

基于光束平差法的像机内参数虚拟立体校准方法

刘长英¹, 吕 瑞², 高印寒³, 高 乐¹, 韩 啸¹

(1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院 长春 130061; 2. 黑龙江工程学院 计算机科学技术系 哈尔滨 150080;
3. 吉林大学 测试科学实验中心 长春 130022)

摘要:为解决摄像机内参数的精确校准问题,对基于光束平差法的像机内参数虚拟立体校准方法进行了研究。通过对摄像机成像过程中各种畸变因素的分析,建立一个更加全面的校准模型;建立了关于校准参数的共线性方程,并对其进行线性化。构建基于 Gauss-Markov 原理的误差模型,实现对像机参数的优化求解。利用红外发光二极管随坐标测量机测头在校准空间内作定间距移动构成虚拟立体校准模板,保证了高精度校准控制点的获取。校准试验表明,该方法切实可行,能够解决视觉测量时摄像机内参数精确校准问题。

关键词:仪器仪表技术;视觉坐标测量;摄像机校准;畸变修正;光束平差

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)05-1081-05

Dummy solid calibration method of camera intrinsic parameters using bundle adjustment algorithm

LIU Chang-ying¹, LÜ Rui², GAO Yin-han³, GAO Le¹, HAN Xiao¹

(1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Department of Computer Science Technology, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150080, China; 3. Center of Measurement Science Experiment, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To solve the precise calibration of the camera intrinsic parameters, a dummy solid calibration method using the beam collimation algorithm was proposed. A comprehensive calibration model was established through the analysis of the distortion factors in the camera imaging process. A collinearity equation of the calibration parameters was derived and linearized. An error model based on Gauss-Markov principle was built to solve the optimization problem of camera parameters. A dummy solid calibration template was formed by an infrared LED moving with constant interval with the probe of the coordinates measurement machine, and the precise calibration control points were acquired. The validating calibration test was performed and its result indicates that the method is viable, and can solve the precise calibration of camera intrinsic parameters in the vision coordinates measurement system.

Key words: technology of instrument and meter; vision coordinates measurement; camera calibration; distortion correction; beam collimation

收稿日期:2007-09-30.

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20070535);长春市科技发展计划项目(20060296).

作者简介:刘长英(1974-),男,博士,讲师.研究方向:视觉测量,测控技术. E-mail:liuchangy@jlu.edu.cn

通信作者:高印寒(1951-),男,教授,博士生导师.研究方向:测控技术及仪器. E-mail:gaoyinhan@sohu.com

视觉测量技术是建立在计算机视觉基础上的一门新兴的柔性坐标测量技术,广泛用于解决航空、航天、军工及民用领域在生产使用过程中对结构件进行三维尺寸测量、装配过程中进行辅助测试以及加工过程中进行工装夹具校准等测量问题。它是根据摄像机所获取的二维图像信息确定被测体的空间三维几何信息,而摄像机参数校准就是确定被测量的三维空间点与对应的二维图像点之间的对应求解关系(即摄像机的成像几何模型)。因此,摄像机参数的校准精度将直接影响视觉测量系统的测量精度。为了提高视觉测量系统的性能,减小摄像机参数校准精度对视觉测量系统测量精度的影响,就必须对摄像机参数进行精确校准,将参数校准误差对整个视觉测量系统性能的影响减小到最低程度。

摄像机参数校准技术最早应用于摄影测量学领域,后来随着计算机视觉技术的发展而得到更为广泛的研究和应用,成为计算机视觉和摄影测量学领域中最热门的研究方向之一。由于其在理论及实践中的重要价值,学术界在近年内对其进行了广泛研究,基于不同的出发点和研究思路取得了一系列成果,对应于不同的问题背景它们都有其各自的应用价值。目前,最具代表性的摄像机参数校准方法为基于透视变换矩阵的线性校准方法^[1-2]、基于最优化原理的非线性优化校准方法^[3-4]、双阶段最优化校准方法^[5-6]和双平面校准方法^[7-8]等。其中,双阶段最优化校准方法兼顾了线性优化校准方法的计算速度快和非线性优化校准方法的计算精确度高等优点,是目前应用最为广泛的一种。本文在双阶段优化校准方法的基础上,结合视觉测量系统的实际应用,采用基于光束平差法的像机内参数虚拟立体校准方案实现对像机内参数的精确校准。

1 摄像机成像几何模型

1.1 坐标系建立

为了描述摄像机成像模型,需要建立世界坐标系、摄像机坐标系、实际图像坐标系及像素坐标系。其中,世界坐标系 $o_w x_w y_w z_w$ 用来定义三维空间的一个公共坐标系,通常根据实际问题需要来确定坐标系原点位置及坐标系方向;实际图像坐标系 oxy 的坐标系原点 o 建立在摄像机的光轴与摄像机的像平面的交点上,轴 x 和 y 分别对应平行于像素单元的横轴和纵轴;摄像机坐标系

$o_c x_c y_c z_c$ 的坐标原点 o_c 建立在摄像机的透视投影中心 C 上,轴 z_c 与摄像机的像平面正交,轴 x_c 和 y_c 分别对应平行于实际图像坐标系的轴 x 和 y ;像素图像坐标系 $o'u'v'$ 的坐标原点建立在像平面的左上角,轴 u 和 v 分别对应平行于实际图像坐标系的轴 x 和 y 。具体建立方法如图 1 所示。

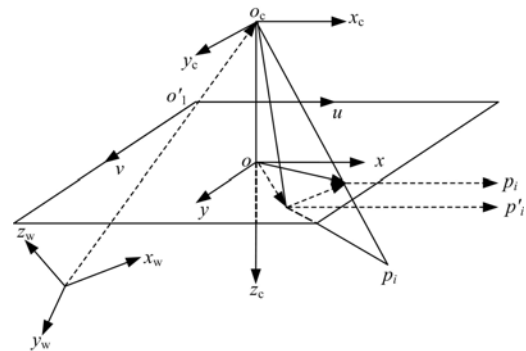


图 1 坐标系

Fig. 1 Coordinates system

1.2 摄像机外参数

摄像机外参数描述摄像机坐标系相对于世界坐标系的位置和方向,可通过一个 3×3 的旋转矩阵 \mathbf{R} 和一个 3×1 的平移矢量 \mathbf{t} 来描述。

为了能够利用图像坐标 $p_i(x_i, y_i)$ 表达空间任意一点 $\mathbf{X}_{wi} = (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$,必须先将其空间坐标变换为摄像机坐标 $\mathbf{X}_{ci} = (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})$,该变换过程可通过矩阵方程表达为

$$\mathbf{X}_{ci} = \mathbf{R}\mathbf{X}_{wi} + \mathbf{t} \quad (1)$$

式中:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}。$$

旋转矩阵 \mathbf{R} 还可以通过绕摄像机坐标系的坐标轴 x_c 、 y_c 和 z_c 的旋转角(即欧拉角 ω 、 ϕ 和 κ)表达为

$$\begin{cases} r_{11} = \cos\kappa \cos\phi \\ r_{12} = \cos\kappa \sin\phi \sin\omega + \sin\kappa \cos\omega \\ r_{13} = \sin\kappa \sin\omega - \cos\kappa \sin\phi \cos\omega \\ r_{21} = -\sin\kappa \cos\phi \\ r_{22} = \cos\kappa \cos\omega - \sin\kappa \sin\phi \sin\omega \\ r_{23} = \cos\kappa \sin\omega + \sin\kappa \sin\phi \cos\omega \\ r_{31} = \sin\phi \\ r_{32} = -\cos\phi \sin\omega \\ r_{33} = \cos\phi \cos\omega \end{cases} \quad (2)$$

因此,在确定旋转矩阵 \mathbf{R} 后,利用式(1)和式(2)

可以确定旋转角为

$$\begin{cases} \omega = \arctan\left(-\frac{r_{32}}{r_{33}}\right) \\ \phi = \arcsin r_{31} \\ \kappa = \arctan\left(-\frac{r_{21}}{r_{11}}\right) \end{cases} \quad (3)$$

1.3 摄像机内参数

摄像机内参数用来描述摄像机的内部几何结构及镜头的光学特性。通常情况下,摄像机的内参数主要包括有效焦距 f 和像面中心坐标 (u_0, v_0) 。

对于理想的针孔模型,摄像机坐标系下的空间点 $\mathbf{X}_{ci} = (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})^T$ 与其在像平面上的理想透视投影点 (x'_i, y'_i) 之间的对应关系可以表达为

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \frac{f}{z_{ci}} \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于摄像机采集的数字图像以二维数组的形式存储于计算机,图像中的每个像素在像面上的坐标位置 (u_i, v_i) 是该像素在数组中的行数和列数,因此并没有用物理单位表示出该像素在图像中的位置。设 d_x, d_y 为单个像素在 x 轴和 y 轴方向上的物理尺寸,则图像中的任意一个像素点在像素图像坐标系 $o'uv$ 下的像素坐标 (u_i, v_i) 和实际图像坐标系 oxy 下的坐标 (x_i, y_i) 有如下变换关系

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x(u_i - u_0) \\ d_y(v_i - v_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

前面的论述是基于理想的针孔成像模型基础进行的,但针孔模型只是摄像机实际成像过程的一个近似模型。在实际成像系统中,由于镜头和 CCD 等的加工和装配误差以及图像采集过程中引入误差的影响,必将引起投影点偏离投影几何中心的偏差。因此,当对摄像机校准精度要求非常高时,针孔模型就不能满足要求,需要一个更加完善的摄像机成像模型。本文在针孔成像模型的基础上,通过对摄像机成像系统中的各种畸变因素进行修正,建立起实际摄像机成像模型,实现对摄像机参数的高精度校准。

摄像机成像过程中的畸变因素主要包括径向畸变、切向畸变及仿射和非正交畸变等。以下是对畸变的成因进行分析,并给出了补偿修正方法。

(1) 径向畸变通常由大的偏轴角和透镜制造缺陷造成的,由光学中心沿径向方向产生并逐渐增大,可以近似地表示为

$$\begin{bmatrix} \delta x_{\text{RLD}} \\ \delta y_{\text{RLD}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i(k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6) \\ y_i(k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + k_3 r_i^6) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:RLD 为 Radial Lens Distortion 的缩写; $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ 为像点 (x_i, y_i) 到摄像机光轴的距离; k_1, k_2, k_3 为径向畸变修正系数。

(2) 切向畸变主要由镜头表面曲率中心不是严格地共线引起,可以近似地表示为

$$\begin{bmatrix} \delta x_{\text{TLD}} \\ \delta y_{\text{TLD}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1(r_i^2 + 2x_i^2) + 2p_2 x_i y_i \\ 2p_1 x_i y_i + p_2(r_i^2 + 2y_i^2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:TLD 为 Tangle Lens Distortion 的缩写; p_1, p_2 为切向畸变修正系数。

(3) 仿射和非正交畸变主要是由像元水平和垂直方向的尺寸不一致、图像采集卡的扫描误差和像元行列排列的不垂直性造成的,该畸变可以近似地表示为

$$\begin{bmatrix} \delta x_{\text{IAND}} \\ \delta y_{\text{IAND}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b_1 x_i + b_2 y_i \\ b_1 y_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:AND 为 Affine and Non-orthogonality Deformations 的缩写; b_1, b_2 为仿射和非正交畸变修正系数。

通过上述分析可知,实际成像过程中畸变影响因素可以表达为

$$\begin{cases} \delta x_i = \delta x_{\text{RLD}} + \delta x_{\text{TLD}} + \delta x_{\text{IAND}} \\ \delta y_i = \delta y_{\text{RLD}} + \delta y_{\text{TLD}} + \delta y_{\text{IAND}} \end{cases} \quad (9)$$

成像过程中畸变因素的存在使得空间坐标点所成的像并不在针孔模型所描述的理想位置 (x'_i, y'_i) ,而是在受到畸变因素的影响产生偏移的实际像平面位置 (x_i, y_i) ,两者之间可以通过畸变修正,表达式为

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i + \delta x_i \\ y_i + \delta y_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

综上所述,像机内参数包括:有效焦距 f 、像面中心坐标 (u_0, v_0) 、径向畸变修正系数 k_1, k_2, k_3 、切向畸变修正系数 p_1, p_2 、仿射畸变和非正交畸变修正系数 b_1, b_2 。

2 共线性方程建立及其线性化

将式(1)和式(4)代入式(10),并作相应变换可得

$$\begin{cases} u_i = \frac{f}{d_x} \left(\frac{r_{11} x_{wi} + r_{12} y_{wi} + r_{13} z_{wi} + t_1}{r_{31} x_{wi} + r_{32} y_{wi} + r_{33} z_{wi} + t_3} - \delta u_i \right) + u_0 \\ v_i = \frac{f}{d_y} \left(\frac{r_{21} x_{wi} + r_{22} y_{wi} + r_{23} z_{wi} + t_2}{r_{31} x_{wi} + r_{32} y_{wi} + r_{33} z_{wi} + t_3} - \delta v_i \right) + v_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\delta u_i, \delta v_i$ 为利用像素坐标表达的畸变因素, 可由式(5)~式(9)变换而得。

共线性方程(11)中含有: ①已知参数为校准控制点空间坐标 (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) 和对应的像点坐标 (u_i, v_i) , 单个像素在 x 轴和 y 轴方向上的物理尺寸 d_x, d_y ; ②未知参数为外参数 $(\omega, \phi, \kappa, t_1, t_2, t_3)$ 和内参数 $(f, u_0, v_0, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, b_1, b_2)$ 。

为对式(11)进行求解, 利用 Taylor 级数展开, 并线性化。式(11)可以改写为

$$\begin{cases} F_u = \frac{f}{d_x} \frac{N_1}{N_3} - \frac{f}{d_x} \delta u_i + u_0 = u_i \\ F_v = \frac{f}{d_y} \frac{N_2}{N_3} - \frac{f}{d_y} \delta v_i + v_0 = v_i \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$\begin{cases} N_1 = r_{11} x_{wi} + r_{12} y_{wi} + r_{13} z_{wi} + t_1 \\ N_2 = r_{21} x_{wi} + r_{22} y_{wi} + r_{23} z_{wi} + t_2 \\ N_3 = r_{31} x_{wi} + r_{32} y_{wi} + r_{33} z_{wi} + t_3 \end{cases}$$

对式(12)应用 Taylor 级数展开, 并通过对未知参数的求导转换成线性方程

$$\begin{cases} u_i - (F_u)_0 = \left(\frac{\partial F_u}{\partial f}\right)^0 \Delta f + \dots + \left(\frac{\partial F_u}{\partial b_2}\right)^0 \Delta b_2 + \left(\frac{\partial F_u}{\partial \omega}\right)^0 \Delta \omega + \dots + \left(\frac{\partial F_u}{\partial t_3}\right)^0 \Delta t_3 \\ v_i - (F_v)_0 = \left(\frac{\partial F_v}{\partial f}\right)^0 \Delta f + \dots + \left(\frac{\partial F_v}{\partial b_2}\right)^0 \Delta b_2 + \left(\frac{\partial F_v}{\partial \omega}\right)^0 \Delta \omega + \dots + \left(\frac{\partial F_v}{\partial t_3}\right)^0 \Delta t_3 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $(\partial F/\partial \dots)^0$ 为函数对未知参数 $(f, u_0, v_0, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, b_1, b_2, \omega, \phi, \kappa, t_1, t_2, t_3)$ 的偏导数。

通过前面的分析可知, 式(13)中包含 10 个未知内参数和 6 个未知外参数, 如果摄像机成像位置数为 n , 那么总的未知参数个数为 $6n+10$ 。根据式(13), 对应于任意一个校准控制点可以确定 2 个方程式, 只要校准控制点数 m 满足 $m > 3n+5$ 就可以构成一个超定方程组, 通过对超定方程组优化求解即可确定摄像机的内参数。

3 光束平差优化求解算法

为实现对摄像机参数的优化校准, 采用校准控制点成像坐标的观测值与利用摄像机参数估计值进行反推所得到的特征像点坐标值之间的偏差来建立校准误差模型。对于图像坐标观测值存在误差的超定方程系统, 根据式(13)建立 Gauss-

Markov 误差模型

$$e = Ax - I \quad (14)$$

式中: A 为未知参数的偏导数系数矩阵; $x = [\Delta f, \Delta u_0, \Delta v_0, \Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3, \Delta p_1, \Delta p_2, \Delta b_1, \Delta b_2, \Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa, \Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3]^T$ 为未知参数向量; I 为特征点像面坐标的观测值与反推值差值的向量; e 为真实误差向量。

通过加权最小二乘法对式(14)进行求解

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P I \quad (15)$$

式中: $P = \sigma_0^{-2} \Sigma^{-1}$ 为观测值的加权矩阵, 其中 σ_0^2 为先验方差, Σ 为观测值方差矩阵。

4 试验与结果分析

为验证校准方案的性能, 对 Kodak Megaplug 1.4i 像机内参数进行校准, 该像机的基本参数为: 焦距 $f = 12 \text{ mm}$, 像面尺寸 $1316 \text{ 像素} \times 1035 \text{ 像素}$, 像素尺寸 $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$ 。

校准所需要的控制点由固定在 Brown & Sharpe 公司的 Gloab Image 153010 三坐标测量机(测量范围为 $1000 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$, 测量不确定度为 $3.0 + L/333 \mu\text{m}$, L 单位为 m)的测头上的红外发光二极管 SE3470 提供。进行参数校准时, 特征点随三坐标测量机测头作定间距移动, 在校准空间内构成一个虚拟立体校准模板(见图 2), 摄像机在校准空间内 7 个不同位置对虚拟立体校准模板成像, 提取特征点的像点坐标, 通过优化算法计算出摄像机的参数。采用光束平差优化校准方法和传统校准方法(即只对摄像机在单个位置进行校准的方法)的校准结果如表 1 所示。

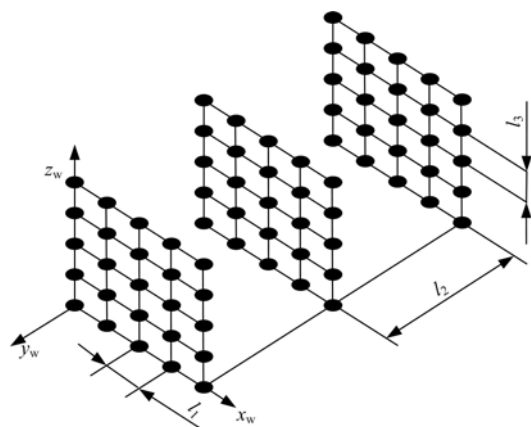


图 2 虚拟立体校准模板

Fig. 2 Dummy solid calibration template

表 1 校准结果

Table 1 Calibration results

参数	传统校准方法	光束平差优化校准方法	
	校准值	校准值	校准偏差
F/mm	12.108	12.086	5.10×10^{-5}
$u_0/\text{像素}$	644.105	647.248	0.06
$v_0/\text{像素}$	524.889	522.968	0.09
k_1	1.366×10^{-3}	-9.840×10^{-4}	3.05×10^{-6}
k_2	4.078×10^{-4}	4.855×10^{-4}	3.27×10^{-6}
k_3	5.230×10^{-7}	6.264×10^{-7}	1.02×10^{-8}
p_1	2.994×10^{-5}	2.124×10^{-5}	1.74×10^{-6}
p_2	-6.816×10^{-4}	-6.016×10^{-5}	2.06×10^{-6}
b_1	9.811×10^{-5}	7.812×10^{-5}	4.22×10^{-6}
b_2	-4.691×10^{-5}	-3.131×10^{-5}	5.06×10^{-6}

5 结束语

通过对摄像机成像过程中各种畸变影响因素的分析,建立了一个更加完善的校准模型;在此基础上建立了关于校准参数的共线性方程,并对其进行了线性化。通过基于 Gauss-Markov 原理的误差模型实现对校准参数的优化求解。校准控制点由固定在坐标测量机测头上的红外发光二极管在校准空间内作定间距移动构成的虚拟立体校准模板提供。最后,通过校准试验证明该方法切实可行,能够解决视觉坐标测量系统中对摄像机内参数精确校准问题。

参考文献:

- [1] Zhang Yan-zhen, Ou Zhong-ying. A new linear approach for camera calibration[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(8): 727-731.
- [2] Meng Xiao-qiao, Hu Zhang-yi. A new easy camera calibration technique based on circular points[J]. Pattern Recognition, 2003, 36: 1155-1164.
- [3] Weng Jy Yang, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [4] Heikkila Janne, Silven Olli. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C] // IEEE Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, Washington, DC, USA, 1997.
- [5] Liu Chang-ying, Yu Zhi-jing, Che Ren-sheng, et al. Bundle adjustments CCD camera calibration based on collinearity equation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(4): 494-497.
- [6] Liu Chang-ying, Ye Dong, Che Ren-sheng, et al. The study of CCD camera optimization calibration technique using genetic algorithm[C] // Proceedings of Second International Symposium on Instrumentation Science and Technology. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.
- [7] Ma Song-de. A self-calibration technique for active vision system[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12: 114-120.
- [8] Kwon Y H, Lindley S L. Applicability of the localized-calibration methods in underwater motion analysis[C] // Proceedings of the XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports. Hong Kong: Chinese University of Hong Kong Press, 2000.
- [1] Zhang Yan-zhen, Ou Zhong-ying. A new linear ap-