

基于双目视觉的水下定位系统

陈元杰, 朱康武, 葛耀峥, 顾临怡*

(浙江大学 流体与传动国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:通过改进传统水上双目立体视觉定位方法使其适于水下机器人(ROV)的机械手等的定位。为适应复杂水下透视环境,针对水下的液体环境设计摄像机密封结构,引入了高次畸变参数对摄像机进行标定,以得到相机水下内外参数,然后针对传统较为复杂的双目摄像机视线(射线)相交求取目标点的方法,提出了一种基于前向平行校正的简单定位算法,并进行试验。试验结果表明,该系统及其算法简单可靠,在一定工作范围内,能保证精度误差在 3% 以内。

关键词:水下机器人;水下标定;双目视觉;定位;前向平行校正

中图分类号:TP242.6;TH136

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0567-07

Binocular vision based locating system for underwater inspection

CHEN Yuan-jie, ZHU Kang-wu, GE Yao-zheng, GU Lin-yi

(State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A new binocular stereo vision locating system was designed for the guidance of the manipulator on a remotely operated vehicle (ROV). In order to adapt the complex underwater environment, a sealing structure for the camera, a method of underwater calibration and a new method of object locating based on front parallel plane transformation were designed. Experiment results show the accuracy and stability of the underwater locating system, the locating error of which can be kept within 3%.

Key words: remotely operated vehicle(ROV); underwater calibration; binocular stereo vision; locating; front parallel plane transformation

0 引言

视觉定位系统根据使用摄像机的数目不同可以分为单目、双目两种。单目视觉定位系统只要处理单幅视频图像,且设备简单,不用考虑两个相机的互相影响,应用安装起来比较方便。但是其缺点是对于物体深度的获取不够方便,往往采用多角度拍摄、弱透视近似模型或者利用事先已经在图像处理器中定义好的物体的 3D 模型进行估计^[1],算法较为复杂。文献[2]中以色列学者 R. Basri 等人将摄像机的弱透投影模型应用在单目视觉定位上,文献[3]中中国船舶科学研究中心学者将目标物体结构模型法单目视觉应用于水下机器人定位。文献[4]中英国学者 N. Hollinghurst 等人利用双目视觉控制机械手抓取物体,文献[5-6]分别将双目立体视觉应用于曲线跟踪和水下焊缝的跟踪。

本研究设计一个基于双目立体视觉的水下机器人机械手定位系统,首先针对水下的液体环境,设计一个摄像机密封装置,同时对水、密封玻璃、摄像机透镜系统进行联合标定,得到水下联合标定内外参数;然后针对传统的双目立体视觉定位算法,提出一种改进的前向平行校正的定位算法,并加以实验,得到了较好的定位精度,提高了算法的稳定性。

1 双目立体视觉定位系统构成

机器视觉系统的硬件一般由视觉传感器(摄像机)、光源、滤光片、图像采集卡、图像处理模块、计算机、执行器(如机械手,电机等)等组成。在该实验系统中,光源为自然光照,省略了光源和滤光片;图像和数据处理都由计算机完成,省略了图像处理模块,由于是用于水下定位,多了密封封装结构。本研究中的双

收稿日期:2010-12-01

作者简介:陈元杰(1984-),男,浙江慈溪人,主要从事水下机器人智能控制系统方面的研究. E-mail: zjucyj@zju.edu.cn

通信联系人:顾临怡,男,教授,博士生导师. E-mail: lygu@zju.edu.cn

目定位系统由以下几部分构成:

(1) 两个摄像机、镜头。摄像机采用的是深圳翔飞科技有限公司的型号为 SF-203G 的彩色 CCD 模拟摄像机,其 CCD 类型为 1/3 英寸 SONY CDD,420 线,512 × 582 pixels;镜头采用 $f1.4$,焦距为 6 mm ~ 15 mm 的 CCTV 普通镜头,光圈大小也可以调节。

(2) 封装及支架。为节省成本并取得较好的实验结果,该实验采用普通摄像机加上防水密封封装的方案,该封装由两个密闭的套筒组成:一端为一个抗压能力较好的透明有机材质,用于摄像机收集视频图像,另一端引出 4 芯水密接插件,以输入供电电源,输出视频信号。两个套筒固定在一个支架上,使两个摄像机有固定的坐标变换关系,为接下去的双目标定打好基础。

(3) 图像采集卡。图像采集卡采用的是陕西维视的双路输入、可进行实时图像采集的 MV-8002 PCI 图像采集卡。该图像采集卡能进行 10 位 A/D 转换,支持 C++ 及 OPENCV 的开发。

(4) 计算机和设计软件。系统设计软件是基于 Windows XP 的 Visual C++ 2008 及 Intel OPENCV 开源视觉库,在进行摄像机内外参标定时,还用到了 Matlab 标定工具箱,图像处理、图像特征提取、标定,定位算法等都是由 PC 机来完成。

2 水下摄像机标定

为了得到水下目标物体的位置,必须建立起目标物世界坐标系坐标、摄像机坐标系坐标、成像图像坐标系坐标之间的转换关系,即根据具体摄像机的特性,得到目标物像点和目标物之间的对应关系。这就必须通过摄像机标定得到摄像机的焦距、光心等内参数。此外,虽然目前的镜头制造技术已经比较完备,但是镜头还是存在一定畸变,尤其是该定位系统是位于水下,由于受水流和密封桶密封透明材料的影响,畸变将更加严重,必须加以矫正。

2.1 摄像机模型分析

摄像机模型的建立过程是图像坐标系、摄像机坐标系以及世界坐标系的转换过程,本研究通过 3 个坐标系的变换,建立起图像坐标系像素坐标和世界坐标系目标物点坐标的对应关系。

2.1.1 两个图像坐标系

在图像处理的各种算法中输入/输出的图像坐标一般以像素为单位,以图像的左上角作为坐标原点,如图 1 所示的 O_0uv 坐标系。但是,实际坐标变换中的图像坐标系须以物理尺度(如 mm)为单位,以便单位统

一,因此必须建立一个基于物理尺度的图像坐标系。该坐标系以摄像机光轴与成像平面的交点为坐标原点,一般位于图像中心处,但实际上是存在偏移的,图中为 O_1XY 坐标系。若以 dX, dY 为每一个像素在 X 轴与 Y 轴方向上的物理尺寸,则两个坐标系之间的关系为:

$$\begin{cases} u = \frac{X}{dX} + u_0 \\ v = \frac{Y}{dY} + v_0 \end{cases} \quad (1)$$

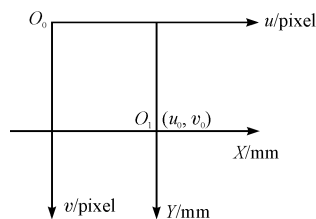


图 1 图像坐标系

转换为齐次坐标和矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dX & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dY & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.1.2 摄像机针孔成像模型

针孔成像模型又称为线性摄像机模型,本研究将针孔位置从中间移到像平面后面后面的一个等效线性投影模型,如图 2 所示,即 O 为投影中心, O_1XY 是成像平面, p 为像点, $P(x, y, z)$ 为物点。

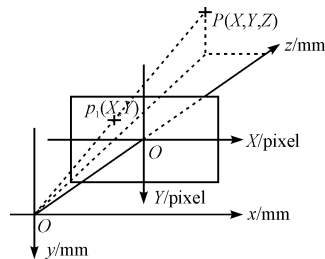


图 2 坐标系变换

由图中的几何关系可得到下面的表达式:

$$\begin{cases} \frac{X}{f} = \frac{x}{z} \\ \frac{Y}{f} = \frac{y}{z} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f — O 到 O_1 的距离,即为非线性模型里面的透镜焦距。

本研究将其写成齐次坐标的矩阵形式即为:

$$s \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: s —比例因子,令 \mathbf{P} 为透视投影矩阵。

将式(4)代入式(2)即可以得到图像坐标系 O_0uv 和摄像机坐标系 Oxy 之间的关系:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dX & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dY & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: α_x, α_y —焦距 f 在图像坐标系 O_0uv 的 u 轴和 v 轴上的归一化因子; u_0, v_0 —光轴与图像平面交点,它们的单位都为像素(pixel)。

$\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 就是接下去标定所需要得到的内参数,因此,矩阵 \mathbf{M}_1 被称为内参矩阵。而世界坐标系 O_w 到摄像机坐标系 O 的转换,可以用一个旋转矩阵 \mathbf{r} 和一个平移向量 \mathbf{t} 乘以世界坐标系得到,其矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

令 \mathbf{M}_2 为摄像机外参数矩阵,从而有:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{r} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

从而实现了摄像机世界坐标系 (x_w, y_w, z_w) 到图像坐标系 $(u, v, 1)$ 转变,其转变的关键是计算得到摄像机的内参数矩阵 \mathbf{M}_1 和摄像机外参数矩阵 \mathbf{M}_2 ,或者说得到内参数 $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 以及外参数 \mathbf{r}, \mathbf{t} ,摄像机标定的目的之一就是得到上述摄像机的内、外参。

2.1.3 摄像机非线性模型

如果按照线性针孔模型来进行摄像机成像,虽然模型比较简单,但是在实际应用中会使摄像机镜头无法清晰成像,必须加一透镜来聚集足够多的光线,使光线在像平面处良好聚焦,清晰成像。透镜的引入使得摄像机模型不再是线性,而是存在一定畸变的非线性模型,图像坐标系坐标存在一定的偏移 $\delta u, \delta v$ ^[7]。而水下环境折射率的不同以及密封桶有机玻璃片的影响致使畸变程度尤其显著。非线性模型中的图像坐标 (u, v) 与

非线性模型中的图像坐标 (u', v') 之间的关系为:

$$\begin{cases} u = u' + \delta u \\ v = v' + \delta v \end{cases} \quad (8)$$

摄像机的畸变分为两部分:沿透镜切向的畸变和沿透镜径向的畸变,畸变表达式如下:

$$\begin{cases} \delta u = (u' - u_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + 2k_3(u' - u_0)(v' - v_0) + k_4[r^2 + 2(u' - u_0)^2] \\ \delta v = (v' - v_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + k_3[r^2 + 2(v' - v_0)^2] + 2k_4(u' - u_0)(v' - v_0) \end{cases} \quad (9)$$

上式中, $r^2 = (u' - u_0)^2 + (v' - v_0)^2$,第1项为透镜径向畸变项,空气中的摄像机透镜系统镜头畸变不是十分严重,以 $k_1 r^2$ 为主,其他高阶分量忽略不计。但是考虑到该实验系统的水下环境,则必须加入 $k_2 r^4$ 、 $k_3 r^6$ 来消除水下畸变的影响。第2项为透镜切向畸变项,有 k_3, k_4 两项参数。因此摄像机标定的另一项任务是求得该摄像机的畸变参数,即求得 $\mathbf{K} = [k_1, k_2, k_3, k_4, k_5]$ 。其中 k_2, k_5 是为消除水下畸变影响而加入。

2.2 水下单摄像机标定

由于水的折射率及密封桶的影响,水下摄像机的标定方法必然与空气中有所区别,但是根据文献[8]推理可知,若将密封桶的透明密封盖放置于接近相机透镜焦距处,或者焦距及密封盖与透镜的距离相对于物距可以忽略,则水的折射率的影响就可以忽略。该系统便是将摄像机如上述安放来消除水的折射率的影响,但是水以及密封窗所产生的畸变不可忽略,必须引入 k_2, k_5 等高次畸变参数来矫正剧烈的畸变影响。

可以用来标定的方法很多,包括基于3D立体靶标的摄像机标定、基于径向约束的摄像机标定和基于2D平面靶标的摄像机标定等^[9]。该系统借助 Matlab 的标定工具箱,并参考张正友的标定原理和方法^[10]对摄像机进行标定。摄像机标定物是一个 10×7 的方格棋盘,标定过程如下:

(1) 用摄像机采集一系列(本次实验采集 10 幅)棋盘在水下不同位置的图片如图 3 所示。

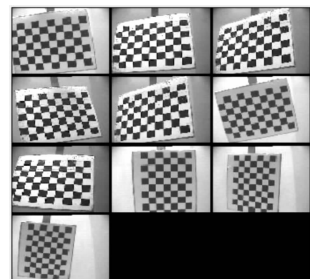


图3 水下 10 幅不同位置的棋盘图

(2) 寻找可用棋盘角点,在每幅棋盘内部找到 9×6 个内部角点,并输入小方格的边长。本实验中使用的棋盘小方格边长为 $25.5 \text{ mm} \times 25.5 \text{ mm}$ 。

(3) 找到 10 幅棋盘的角点后,用 Matlab 工具箱进行标定,设置 k_2, k_5 的畸变参数为打开状态,即考虑 k_2, k_5 的畸变影响,并反复步骤(2),每次反复以上一次的标定结果作为初始量进行角点的重新寻找,最终找到角点像素误差较小的标定值。本次标定实验角点平均像素误差 $err = [dX_{err}, dY_{err}] = [0.18574, 0.19177]$, 每一个角点的误差图如图 4 所示。

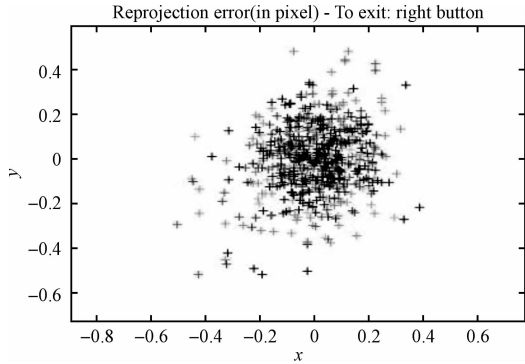


图 4 角点误差图

(4) 保存左摄像机标定结果,重复步骤(1)~(3),进行右相机的标定,最终得到两个摄像机在水下各自的内参数和畸变参数的标定结果,如表 1、表 2 所示。

表 1 左摄像机标定结果

| | |
|-----------------|--|
| Focal Length | $f_c = [\alpha_x, \alpha_y] = [443.887, 431.116]$ |
| Principal point | $c_c = [u_0, v_0] = [172.009, 120.281]$ |
| Distortion | $k_c = [k_1, k_2, k_3, k_4, k_5] = [-0.594, 0.880, 0.00719, -0.00668, 0.3225]$ |
| Pixel error | $err = [0.182, 0.185]$ |

表 2 右摄像机标定结果

| | |
|-----------------|---|
| Focal Length | $f_c = [\alpha_x, \alpha_y] = [455.175, 441.349]$ |
| Principal point | $c_c = [u_0, v_0] = [163.796, 89.140]$ |
| Distortion | $k_c = [k_1, k_2, k_3, k_4, k_5] = [-0.583, 0.684, 0.0111, -0.00359, 0.4102]$ |
| Pixel error | $err = [0.186, 0.192]$ |

(5) 最后由上述标定得到的摄像机内外参数 r, t , 在 Matlab 中验证标定结果。右摄像机和 10 幅标定棋盘的相对位置图如图 5 所示。将图中各个棋盘的相对位置和原始标定图片相比较,并结合图中的比例刻度,可以验证标定的准确度。至此单个摄像机的标定工作完成。

2.3 双目立体标定

双目立体标定的目的是:在得到左、右摄像机各自的内参数和畸变参数以后,以此为基础建立起左、右摄像机坐标系之间的坐标变换,得到左、右摄像机坐标之间的旋转变换矩阵 R 和平移变换矩阵 T 。立体标定得

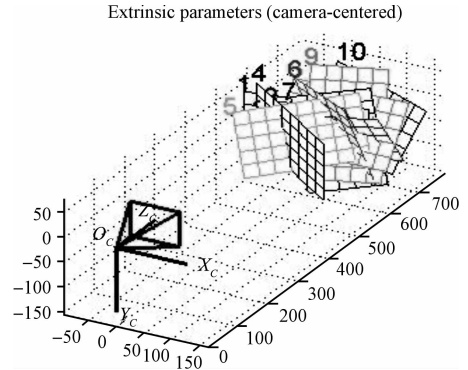


图 5 单摄像机标定结果验证(单位:mm)

到的 R, T 是下述前向平行校正的定位算法的基础。

同样,应用 Matlab 标定工具箱,可以标定得到以左摄像机为固定坐标基准、右摄像机向左摄像机变换的矩阵 R, T 。立体标定结果如下:

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & -0.0020 & 0.0042 \\ 0.0020 & 1.0000 & -0.0062 \\ -0.0042 & 0.0062 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$T = [66.9016 \quad -0.2824 \quad 1.1478] \quad (11)$$

从 R 中可以看出,两个摄像机的放置还是接近平行的,旋转变换的角度较小。从 T 中可以看出,两个摄像机的 y, z 坐标基本重合,但还是存在一定偏差,在 x 方向上的距离是 66.9016 mm ,这个值和实际测量两个镜头之间的距离是比较吻合的。两个摄像机和 10 幅棋盘的相对位置如图 6 所示。

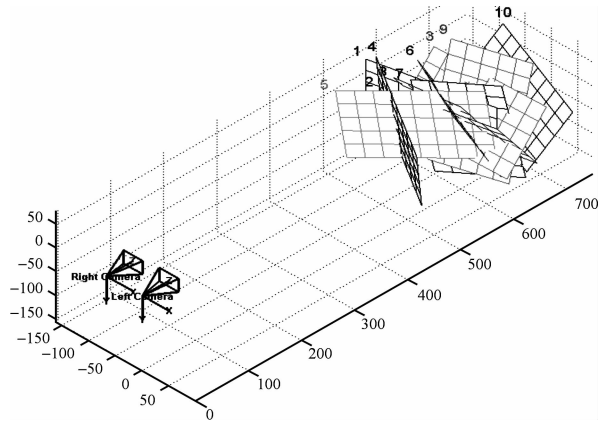


图 6 双目标定验证(单位:mm)

3 前向平行校正定位算法

在进行水下摄像机标定、得到摄像机内外参数后,接下去就是利用内外参数进行目标定位。双目摄像机系统的两个摄像机的摆放总有一定几何角度,或者刻意增加角度来增加两个摄像机的视野重合面积,如图 7 所示,若考虑摄像机摆放光轴的交角,则会使摄像机在定位算法上较为复杂,若不考虑光轴的交角,则会使

定位产生较大的误差。

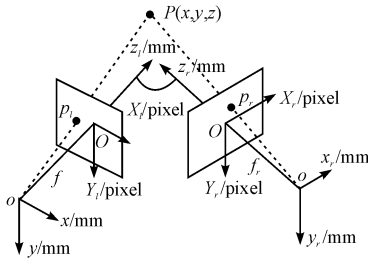


图7 一般双目立体视觉模型

在传统的双目立体定位算法中,一般是利用上述标定的两个摄像机的内外参数,匹配左右摄像机图像平面上的特征点生成共轭点对集合 $\{(p_{li}, p_{ri})\}, i = 1, 2, 3 \dots, n$, 每一个共轭点对定义的两条射线,相交于空间某一场景点即得到目标点坐标。这样,目标物坐标提取问题就转为求取两条射线方程相交求交点问题。由于存在系统误差,两条射线不一定相交,往往利用最小二乘法求得近似解,具体算法可参考文献[11]。

本研究中设计的算法首先结合摄像机的内、外参对两个摄像机进行立体校正,使两摄像机成像平面在数学上前向平行,光轴所成角度为0,如图8所示,然后再根据下述较为简单的几何运算得到目标物的三维世界坐标。由于该算法先进行校正,再进行简单线性定位运算,使算法大大简化。

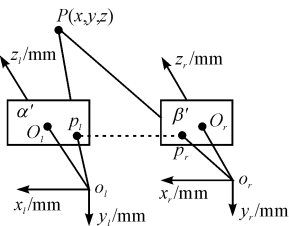


图8 前向平行双目立体视觉模型

3.1 立体校正过程

基于 Bouguet 算法^[12]的立体校正变换如图9所示。为了使图像重投影畸变最小化,Bouguet 算法将旋转矩阵 R 分离成 R_l 和 R_r 两部分,即两个摄像机成像平面在数学上各旋转一半角度(如图10所示,左摄像机从 α 平面旋转到 α' 平面,右摄像机从 β 平面旋转到 β' 位置)并结合各自的摄像机内参数和畸变参数达到前向重合位置。

用 Visual C++ 结合 OPENCV 库能很好地编写出该算法。首先利用函数 cvStereoRectify() 输入两个相机的内外参及立体标定结果 R, T ,可以得到两个摄像机各自的旋转矩阵 R_l 和 R_r 以及校正后的投影矩阵 P_l, P_r ,之后利用函数 cvInitUndistortRectifyMap() 输入 R_l, R_r, P_l, P_r 及畸变参数 K_1, K_2 计算用来重投影的映

射查找表 mapx 和 mapy,最后通过重投影函数 cvRe-map() 结合查找表 mapx 和 mapy 重投影,分别计算得到两幅对应特征点 y 坐标相同的且成像平面重合的左、右摄像机图像 α', β' 。通过立体校正和重映射的两个摄像机的图像如图10所示。

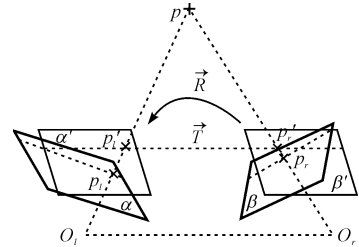


图9 左、右摄像机立体校正图(Bouguet 算法)

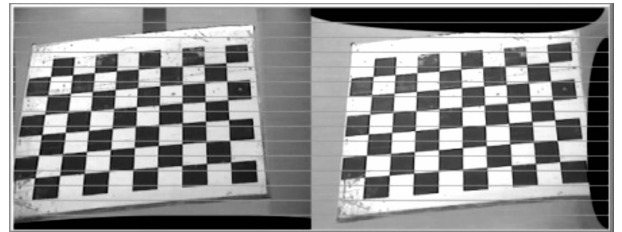


图10 立体校正重投影后的左、右摄像机对应图像

从图10中可以看到,该棋盘图像上面对应点的 y 坐标已经对齐(即在同一条灰线上面),而且已经消除了图像畸变,但是图像整体区域有所变小,存在重投影画面畸变。重投影画面畸变大小由两个摄像机所成夹角决定,夹角越大,畸变越大,因此,要求两相机在一开始就尽量保持平行,以使画面畸变最小化。

3.2 坐标计算

如图8所示, α', β' 为校正后前向平行的两个平面,由 $P(x, y, z), p_l(X_l, Y_l), p_r(X_r, Y_r)$ 之间的几何比例关系可以得到:

$$\begin{cases} X_l = f \frac{x}{z} \\ X_r = f \frac{(x - o_l o_r)}{z} \\ Y_l = Y_r = f \frac{y}{z} \end{cases} \quad (13)$$

设基线距离 $o_l o_r$ 为 B , 视差 $d = X_l - X_r$, 则点 $P(x, y, z)$ 的坐标可按下式求解得:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} BX_l/d \\ BY_l/d \\ Bf/d \end{bmatrix} \quad (14)$$

该系统目标物为球形,视觉捕捉的为该球的球心。因此,图像坐标 (X_l, Y_l) 可由霍夫变换提取立体校正后左图像目标物球心得到;视差 d 由两幅图像提取出来的

球心横坐标作差得到,而 $B = T_x, T_x$ 是上述立体标定得到的参数 T 的第一个元素,为校正后摄像机焦距。

至此,只要将左摄像机像平面坐标 (X_l, Y_l) ,视差 d ,以及左右摄像机平移矩阵 T 中的 $T_x (B = T_x)$,焦距 f 代入式(14)即可得到 P 点的三维坐标 (x, y, z) ,具体用 Visual C++ 软件编程计算实现。

4 定位实验及分析

定位实验通过在水箱里放入一圆球,然后通过

表 3 前向平行校正的双目视觉水下定位系统实验数据

| z/cm | $d/pixel$ | z'/cm | $d'/pixel$ | $E/(%)$ | $e/pixel$ | $P/pixel$ | p/mm |
|--------|-----------|---------|------------|---------|-----------|-----------|-----------------------|
| 20 | 126.15 | 20.35 | 124 | 1.75 | 2.15 | 247,156 | 48.21,25.62,203.46 |
| 30 | 84.10 | 30.77 | 82 | 2.57 | 2.1 | 217,125 | 48.44,13.46,307.67 |
| 40 | 63.07 | 40.69 | 62 | 1.72 | 1.07 | 202,147 | 47.87,41.54,406.91 |
| 50 | 50.46 | 51.49 | 49 | 2.98 | 1.46 | 189,161 | 42.83,71.67,514.87 |
| 60 | 42.05 | 61.53 | 41 | 2.55 | 1.05 | 174,144 | 26.71,57.92,615.33 |
| 70 | 36.04 | 72.08 | 35 | 2.97 | 1.04 | 170,143 | 23.64,65.94,720.82 |
| 80 | 31.54 | 81.38 | 31 | 1.72 | 0.54 | 157,137 | -1.36,61.50,813.83 |
| 90 | 28.03 | 93.44 | 27 | 3.82 | 1.03 | 153,138 | -11.48,73.09,934.39 |
| 100 | 25.23 | 105.12 | 24 | 5.12 | 1.23 | 146,138 | -32.42,82.22,1051.19 |
| 110 | 22.94 | 114.68 | 22 | 4.25 | 0.94 | 149,142 | -26.25,101.86,1146.75 |
| 120 | 21.02 | 126.14 | 20 | 5.12 | 1.02 | 152,129 | -18.84,68.56,1261.43 |
| 130 | 19.41 | 140.16 | 18 | 7.82 | 1.41 | 148,130 | -35.80,79.90,1401.59 |
| 140 | 18.02 | 148.40 | 17 | 6.00 | 1.02 | 145,127 | -49.71,72.79,1484.03 |

z —实际深度,为物体距离摄像机密封盖的水平距离,由刻度尺实际测量得到; z' —测量深度,由上述算法计算得到,为 $P(x, y, z)$ 中的 z 坐标; d —实际视差,是实际深度值 z 根据式 $z = Bf/d$ 即 $d = Bf/z$ 计算得到; d' —测量视差,是通过霍夫变换提取左右摄像机图像中球心坐标的横坐标值做差求得; E —距离误差, $E = 100\% \times (z' - z)/z$; e —视差偏差, $e = d - d'$; P —左摄像机图像坐标; p —球心物理坐标。

由上述数据得到的距离变化曲线 $z' - z$,视差变化曲线 $d - z$,距离误差曲线 $E - z$,视差偏差曲线 $e - z$ 如图 11 ~ 14 所示。

从图 11 ~ 13 可以看到,该算法的深度测量精度与目标物距离摄像机的距离 z 有关,随着距离 z 的增大,测量值 z' 逐渐偏离实际值 z ,且离摄像机距离越远,误差越大。但是该算法的误差在本实验中始终没有超过 10%,在目标物处于 20 cm ~ 80 cm 时能保证较好的准确度,误差在 3% 以内。由图 12 ~ 14 可知,随着距离 z 的增加,视差逐渐减小,测量视差 $d' - z$ 变化曲线和实际视差 $d - z$ 曲线基本重合,视差偏差 e 基本在 1 ± 0.5 之间,波动很小。这说明,随着距离 z 的增加,同样的视差小偏差 e 就能引起较大的距离误差 E ,原因是随着距离的增加,视差值越来越小,视差偏差占视差的百分比越来越大,从而产生大的误差。因此采用该算法必须设定一个有效工作距离范围,如在上述焦距 $f = 6$ mm 和基线 $B = 66.9$ mm 的情况下的有效工作距离为 20 cm ~ 80 cm,将机械手工作范围设定在该范围内,能获得较高的精度(3% 以内),如果误差的容忍度较高,或者采取较好的设备,该算法的工作距离也将更大。

双目定位系统寻找该球球心,获得球的坐标位置进行定位计算。坐标系仍然以左摄像机坐标系为世界坐标系,计算得到的球心坐标都是相对于左摄像机而言。

实验中摄像机的焦距定为 $f = 6$ mm/377.12 pixel,基线距离为 $B = 66.9$ mm。由于双目立体视觉定位误差主要来自于深度 z ,及物体距离摄像机的距离,本研究通过改变球离摄像机的距离 z 值,以获得 13 组数据来观测测量精度,如表 3 所示。

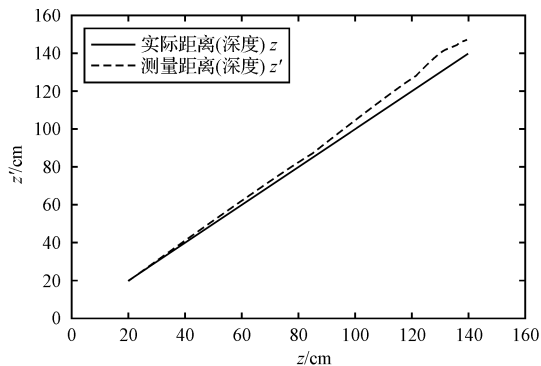


图 11 测量距离(深度)变化曲线

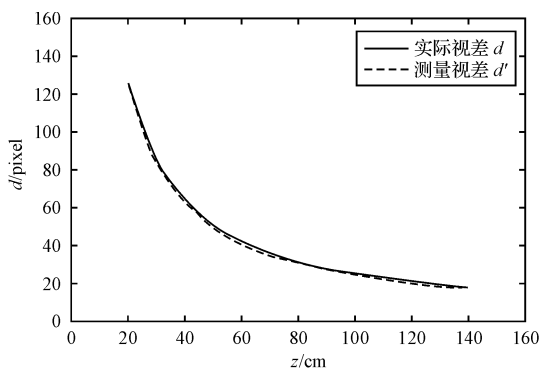


图 12 测量视差变化

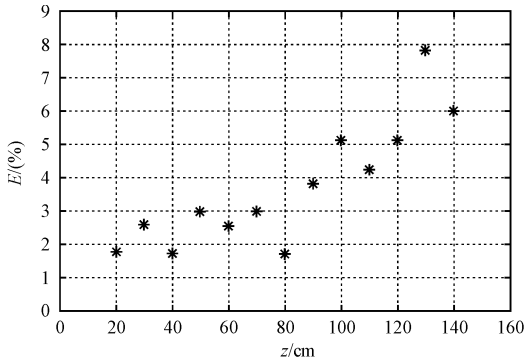


图 13 测量距离误差变化 E-z 曲线

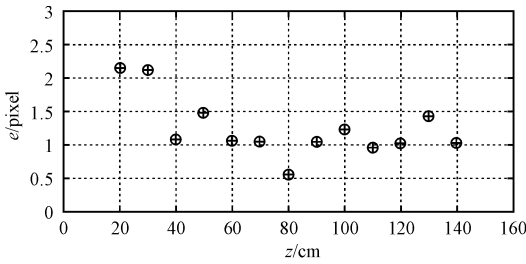


图 14 测量视差偏差变化 e-z 曲线

5 结束语

本研究通过对水下机器人机械手视觉定位系统的分析,设计出一套能进行水下双目摄像机视觉定位的系统。针对水下环境的特殊性,本研究设计出一种水下密封保护装置和水下标定方法,并通过标定得到在透镜、密封盖、水三重透视系统下的摄像机内参和3个畸变参数。最后,针对传统较为复杂的射线相交坐标点提取法,提出一种较为简单的前向平行校正定位算法,并通过实验验证了该算法具有较高的准确度和适用范围。该系统后续设计中,可将获得的坐标值输入

机械手控制器,引导机械手进行水下视觉定位操作。

参考文献 (References):

- [1] 邱联奎. 基于机械手的视觉伺服控制及其应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学自动化系,2006:16-17.
- [2] BASRI R, RIVLIN E, SHIMSHONI I. Image-based Robot Navigation under the Perspective Model[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit: [s. n.], 1999:2583-2587.
- [3] 胡震,袁小海,陈荣盛,等. 用于目标检测和精确定位的水下机器人视觉系统[J]. 中国造船,2000,41(2):89-94.
- [4] HOLLINGHURST N, CIPOLLA R. Visually guided gasping in unstructured environments[J]. **Journal of Robotics and Autonomous Systems**, 1997(19):337-346.
- [5] 邱联奎,雷建和,宋全军,等. 基于立体视觉的机械手未知平面内曲线跟踪[J]. 传感技术学报,2007,20(2):293-297.
- [6] 肖心远,石永华,王国荣,等. 机器人水下焊缝跟踪中双目立体视觉系统[J]. 焊接设备与材料,2009,38(1):37-40.
- [7] SLAMA C C. Manual of Photogrammetry[M]. 4th ed. Maryland: American Society of Photogrammetry, 1980.
- [8] 徐杰,王宗义,刘涛. 水下图像的校正[J]. 黑龙江科技学院学报,2008,18(2):133-136.
- [9] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [10] ZHANG Zhen-you. Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra: [s. n.], 1999:666-673.
- [11] 张钧,张宏,刘小茂,等. 双目立体视觉中物点定位的一种快速算法[J]. 信息与控制,2009,38(5):563-570.
- [12] BRADSKI G, KAEHLER A. Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library[M]. Sebastopol: O'Reilly Media, 2008. [编辑:李辉]

(上接第 544 页)

参考文献 (References):

- [1] 路甬祥. 液压气动技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [2] 朱华,战长松. 往复泵[M]. 北京:机械工业出版社, 1992.
- [3] COLLIER S L. Know your triplex mud pump-part 5: value behavior must be clearly understand[J]. **World Oil**, 1982, 194(4):109-114.
- [4] BARRY W R. Plunger pump development appears promising [J]. **World Oil**, 1972, 184(4):78-82.
- [5] Reed Tool Company. How to Get the Most from Mud Pump Parts[M]. Petroleum Times, 1976.
- [6] RAO S S. Optimization Theory and Applation[M]. 2nd ed. Wiley Eastern Limited, 1984.
- [7] 《往复泵设计》编写组. 往复泵设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1987.
- [8] 闫国军,赵军明. 往复泵阀运动规律的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(18):1617-1619.
- [9] 孟英峰. 往复泵运动规律的建模与仿真[J]. 石油机械, 1995, 23(5):16-20.
- [10] 付永领,祁晓野. AMESim 系统建模和仿真-从入门到精通[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.
- [11] 陈绍. 阀控液压转向系统的仿真与分析[J]. 现代制造技术与装备, 2009(2):77-80.
- [12] 亓立军,孙文涛,戚大波. 一种新型高炉重力除尘器排灰阀的研制与应用[J]. 现代制造技术与装备, 2009(4): 34. [编辑:张翔]