

doi: 10.3788/gzxb20144301.0111004

基于粒子群优化的水下成像系统标定

张强^a, 王鑫^a, 李海滨^{a,b}

(燕山大学 a. 电气工程学院 工业计算机控制工程河北省重点实验室; b. 中国环境管理干部学院 生态学系, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 摄像机在水下拍摄时, 经过不同介质的成像光线会发生折射, 小孔成像模型不再成立, 现有标定方法无法准确标定系统参量. 针对此问题, 本文提出一种基于粒子群优化的水下成像系统标定方法. 在空气中应用张正友平面标定法得到摄像机内、外参量, 通过求取特征点间相对定位距离, 建立系统对水中物体的标定评价函数, 并用粒子群算法对其优化, 从而标定得到光心到防水罩距离、防水罩平面法向量和防水罩厚度. 结果表明: 基于粒子群标定算法得到的相对定位误差平均值分别为 1.99% 和 0.62%, 而应用高阶畸变折射补偿法得到的相对定位误差平均值分别为 3.29% 和 2.68%; 当被测物位于不同拍摄距离以及改变不同姿态时, 由本文算法得到的相对定位误差均低于高阶畸变折射补偿法, 且本文提出的标定算法可以得到高准确度的系统参量, 为水下视觉研究提供了可靠的参量依据.

关键词: 机器视觉; 摄像机标定; 双目立体视觉; 粒子群优化算法; 水下成像系统

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)01-0111004-5

Calibration Algorithm of Underwater Imaging System Based on PSO

ZHANG Qiang^a, WANG Xin^a, LI Hai-bin^{a,b}

(a. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Institute of Electrical Engineering,

b. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling,

Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Light refraction occurs when imaging in the water, and the pin-hole imaging model is no longer valid. Calibration methods existing can't calibrate the system parameters correctly. This paper presents an underwater calibration algorithm based on particle swarm optimization. Firstly, Zhang's calibration method is employed to calculate intrinsic parameters and external parameters of the two cameras in the air. The evaluation function is accomplished via length measurement, and then the distance from optical center to refractive interface d , the normal vector n_n and the thickness of waterproof cover h are calibrated by using particle swarm optimization. Through experimental comparison, the relative positioning errors are 3.29% and 2.68% in the method of high order distortion compensate refraction, while those are 1.99% and 0.62% in the proposed algorithm. Compared with previous method, the proposed algorithm can calibrate parameters accurately and decrease the relative positioning errors obviously, which is important to positioning research in submerged circumstance.

Key words: Machine vision; Camera calibration; Binocular stereo vision; Particle swarm optimization algorithm; Underwater imaging system

OCIS Codes: 150.0155; 010.4450; 150.1488

0 引言

海洋约占地球总面积的 71%, 其中蕴含着大量的

矿产、石油以及生物资源^[1-3]. 受多方面因素影响, 目前整体的开发利用程度较低, 仍有大量资源有待开发, 因此海洋资源的探索工作具有巨大的科研价值和广阔的

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61007003)、河北省自然科学基金(No. D2013203363)和河北省自然科学基金(No. D2014203153)资助

第一作者: 张强(1982-), 男, 实验师, 硕士, 主要研究方向为计算机视觉. Email: jhtzq@ysu.edu.cn

通讯作者: 李海滨(1978-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为计算机视觉、智能控制. Email: hbli@ysu.edu.cn

收稿日期: 2013-05-08; 录用日期: 2013-08-07

<http://www.photon.ac.cn>

发展前景.

在探索海洋奥秘的过程中,视觉成像系统作为水下探测设备的重要组成部分,凭借其信息量大、准确度高^[4-6]等特点,成为获取水下信息的重要手段之一. 摄像机系统在水下进行拍摄时,成像光线经过不同介质会发生折射现象,致使成像过程的非线性度大大增加,传统成像模型不再成立. 针对光线折射问题,王宗义^[5]提出在一定条件下,将水下图像转换为空气图像的理论方法,但该方法适用范围有限,局限性强; J. M. Lavest 等人^[8-10]应用高阶畸变折射补偿法处理折射,近似认为折射对图像的影响是镜头高阶畸变中的一部分,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引起的误差. 上述方法都未考虑光线折射的物理过程,而是对折射问题进行了近似化处理,且都存在较强的局限性. 王俊等^[11]提出将标定板附着在防水罩表面的标定方法,但该方法对防水罩的样式有较强的要求,且标定准确度有限; 李绪勇^[12]提出在摄像机光轴与折射平面垂直的理想模型下,应用径向约束法标定水下成像系统,该方法只适用于特殊的理想模型,不具普遍性. 针对以上问题,本文提出一种基于粒子群优化的水下成像系统标定方法,在一般性折射模型基础上,建立优化评价函数,利用粒子群优化算法分别标定摄像机光心到防水罩距离、防水罩平面法向量以及防水罩厚度.

1 水下成像系统标定

1.1 建立优化模型

物体在水中成像时,为保护摄像机不受液体侵蚀,多将摄像机与液体分隔放置. 针对本实验实际情况,如图 1,被测物放置于侧面为透明玻璃的水箱内,双目摄像机置于水箱外侧,通过透明玻璃对水中物体进行拍摄.

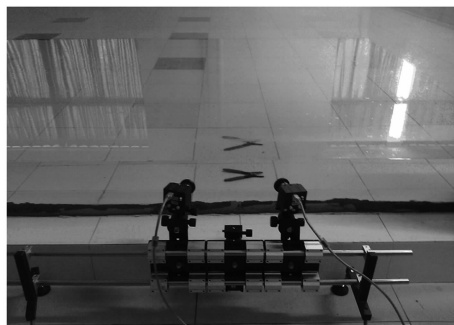


图 1 水下成像系统

Fig. 1 Underwater binocular measurement system

在双目立体视觉系统中,通过求取两摄像机反投光线交汇点可以定位空间三维点坐标. 在水下环境定位空间点时,反投光线需要经过空气、玻璃、水三种介质,并在介质交界面处共发生两次折射,据此可以建立基于空间点定位的标定评价函数.

如图 2,以左摄像机系统为例,对 P 点的反投光路进行分析. O_{cl} 为左摄像机光心, P_{il} 为物点 P 的像点, P_{al} 、 P_{dl} 分别为光线与防水罩上、下表面的交点, θ_{al} 、 θ_{gl} 、 θ_{wl} 分别为光线的入射角、一次折射角、二次折射角, d_l 为左摄像机光心到防水罩外表面距离, h 为防水罩的厚度. n_a 、 n_g 、 n_w 分别表示空气、玻璃、水的相对折射率.

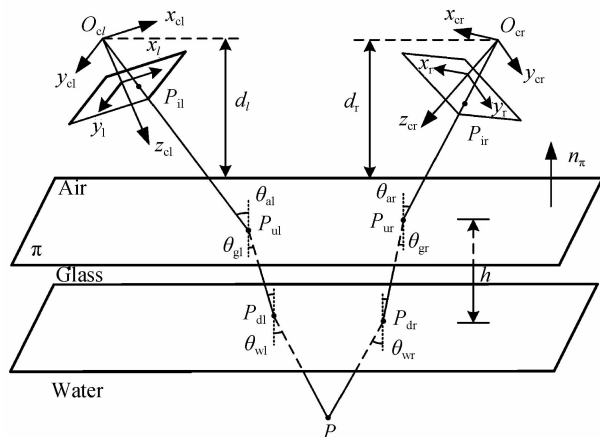


图 2 反向投影原理

Fig. 2 Schematic of unprojecting

在左摄像机坐标系中,向量 $O_{cl}P_{il}$ 与 $O_{cl}P_{al}$ 共线,且 $O_{cl}P_{al}$ 在防水罩平面法向量 n_π 方向上投影长度为 d_l ,即

$$O_{cl}P_{al} = \lambda_{l1} \cdot O_{cl}P_{il} \quad (1)$$

$$\langle O_{cl}P_{al}, n_\pi \rangle = d_l \quad (2)$$

由式(1)、(2)以及折射定律可得

$$\theta_{al} = \arccos \left[\frac{\langle O_{cl}P_{al}, n_\pi \rangle}{\|O_{cl}P_{al}\| \cdot \|n_\pi\|} \right] \quad (3)$$

$$\theta_{gl} = \arcsin \left[\frac{n_a}{n_g} \cdot \sin \theta_{al} \right] \quad (4)$$

当光线到达空气与防水罩上交界面时,会在 P_{al} 点处发生折射,折射前后光线共面,且旋转角度 $\theta_{l1} = \theta_{al} - \theta_{gl}$,应用四元数定义折射旋转,折射过程绕轴向量 n_l 完成,描述折射向量转动的四元数记作 q_l .

$$n_l = \frac{O_{cl}P_{al} \times n_\pi}{\|O_{cl}P_{al}\| \cdot \|n_\pi\| \cdot \sin \theta_{al}} \quad (5)$$

$$q_l = \cos \left[\frac{\theta_{l1}}{2} \right] + \sin \left[\frac{\theta_{l1}}{2} \right] \cdot n_l \quad (6)$$

则折射后的向量 $P_{al}P_{dl}$ 的方向向量 P'_{dl} 可由式(5)、(6)求得

$$P'_{dl} = q_l \cdot O_{cl}P_{al} \cdot q_l^{-1} \quad (7)$$

同理,当光线在防水罩内部传输到达其下表面时,光线会在点 P_{dl} 处发生第二次折射,推导过程与第一次折射相同,向量 $P_{ul}P_{dl}$ 在防水罩平面法向量的 n_π 方向上投影长度为 h .

$$P_{ul}P_{dl} = \lambda_{l2} \cdot P'_{dl} \quad (8)$$

$$\langle P_{ul}P_{dl}, n_\pi \rangle = h \quad (9)$$

$$\theta_{wl} = \arcsin \left[\frac{n_g}{n_w} \cdot \sin \theta_{gl} \right] \quad (10)$$

第二次折射时光线旋转的角度为 $\theta_{l2} = \theta_{gl} - \theta_{wl}$,由

折射定理易知,三段折射光线 $O_{cl}P_{dl}$ 、 $P_{dl}P_{dl}$ 、 $P_{dl}P$ 共面,故第二次折射仍围绕轴向量 n_{l1} 旋转,应用四元数 q_{l1} 描述此次转动.

$$q_{l1} = \cos(\theta_{l1}/2) + \sin(\theta_{l1}/2) \cdot n_{l1} \quad (11)$$

由转动四元数 q_{l1} 可以求得折射光线 $P_{dl}P$ 的方向向量 P'_{dl} .

$$P'_{dl} = q_{l1} \cdot P_{dl} \cdot q_{l1}^{-1} \quad (12)$$

同理,在右摄像机坐标系中,反投光线经过两次折射,可以得到 $P_{dr}P$ 的方向向量 P'_{dr} . 但实际拍摄时,由于受到系统标定误差以及噪音的影响,空间中两条反投光线很难交于一点,往往相互异面. 针对此问题,如图3所示,可以近似认为当两异面光线公垂线距离小于某阈值时,公垂线中点 P 即为待求空间点^[13].

根据水下反向投影模型定位空间点时,模型中包含两光心到防水罩距离 d_l 、 d_r , 防水罩平面法向量 n_x , 防水罩厚度 h . 在水下拍摄 k 幅不同姿态的棋盘格标定板图像,在每幅图像中选取相邻的 l 个角点,并定位得到每个角点坐标,通过最小化标称距离 Len 与相邻角点间距 Dis 之间差值,建立标定评价函数 E .

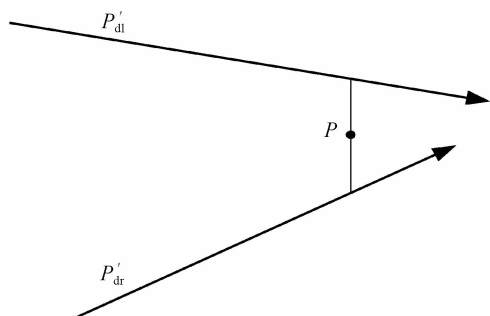


图3 空间异面光线交汇法

Fig. 3 Space bifacial light intersection method

$$E = \min \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \| Len_{ij} - Dis_{ij}(d_l, d_r, n_x, h) \|^2 \quad (13)$$

1.2 应用粒子群算法标定参量

粒子群算法是一种模拟鸟类寻食过程的智能优化算法,一群鸟在寻食过程中,只有不断调整自身位置,向离食物最近的鸟周围靠拢,才可能最快的寻找到食物,粒子群算法正是基于此特点,建立了个体之间合作与竞争的优化策略,在有限区域内最大限度地搜寻最优解^[14-15].

针对本文高维评价函数的最优化问题,需要优化多组参量,传统优化方法对初值要求较高,若选取不当,结果易陷入局部极值点,而且优化过程的运算量会随着参量的增加呈指数增长,大大增加了求解难度. 粒子群算法作为群体智能优化算法,对高维函数有较强的适应性,能够在较短的时间内收敛于最优解.

应用粒子群算法对式(13)优化步骤为:

Step1 设定初值范围,在给定范围内随机初始化个体粒子的位置值、速度值,将每个粒子当前位置的适应

度值设置为个体极值,个体极值中的最优值记为全局极值.

Step2 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. 根据式(14)、(15)对粒子的位置、速度进行更新^[14].

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)(P_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(P_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (14)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (15)$$

式中 $v_{ij}(t+1)$ 、 $x_{ij}(t+1)$ 分别表示粒子 i 在 $t+1$ 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.

Step3 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;否则跳转步骤2.

依据 Step 1~Step 3,可优化得到两光心到防水罩距离 d_l 、 d_r , 防水罩平面法向量 $n_x(x_n, y_n, z_n)$ 以及防水罩厚度 h 的最优解,从而完成对水下拍摄系统的标定.

2 实验

2.1 实验设备

水下双目视觉实验平台如图1,硬件部分包含维视公司的 MV-1300FC 工业数字相机两台,分辨率为 1280×1024 ,像素尺寸为 $5.2 \times 5.2 \mu m^2$,MV-1394 图像采集卡,双目视觉支架台,Pentium 4 处理器的计算机,平面棋盘格标定板,具有透明平板玻璃罩的水槽. 软件部分是应用 VC++ 6.0 自主开发的双目视觉采集程序.

2.2 标定

应用张正友^[16]提出的平面标定法标定摄像机内、外参量. 在空气环境中,双目视觉系统采集标定板的多角度变换图片,标定得到摄像机的内、外参量如表1.

表1 相机参量标定结果

Table 1 Calibration results of camera parameters

	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,	(-0.12774, 0.16553,
	0.00012, 0.00059, 0)	-0.00044, -0.00084, 0)
om	(2.17, 2.03, 0.01)	(-2.30, -2.14, 0.21)
T	(-231.19, 31.42,	(34.35, -6.89, 555.11)
	532.73)	

表中 (f_x, f_y) 为摄像机焦距的像素坐标, (u_0, v_0) 为摄像机主点的像素坐标, k_c 为镜头的畸变系数, om 、 T 分别为双目摄像机之间的旋转向量和平移向量. 标定水下成像系统参量: 光心到防水罩上表面距离 d , 防水罩平面法向量 n_x , 防水罩厚度 h . 将平面标定板浸入

水中,图4中标定板是由边长33 mm黑白相间的正方形棋盘格构成,拍摄多幅不同角度的标定板图片,取其中35个相邻的角点作为待定位点,应用粒子群算法对式(13)进行优化,标定结果如表2.

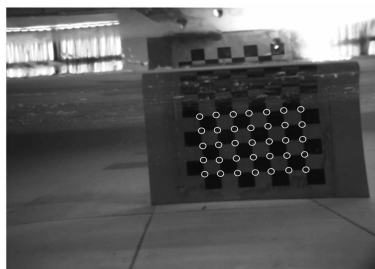


图4 水下标定板
Fig. 4 Underwater calibration plate

表2 系统参量标定结果
Table 2 Calibration results of system parameters

	Left camera	Right camera
d/mm	190.748	193.318
n_z	(0.040, -0.019, 0.976)	(0.018, 0.086, 0.990)
h/mm	10.970	

2.3 实验验证

选取夹线钳作为实验对象,定位两对角点坐标并计算长度.共进行了两组对比实验,第一组实验在拍摄距离 s 不同时,测量同姿态夹线钳对角定位长度,见图5;第二组实验是在相同拍摄距离下,测量不同姿态的夹线钳对角定位长度,见图6.同时,为验证本文标定

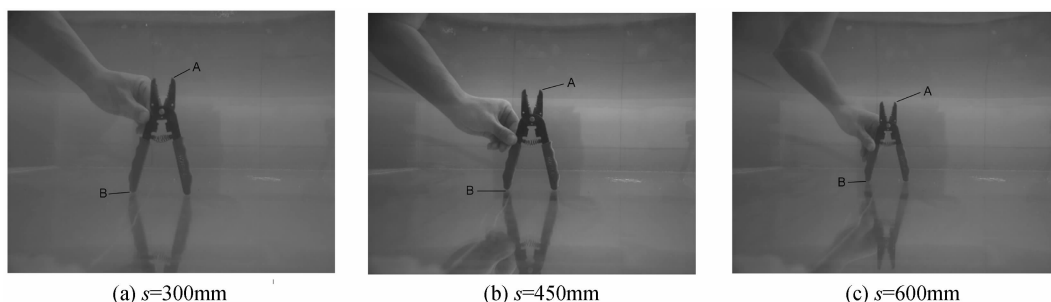


图5 多种拍摄距离实验图
Fig. 5 The picture of underwater experiment in various distance

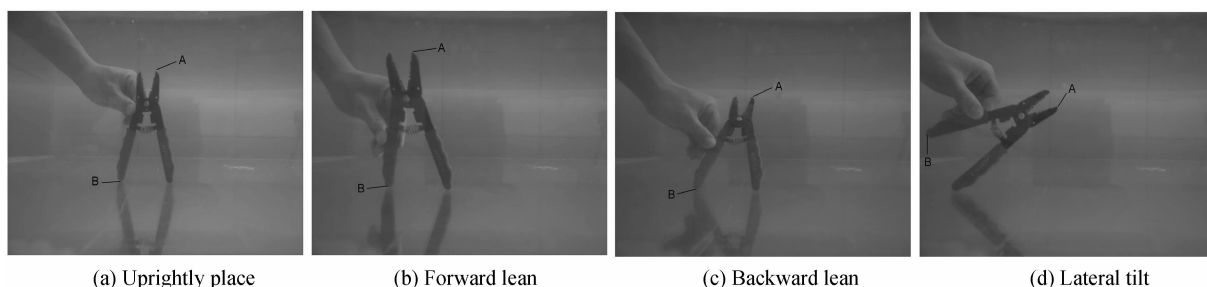


图6 同距离不同姿态实验图

Fig. 6 The picture of underwater experiment in the same distance with different poses

方法的有效性,引入高阶畸变折射补偿法进行对比实验,高阶畸变折射补偿法将折射影响归纳为镜头的径向畸变中.经实际测量,夹线钳AB两点间实际长度为

表3 多种距离夹线钳对角长度测量数据

Table 3 The measurement data of clamp's length in various distances

	Method 1		Method 2	
	Measurement length/mm	Relative positioning errors/%	Measurement length/mm	Relative positioning errors/%
a	169.25	0.74	163.20	2.86
b	170.71	1.61	163.87	2.46
c	174.09	3.63	160.34	4.56
Average value	171.35	1.99	162.47	3.29

备注:实验 a、实验 b、实验 c 的拍摄距离分别为 300 mm、450 mm 和 600 mm

表4 同距离不同姿态夹线钳对角长度测量数据

Table 4 The measurement data of clamp's length in the same distance with different poses

	Method 1		Method 2	
	Measurement length/mm	Relative positioning errors/%	Measurement length/mm	Relative positioning errors/%
a	169.25	0.74	163.20	2.86
b	167.33	0.40	162.96	3.00
c	167.87	0.08	163.45	2.70
d	170.09	1.24	164.37	2.16
Average value	168.64	0.62	163.50	2.68

备注:实验 a、实验 b、实验 c、实验 d 的拍摄距离为 300 mm、168 mm.表3和表4分别为上述第一组和第二组的实验结果,其中方法1为本文方法,方法2为高阶畸变折射补偿法.

由两组实验可知,在不同拍摄距离和同距离不同姿态两种条件下,本文方法计算得到的相对定位误差平均值分别为 1.99% 和 0.62%,由高阶畸变折射补偿法得到的相对定位误差平均值分别为 3.29% 和 2.68%。结果表明拍摄距离和拍摄姿态对测量误差都存在一定的影响,但应用本文方法标定的结果可以得到较高的定位准确度,证明粒子群优化标定法可以准确标定出水下成像系统参量,有效地减小相对定位误差、提升定位准确度。

3 结论

本文针对双目视觉系统在水下成像的特殊性进行了研究,建立了系统标定评价函数,通过粒子群算法对评价函数进行优化,提出了一种新的水下成像系统的标定方法。实验结果表明,本文提出的方法可以得到较高准确度的标定结果,弥补了现有方法准确度低的缺点,为水下环境的视觉定位、测量、重建等提供了可靠的参量依据。

参考文献

- [1] XU Yu-ru, PANG Yong-jie, GAN Yong, *et al.* AUV state of the art and prospect[J]. *CAAI Transaction on Intelligent Systems*, 2006, **1**(1): 9-16.
徐玉如, 庞永杰, 甘永, 等. 智能水下机器人技术展望[J]. 智能系统学报, 2006, **1**(1): 9-16.
- [2] JIN Wei-qi, WANG Xia, CAO Feng-mei, *et al.* Review of underwater opti-electrical imaging technology and equipment (II)[J]. *Infrared Technology*, 2011, **3**(3): 125-132.
金伟其, 王霞, 曹峰梅, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(下)[J]. 红外技术, 2011, **3**(3): 125-132.
- [3] FERREIRA R, COSTEIRA J P, SANTOS J A. Stereo reconstruction of a submerged scene[C]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, **3522**: 102-109.
- [4] LIU Hao-ran, ZHANG Wen-ming, LIU Bin. Three dimensional measurement based on the binocular vision[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1830-1834.
刘浩然, 张文明, 刘彬. 基于双目立体视觉实现物体三维测量的研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1830-1834.
- [5] HUANG Chuan-bo, JIN Zhong. A method of color image retrieval based on visual attention model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1025-1030.
黄传波, 金忠. 基于视觉注意的彩色图像检索方法[J]. 光子学报, 2011, **40**(7): 1025-1030.
- [6] LIU Ning, LU Rong-sheng, XIA Rui-xue, *et al.* A novel algorithm for computing the plane of line structured light in 3D vision measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 178-184.
刘宁, 卢荣胜, 夏瑞雪, 等. 一种用于计算三维视觉测量中线结构光平面的新型算法[J]. 光子学报, 2012, **41**(2): 178-184.
- [7] WANG Zong-yi. 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] LAVEST J M, RIVES G, LAPRESTE J T. Underwater camera calibration[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2000, **1843**: 654-668.
- [9] PIZARRO O, EUSTICE R, SINGH H. Relative pose estimation for instrumented, calibrated imaging platforms[C]. In *Proceedings of Digital Image Computing Techniques and Applications*, 2003: 601-612.
- [10] CHEN Yuan-jie, ZHU Kang-wu, GE Yao-zheng, *et al.* Binocular vision based locating system for underwater inspection [J]. *Journal of Mechanical and 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] WANG Jun, ZHU Zhan-xia, JIA Guo-hua, *et al.* Multi-medium space target visual measurement [J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, **31**(5): 1431-1434.
王俊, 朱战霞, 贾国华, 等. 水下空间目标的视觉测量[J]. 计算机应用, 2011, **31**(5): 1431-1434.
- [12] LI Xu-yong. Study on modeling and calibration technology of underwater camera [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010: 30-35.
李绪勇. 水下摄像机的建模与标定技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 30-35.
- [13] LUO Shi-min, LI Mao-xi. Research on how to get object's 3D coordinate on two CCD camera measure system [J]. *Computer Engineering and Design*, 2006, **27**(19): 3622-3624.
罗世民, 李茂西. 双目视觉测量中三维坐标的求取方法研究[J]. 计算机工程与设计, 2006, **27**(19): 3622-3624.
- [14] 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.
- [15] ZHAI Zi-yu, YE Mei-ying. A coating design method based on particle swarm optimization [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1338-1341.
翟子羽, 叶美盈. 基于粒子群优化算法的膜系设计方法[J]. 光子学报, 2011, **40**(9): 1338-1341.
- [16] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.