距离 d 约束,通过最小化实际像点与模型求取像点间距离,建立评价函数:

$$E = \min \sum_{i=1}^m \|q_i - p_i(\mathbf{n}_\pi, d_i)\|^2, \quad (11)$$

式中 m 为提取特征点的个数, q_i 为实际读取的第 i 个特征点坐标, $p_i(\mathbf{n}_\pi, d_i)$ 为第 i 个特征点经模型计算得到的坐标。

3.2 应用粒子群算法标定参数

对(11)式进行最优化处理,目标为得到折射平面法向量 \mathbf{n}_π 矢端的三维坐标 (x_n, y_n, z_n) 以及光心到折射面距离 d 。针对此种高维评价函数的优化问题,传统优化方法对初值要求较高,且高维求解运算量呈指数增长,并易陷于局部极值点^[14]。粒子群算

法作为群体智能优化算法,参数设置简单,易于实现,具有较强的全局搜索能力,能够在较短的时间内收敛于最优解。

通过对鸟类捕食行为的研究,发现一群鸟在搜寻食物时,找到食物最快、最便捷的方案是在离食物最近的鸟周边区域进行搜索。粒子群优化算法正是模拟鸟类寻食过程,通过个体间的合作与竞争完成优化搜索工作。粒子群中的每个粒子都有位置和速度两个属性,通过对比粒子自身位置极值以及全局极值,实时更新现有位置与速度。通过多重的迭代过程,得到全局最优解^[15]。

依据(11)式,应用粒子群优化算法进行系统参数优化。

步骤1:搜索空间为4维,分别为参数 x_n, y_n, z_n, d ,在设定的范围内,随机初始化种群规模 m 的位置值、速度值,将每个粒子当前位置的适应度值设置为个体极值,将个体极值中的最优值记为全局极值。

步骤2:当个体粒子适应度值优于个体极值时,则更新个体极值;当个体粒子适应度值优于全局极值时,则更新全局极值。

步骤3:粒子的位置、速度的更新公式为^[16]

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)[P_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[P_{gj}(t) - x_{ij}(t)], \quad (12)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \quad (13)$$

式中 $v_{ij}(t+1), x_{ij}(t+1)$ 分别表示粒子 i 在第 $t+1$ 次迭代中第 j 维的速度与位置; c_1, c_2 是学习因子,分别调节个体与全局最好粒子的步长; r 为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数。

步骤4:检验是否达到迭代循环结束条件,如达到最小适应度值或最大迭代次数,则停止;否则跳转至步骤2。

完成上述步骤,即可得到折射平面法向量 \mathbf{n}_π (x_n, y_n, z_n) 和光心到折射面的距离 d 的最优解,从而得到多介质拍摄系统的标定结果。

4 多介质空间点定位

根据光线追踪方法,对反向投影过程进行分析。图3为多介质情况下的反向投影原理图。

向量 \mathbf{p}_r 与 \mathbf{p}_i 共线,且 \mathbf{p}_r 在界面法向量 \mathbf{n}_π 方向上投影长度为 d ,即

$$\mathbf{p}_r = O_c^T + \lambda \cdot \mathbf{p}_i, \quad (14)$$

$$\langle \mathbf{p}_r, \mathbf{n}_\pi \rangle = d. \quad (15)$$

由(14)式和(15)式以及折射定律可得

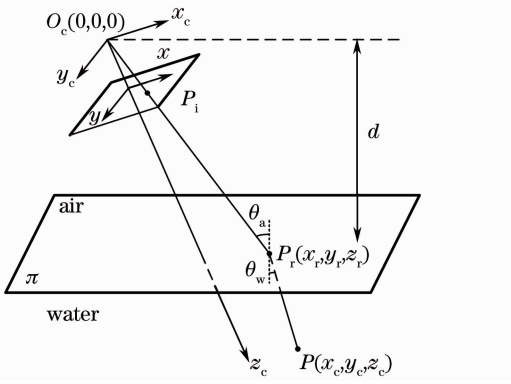


图 3 反向投影原理图

Fig. 3 Schematic of inverseprojecting

$$\theta_a = \arccos\left(\frac{\langle \mathbf{p}_r, \mathbf{n}_\pi \rangle}{\|\mathbf{p}_r\| \cdot \|\mathbf{n}_\pi\|}\right), \quad (16)$$

$$\theta_w = \arcsin\left(\frac{n_a}{n_w} \sin \theta_a\right). \quad (17)$$

当光线到达空气与水的交界面时,会在 P_r 点处发生折射,折射前后光线共面,且旋转角度 $\theta = \theta_a - \theta_w$,应用四元数定义折射旋转,折射过程绕轴向量 \mathbf{n} ,完成,描述折射向量转动的四元数记作 \mathbf{q} :

$$\mathbf{n}_r = \frac{\mathbf{p}_r \times \mathbf{n}_\pi}{\|\mathbf{p}_r\| \cdot \|\mathbf{n}_\pi\| \sin \theta_a}, \quad (18)$$

$$\mathbf{q} = \cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \mathbf{n}_r. \quad (19)$$

则折射后的向量 \mathbf{p}_{prp} 可由(18)、(19)式求得:

$$\mathbf{p}_{\text{prp}} = \mathbf{p}_r + \mathbf{q}\mathbf{p}_r\mathbf{q}^{-1}. \quad (20)$$

在双目立体视觉中通过空间两光线交汇点来求取三维点坐标,然而在实际应用中,由于相机成像模型并非理想针孔模型以及成像时受到的噪声影响,往往会使得从两摄像机反投的光线异面。如图 4 所示,问题转化为由两条异面光线重建空间点的问题,当两异面光线公垂线距离小于阈值 τ 时,可近似认为公垂线中点即为待求空间三维点。

在双目视觉系统中,根据(20)式可以得到两条反投光线向量,经校正到同一坐标系后,由上述空间

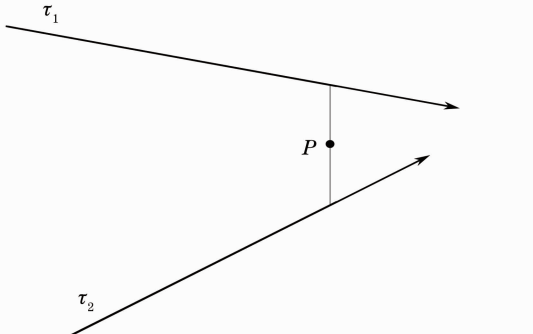


图 4 空间异面光线交汇法

Fig. 4 Spatial bifacial light intersection method

异面光线交汇法可求得空间点 P 的定位坐标。

5 实 验

5.1 实验设备

使用如图 5 所示的双目视觉实验平台,具体硬件设备有:维视公司的 MV-1300FC 工业数字相机两台, MV-1394 图像采集卡,双目视觉支架台, Pentium 4 处理器的计算机,具有透明平板玻璃罩的水槽。

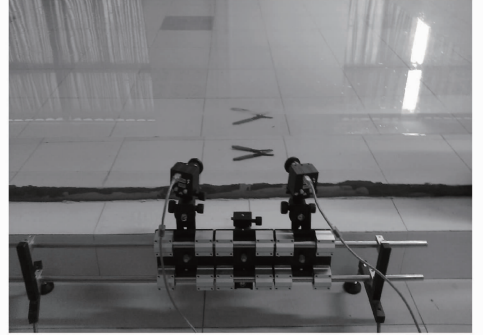


图 5 实验设备平台

Fig. 5 Experimental equipment platform

5.2 实验及数据结果

对两摄像机内、外参数进行标定。采用由 Bouguet^[17]编写的 Matlab 软件标定工具箱(此工具箱非 Matlab 软件集成,需要单独下载安装),主要步骤如下:

- 1) 调用 calib 指令,启动标定面板;
- 2) 读入一组标准棋盘格图片;
- 3) 依次对读入的棋盘格进行角点提取;
- 4) 运行标定程序,得到单台摄像机的内、外参数;
- 5) 调用 stereo_gui 指令,启动两相机联合标定面板,标定得到两台摄像机之间的外参数。

然后,应用粒子群算法对(11)式进行优化,分别得到左、右相机折射平面的法向量 \mathbf{n}_π 与光心到折射平面的距离 d 。标定结果如表 1 所示。表 1 中 f_x 和 f_y 分别为摄像机焦距在水平和垂直方向上所占像素的个数; k_c 为摄像机的畸变系数; \mathbf{T}_{om} 和 \mathbf{T} 分别为世界坐标系向摄像机坐标系变换的旋转向量和平移向量。

实验被测物为夹线钳,将其放入水中,对 A、B 两顶点进行定位,两点间实际距离为 200 mm。实验分两组进行。第一组实验,如图 6 所示,将夹线钳直立放置,两待测点 A、B 之间深度值接近;另一组实验,如图 7 所示,将夹线钳倾斜放置,两待测点 A、B 之间深度值相差较大。对于以上两组实验分别用两种不

同方法对 A、B 两点进行定位,并求取其间距离。第一种方法为本文提出的多介质定位算法(表 2,3 中记作算法 1);第二种方法为高阶畸变折射补偿法(表 2,

3 中记作算法 2),该方法不具体考虑折射过程,而是应用镜头高阶畸变系数补偿折射影响,定位得到两点坐标并计算长度值。测量结果如表 2 和表 3 所示。

表 1 参数标定结果

Table 1 Parameter calibration results

	Left camera	Right camera
(f_x, f_y)	(973.88, 978.34)	(970.98, 974.36)
(u_0, v_0)	(625.79, 456.86)	(594.09, 487.50)
k_c	(-0.13696, 0.18585, 0.00012, 0.00059, 0)	(-0.12774, 0.16553, -0.00044, -0.00084, 0)
T_{om}	(2.17, 2.03, 0.01)	(-2.30, -2.14, 0.21)
T	(-231.19, 31.42, 532.73)	(34.35, -6.89, 555.11)
n_x	(-0.04091, 0.04965, 0.99546)	(-0.05413, 0.02089, 0.97134)
d / cm	19.61886	19.22960

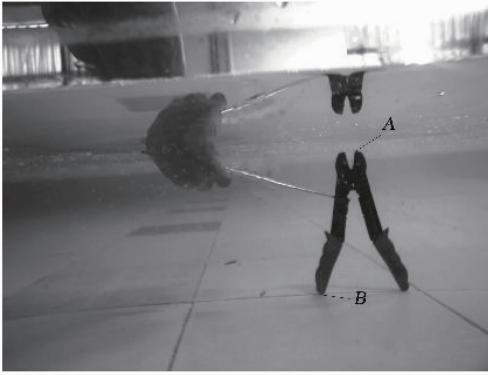


图 6 直立放置

Fig. 6 Uprightly placed

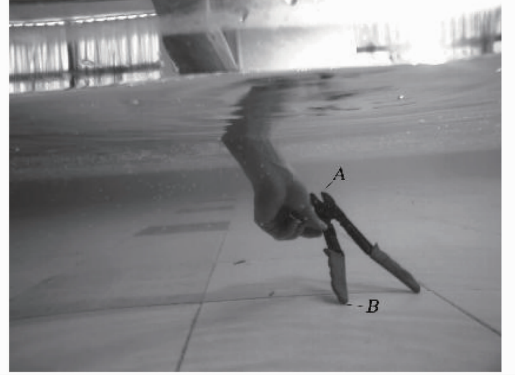


图 7 倾斜放置

Fig. 7 Slantwise placed

表 2 直立放置对角点长度测量数据

Table 2 Measurement data of diagonal length when uprightly placed

	Algorithm 1		Algorithm 2	
	Point A	Point B	Point A	Point B
Left camera	(447.66, 454.65)	(345.45, 819.12)	(447.66, 454.65)	(345.45, 819.12)
Right camera	(922.05, 408.36)	(835.27, 772.84)	(922.05, 408.36)	(835.27, 772.84)
Coordinates	(167.82, -38.95, 709.2)	(118.24, 155.79, 695.6)	(179.95, -42.36, 525.97)	(128.76, 153.81, 509.49)
Actual length	200.00		200.00	
Measurement length	201.40		203.41	
Relative positioning error / %	0.70		1.71	

表 3 倾斜放置对角点长度测量数据

Table 3 Measurement data of diagonal length when slantwise placed

	Algorithm 1		Algorithm 2	
	Point A	Point B	Point A	Point B
Left camera	(391.73, 558.78)	(331.95, 842.26)	(391.73, 558.78)	(331.95, 842.26)
Right camera	(810.20, 516.36)	(873.84, 794.05)	(810.20, 516.36)	(873.84, 794.05)
Coordinates	(120.52, 22.47, 788.00)	(126.39, 152.08, 636.98)	(132.16, 19.23, 590.17)	(136.29, 150.36, 463.93)
Actual length	200.00		200.00	
Measurement length	199.09		182.07	
Relative positioning error / %	0.45		8.96	

5.3 实验数据分析

由表 2 和表 3 所示的实验结果可知,当被测物分别处于直立与倾斜姿态时,本文算法的相对定位误差为 0.70%和 0.45%,应用高阶畸变折射补偿法得到的相对定位误差为 1.71%和 8.96%。在这两种情况下,本算法的相对定位误差均低于高阶畸变折射补偿法,具有更高的定位精度;当被测物由直立态转换为倾斜态时,高阶畸变折射补偿法的相对定位误差明显增大,而本算法的测量精度受被测物景深变化影响较小,可有效弥补高阶畸变折射补偿法的局限性。

6 结 论

对多介质条件下双目视觉系统的相关问题进行了研究,提出了基于粒子群优化算法的标定方案,并给出多介质空间点定位的理论方法。实验结果表明,粒子群算法可以极大地优化并得到最佳标定参数,基于此种标定方法的多介质定位算法具有较高的测量精度,很好地解决了高阶畸变系数法的误差大、局限性强等问题,为多介质环境下定位、测量提供了切实可行的参考方案。

参 考 文 献

- 1 V. Brandou, A. G. Allais, M. Perrier *et al.*. 3D reconstruction of natural underwater scenes using the stereovision system IRIS [C]. OCEANS 2007-Europe, 2007
- 2 A. Meline, J. Triboulet, B. Jouvencel. A camcorder for 3D underwater reconstruction of archeological objects [C]. OCEANS 2010-Europe, 2010
- 3 R. Ferreira, J. P. Costeira, J. A. Santos. Stereo reconstruction of a submerged scene[C]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, **3522**: 102~109
- 4 Han Biao, Liu Jifang, Liu Kunlun *et al.*. Study of backward optical detection method for ship wake bubbles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0101001
韩彪,刘继芳,刘昆仑等.舰船尾流气泡后向光学检测方法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0101001
- 5 Wen Qingchuan, Da Feipeng, Fang Xu. Calibration for gaze tracking system based on binocular stereo vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1015002
温晴川,达飞鹏,方旭.基于双目立体视觉的视线跟踪系统标

- 定[J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1015002
- 6 Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0915001
杨博文,张丽艳,叶南等.面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0915001
- 7 Wang Zongyi. Vision Sensor with Structured Light and Underwater 3D Measurement[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. 96~106
王宗义.线结构光视觉传感器与水下三维探测[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2005. 96~106
- 8 M. R. Shortis, E. S. Harvey. Design and calibration of an underwater stereo-video system for the monitoring of marine fauna populations[J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, **32**(5): 792~799
- 9 J. M. Lavest, G. Rives, J. T. Lapreste. Underwater camera calibration [C]. Lecture Notes in Computer Science, 2000, **1843**: 654~668
- 10 Chen Yuanjie, Zhu Kangwu, Ge Yaozheng *et al.*. Binocular vision based locating system for underwater inspection[J]. *J. Mechanical & Electrical Engineering*, 2011, **28**(5): 567~573
陈元杰,朱康武,葛耀峥等.基于双目视觉的水下定位系统[J]. *机电工程*, 2011, **28**(5): 567~573
- 11 J. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(10): 965~980
- 12 T. Treibitz, Y. Y. Schechner, H. Singh. Flat refractive geometry[C]. Proc. IEEE Computer, 2008
- 13 J. Gedge, M. Gong, Y. Yang. Refractive epipolar geometry for underwater stereo matching[C]. 2011 Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 2011. 146~152
- 14 Lin Liangkui, Xu Hui, An Wei *et al.*. Closely spaced objects infrared super-resolution algorithm based on particle swarm optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1645~1650
林两魁,徐晖,安玮等.基于粒子群优化的空间邻近目标红外超分辨率算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1645~1650
- 15 Gong Fang, Zhang Xuwu, Sun Hao. Detection system for solar module surface defects based on constrained ICA model and PSO method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0415002
龚芳,张学武,孙浩.基于独立分量分析和粒子群算法的太阳能电池表面缺陷红外热成像检测[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0415002
- 16 Xue Huifeng. Introduction to the Study of the Complexity of Artificial Life[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. 96~109
薛惠锋.复杂性人工生命研究方法导论[M].北京:国防工业出版社, 2007. 96~109
- 17 J.-Y. Bouguet. Camera calibration toolbox for Matlab [EB/OL]. California Institute of Technology, June 2008 [2012-12]. <http://www.visiontech.edu/bouguetj/calib-doc/index.html>

栏目编辑:李文洁