

文章编号 1004-924X(2006)03-0485-05

基于遗传算法的像机虚拟立体校准技术研究

叶 东, 刘长英, 车仁生, 陈 刚

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:给出了一种基于遗传优化算法的虚拟立体校准方法。利用红外发光二极管随三坐标测量机的测头做定间距移动构造了一个立体校准模板,通过奇异值分解算法初始估计校准参数,最后,通过遗传算法优化求解所有校准参数。实验中校准点的空间位置反推误差小于 0.04 mm,表明该方法能够解决像机内参数精确校准问题,可以满足大尺寸视觉坐标测量技术对摄像机内参数精确校准的要求。

关键词:大尺寸视觉测量;像机校准;畸变修正;遗传算法;立体校准
中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

Dummy solid camera calibration technology using genetic algorithm

YE Dong, LIU Chang-ying, CHE Ren-sheng, CHEN Gang

(School of Electronic Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A dummy solid camera calibration method based on genetic algorithm was presented. Using the infrared LED moved with the CMM probe according to some distance, the solid calibration template was formed to estimate the initialization calibration parameters by the Singular Value Decomposition (SVD) algorithm. Finally, the genetic algorithm was used to optimize and determine all calibration parameters. The experimental results show that the inverse result error of calibration point is less than 0.04 mm, and the calibration method can resolve the problem of high-precision camera calibration, and also can meet the requirement of high-precision camera calibration in the field of large scale vision coordinate measurement.

Key words: large scale vision measurement; camera calibration; distortions correction; genetic algorithm; solid calibration

1 引 言

大空间高精度视觉测量系统由于其具备测量空间大、测量精度高及可进行现场测量等优点成为航空、航天、军工及民用等领域大型构件进行三维测量、装配过程中进行辅助测试及加工过程中

工装夹具进行校准的三维坐标测量系统。CCD 像机作为视觉测量系统的关键部件,其校准精度直接影响系统的整体性能,因此像机参数必须被精确校准。目前,已提出了很多校准方法,按照所采用的参数估计方法不同可分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

收稿日期:2005-07-09;修订日期:2006-05-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(NO. 50275040);哈尔滨工业大学校科研基金资助项目(HIT. 2002. 17)

双平面校准方法^[7-8]等,其中双阶段最优化校准方法既具有线性优化校准方法的计算速度又具有非线性优化校准方法的计算精确度,因此是近些年应用最为广泛的一种校准方法。结合实际项目应用于大空间现场测量的特点,本文提出了一种基于遗传优化算法的像机虚拟立体校准方案。

2 像机校准模型建立

像机校准模型是利用一组参数对实际传感器进行近似的几何建模。基于共线性原理的针孔模型是一个常用的理想化透视投影模型,忽略了

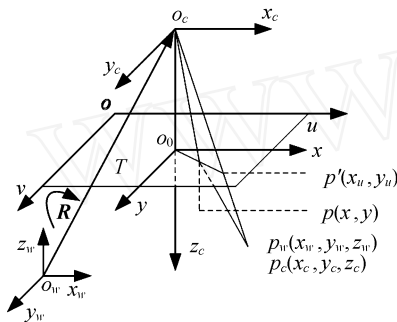


图 1 像机校准模型

Fig. 1 Camera calibration modal

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha & \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \\ -\cos \alpha \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha & \sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \\ \sin \alpha & 0 & 0 & -\sin \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

在确定旋转矩阵 R 后,利用式 (1) 和 (2) 可以确定旋转角为:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(-\frac{r_{32}}{r_{33}}\right) \\ \beta = \arcsin(r_{31}) \\ \gamma = \arctan\left(-\frac{r_{21}}{r_{11}}\right) \end{cases}, \quad (3)$$

2.2 内参数

摄像机内参数描述摄像机内部几何结构参数及镜头的光学特性,主要包括:焦距 f , 像面中心坐标 (u_0, v_0) 。

对于理想的针孔模型,它反映了空间点像机坐齐次坐标 $X_c = (x_c, y_c, z_c, 1)^T$ 与对应的像面齐次坐标 $U = (u, v, 1)^T$ 间的线性透视投影变换关系:

成像光路中各种误差的影响,使空间点通过直线经过像机投影中心投影到像机的像平面,成像关系为线性的。但是,在实际应用中,当校准精度要求较高时,理想化的针孔模型就不能完全满足要求了。因此,必须在理想的针孔成像模型的基础上,通过进行系统畸变修正来建立一个更加全面的像机校准模型。像机参数校准模型如图 1 所示。

2.1 外参数

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,通过一个的旋转矩阵 R 和一个 3×1 平移矢量 t 来描述。因此,空间任意一点在世界坐标系与摄像机坐标系下的齐次坐标 $X_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 和 $X_c = (x_c, y_c, z_c, 1)^T$ 的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,旋转矩阵 R 可以通过绕世界坐标系的坐标轴 x_w, y_w 和 z_w 的旋转角 α, β 和 γ 表达为:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, $x = f/d_x, y = f/d_y, f$ 为像机焦距, d_x 和 d_y 为 CCD 中单个像素在垂直和水平方向上的长度; (u_0, v_0) 为 CCD 像面中心的像素坐标。

由于理想的针孔模型只是实际像机投影的一个估计,它是一个非常有用的模型,简化了空间坐标与像面坐标之间的透视投影变换关系。因此,当要求高精度时,必须使用一个更全面的校准模型。通过对针孔模型进行系统坐标畸变修正,空间点的实际透视投影点可以表示为:

$$\begin{cases} x_u = x + \Delta x \\ y_u = y + \Delta y \end{cases}, \quad (5)$$

式中, (x_u, y_u) 为理想图像坐标值; Δx 和 Δy 为畸

变修正,可以被表达为:

$$\begin{cases} x = x_{RLD} + x_{PLD} + x_{AD} \\ y = y_{RLD} + y_{PLD} + y_{AD} \end{cases}, \quad (6)$$

其中,径向畸变修正:

$$\begin{cases} x_{RLD} = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{RLD} = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases}, \quad (7)$$

其中, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, (k_1, k_2, k_3) 为径向畸变修正系数。

切向畸变修正:

$$\begin{cases} x_{PLD} = p_1 (r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy \\ y_{PLD} = 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2y^2) \end{cases}, \quad (8)$$

其中, (p_1, p_2) 为切向畸变修正系数。

仿射和非正交畸变修正系数:

$$\begin{cases} x_{AD} = -b_1 x + b_2 y \\ y_{AD} = b_1 y \end{cases}, \quad (9)$$

其中, (b_1, b_2) 为仿射和非正交畸变修正系数。

综上所述,可知 CCD 像机内参数包括:有效

$$K = \begin{bmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 x_{w1} & -u_1 y_{w1} & -u_1 z_{w1} & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -v_1 x_{w1} & -v_1 y_{w1} & -v_1 z_{w1} & -v_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n x_{wn} & -u_n y_{wn} & -u_n z_{wn} & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{wn} & y_{wn} & z_{wn} & 1 & -v_n x_{wn} & -v_n y_{wn} & -v_n z_{wn} & -v_n \end{bmatrix}$$

假设矩阵 K 奇异值分解为 $U_{2n \times 2n} \quad 2n \times 12 \quad V_{12 \times 12}$, 向量 m 由与最小奇异值相对应的右奇异值向量 v_{12} 确定。

由式(1)、(4)和(10)可得:

$$m_{34} \begin{bmatrix} m_1^T & m_{14} \\ m_2^T & m_{24} \\ m_3^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x r_1^T + u_0 r_3^T & x t_x + u_0 t_z \\ y r_2^T + v_0 r_3^T & y t_y + v_0 t_z \\ r_3^T & t_z \end{bmatrix}, \quad (12)$$

比较式(12)两边可知, $m_{34} m_3 = r_3$, 由于 r_3 是正交单位矩阵的行向量, $|r_3| = 1$, 因此可以从 $m_{34} |m_3| = 1$ 求出 $m_{34} = \frac{1}{|m_3|}$ 。由以下式子求出其它参数:

$$\begin{aligned} r_3 &= m_{34} m_3, u_0 = m_{34}^2 m_1^T m_3, v_0 = m_{34}^2 m_2^T m_3, x = m_{34} |m_1 \times m_3|, \\ y &= m_{34} |m_2 \times m_3|, t_x = \frac{m_{34}}{x} (m_{14} - u_0), t_y = \frac{m_{34}}{y} (m_{24} - v_0), t_z = m_{34}, r_1 = \frac{m_{34}}{x} (m_1 - u_0 m_3), r_2 = \frac{m_{34}}{y} (m_2 - v_0 m_3). \end{aligned}$$

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), 仿射畸变及非正交畸变修正系数 (b_1, b_2)。

3 像机参数初始值估计

为了利用遗传算法优化标定像机的全部参数,首先在忽略畸变参数的基础上,用线性方法估计所有外参数和部分内参数初始值。具体估计方法如下:

将式(1)代入式(4)得:

$$z_c U = m X_w, \quad (10)$$

其中, m 为 3×4 投影矩阵。

根据式(10)并做适当变换,由 n 个控制点对组成的标定方程为:

$$K m = 0, \quad (11)$$

其中,

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -u_1 x_{w1} & -u_1 y_{w1} & -u_1 z_{w1} & -u_1 \\ 1 & -v_1 x_{w1} & -v_1 y_{w1} & -v_1 z_{w1} & -v_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -u_n x_{wn} & -u_n y_{wn} & -u_n z_{wn} & -u_n \\ 1 & -v_n x_{wn} & -v_n y_{wn} & -v_n z_{wn} & -v_n \end{bmatrix}$$

4 利用遗传算法优化像机参数

以往的非线性像机优化标定方法通常是通过规格化或附加部分约束条件来保证旋转矩阵的正交约束性^[3-4],然而这增加了求解的复杂性。遗传优化算法是通过简单的染色体数据结构来保证最优解,通过再生运算产生新点,同时保存了重要信息。下面对染色体矢量的定义、代价函数的构造及优化求解过程进行论述。

4.1 染色体矢量定义

为保证旋转矩阵 R 的正交性,直接以旋转角变量 α, β, γ 和 δ 作为染色体的遗传基因。以包括所有畸变参数在内的所有标定参数作为遗传基因构造染色体矢量:

$$b = \{ \alpha, \beta, \gamma, \delta, t_x, t_y, t_z, f, u_0, v_0, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, b_1, b_2 \}, \quad (13)$$

为加快遗传算法的优化求解速度,染色体矢量的所有变量将在下节(3)中的线性估计的基础上随机产生,同时采用并行遗传优化方法扩大寻

优范围。

4.2 代价函数构造

遗传算法在进行搜索中基本不利用外部信息,仅以代价函数为依据,利用种群中每个个体的适应度值来进行搜索。因此代价函数的构造至关重要,直接影响到遗传优化算法的收敛速度以及能否找到最优解。这里以标定控制点的成像平面坐标测量值作为代价函数:

$$E(b_r) = \sum_{i=1}^n \{ [x_u(b_r) - x(b_r)]^2 + [y_u(b_r) - y(b_r)]^2 \}, \quad (14)$$

其中, $(x_u(b_r), y_u(b_r))$ 为对应于染色体 b_r 和标定控制点 P_i 的成像平面坐标期望值,由式(1)和(5)求得; $(x_i(b_r), y_i(b_r))$ 为对应的成像平面坐标值,由式(4)求得。

4.3 优化求解过程

(1) 随机产生 N 个个体群,每个个体群包含 M 个个体,个体的染色体在初值的基础上随机产生,即有:

$$G_i^t \ S; G_i^t = \{ b_{i1}^t, b_{i2}^t, \dots, b_{ij}^t, \dots, b_{iM}^t \}, t=0, \quad (15)$$

其中, S 为所有个体群的集合; G 为个体群; t 为进化代数, i 为个体群序号。

(2) 计算个体的代价函数,对个体按照代价函数由小到大的顺序进行重新排列。

$$G_i^t = \{ b_{i1}^t, b_{i2}^t, \dots, b_{iM}^t \}, E(b_{ij}^t) = E(b_{i(j+1)}^t), \quad (16)$$

(3) 通过复制算子、产生新算子、变异算子、杂交算子的方法产生下一代的个体。

$$G_i^{t+1} = \{ b_{i1}^{t+1}, b_{i2}^{t+1}, \dots, b_{iM}^{t+1} \}, \quad (17)$$

(4) 进化代数增加 1,选取所有个体中的最优解作为当前解,取 $t = t + 1$,则有:

$$b_{\text{best}} = \left\{ b_{\text{sd}}^t \mid E(b_{\text{sd}}^t) = \min_{i=1}^N (\min_{j=1}^M (E(b_{ij}^t))) \right\}, \quad (18)$$

(5) 检验进化过程是否结束。如果符合条件结束算法,输出结果,否则转向。

5 实验与结果

为验证本文提出的校准方案,对 Kodak Megaplug 1.4i 像机进行校准,其基本参数为:焦距 $f = 12 \text{ mm}$,像面尺寸 $1316 \text{ 像素} \times 1035 \text{ 像素}$,像素尺寸 $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$ 。实验中采用波长为 880 nm 的高功率红外发光二极管(Honeywell 的 SE3470)作为成像目标来提供控制点图像,同时为了减小背景噪声的影响,在 CCD 摄像机 Tamron 镜头前安装 850 nm 的前截止红外滤波片,将

背景可见光滤除掉。校准过程中采用 Brown & Sharpe 的 Gloab Image 153010 坐标测量机(测量范围: $1000 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$,测量不确定度 $(3.0 + L/333) \mu\text{m}$ L 单位为 m)来完成校准。在坐标测量机的测头上固定着红外发光二极管,利用红外发光二极管随坐标测量机的测头在宽度、高度和深度方向的定间距移动,在空间构成一虚拟立体校准模板,通过摄像机对虚拟立体校准模板成像,并提取各特征点位置的像素坐标,最终通过优化算法计算出摄像机的参数。虚拟立体校准模板的构成如图 2 所示。

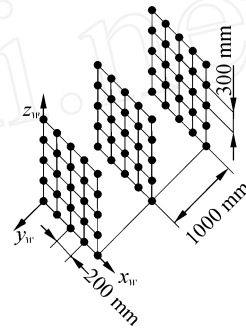


图 2 虚拟立体校准模板

Fig. 2 Dummy solid calibration template

由于像机外参数描述世界坐标系与摄像机坐标系之间的变换关系,随成像位置的不同而改变。内参数是像机本身固有的特性,在这里只给出内参数标定结果。

表 1 像机校准结果

Tab. 1 Camera calibration results

像机参数	校准值
焦距 f (mm)	12.108
u_0 (像素)	648.674
v_0 (像素)	525.102
k_1	1.36146×10^{-3}
k_2	-0.77961×10^{-6}
k_3	0.71420×10^{-7}
p_1	0.54492×10^{-6}
p_2	4.63133×10^{-5}
b_1	-1.01755×10^{-4}
b_2	2.58013×10^{-4}

为了验证校准方法,将特征点在空间某一 XZ 平面上的位置通过校准参数进行反推的结果同三坐标机给出的精确位置进行了比较,见表 2。

表2 反推结果与标准位置对比

Tab.2 Comparison of inverse results and criterion results

P	C	IR	RC	
1	z	300.03	300	0.03
	x	200.01	200	0.01
2	z	600.01	600	0.01
	x	400.02	400	0.02
3	z	899.97	900	-0.03
	x	600.04	600	0.04
4	z	900.02	900	0.02
	x	199.99	200	-0.01
5	z	299.98	300	-0.02
	x	599.96	600	-0.04
6	z	600.03	600	0.03
	x	599.98	600	-0.02

其中 P —点, C —坐标值, IR —反推结果, CR —坐标机给出值, Δ —偏差。

参考文献:

- [1] ZHANG Y, OU ZH Y. A new linear approach for camera calibration[J]. *Journal of Image and Graphics*. 2001, 6(8): 727-731.
- [2] MENG X Q, HU ZH Y. A new easy camera calibration technique based on circular points[J]. *Pattern Recognition*. 2003, 36: 1155-1164.
- [3] WENG J Y, 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 J, SILVEN O. A Four-step camera calibration procedure with implicit image correction[J]. *IEEE Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*. 1997, 1106-1112.
- [5] LIU CH Y, YU ZH J, CHE R SH, et al. Bundle adjustments CCD camera calibration based on collinearity equation [C]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 17:494-497.
- [6] LIU CH Y, YE D, CHE R SH, et al. The study of CCD camera optimization calibration technique using genetic algorithm [C]. *Proceedings of Second International Symposium on Instrumentation Science and Technology (ISIST 2004)*, Xian, 2004. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.
- [7] SONGDE M. 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, SANDERS R H, et al. Applicability of the localized calibration methods in underwater motion analysis[C]. *Proceedings of the XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports*, Hong Kong, China, 2000. Chinese University of Hong Kong Press, 2000.

作者简介:叶东(1968-),男,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工业大学副教授,现主要从事空间大尺寸视觉测量方面的研究。

从表2可知,最大差值是0.04 mm,比较结果表明通过内参数反推的结果具有很高的精度。

6 结论

本文通过安置在高精度大尺寸坐标测量机测头上的红外发光二极管随坐标测量机的测头的定间距移动提供立体校准模板,通过线性求解方法确定参数初始值,最后利用遗传算法进行优化确定像机参数。高精度大尺寸坐标测量机的使用为标定提供了高精度的校准控制点,遗传优化算法的使用严格保证了旋转矩阵的正交性及解的最优性。实验证明该方法是切实可行的,具有较高的校准精度,能够满足应用于大尺寸视觉测量系统的像机的校准要求。