

文章编号: 2095-2163(2021)02-0055-05

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

基于双目相机的光学高度测量系统

王修文, 李志伟, 李宏伟, 田智源, 胥震宇, 田燕青

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 根据双目立体视觉模型, 搭建一个实验室专用的高度测量系统。首先使用 Matlab 自带的工具箱对双目相机进行多次标定, 获取实验所需的诸多参数, 然后通过立体校正技术建立修正后的世界坐标与像素坐标之间的关系方程。在 VS2015 结合 OpenCV 的编程环境下, 利用立体匹配算法和视差理论获取目标表面的三维空间信息。最后通过选定同一目标的 2 个特征点获取其空间坐标, 达到高度测量的目的。实验结果显示, 该系统能够有效实现真实场景下的三维信息测量。

关键词: 双目立体视觉; 相机标定; 视差图; 高度测量

Optical height measurement system based on binocular camera

WANG Xiuwen, LI Zhiwei, LI Hongwei, TIAN Zhiyuan, XU Zhenyu, TIAN Yanqing

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] According to the binocular stereo vision model, this paper builds a laboratory-specific height measurement system. By using the Matlab toolbox to calibrate the binocular camera to obtain many parameters required by the experiment, the paper establishes the relationship equation between the corrected world coordinates and the pixel coordinates through image correction technology. Under the programming environment of VS2015 combined with OpenCV, the stereo matching algorithm and the parallax theory are used to obtain the three-dimensional spatial information of the target surface. Finally, the space coordinates of the same target are obtained by selecting two characteristic points to achieve the purpose of height measurement. The experimental results show that the system can achieve 3D information measurement of real scenes well.

[Key words] binocular stereo vision; camera calibration; disparity map; height measurement

0 引言

从古至今,人类一直在尝试使用工具描绘看见的任何事物,现代科技不断向前发展的同时,新的高度测量技术也被不断提出。对于各所高校而言,在实验室内更加准确快速地获得周围物体的尺寸有助于验证阶段性的实验成果,相比于费时、费力且效率低下的普通测量方法,双目视觉测高技术有着多目标同时检测,非接触式、高精度、高效率的优势。

在双目视觉测量这一领域,国内外许多学者做了大量研究与实践。1966年,最小二乘法首次被 Hallert 用于标定观察数据的处理上,在野外立体坐标测量仪上的应用更是取得突破性的精确结果。周科杰等人^[1]推出了一种采用双目相机结合编码结构光的三维测量系统,该系统能通过移动测量仪获得三维点云矩阵,进而完成对大型曲面的测量。虽然目前对立体视觉技术的理论研究已经逐渐趋于完善,但由于在不同的场景下的需求也不相同,这就对

整个立体视觉系统的鲁棒性和稳定性提出了更高的要求。

为提高获得的相机相关参数的准确性,主要对双目视觉的标定方法进行了改良,开创性地使用预标定+单目标定+双目标定的方式进行立体标定,实验结果最终也论证了该方法行之有效。

1 双目测高的原理

作为机器视觉的一类重要分支,双目视觉测量技术采用一对双目模块来模拟人眼的视觉机制,从而获取同一场景 2 个不同视角下的 2 幅图像,再依据视差原理建立相应数学模型来还原该场景下的深度信息,最后利用相似原理,计算出目标物体同一面上最高最低点的空间三维坐标^[2]。

双目立体视觉模型如图 1 所示。图 1 中, P_L 与 P_R 分别是点 $P(x, y, z)$ 在左右相机成像平面上的投影, O_R 、 O_L 分别为左右相机光心, n 为相机主光轴向量, f 为相机焦距。若已知空间点 P 在左右像平

基金项目:上海工程技术大学研究生科研创新项目(19KY0201)。

作者简介:王修文(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:图像识别与处理;李志伟(1982-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向:光电子、图像处理、机器视觉等。

通讯作者:李志伟 Email: zhiwei.li@sues.edu.cn

收稿日期: 2020-11-19

面的投影坐标 P_L 和 P_R 以及相机标定参数,即可计算出点 P 的三维空间坐标^[3]。

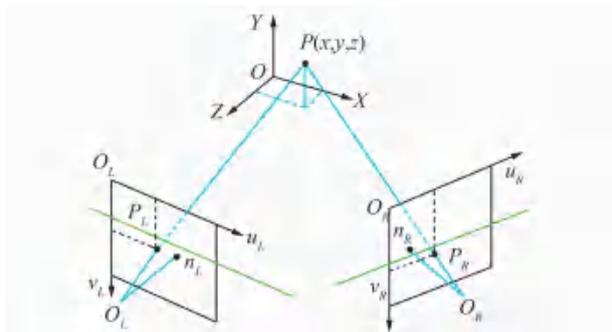


图1 双目立体视觉模型

Fig. 1 Binocular stereo vision model

1.1 双目标定

双目相机标定要求测定参照物上每个特征点相对于世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) 的位置,图像平面坐标与三维空间坐标间的对应关系,这个映射关系主要由双目相机的内、外参数确定^[4-5]。换句话说,双目相机标定的主要目的就是求取相机内外参数以及相应的畸变系数,因为这会直接影响到双目测量的结果。

标定方法采用由张正友教授提出的单平面棋盘格法,以下简称张氏标定法^[6],标定板如图2所示。张氏标定法直接将世界坐标系与标定板平面融合,即 $Z_w = 0$,标定板平面上任意一点 P 的齐次坐标为 $(X_w, Y_w, 0, 1)$,在图像像素坐标系下表示为 $(u, v, 1)$ 、图像物理坐标系 $(x, y, 1)$ 、相机坐标系 (X_c, Y_c, Z_c) ,用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & \gamma & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} u = x/dx + u_0, \\ v = y/dy + v_0. \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_R & M_T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & \gamma & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_R & M_T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_R & M_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中, M_1 表示相机内置参数矩阵,由 $f_x, f_y, u_0, v_0, \gamma$ 决定,只是 γ 一般看作 0 使用,这五个参数仅与相机内部结构有关,而 M_2 包含旋转矩阵 M_R 和平移矩阵 M_T 。

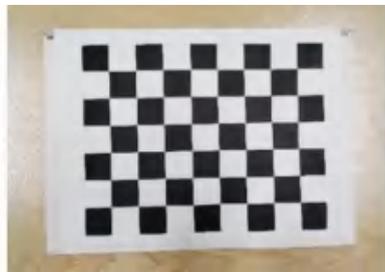


图2 标定板实物图

Fig. 2 Calibration board

由于诸多参数都是在标定这一阶段获得,因此为了使标定结果更加准确,创造性地使用预标定+单目标定+双目标定的方式。

预标定如图3所示。在预标定阶段,首先利用 Matlab 的自动标定工具箱—Stereo Camera Calibrator 对采集的 24 组棋盘格图像来进行筛选标定,再根据 Mean Error Pixels 指标来剔除标定过程中误差较大的图像对。

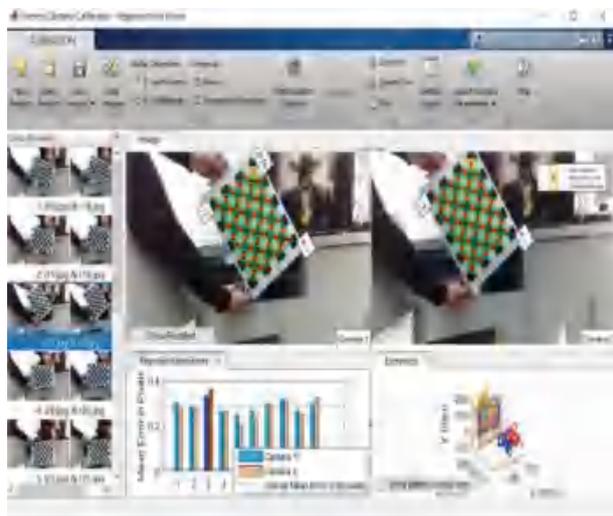


图3 预标定

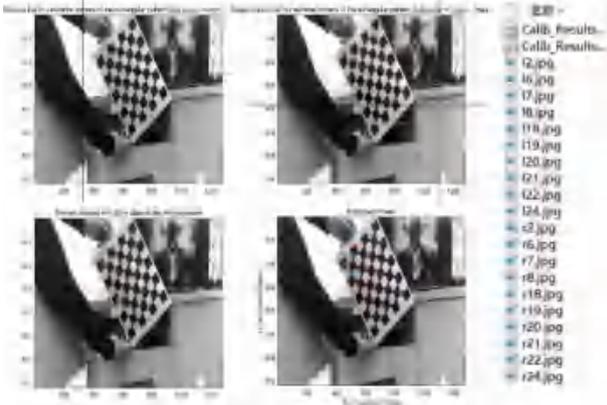
Fig. 3 Pre-calibration

单目标定如图4所示。角点选取见图4(a)。在第二阶段,使用 calib 工具箱分别对筛选后的左/右视图进行手动标定,这一过程主要包括手动设置角点以及自动提取角点,由此得到 2 组单目标定的参数,见表1。图4(b)中则展示了单目镜头与标定板之间的相对三维空间图。

表 1 左右相机部分参数

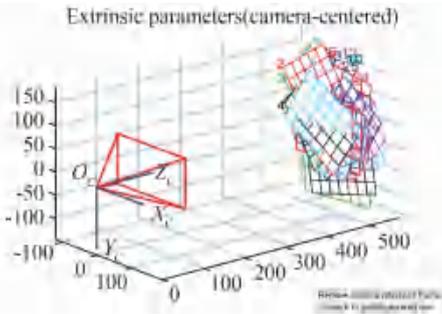
Tab. 1 Build-in parameters of left and right camera

左相机	右相机
焦距 [1 230.788 42 1 244.188 06]±[2.853 18 2.978 42]	[1 247.161 89 1 234.775 46]±[2.395 85 2.711 14]
主点 [608.242 70 257.838 62]±[4.342 02 4.447 98]	[589.279 35 272.085 24]±[4.626 46 4.436 35]
畸变 [0.253 87 -0.506 67 -0.052 99 -0.012 18 0.000 00]±	[0.239 34 -0.186 53 -0.059 75 -0.021 71 0.000 00]±
系数 [0.075 60 0.582 88 0.009 54 0.003 38 0.000 00]	[0.071 40 0.285 46 0.010 34 0.004 28 0.000 00]



(a) 角点选取

(a) Extract the corner points of the calibration image



(b) 单目三维空间图

(b) Stereograph of monocular camera calibration

图 4 单目标定

Fig. 4 Monocular calibration

接下来在第三阶段, 换用 Stereo Calibration 工具箱, 通过导入第二阶段的成果, 对单目标定的结果进行整合。双目标定三维空间图如图 5 所示。2 个相机的空间配置和校准平面以一种 3D 图的形式展现出来, 在全局立体优化之后, 最终得到左右相机的参数矩阵 M'_L 和 M'_R , 以及旋转矩阵 M_R 和平移矩阵 M_T 。研究求得的计算结果为:

$$M'_L = \begin{bmatrix} 1 & 230.79 & 0 & 608.24 \\ 0 & 1 & 230.78 & 257.83 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$M'_R = \begin{bmatrix} 1 & 247.12 & 0 & 589.27 \\ 0 & 1 & 234.77 & 272.11 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$M_R = \begin{bmatrix} 0.999 & 9 & 0.007 & 6 & -0.013 & 4 \\ -0.007 & 4 & 0.999 & 9 & 0.014 & 3 \\ 0.014 & 1 & -0.013 & 9 & 0.999 & 9 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$M_T = \begin{bmatrix} -61.804 \\ 1.141 \\ 10.283 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

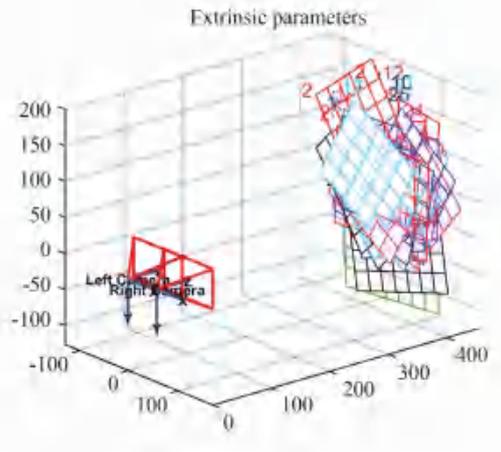


图 5 双目标定三维空间图

Fig. 5 Three-dimensional space map of binocular calibration

1.2 立体校正

想要通过 2 幅图像对一个点的深度信息进行估计, 就必须严格保证能在 2 幅图像中匹配到该点。同时, 为了提高匹配的效率, 左右相机的成像平面应处于同一平面上。但是在实际操作中, 仅仅通过平放摄像头无法保证光心 O_R 与 O_L 保持在一条轴上, 参见图 1。此时就需要使用图像立体校正技术, 把 2 个不同的图像平面重新投影到同一平面上, 使得 2 幅图像满足匹配条件^[7-8]。

进行校正后的双目立体视觉模型如图 6 所示。由图 6 可以看到, 进行立体校正后, 图像畸变消除, 2 台相机的 X 轴重合, 左右相机光心 O_R , O_L 之间为基线 B , 光轴与相机成像平面垂直, 左右成像面上的每一行都严格水平对齐, 满足极线约束条件, 匹配点的搜索范围也从二维降到了一维上, 在这种结构下寻找 P 点在左右成像面上的投影 u_L , u_R 之间的匹配关系将会十分便捷^[9]。

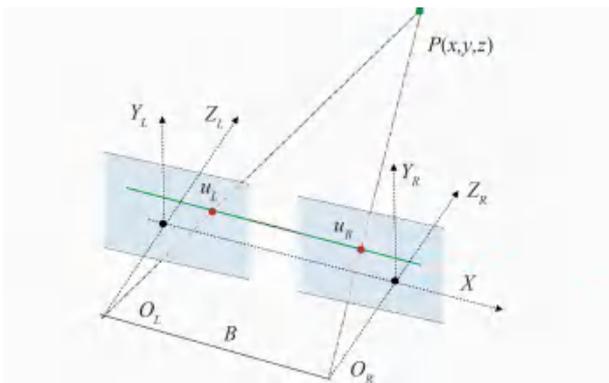


图6 立体校正后的双目视觉模型

Fig. 6 Binocular stereo vision model after stereo correction

1.3 立体匹配

立体匹配是双目立体测量的核心过程,根据输入的参考图像 R 和目标图像 T 得到参考图像 R 对应的视差图,进而能较为准确地计算出目标的三维空间信息,这就是双目匹配的过程^[10]。

由于立体校正后,左右相机成像平面重合,因此为便于说明,将图6转化为俯视视角来查看。立体校正后的左右图像对如图7所示。三角测量原理如图8所示。由图8可知,在光轴平行与相机镜头焦距 f 相同的条件下, B 为基线长度, Y 轴垂直屏幕指向内部,目标点 $P(x, y, z)$ 在左、右相机成像平面的成像坐标分别为 P_L 和 P_R , a 为相机镜头宽度,左右镜头中心到 P_L , P_R 的距离为 m, n , 则根据三角测量原理可推出:

$$\frac{z-f}{z} = \frac{B - (m+n)}{B}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_L = \frac{a}{2} + m \\ x_R = \frac{a}{2} - m \end{cases} \Rightarrow x_L - x_R = m + n, \quad (10)$$

再由上式可得:

$$\frac{z-f}{z} = \frac{B - (x_L - x_R)}{B} \Rightarrow z = \frac{Bf}{x_L - x_R} = \frac{Bf}{dis}, \quad (11)$$

同理可得:

$$x = \frac{x_L \cdot z}{f}, \quad y = \frac{y_L \cdot z}{f}. \quad (12)$$

此时所得 (x, y, z) 即为目标在世界坐标系中的坐标 (X_W, Y_W, Z_W) , 其中左右相机焦距 f 与基线长 B , 均是在匹配前便得到的常量,而视差 dis , 即左右相机像素点之间的对应关系,是求取深度 z 的核心要素^[2-3,7]。



图7 立体校正后的左右图像对

Fig. 7 Left and right image pairs after stereo correction

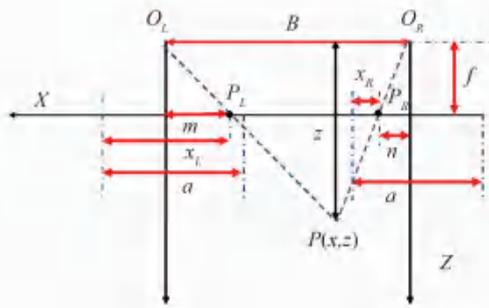


图8 三角测量原理

Fig. 8 Triangulation principle

2 实验与结果分析

2.1 实验平台搭建

实验室用双目立体视觉系统的特点之一是成本低、操作简单,其核心组成为一个双目视觉模块、专用支架和一台计算机。使用一根 USB 数据线连接计算机与双目相机,双目视觉模块的实物图如图9所示,主要参数见表2。



图9 双目相机实物图

Fig. 9 Binocular camera physical map

表2 双目相机硬件参数

Tab. 2 Binocular camera parameters

参数类型	具体配置
接口	USB3.0(兼容USB2.0)
传输速度/(MB · S ⁻¹)	≥100
分辨率	1 280×480
帧速率/fps	30
接口协议	UVC 协议
尺寸大小/(mm×mm)	74×23

平台的搭建也是十分快捷,只需将双目相机固定在支架上,再将支架固定在实验桌上,最后使用 USB 数据线与笔记本连接就完成了。整个双目测距

系统的软件平台基于 Win10 桌面操作系统,相机标定使用 Matlab2010b 的标定箱工具,立体匹配算法运行环境为 Microsoft Visual Studio 2013,整个系统的具体运作流程如图 10 所示。



图 10 双目立体视觉高度测量流程

Fig. 10 Binocular stereo vision ranging process

2.2 实验结果

使用半全局匹配算法中的 SGBM 算法与局部立体匹配算法中的 BM(Block Matching)算法进行对比。

使用 BM 算法对图 7 进行立体匹配后输出的视差图如图 11 所示。可以从视差图中看出整个场景的大致轮廓被基本还原,但由于错误匹配点较多,信息缺失十分严重,视差图整体识别度比较差,因此不具备参考价值。

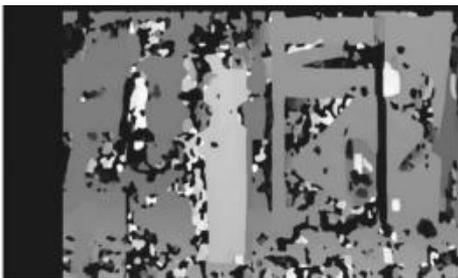


图 11 BM 算法输出视差图

Fig. 11 BM algorithm output disparity map

使用 SGBM 算法对图 7 进行立体匹配后输出的视差图如图 12 所示。虽然信息也有缺失,但整体轮廓较为完整,分辨率较高,且与 BM 算法的结果相比,不正确的匹配点更少。



图 12 SGBM 算法输出视差图

Fig. 12 SGBM algorithm output disparity map

由于实验条件有限,暂时只使用了 2 种匹配算法。误差结果见表 3,本系统测量结果较为准确,误差控制在 1% 左右。

表 3 实验数据与误差分析

Tab. 3 Experimental data and error analysis

序号	系统测量高度 a /mm	实际高度 b /mm	误差 $((b-a)/b)$ /%
1	134.892	136.4	1.105
2	229.524	231.8	0.009
3	486.829	491.3	1.009

3 结束语

利用 Matlab 来研发真实场景图像对的采集和实验所用双目相机的标定,并在双目标定这一阶段结合了多种标定方法,从而保证了所得相机内置与外置参数的精确性。在 VS2013 编程环境中结合 OpenCV,完成对双目图像的校正,在双目匹配阶段对 BM 和 SGBM 两种算法生成的视差图进行比较。最终得到的实验结果表明该系统可以很好地实现真实场景的三维高度测量。

参考文献

- [1] 周科杰,冯常. 基于双目视觉的三维测量技术研究[J]. 计算机测量与控制,2019,27(1):22-25,31.
- [2] 曾劲松,薛文凯,徐博凡,等. 双目视觉引导机器人定位抓取技术的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(1):131-133,137.
- [3] 孔繁淇. 基于双目视觉的无人机测距与避障方法研究[J]. 科技风,2019(1):101.
- [4] 王晓宁,宋晓炜,杨蕾,等. 双目视觉下交通路标的立体匹配算法研究[J]. 中原工学院学报,2018,29(6):56-60.
- [5] 刘锐,陈凤翔,陈科羽,等. 基于双目视觉的障碍物检测方法研究[J]. 计算机测量与控制,2018,26(12):67-71.
- [6] 陶凯. 基于双目视觉室内环境的机器人导航和避障算法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2018.
- [7] 李薇. 基于双目视觉的特定运动目标跟踪和实时测距方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [8] 朱平,甄子洋,覃海群,等. 基于立体视觉和光流的无人机避障算法研究[J]. 电光与控制,2017,24(12):31-35.
- [9] 贾宁. 基于双目视觉的家庭机器人的目标识别与检测[J]. 现代电子技术,2017,40(23):51-54,58.
- [10] 刘维. 基于双目立体视觉的物体深度信息提取系统研究[D]. 长沙:中南大学,2009.