

文章编号 1004-924X(2010)09-2086-08

借助于星点标定相机的内方位元素

刘伟毅^{1,2}, 丁亚林¹, 贾继强¹, 刘波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为满足单个或一批次测绘相机的标定,提出了一种利用已知坐标值的星点对测绘相机进行标定的方法。介绍了该方法的原理以及计算步骤,给出了实验过程。该方法建立在小孔成像的基础上,通过各个坐标系的相互转换,建立起星点坐标和像素坐标之间的联系,以此求解相机内方位元素。与基于平行光管和精密转台的精密测角法相比,该方法不需要昂贵的实验设备,且简化了标定步骤。最后,对标定精度进行了分析,讨论了噪声扰动和已知内方位元素误差对标定结果的影响。分析结果表明,采用该标定方法,相机的主点精度优于 $3\ \mu\text{m}$ ($1/3\ \text{pixel}$),主距精度优于 $7\ \mu\text{m}$ (小于 $1\ \text{pixel}$),满足标定精度要求。

关键词:相机标定;星点;内方位元素;标定精度

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2086

Calibration of inner orientation elements for camera by means of star points

LIU Wei-yi^{1,2}, DING Ya-lin¹, JIA Ji-Qiang¹, LIU Bo¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To implement the single or batch calibrations of mapping cameras, a calibration method to find the inner orientation elements of the camera by star points was presented. The principles and calculation steps of the method were introduced, and the experimental process was described in detail. The method was based on a hole imaging and it established a relationship between celestial coordinate and pixel coordinate by the conversions of different coordinate frames to obtain the inner orientation elements. In comparison to the precision angle measurement method based on the collimator and precision rotating platform, this method greatly simplifies the calibration steps and requires no expensive experimental equipment. Finally, the calibration precision was analyzed, and the effects of noise disturbance and known errors of inner orientation elements on calibration results were discussed. Obtained results indicate that the principal point precision and principal distant precision are better than $3\ \mu\text{m}$ ($1/3\ \text{pixel}$) and $7\ \mu\text{m}$ ($1\ \text{pixel}$), respectively, which meets the requirement of calibration precision.

Key words: camera calibration; star point; inner orientation element; calibration precision

收稿日期:2009-10-13;修订日期:2009-12-28.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA701203)

1 引言

相机标定是计算机视觉、图像测量及相关应用的重要步骤。目前,利用标定模板来进行摄像机标定的方法很多^[1-8],但这些方法不适用于高空作业的测绘相机,要获取这类相机的内方位元素参数,实验室一般采用基于平行光管,二维精密转台来标定相机的精密测角法^[9]。

精密测角法是通过平行光管发出的平行光经过相机透镜汇聚于焦平面一点,用精密转台记录该点和焦平面中心点到光学中心的夹角,CCD 焦平面记录该点的位置坐标;然后运用多个成像点的位置和角度及主点畸变最小的原理,计算出相机的内方位元素:主距、主点、畸变系数等。该方法算法简单,准确度高。但是所需的试验设备条件较高,测点数目较多(一般为 60 个点以上)。每一个点意味着要拍一张照片,进行一次角度测

量和位置坐标读取。如果对于一批次的相机都需要标定,每个相机都需要拍 60 多张照片^[10],其工作量可想而知。

针对以上问题,本文提出一种新的相机标定方法,该方法利用已知坐标值的星点进行标定。由于星点坐标值的获取需要一定的星座知识,对时间段也有限制,本文又介绍了一种通过已知内方位元素的测绘相机来计算、求得星点坐标值的方法(详见 2.3.1 节)。这种标定方法的步骤比精密测角法简单了许多,其标定精度也能够达到所需的要求范围。

2 原理

2.1 坐标系的介绍

为描述成像过程,定义了 3 个坐标系:图像坐标系,相机坐标系和天球坐标系。

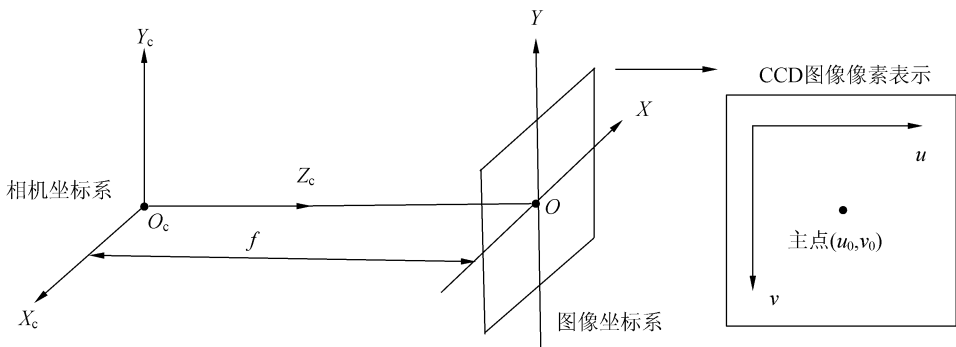


图 1 相机坐标系、图像坐标系和 CCD 像素坐标系的关系

Fig.1 Camera coordinate, image coordinate and CCD coordinate

图像坐标系是成像平面上建立的二维坐标系,用 $O-XY$ 表示。原点 O 为像平面主点,即像平面与光轴的交点。

相机坐标系用 $O_c-X_cY_cZ_c$ 表示。原点 O_c 为相机光心, Z_c 轴与镜头的光轴重合, X_c 轴和 Y_c 轴组成的平面与图像坐标系组成的平面平行,且两平面之间距离为 f 。

天球坐标系由俯仰角 δ 和方位角 α 表示(星点的角度可以通过查星座图获得),转化到直角坐

$$\text{标系(用 } O-UVW \text{ 表示)为 } \begin{cases} U \\ V \\ W \end{cases} = \begin{cases} \cos \alpha \cos \delta \\ \sin \alpha \cos \delta \\ \sin \delta \end{cases}.$$

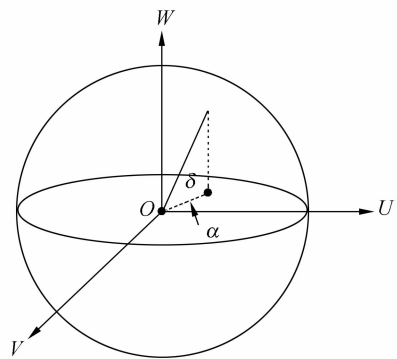


图 2 天球坐标系的三维转换表示图

Fig.2 Picture of celestial coordinate frame converting to three-dimension coordinate frame

2.2 CCD 图像像素(u, v)和天球坐标系坐标(U, V, W)的对应关系

2.2.1 CCD 图像像素(u, v)和图像坐标系坐标(x, y)的对应关系

CCD 图像像素(u, v)分别是该像素在数组中的列数和行数,与图像坐标系坐标(x, y)的对应关系为: $u = x/d_x + u_0, v = y/d_y + v_0$ 。其中(u_0, v_0)是相机光轴和图像交点的 CCD 像素坐标,即相机的主点坐标, d_x 和 d_y 分别是每一个像素在 X 轴和 Y 轴方向的长度。用矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2.2.2 图像坐标系坐标(x, y)和相机坐标系坐标(X_c, Y_c, Z_c)的对应关系

设空间一点 P 成像在相机图像上,由相机的

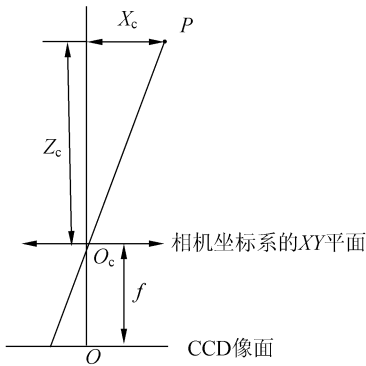


图 3 图像坐标系和相机坐标系关系图

Fig. 3 Relationship between image coordinate and camera coordinate systems

针孔模型容易得到: $x = -\frac{f \cdot X_c}{Z_c}, y = -\frac{f \cdot Y_c}{Z_c}$ 。

其中(x, y)为 P 点在图像坐标系的坐标, (X_c, Y_c, Z_c)为 P 点在相机坐标系的坐标。用矩阵表示:

$$-Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

2.2.3 相机坐标系坐标(X_c, Y_c, Z_c)和天球坐标系坐标(U, V, W)的对应关系

对于恒星方位来说,天球坐标系和相机坐标系之间转换可以忽略坐标平移。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: \mathbf{R} 为 3×3 正交单位矩阵。结合式(1),(2),(3),可以得到 CCD 像素坐标和天球坐标对应关系:

$$-Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \mathbf{C} \mathbf{R} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: $\alpha = f/d_x, \beta = f/d_y, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

2.3 求解待标定相机主点(u_0, v_0)

星点坐标值的获取可以通过查星座图,但是该方法需要一定的星座知识,对相机标定的时间段也有所限制。为此,可以用已知内方位元素相机来求解星点坐标。虽说精度有所降低,对已知内方位元素相机的精度有所依赖,但是这样可以避免寻找星座的过程,也不需要星座知识,大大降低了相机标定的条件要求(事实上只要能照出多个星点即可)。通过下文的精度分析,该方法的标定精度也能够达到所需的要求。

2.3.1 用已知内方位元素相机来表示星点在天球坐标系下的坐标值(U_i, V_i, W_i)^T

如图 4,容易获得:

$$|\sin \alpha| = |y/\sqrt{x^2 + y^2}|$$

$$|\cos \alpha| = |x/\sqrt{x^2 + y^2}|$$

$$|\sin \delta| = |f/\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}|$$

$$|\cos \delta| = |\sqrt{x^2 + y^2}/\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}|$$

则:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta \\ \sin \alpha \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x/\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} \\ -y/\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} \\ f/\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: f 为相机的焦距。

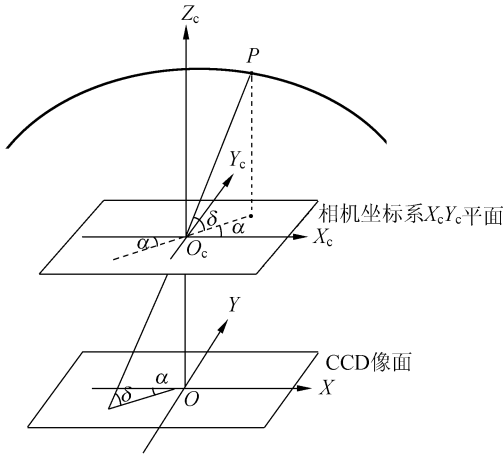


图 4 天球坐标系下的点在 CCD 像面上的投影图
Fig. 4 Projection of point in celestial coordinate on CCD image

对于考虑径向畸变的相机来说:

$$x = x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad (6)$$

$$y = y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad (7)$$

其中: (x, y) 为理想坐标, (x_d, y_d) 为实际坐标, $r^2 = x_d^2 + y_d^2$ 。

像素值与平面坐标的关系:

$$x_d = (u_d - u_0) \cdot d_x, \quad (8)$$

$$y_d = (v_d - v_0) \cdot d_y, \quad (9)$$

将式(6)~(9)代入式(5),便可得到各星点坐标值 $(U_i, V_i, W_i)^T$ 。

2.3.2 求解矩阵 H

由式(3)可知:

$$-Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$-Z_c u = h_1 U + h_2 V + h_3 W, \quad (11)$$

$$-Z_c v = h_4 U + h_5 V + h_6 W, \quad (12)$$

$$-Z_c = h_7 U + h_8 V + h_9 W, \quad (13)$$

将式(13)代入式(11)和式(12)

$$\begin{cases} h_1 U + h_2 V + h_3 W - u h_7 U + u h_8 V + u h_9 W = 0 \\ h_4 U + h_5 V + h_6 W - u h_7 U + u h_8 V + u h_9 W = 0 \end{cases}$$

即:

$$\begin{bmatrix} U & V & W & 0 & 0 & 0 & -uU & -uV & -uW \\ 0 & 0 & 0 & U & V & W & -vU & -vV & -vW \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 & h_5 & h_6 & h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix}^T = 0, \quad (14)$$

式(14)写成 $KL^T = 0$ 。

设有 n 个标定星点,则 K 是 $2n \times 9$ 矩阵,当 $2n > 9$ 时, L 有唯一最佳非零解使得最小二乘法误差最小。

这样便获得了 CCD 像素坐标值和天球坐标系下的坐标值转换关系。理想状态下,应满足式(10),实际由于噪声、误差、扰动等因素,与式(10)有一定的偏差。

这里可以用非线性的方法对解 $L = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5 \ h_6 \ h_7 \ h_8 \ h_9]^T$ 优化。设 P_i 和 \bar{p}_i 分别是天球坐标系下的坐标值和 CCD 像素实际坐标值。即:

$$P_i = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}, \bar{p}_i = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \text{用 } \bar{p}_i \text{ 来表示由式(10)计算出}$$

的理想 CCD 像素值 p_i 。

$$\text{设矩阵 } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix}, \text{其中 } \mathbf{H}_1 =$$

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix}^T, \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{bmatrix}^T, \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} h_7 \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix}^T \text{ 则:}$$

$$p_i = \frac{1}{\mathbf{H}_3 P_i} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 P_i \\ \mathbf{H}_2 P_i \end{bmatrix}.$$

运用最小二乘法使满足 $\min_H \sum_i \| p_i - \bar{p}_i \|^2$ 。

初值可设为 L ,便可求得优化后的矩阵 H 。

2.3.3 求解待标定相机的主点 (u_0, v_0)

由式(10)可得:

$$-Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \mathbf{R} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = [t_1 \ t_2 \ t_3] \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}$$

其中: t_1, t_2, t_3 分别是矩阵 H 的第 1 列,第 2 列和第 3 列向量。

$$[t_1 \ t_2 \ t_3] = \mathbf{C} [r_1 \ r_2 \ r_3]$$

考虑 R 是单位正交矩阵,满足:

$$\begin{cases} r_i^T \cdot r_j = 0 & (i \neq j) \\ r_i^T \cdot r_i = r_j^T \cdot r_j \end{cases}$$

则:

$$\begin{cases} t_i^T \cdot \mathbf{C}^{-T} \cdot \mathbf{C}^{-1} \cdot t_j = 0 \\ t_i^T \cdot \mathbf{C}^{-T} \cdot \mathbf{C}^{-1} \cdot t_i = t_j^T \cdot \mathbf{C}^{-T} \cdot \mathbf{C}^{-1} \cdot t_j \end{cases}, \quad (15)$$

其中: \mathbf{C}^{-T} 表示 $(\mathbf{C}^{-1})^T$ 或 $(\mathbf{C}^T)^{-1}$ 。

令 $\mathbf{M} = \mathbf{C}^{-T} \cdot \mathbf{C}^{-1}$, 则:

$$M^T = M = \begin{bmatrix} 1/\alpha^2 & 0 & -u_0/\alpha^2 \\ 0 & 1/\beta^2 & -v_0/\beta^2 \\ -u_0/\alpha^2 & -v_0/\beta^2 & u_0/\alpha^2 + v_0/\beta^2 + 1 \end{bmatrix}$$

M 是对称矩阵,令

$$m = [M_{11} \quad M_{12} \quad M_{22} \quad M_{13} \quad M_{23} \quad M_{33}]^T$$

H 的第 i 列向量 $t_i = [t_{i1} \quad t_{i2} \quad t_{i3}]^T$

则可表示 $t_i^T M t_j = V_{ij}^T m$

其中: $V_{ij} = [t_{i1} t_{j1} \quad t_{i1} t_{j2} + t_{i2} t_{j1} \quad t_{i2} t_{j2} \quad t_{i3} t_{j1} + t_{i1} t_{j3} \quad t_{i3} t_{j2} + t_{i2} t_{j3} \quad t_{i3} t_{j3}]^T$.

这样式(15)可以表示为:

$$\begin{bmatrix} V_{12} \\ V_{13} \\ V_{23} \\ (V_{11} - V_{22})^T \\ (V_{11} - V_{33})^T \\ (V_{22} - V_{33})^T \end{bmatrix} \cdot m = 0 \text{ 简写为 } Vm = 0$$

为了提高准确度,可以从 n 个角度拍摄,那么 V 是 6n×6 的矩阵,可以得到超定方程组唯一的非零最优化解 m。

$$u_0 = -M_{13}/M_{11}$$

$$v_0 = -M_{23}/M_{22}$$

$$f = \sqrt{\frac{M_{33} + M_{13} + M_{23}}{M_{11}}} \cdot d_x.$$

2.4 透镜径向畸变系数 k 的求解

由于相机的畸变系数较小,通常在确定主点和主距之后再确定镜头畸变系数。相机镜头的畸变有径向畸变、偏心畸变、薄棱镜畸变等,其中径向畸变为主要因素。这里只考虑径向畸变。

相机镜头无畸变时,设理想图像坐标为(x, y),考虑畸变时实际坐标为(x_d, y_d),则:

$$x = x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$y = y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

其中:k₁, k₂ 为径向畸变系数, $r^2 = x_d^2 + y_d^2$

若(u, v)和(u_d, v_d)分别是理想像素坐标值和实际像素坐标值,则:

$$u = u_d + (u_d - u_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$v = v_d + (v_d - v_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} (u_d - u_0)r^2 & (u_d - u_0)r^4 \\ (v_d - v_0)r^2 & (v_d - v_0)r^4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - u_d \\ v - v_d \end{bmatrix}$$

简写为: $D \cdot k = d$.

如果有 n 幅图像和 m 个星点,那么有 m · n

个方程,利用最小二乘原理可以求得:

$$k = (D^T D)^{-1} D^T d.$$

3 实验

3.1 相机的已知参数和待求参数

对于待标定的相机,已知参数:

(1)CCD 单位像素长度 $d_x = d_y = 9 \mu\text{m}$,分辨率为 $4\ 008 \times 5\ 344$ 。

(2)每个星点的像素坐标值(u_i, v_i)

待求解参数:

(1)相机的主点(u_0, v_0)

(2)相机的主距 f

(3)相机的径向畸变系数 k

3.2 实验步骤

(1)用已知内方位元素的相机(主距精度 $3.56 \mu\text{m}$,主点精度 $1.39 \mu\text{m}$)对天空星点拍照,如图 5 所示。

(2)用待标定的相机以不同的 n 个角度对同一块区域拍照,确保选取的星点均在视场范围内。(本实验 n=6)

(3)获取星点在各图像中的坐标值。

(4)利用已标定好的相机所拍的图像中的星点坐标值及相机的内方位元素计算并记录星点的天球坐标系下的坐标(U_i, V_i, W_i)^T。

(5)计算待标定的相机的内方位元素值。



图 5 星点图(局部)

Fig. 5 Star point image (local part)

3.3 误差精度分析

3.3.1 噪声扰动对结果的影响

在像素坐标值的提取中,会有噪声等扰动因

素。实验中选取 60 个点,通过改变像素提取的噪声水平来模拟外界扰动,分别采用线性和非线性方法求解,精度影响结果如图 6 和图 7 所示。

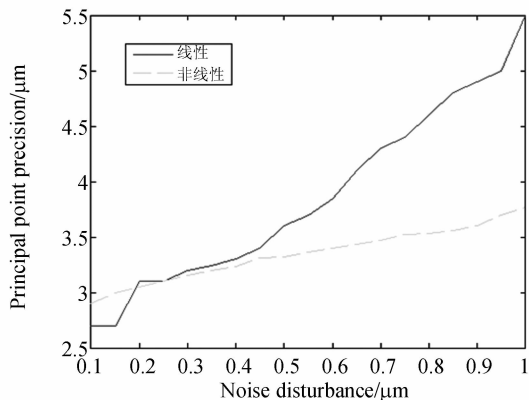


图 6 主点精度与噪声扰动关系图

Fig. 6 Relationship between principal point precision and noise disturbance

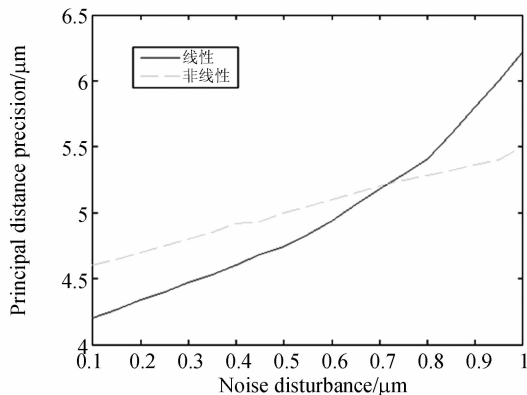


图 7 主距精度与噪声扰动关系图

Fig. 7 Relationship between principal distance precision and noise disturbance

由图 6 和图 7 可以看出,采用非线性方法求解矩阵 H ,最后结果的精度变化相对稳定一些。

3.3.2 已标定好的相机内方位元素误差对结果的影响

由于本文方法需要已知内方位元素的测绘相机,所以需要分析已知内方位元素误差对测绘相机的影响。本实验选取角度值 $n=6$,固定其他分量,选取已标定好的测绘相机不同的主距精度和主点精度,分别计算,得到未标定相机的主距和主点精度,将计算值连成曲线,得到图 8 和图 9。

由图 8 和图 9 可知,已标定好的测绘相机的

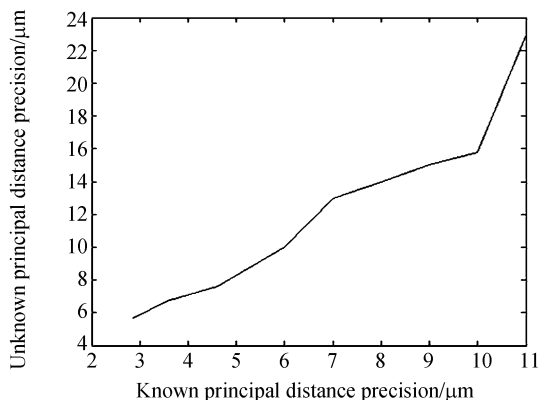


图 8 主距精度影响图

Fig. 8 Effect of principal distance precision

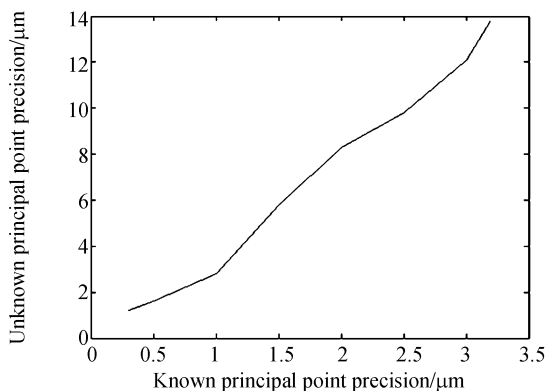


图 9 主点精度影响图

Fig. 9 Effect of principal point precision

内方位元素的误差对结果影响很大,精度过低将会严重影响待标定相机的标定结果。

3.3.3 标定方案的验证及标定结果

理论上讲,查星座图获取的星点坐标值是准确的,而通过已知内方位元素相机计算获得的星点坐标值是有误差的,误差大小由已知内方位元素相机的精度决定。运用计算得出的星点坐标对相机进行标定,然后对这个方法进行了实验与精度分析,来验证此方法是否可行以及精度能否达到要求。

用精密测角法^[9,11]标定好相机(相关数据见表 1),将其作为已知的内方位元素相机,计算好星点坐标值,再用本文方法进行标定,结果见表 1。

由数据看出,运用计算出的星点坐标值采用本文的方法进行相机标定,所得的结果主点精度

小于 $3\ \mu\text{m}$, 主距精度小于 $9\ \mu\text{m}$, 均满足要求。说明采用已知内方位元素相机来计算获取星点坐标值, 并以此数据进行标定的方法可行。

表 1 用不同方法标定相机的比较

Fig. 1 Comparison of different camera calibration methods

数值 标定 方法	数值		精度	
	u_0 (mm)	v_0 (mm)	主点精度 (μm)	主距精度 (μm)
精密测角法	0.408 2	0.559 3	1.39	3.56
本文方法	0.410 3	0.558 2	2.87	6.74

参考文献:

- [1] 陈刚, 陈华, 车仁生. 空间点的立体视觉传感器标定方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1439-1444.
CHEN G, CHEN H, CHE R SH. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1439-1444. (in Chinese)
- [2] 潘淑杰, 董守平, 王红丽. 应用灭点标定的立体视觉自由曲面三维重建[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1127-1133.
PAN SH J, DONG SH P, WANG H L. Three dimensional reconstruction of stereo vision free-form surface based on vanishing-point calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1127-1133. (in Chinese)
- [3] 孙军华, 吴子彦, 刘谦哲, 等. 大视场双目视觉传感器的现场标定[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 633-640.
SUN J H, WU Z Y, LIU Q ZH, et al.. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 633-640. (in Chinese)
- [4] JONG-SOOL, YU-HO J. CCD camera calibrations and projection error analysis [J]. *IEEE Int Conf Science and Technology*, 2000(2): 50-55.
- [5] 陈刚, 姚英学. 多视点大空间三维坐标数据归一化方法[J]. 光学精密工程, 2008, 17(7): 1309-1314.
CHEN G, YAO Y X. 3D datum mosaic method of multi-view and large scale based on optical coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 17(7): 1309-1314. (in Chinese)

4 结 论

本文介绍了一种利用已知坐标值的星点进行相机标定的方法, 并对该方法的原理以及计算步骤、实验过程等进行了详细的介绍。该方法建立在小孔成像的基础上, 通过寻找星点坐标和像素坐标之间的联系来求解相机内方位元素。该标定方法不需要特别的实验设备, 且步骤简单。通过各参量的变化对结果的精度进行分析表明, 主点精度优于 $3\ \mu\text{m}$ (1/3 pixel), 主距精度优于 $7\ \mu\text{m}$ (小于 1 pixel)。结果表明, 该方法的标定能够达到所要求的精度, 是可行的。

- [6] 韩建栋, 吕乃光, 董明利, 等. 线结构光传感系统的快速标定方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 958-963.
HAN J D, LV N G, DONG M L, et al.. Fast method to calibrate structure parameters of line structured light vision sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 958-963. (in Chinese)
- [7] 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
MA S D, ZHANG ZH Y. *Computer Vision-Theory and Algorithms* [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [8] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [9] 吴国栋, 韩冰, 何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1628-1632.
WU G D, HAN B, HE X. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1628-1632. (in Chinese)
- [10] 刘伟毅, 贾继强, 丁亚林, 等. 精密测角法中测量误差对内方位元素标定的影响[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 705-709.
LIU W Y, JIA J Q, DING Y L, et al.. Measurement error impact on parameters calibration in precise angle measurement method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 705-709. (in Chinese)
- [11] 王志和, 舒嵘, 何志平, 等. 基于平行光管的 CCD 相

机标定新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(6):465-468.

WANG ZH H, SHU R, HE ZH P, *et al.*. New

method of CCD camera calibration based on collimator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 26(6):465-468. (in Chinese)

作者简介:



刘伟毅(1983—),男,山东烟台人,博士研究生,2006年于山东大学获得学士学位,主要从事相机标定及航空遥感器稳定成像技术方面的研究。E-mail: 2219101@163.com



刘波(1985—),男,江苏抚州人,研究实习员,2006年、2008年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士学位,主要从事航空相机机构设计的研究。E-mail: liubo1985@gmail.com

导师简介:



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1987年于吉林工业大学获学士学位,1994年于东北大学获硕士学位,主要从事航空遥感仪器光机结构总体技术及载机动态条件下稳定成像技术方面的研究。E-mail: dingyyl1964@sohu.com



贾继强(1966—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,1987年于吉林工学院获学士学位,主要从事测绘相机及相机稳定技术方面的研究。E-mail: jiajiqiang@sohu.com

●下期预告

直流力矩电机力矩波动的自适应补偿控制

宋彦^{1,2},高慧斌¹,张淑梅¹,杜璧秀¹,郭同健¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

研究了伺服系统低速状态下电机力矩波动对速度稳定度的影响,提出了针对速度稳定性的自适应补偿控制方法。首先从电机结构出发,分析了电机力矩波动产生的机理,并建立了力矩波动的数学模型。接着,提出了基于鲁棒自适应的控制策略。系统控制器由两部分组成:超前-滞后校正,主要保证系统的名义稳定性和鲁棒性;自适应补偿控制,采用最小二乘法在线辨识力矩波动,并给予自适应补偿。实验结果显示:与超前-滞后方法相比,采用自适应补偿时,速度波动的峰-峰值由4.21%下降到1.77%,均方根值由0.97%下降为0.39%,结果说明这一方法能够有效降低电机力矩波动对速度稳定度的不利影响。