

双目立体视觉系统的精度分析

刘俸材¹, 谢明红¹, 颜国霖²

(1. 华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021; 2. 黎明大学机电工程系, 福建 泉州 362000)

摘 要: 为提高双目立体视觉系统的测量精度, 分析双目视觉系统的工作原理以及该系统各个环节的误差模型。通过提高标定模板的精度、增加标定图像, 可以减小标定误差及图像校正行对齐误差。分析图像识别误差对视觉系统测量精度的影响, 导入视觉系统的结构参数与测量误差之间的关系, 从而确定结构参数对测量精度的作用。讨论物距对测量精度的影响, 并给出合适的物距范围。

关键词: 立体视觉; 精度分析; 摄像机标定; 立体校正; 结构参数

Accuracy Analysis of Binocular Stereo Vision System

LIU Feng-cai¹, XIE Ming-hong¹, YAN Guo-lin²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Department of Electromechanical Engineering, Liming University, Quanzhou 362000, China)

【Abstract】 To raise the measurement accuracy of binocular stereo vision system, working principle of binocular vision system and error model in all aspects are analyzed. The calibration error and the image rectification error can be reduced by improving the accuracy of calibration template and increasing calibration images. By analyzing image recognition errors' influence on the measurement accuracy of the visual system, the relationship between structural parameters of visual system and measurement errors is introduced. The influence of structural parameters to visual system is determined. The influence of object distance on measurement accuracy is discussed and a proper object distance scope is given.

【Key words】 stereo vision; accuracy analysis; camera calibration; stereo rectification; structural parameter

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.19.092

1 概述

双目立体视觉是计算机视觉的一个分支, 利用2台摄像机同时对物体拍照, 根据景物点在左右摄像机图像上的位置关系计算出景物点的三维坐标, 从而可以实现三维测量和恢复。由于结构简单、数据采集方便迅速、属于非接触式测量以及可以应用于各种复杂恶劣的环境中, 双目视觉被广泛应用于三维检测、机器人导航、医学成像等领域^[1]。

目前, 已有许多学者对双目立体视觉进行了非常深入的研究, 但大部分学者都将注意力集中在摄像机标定、特征提取、立体匹配等数学模型方面, 而系统地论述双目视觉系统误差尤其是系统的结构参数对双目视觉系统的精度影响的著作较少。文献[2]分析了数字化量效应对精度的影响, 但没有研究结构参数和摄像机标定误差对视觉系统精度的影响。文献[3]讨论了光轴与基线的夹角、基线长度、焦距等对系统测量精度的影响, 但是没有联系实际论述物距对系统精度的影响。

本文论述摄像机标定、特征提取、结构参数等对测量精度的影响, 对双目视觉系统的设计和使用均能起到指导性作用。

2 双目视觉系统的测量原理

双目立体视觉系统的工作原理是基于视差原理, 图1为双目立体视觉系统的测量原理图。其中, 左摄像机的光心 O_l 为双目视觉系统坐标系的坐标原点; X 轴和 Y 轴方向如图所示; Z 轴可以通过右手定则确定。两摄像机在同一时刻观看空间物体的同一特征点 $P(x_c, y_c, z_c)$, 在左右图像上可分别得到点 P 的对应点 $P_l(x_l, y_l)$ 和 $P_r(x_r, y_r)$ 。

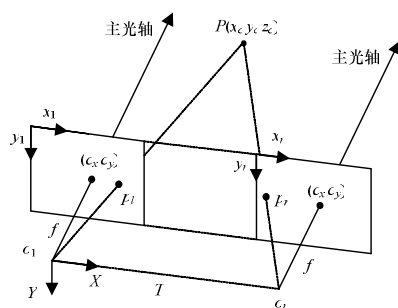


图1 双目视觉原理

假定左右摄像机的图像在同一个平面上, 则特征点 P 在2幅图像具有相同的 Y 坐标, 即 $y=y_l=y_r$, 则由三角几何关系得到:

$$x_l = f \cdot x_c / z_c, \quad x_r = f \cdot (T - x_c) / z_c, \quad y = f \cdot y_c / z_c \quad (1)$$

令视差 $d = x_l - x_r$, 根据三角形相似可以计算出特征点 P 在双目视觉系统坐标系下的坐标:

$$x_c = T \cdot x_l / d, \quad y_c = T \cdot y / d, \quad z_c = T \cdot f / d \quad (2)$$

因此, 左摄像机像面上的任意一点只要能在右摄像机像面上找到对应的匹配点, 就可以确定出该点的三维坐标。

3 视觉系统的各环节与误差分析

对双目视觉系统测量精度有较大影响的主要有摄像机标

基金项目: 福建省高校产学研基金资助重大项目(2010H6016)

作者简介: 刘俸材(1985—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 计算机视觉; 谢明红, 研究员; 颜国霖, 讲师

收稿日期: 2011-03-28 **E-mail:** xmh@hqu.edu.cn

定、立体标定、特征提取等方面。本文将逐一论述各环节对双目立体视觉系统测量精度的影响。

3.1 摄像机标定及误差分析

摄像机标定,是指建立摄像机几何成像模型,描述空间坐标系中的景物点同它在图像平面上的像点之间的对应关系,并求取该模型各参数的过程。在计算机视觉领域,摄像机成像模型一般都采用针孔模型,如图2所示。其中, $x_c y_c z_c$ 为摄像机坐标系, $x_u y_u z_u$ 为图像坐标系。

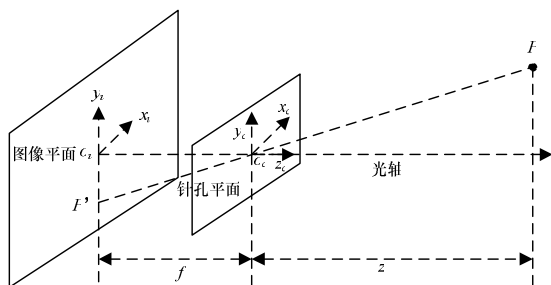


图2 摄像机成像模型

世界坐标系中的点 $X(x_c, y_c, z_c)$ 与其在图像平面上的对应点 (x_u, y_u) 之间的关系如下:

$$s \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 M_c \quad (3)$$

其中, M_1 为摄像机内参数矩阵; M_2 为外参数矩阵; R 为世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵; T 为世界坐标系到摄像机坐标系之间的平移向量。由于摄像机镜头的制造误差,镜头存在一定的径向畸变。在 $r=0$ 处用泰勒级数展开的前3项定量描述:

$$\begin{aligned} x_{\text{corrected}} &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{\text{corrected}} &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (4)$$

镜头的安装误差将带来切向畸变,可以用2个额外的参数 p_1 和 p_2 描述:

$$\begin{aligned} x_{\text{corrected}} &= x + [2p_1 y + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_{\text{corrected}} &= y + [2p_2 x + p_1(r^2 + 2y^2)] \end{aligned} \quad (5)$$

因此,可以用一个五维向量 $d=[k_1, k_2, p_1, p_2, k_3]$ 表示径向误差和切向误差^[4]。摄像机标定的目的就是求取内参数矩阵 M_1 和畸变向量 d 。首先采用张正友的灵活标定算法求取摄像机内参数。然后,考虑到畸变的影响,建立如式(6)的畸变模型:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = (1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 x_i y_i + p_2(r_i^2 + 2x_i^2) \\ 2p_2 x_i y_i + p_1(r_i^2 + 2y_i^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

提取模板图像上的角点坐标,利用畸变模型计算出相应角点的坐标,将这2组坐标值带入目标函数中进行数据拟合,最终算出相应的畸变参数值。数据拟合函数如下:

$$\min F = \sum_{i=1}^N (X_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^N (Y_i - y_i)^2 \quad (7)$$

其中, $r_i^2 = x_i^2 + y_i^2$; (x_i, y_i) 为目标角点的实际坐标; (X_i, Y_i) 为目标角点规范化坐标。由式(7)可以看出,该算法在精确求取摄像机内参数和畸变向量的时候采用最小二乘法,因此,单摄像机的标定结果与采集的标定图像数存在密切关系。一般而言,采集的图像数越多,标定精度越高,但是标定过程耗时越长。本文分别多次采集不同数目的标定图像,通过将空间坐标系中的景物点利用标定参数重投影到摄像机的图像平面,将其与实际图像上的对应位置进行比较,之差即为摄像机标定的绝对误差。标定精度与采集的图像数目的关系如图3所示,

从图3可以看出,随着标定图像的逐渐增多,标定误差逐渐减小。但是当标定图像超过12幅后,误差趋于稳定。在进行摄像机标定的时候,应该对标定模板采集12幅图像以上。

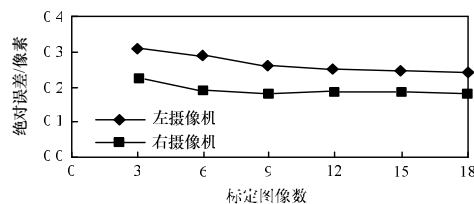


图3 标定图像数与标定精度的关系

3.2 特征提取及误差分析

由于CCD的每一个像素都具有一定的面积,一个理想点(无大小)在CCD像素上的精确位置无法在图像上得到反映。这就在根本上造成了像点坐标误差,即图像识别误差。在三维恢复的过程中,一般都采用基于视差图的三维恢复,因此只需讨论在水平方向上,特征提取对三维恢复的误差即可^[5]。以本文实验所用的维视MV1300-UM摄像机为例,其像元尺寸为 $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$ 。世界坐标系中的点 P 左右图像上的映射点分别为 P_l 和 P_r ,如图4所示。

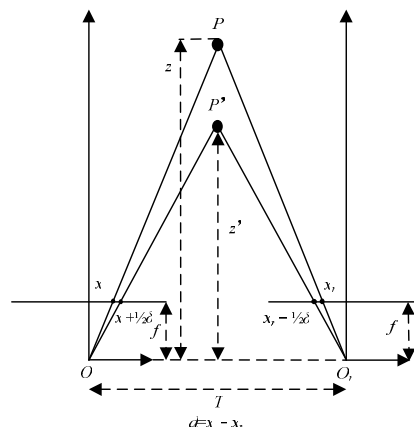


图4 图像识别误差对测量精度的影响

由于点在图像中的定位误差为 $\delta/2$, 则有:

$$\Delta x_l = |x_l - \bar{x}_l| = |x_r - \bar{x}_r| \leq \delta/2 \quad (8)$$

其中, δ 表示像元的宽度。

由式(8)可得:

$$\Delta d = |x_l - x_r| - |\bar{x}_l - \bar{x}_r| \leq \delta \quad (9)$$

即视差值的最大误差为一个像素单位。在式(9)中, x_l 和 x_r 分别为点 P 在左右图像上的理想的 X 坐标值; \bar{x}_l 和 \bar{x}_r 分别为点 P 对应图像上的像素坐标。当左右摄像机图像上的特征提取误差均为最大时,三维测量误差最大。

由图4可得:

$$\frac{Z-f}{Z} = \frac{T-d}{T}, \frac{Z'-f}{Z'} = \frac{T-(d+\delta)}{T} \quad (10)$$

由上式可得: $Z = \frac{fT}{d}$, $Z' = \frac{fT}{d+\delta}$, 则精度误差:

$$\Delta Z = Z - Z' = Z \delta / (d + \delta) \quad (11)$$

由式(11)可以看出,当物距越大,即景物点离摄像机越远时,误差越大。当摄像机的像素尺寸越大时,误差越大。当视差越大时,误差越小。因此,在设计视觉系统结构的时候,适当增大左右摄像机之间的距离。而在测量的时候,物体应当尽量靠近摄像机。因为这样一方面可以减小景深 Z ,另一方面可以增大 d ,从而减小误差。而对摄像机本身质量,

当然像元尺寸越小越好。

4 结构参数的误差分析

4.1 物距对测量误差的影响

对于一个既定的双目视觉系统,由式(11)可知,物体距离摄像机越近,即 Z 越小,误差越小,精度越高。但由图 4 可知,当物体过于接近摄像机的时候,不能实现 2 个摄像机同时拍摄^[6]。因此,在实际使用双目视觉系统的时候,如何确定物体与摄像机之间的距离是一个值得研究的问题。通常情况下,左右摄像机对称布置,且各项参数比较接近,如图 5 所示。

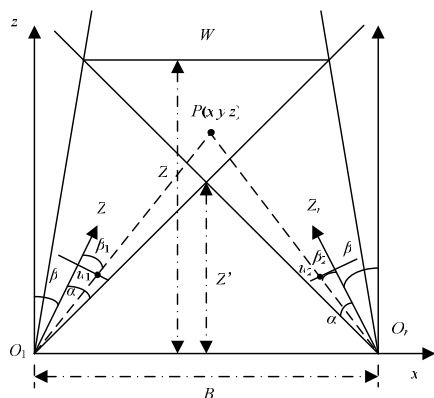


图5 双目视觉系统的可视范围

在图 5 中, α 和 β 分别表示摄像机的视角和摄像机主光轴与 z 轴之间的夹角。该双目视觉系统的可视范围如下:

$$W = \begin{cases} 2z \tan(\alpha + \beta) - B \\ z \in [\text{ctg}(\alpha + \beta)B/2, B/(\tan(\alpha + \beta) + \tan(\beta - \alpha))] \\ B - 2z \tan(\alpha + \beta) \\ z \in [B/(\tan(\alpha + \beta) + \tan(\beta - \alpha)), +\infty] \end{cases} \quad (12)$$

当测量精度要求比较高时,尽可能将物体放在距离摄像机的距离比图中 Z' 略大的位置上。如果精度要求不是很高,而需要提高测量效率的时候,可以适当扩大物距。在本文针对物距对测量误差的实验中,固定基线长度和摄像机光轴与 Z 轴的夹角。其中,基线长度为 112.52 mm,左右摄像机光轴始终保持平行,改变被测物体与基线中点的距离,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,当物距越靠近 Z' 时,测量精度越高。

表1 物距与测量精度之间的关系

物距/mm		300	500	700	1 000
塑料板 1 (212.20 mm×115.40 mm)	长	211.48	210.81	210.42	210.120
	宽	115.14	115.08	114.96	114.810
塑料板 2 (176.10 mm×115.40 mm)	长	175.42	175.08	174.83	174.560
	宽	115.13	115.05	115.01	114.890
塑料板 3 (176.10 mm×85.20 mm)	长	175.41	174.98	174.79	174.430
	宽	84.87	84.62	84.50	84.380
平均误差/mm		0.49	0.80	0.98	1.201

4.2 相机主轴与 Z 轴夹角对测量精度的影响

为方便图像校正,可以让左右摄像机的主光轴平行,但是这样 2 个摄像机的公共可视区域就很小,测量效率较低,而且对精度存在较大影响。为分析左右摄像机的夹角对精度的影响,假定左右摄像机光轴 Z 轴的夹角为 β ,空间中的点 $P(x, y, z)$ 在左右图像上的对应点分别为 U_1 、 U_2 。点 P 与左摄像机光心的连线与左摄像机主光轴的夹角为 β_1 , P 与右摄像机光心的连线和右摄像机主光轴的夹角为 β_2 ,如图 5 所示。根据三角形相似,可得:

$$\frac{f \cos \beta - U_1 \sin \beta}{z} = \frac{f \sin \beta + U_1 \cos \beta}{x} \quad (13)$$

由式(13)可得:

$$z = \frac{(f \cos \beta - U_1 \sin \beta)x}{f \sin \beta + U_1 \cos \beta} \quad (14)$$

现将该式对 U_1 求偏导可得:

$$\frac{\partial z}{\partial U_1} = \frac{-xf}{(f \sin \beta + U_1 \cos \beta)^2} \quad (15)$$

又由式(14)可得:

$$U_1 = \frac{f(x \cos \beta - z \sin \beta)}{z \cos \beta + \sin \beta x} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)可得:

$$\frac{\partial z}{\partial U_1} = -\frac{(z \cos \beta + x \sin \beta)^2}{xf} \quad (17)$$

由式(17)可知,对于一个特定的焦距和空间点,当 β 与 x 、 z 满足如下关系时,误差可以取得最小值:

$$\beta = 90^\circ - \arctan(z/x) \quad (18)$$

本文实验使用系统主要用于扫描体积较小的工艺品,物体离摄像机比较近, X 轴与 Z 轴坐标比较接近。因此,在本文实验中,当左右摄像机与 Z 轴夹角在 45° 左右时,可以获得较高的精度。

4.3 基线长度对测量精度的影响

基线长度是表征视觉系统中左右摄像机之间相互位置关系的重要参数,它的变化不仅会引起系统结构的改变,而且会直接影响测量精度。由式(10)可得:

$$\Delta z = Z - Z' = \frac{fT}{d} - \frac{fT}{d + \delta} = \frac{fT\delta}{d(d + \delta)} \quad (19)$$

$$d = \frac{fT}{z} \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)可得:

$$\Delta z = Z - Z' = \frac{z^2 \delta}{fT + z\delta} \quad (21)$$

由式(21)可知,对于一个特定镜头和空间点,随着基线长度 T 的增大,测量误差减小,且焦距越大,测量误差越小。

在本文实验中,分别用焦距为 4.5 mm 和 10 mm 的 2 个镜头在不同位置测量精度较高、尺寸为 30 mm×30 mm 且位置固定的塑料板。在测量过程中,保证塑料板与基线之间的距离基本不变(500 mm),只改变基线长度,测量结果如图 6 所示。

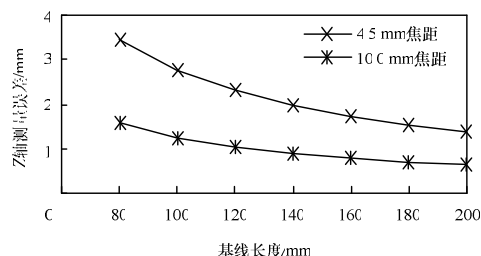


图6 测量误差与基线长度之间的关系

5 结束语

本文针对双目立体视觉系统的各个环节,包括摄像机标定、图像校正、结构参数的设计、测量物距等方面与测量精度之间的关系做了比较全面的分析。此外,由于目前没有一种较好的办法测量左右摄像机光心之间的距离,因此在摄像机的立体标定与测量精度之间的关系方面,还没有一种较好的精度分析和衡量方法,有待于进一步研究。

(下转第 285 页)