

基于灭点理论和平面控制场的 相机标定方法研究

杨化超^{1), 2)} 张书毕^{1), 2)} 刘超²⁾

¹⁾ (江苏省资源环境信息工程重点实验室, 徐州 221008) ²⁾ (中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221008)

摘要 给出了一种基于灭点理论和平面控制场的相机解析自标定方法。在系统分析平面场景灭点几何的基础上,依据灭点理论并结合2维场景的共线方程严密论证和推导了平面控制场中相机外方位元素初值的实用算法。给出了一种圆形标志点的快速检测及定位方法,提出了一种基于计算可靠性矩阵 $Q_{VV}P$ 的自检校光束法平差中各类观测值权值的确定方法。实验证明了该相机标定方法的正确性和有效性,为相机标定探索了一种可行的方法。

关键词 相机标定 共线方程 外方位元素 灭点

中图法分类号: V52 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)08-1168-07

Research into Camera Calibration Methods Based on the Vanishing Points Theory and Planar Control Fields

YANG Huachao^{1), 2)}, ZHANG Shubi^{1), 2)}, LIU Chao²⁾

¹⁾ (Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou 221008)

²⁾ (School of Environment & Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

Abstract A systematic and deep research is carried out into the camera calibration methods based on the vanishing points theory and planar control fields. Then a practical algorithm to obtain the initial values of the exterior orientation elements is deduced by combining the theory of vanishing points and collinearity equations in planar scenes. Detection methods of signalized points based on 2D direct linear transformation was proposed. Mathematical model of bundle block adjustment with self calibration is given and the method of determining the weight of every class of observations based on the calculating the $Q_{VV}P$ is proposed. The performance between two camera calibration methods is compared and some valuable conclusions are acquired. It can provide some advices in practical applications. But how to realize the full automatic detection and localization of target points should be improved in the future.

Keywords camera calibration, collinearity equations, exterior orientation elements, vanishing points

0 引言

数字摄影测量和计算机视觉的基本任务之一是从相机获取的图像信息出发计算3维空间中物体的几何信息,并由此重建和识别物体。相机标定是实现这一过程的前提和基础。在计算机视觉界,基于

不同的出发点和研究思路,近二十年来相机标定技术得到了广泛而深入的研究,如 Tsai 提出的“两步法”^[1]和 Zhang 的平面法^[2]、基于神经网络^[3]及灭点理论^[4-5]的相机标定方法等。而利用数学方法对从图像中获取的数据进行处理而求取相机内方位元素及变形参数的解析法是摄影测量界应用较为广泛的相机标定方法^[6]。解析法可分为实验场法和自

基金项目:地理信息工程国家测绘局重点实验室开放基金项目(200818)

收稿日期:2008-09-02;改回日期:2009-01-19

第一作者简介:杨化超(1977—),男,副教授。中国矿业大学大地测量学与测量工程专业博士研究生。主要研究方向为数字摄影测量与计算机视觉,已发表学术论文20余篇,其中EI检索6篇。E-mail: huachao-yang@163.com

标定法两种。试验场法通常是利用试验场中建立大量的高精度的控制点通过空间后方交会对象点的系统误差直接进行补偿,可以比较准确地改正系统误差,但控制场的建立和定期维护却是一件费力耗时的的工作。所谓自标定是指将相机的内、外方位元素同时进行整体平差计算,即按带有附加参数的间接平差模型来求解标定参数,可以不需要控制点,属于间接补偿系统误差。该法对控制场的要求相对较低。本文给出了一种基于灭点理论和平面控制场的相机标定方法。该方法首先依据灭点理论并结合 2 维场景中的共线方程求解相机外方位元素初值。然后在圆形标志点快速检测及定位的基础上,采用基于计算可靠性矩阵 Q_{VP} 的自检校光束法平差用于相机的精确标定。试验证明了该相机标定方法的正确性和有效性。

$i = 1, 2, 3$ 为摄影测量中常用的旋转角 φ, ω, κ (Y 为主轴) 构成的旋转矩阵^[7]。

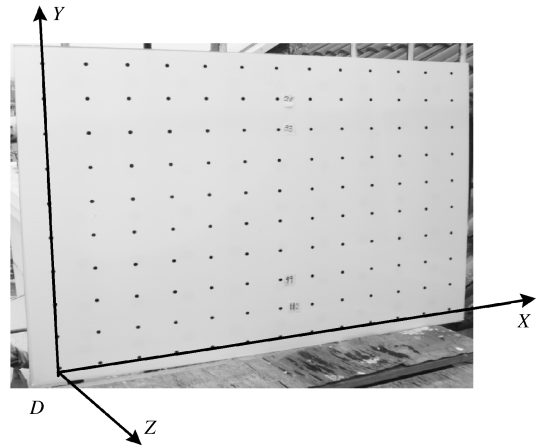


图 1 2 维平面控制场

Fig. 1 Planar control scenes

1 基于平面场景的共线方程

图 1 为本文设计的用于相机标定试验的 2 维平面控制场,是由 130 个圆形标志点构成的平面矩形规则格网。 X, Y 轴设在平面内,则 $Z = 0$, 于是共线方程可写为^[7]

$$\begin{cases} X - X_s = -Z_s \frac{a_1x + a_2y - a_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \\ Y - Y_s = -Z_s \frac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_s, Y_s, Z_s 为摄站点坐标; X, Y 为物方空间点平面坐标; x, y 为相应的像点坐标。 $R = \{a_i, b_i, c_i,$

2 平面场景中基于灭点的外方位元素初值计算方法

设图 1 中 4 个角标志点(按顺时针方向编号)的物方坐标记为 $G_i(X_i, Y_i, Z_i)$ ($i = 1, 2, 3, 4$)。且 $X_1 = X_2, X_3 = X_4, Y_1 = Y_3, Y_2 = Y_4, Z_i = 0$ ($i = 1, 2, 3, 4$)。矩形的 4 个角点在像平面上的相应像点分别记为 $p_i(x_i, y_i)$ ($i = 1, 2, 3, 4$)。由于采用任意方位进行摄影,由灭点理论知,2 维场景中的灭点存在如表 1 所示的 4 种情况(其中 k_{12} 代表直线 p_1p_2 的斜率,其余类同)。4 种灭点存在情况的判断依据为表 1 中所列的 4 条直线段斜率之间的几何关系。

表 1 2 维场景中的灭点

Tab. 1 Vanishing points in planar scenes

序号	说明	示意图	序号	说明	示意图
a	$k_{12} \neq k_{34}, k_{13} \neq k_{24}$ 存在 X, Y 方向 2 个灭点。 $\varphi \neq 0, \omega \neq 0$		c	$k_{12} = k_{34}, k_{13} \neq k_{24}$ 仅 X 方向 1 个灭点。 $\varphi \neq 0, \omega = 0$	
b	$k_{12} \neq k_{34}, k_{13} = k_{24}$ 仅 Y 方向 1 个灭点。 $\varphi = 0, \omega \neq 0$		d	$k_{12} = k_{34}, k_{13} = k_{24}$ X, Y 方向灭点均不存在。 $\varphi = 0, \omega = 0$	

设 X 和 Y 方向的灭点分别为 $\nu_X(x_{X_\infty}, y_{X_\infty})$ 和 $\nu_Y(x_{Y_\infty}, y_{Y_\infty})$, 则由灭点理论知^[8-10]:

$$x_{X_\infty} = x_0 - fa_1/a_3, y_{X_\infty} = y_0 - fa_2/a_3 \quad (2)$$

$$x_{Y_\infty} = x_0 - fb_1/b_3, y_{Y_\infty} = y_0 - fb_2/b_3 \quad (3)$$

随着相机硬件技术的发展,相机的内方位元素已经非常接近理想值(如主点坐标近似位于图像中心,焦距接近标称焦距)^[11]。同时考虑到本文方法得到的外方位元素主要被用作光束法平差的初始值。因此,式(2)和式(3)中的内方位元素设为理想值,即 $x_0 = y_0 = 0, f$ 为相机的标称焦距。以下对表 1 所列的 4 种情况分别探讨其外方位元素的计算方法。

2.1 存在 X, Y 方向 2 个灭点(a)

2.1.1 ω, κ 和 X_S, Y_S 的求解

由于 Y 方向灭点存在,则 ω, κ 角度的值可直接按式(4)求出(此处保留 ω 角的正负号):

$$\tan \kappa = x_{Y_\infty}/y_{Y_\infty}; \tan \omega = \pm \frac{f}{\sqrt{x_{Y_\infty}^2 + y_{Y_\infty}^2}} \quad (4)$$

对 G_1, G_3 两点按共线方程第 1 式列方程并相除得

$$\frac{X_1 - X_S}{X_3 - X_S} = \frac{a_1x_1 + a_2y_1 - a_3f}{a_1x_3 + a_2y_3 - a_3f} \cdot \frac{c_1x_3 + c_2y_3 - c_3f}{c_1x_1 + c_2y_1 - c_3f} \quad (5)$$

令:

$$k_1 = \frac{a_1x_1 + a_2y_1 - a_3f}{a_1x_3 + a_2y_3 - a_3f} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{c_1x_1 + c_2y_1 - c_3f}{c_1x_3 + c_2y_3 - c_3f} \quad (7)$$

利用式(2)将式(6)化简可得

$$k_1 = \frac{x_1x_{X_\infty} + y_1y_{X_\infty} + f^2}{x_3x_{X_\infty} + y_3y_{X_\infty} + f^2} \quad (8)$$

由旋转矩阵的正交性质可得^[7]

$$c_1a_1 + c_2a_2 + c_3a_3 = 0 \quad (9)$$

利用式(2)进一步简化式(9)得

$$\frac{c_2}{c_3} = \frac{f}{y_{X_\infty}} - \frac{c_1x_{X_\infty}}{c_3y_{X_\infty}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(7)并化简得

$$k_2 = \frac{y_{X_\infty} - y_1}{y_{X_\infty} - y_3} \cdot \frac{1 + \left(\frac{x_1y_{X_\infty} - y_1x_{X_\infty}}{y_1 - y_{X_\infty}} \right) \frac{c_1}{c_3f}}{1 + \left(\frac{x_3y_{X_\infty} - y_3x_{X_\infty}}{y_3 - y_{X_\infty}} \right) \frac{c_1}{c_3f}} \quad (11)$$

由于灭点 ν_X 和 p_1, p_3 两点位于像面的一条直线上,则容易证明:

$$\frac{x_1y_{X_\infty} - y_1x_{X_\infty}}{y_1 - y_{X_\infty}} = \frac{x_3y_{X_\infty} - y_3x_{X_\infty}}{y_3 - y_{X_\infty}} \quad (12)$$

则式(11)变为

$$k_2 = \frac{y_{X_\infty} - y_1}{y_{X_\infty} - y_3} \quad (13)$$

利用式(5)、式(8)、式(13)可求得

$$X_S = (k_1X_3 - k_2X_1)/(k_1 - k_2) \quad (14)$$

由 G_1, G_2 两点按共线方程(1)中第 2 式列方程并相除

$$\frac{Y_1 - Y_S}{Y_2 - Y_S} = \frac{b_1x_1 + b_2y_1 - b_3f}{b_1x_2 + b_2y_2 - b_3f} \cdot \frac{c_1x_2 + c_2y_2 - c_3f}{c_1x_1 + c_2y_1 - c_3f} \quad (15)$$

结合式(3)同上述化简步骤,可求得

$$Y_S = (s_1Y_2 - s_2Y_1)/(s_1 - s_2) \quad (16)$$

式中, $s_1 = \frac{x_1x_{Y_\infty} + y_1y_{Y_\infty} + f^2}{x_2x_{Y_\infty} + y_2y_{Y_\infty} + f^2}, s_2 = \frac{y_{Y_\infty} - y_1}{y_{Y_\infty} - y_2}$

2.1.2 φ 和 Z_S 的求解

由共线方程式(1)中的两式相除得

$$\frac{X - X_S}{Y - Y_S} = \frac{a_1x + a_2y - a_3f}{b_1x + b_2y - b_3f} \quad (17)$$

第 2.1.1 节中已求得 X_S, Y_S, ω 和 κ , 则可根据旋转矩阵及式(3)计算 b_1, b_2 和 b_3 。 b_3 确定后,据 $b_3 = -\sin\omega$ 可以确定根据式(4)求得的 ω 角的正负号。进一步结合式(2)并利用式(16)可分别求得 a_3, a_1 和 a_2 。由旋转矩阵的正交性关系知 $c_3 = a_1b_2 - a_2b_1$, 则由 $\tan\varphi = -a_3/c_3$ 可确定旋转角 φ 。 Z_S 的求解可按计算得到的旋转矩阵按式(1)中任意一式得到。

2.2 存在 1 个或 0 个灭点

2.2.1 仅 Y 方向的灭点存在(b)

当 $\varphi = 0, \omega \neq 0$ 时, Y 方向的灭点 ν_Y 存在, 即式(3)存在, 则由式(4)仍可直接确定 ω 和 κ 。 ω 角的正负判断方法同第 2.1 节。 Y_S 按式(16)计算, 利用已知的 3 个旋转角可确定旋转矩阵, 旋转矩阵确定后, 可直接按式(5)求得 X_S 。

2.2.2 仅 X 方向的灭点存在(c)

当 $\varphi \neq 0, \omega = 0$ 时, X 方向的灭点 ν_X 存在, 即式(2)存在但式(3)不存在, 此时 κ 角不能直接确定。但当 $\omega = 0$ 时, 由旋转矩阵表达式知 $a_2 = -\cos\varphi\sin\kappa, a_1 = \cos\varphi\cos\kappa$, 则 $\tan\kappa = -a_2/a_1$, 结合式(2)得到 $\tan\kappa = -y_{Y_\infty}/x_{Y_\infty}$ 。据此求得 κ 角度值。 ω, κ 确定后, φ 角度的求解方法同第 2.1 节。 X_S 按式(14)计算, Y_S 用已确定的旋转矩阵用式(15)直接计算。

2.2.3 X,Y方向的灭点均不存在(d)

当 $\varphi = 0, \omega = 0$ 时,知 $a_3 = 0, b_3 = 0, c_3 = 1$,进一步根据旋转矩阵的特性 $c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1$ 可知 $c_1 = c_2 = 0$,则取用 G_1, G_3 两点同式(15)列方程并考虑到 $Y_1 - Y_s = Y_3 - Y_s$ 对其进行化简变形后得

$$\frac{b_1}{b_2}x_1 + y_1 = \frac{b_1}{b_2}x_3 + y_3 \quad (18)$$

由上式得 $\tan\kappa = b_1/b_2 = -(y_1 - y_3)/(x_1 - x_3)$,据此可求得 κ 角度值。 X_s, Y_s 按确定的旋转矩阵分别采用式(5)和式(15)两式直接计算。

以上 3 种情况下的 Z_s 均可按式(1)中的任意一式计算得到。

3 标志点影像坐标的量测

标志点影像坐标的自动量测是保证相机标定速度和精度的一个重要技术。传统的基于影像匹配技术的影像坐标量测方法不但耗时较长(如模板匹配),而且在存在众多图形单一的标志点构像的情况下容易产生匹配奇异的情况。文献[12]提出可使用电视扫描 TV 的方式按给定的行宽对全幅影像进行扫描,以自动量测标志点影像。但对全幅影像进行扫描时行宽和扫描方向均难以确定。

本文采用的方法是:首先利用每幅影像中 4 角标志点的物方设计坐标及其相应的像坐标采用 2 维直接线性变换方法(DLT)^[7]计算各影像的 2 维 DLT 系数(4 角标志点坐标通过人工在标志点影像区域点选区域生长的种子点,继而通过椭圆拟合算法定位标志点中心影像坐标),然后根据 2 维 DLT 系数及其余标志点的物方设计坐标反算其相应的像坐标。

如反算的像坐标落在标志点影像范围内(可根据灰度值判断),则以该点为种子点进行区域生长(如图 2 中的 p_2 点),根据区域生长算法检测出来的边缘点进一步采用椭圆拟合算法^[12]拟合该标志点影像中心的坐标;如反算的像坐标落在标志点影像范围以外(如图 2 中的 p_1 点),则以 p_1 点为中心点按一定的步距搜索其最近的标志点影像再进行拟合即可。需要指出的是,为了避免搜索的盲目性,采用的搜索策略为:首先在平行于图像坐标系($O-JI$)的坐标轴的 1,2,3,4(如图 2)4 个主要方向上按给定的步距搜索,如果在给定的搜索范围内没有发现标志点,则在如图 2 所示的按 45°角间隔生成的 5,6,

7,8 四个方向上继续搜索,直至搜索到标志点为止。实验表明该方法在本文的实验条件下非常有效,且物像对应关系明显,便于后续的数据组织。图 3 为采用该方法的标志点坐标量测结果(部分),其中绿十字交叉点为利用 2 维 DLT 系数反算的标志点像点坐标,红十字交叉点为最终的标志点中心影像坐标。

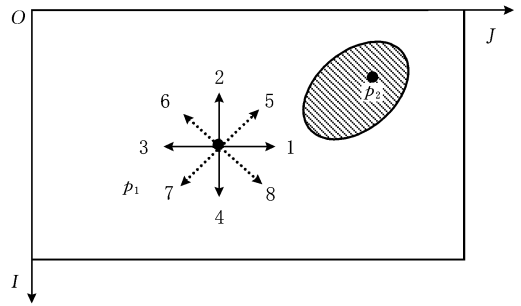


图 2 标志点检测

Fig. 2 Detection of signalized points

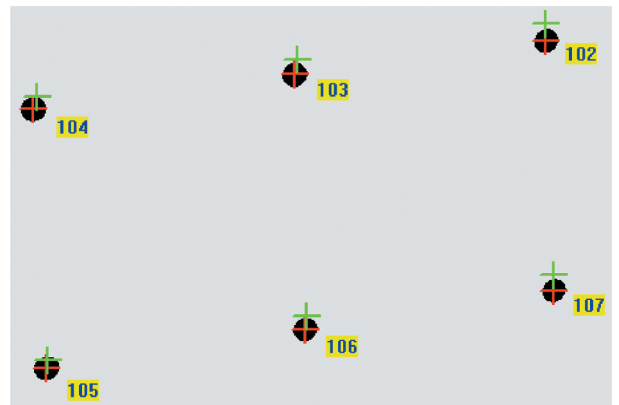


图 3 标志点坐标量测结果(部分)

Fig. 3 Measurement results of signalized points(parts)

表 2 给出了实验中的 2 张影像基于模板匹配^[13](模板尺寸为 40 × 40)与本文方法的标志点识别方法的耗时比较(不包括标志点的定位时间)。

表 2 两种方法的耗时比较

Tab. 2 Comparison of computational time for two methods

影像编号	耗时/s	
	模板匹配	本文方法
DSC00415	541.86	5.2
DSC00419	542.48	4.8

表 2 表明本文方法的耗时仅为模板匹配方法的约 1%。需要特别指出的是表 2 的实验结果仅仅是利用模板匹配对标志点进行识别,如利用基于自适

应模板的最小二乘模板匹配及定位技术对标志点进行识别与定位则耗时更长。

4 基于重复计算可靠性矩阵 $Q_{VV}P$ 的自检校光束法平差

将标志点的设计坐标和改正系统误差的附加参数处理成带权观测值时,自检校光束法平差之误差方程式为^[13]

$$\begin{cases} V_1 = A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 - L_1 & P_1 \\ V_2 = I_2 X_2 - L_2 & P_2 \\ V_3 = I_3 X_3 - L_3 & P_3 \end{cases} \quad (19)$$

式中各参数的含义及误差方程式各项系数详见文献[7,14],其中:

$X_3 = [dx_0 \quad dy_0 \quad df \quad dK_1 \quad dK_2 \quad dS_1 \quad dS_2]^T$
 x_0, y_0, f 为相机的内方位元素; K_1, K_2 为径向畸变(radial distortion)改正系数, S_1, S_2 为偏心(decentring distortion)畸变改正系数。

利用验后权估计的方法来合理确定各类观测值的权。式(19)中各类观测值的权可定义为 $p_i = \sigma_0^2 / \sigma_i^2$ ($i=1,2,3$), 单位权观测值中误差可用像点坐标观测精度作为测度,对于第 i 类观测值的中误差 σ_i 。可由平差后的观测值残差向量 V_i 得到:

$$\sigma_i^2 = V_i^T V_i / r_i \quad (20)$$

式中,为第 i 类观测值的多余观测分量可由 n_i 个观测测量及其相应的误差方程式系数矩阵 A_i 按下式计算:

$$r_i = n_i - p_i \text{tr}(A_i Q_{xx} A_i^T) \quad (21)$$

为降低式(21)中 Q_{xx} 的计算工作量,采用了一种基于重复计算可靠性矩阵 $Q_{VV}P$ 的逐次递归快速算法。该算法的具体实现详见文献[15]。

5 实验及结果分析

对一标称焦距为 18mm 的数码相机(像素大小 $6\mu\text{m}$, 像幅为 $3\,872 \times 2\,592$) 进行标定实验。按文献[12]表 1 中“四角加四边”的摄影方式且每站旋转相机约 90° , 共拍摄了标定格网的 16 张数字影像(图 1 为其中拍摄的一幅影像)。每张像片均匀分布有 130 个标志像点。则共有 2 080 个像点和 130 个物点,考虑到附加的 7 个内部参数观测值,则共有观测值 $2\,080 \times 2 + 130 \times 3 + 7 = 4\,557$ 个,未知数的

个数 $16 \times 6 + 7 + 130 \times 3 = 493$ 个,多余观测为 $4\,557 - 493 = 4\,064$ 个。在自检校光束法平差中进行验后权估计所要估求的乃是像点坐标观测值、物点坐标观测值和虚拟的附加参数观测值的权阵,即式(19)中的 P_1, P_2, P_3 。假设在每一类观测值互为等权互不相关的情况下 $P_i = p_i I_i$, 此时实际上只要估求 p_1, p_2, p_3 的值。表 3 给出了对各类观测值的先验权分别取 0.05, 0.1, 0.5 和 1.0 时迭代收敛后各类观测值的权值及单位权中误差 σ_0 (单位: pixel)。实验中的迭代终止条件为两次 σ_0 的计算差值的绝对值小于 $1E-10^{-5}$ 。表 3 说明对不同类观测值赋予 0.05 ~ 1.0 间任一相同的初始权,自检校光束法平差有一致收敛解, σ_0 基本是一致的,且与像点坐标的检测精度相当。说明自检校光束法平差能有效地补偿像点坐标的系统误差。物点坐标观测值的验后权随先验权的不同有较大变化,说明摄影测量光束法平差中随机误差的方差不易估准,但不会破坏整个法方程解的稳定性。为进一步说明基于重复计算可靠性矩阵 $Q_{VV}P$ 的自检校光束法平差运算性能,分别采用一般方法^[15]、Förstner 方法^[14] 和本文方法计算可

表 3 权值及单位权中误差

Tab. 3 Weights and unit RMS error

项目	先验权			
	0.05	0.1	0.5	1.0
p_1	1.0	1.0	1.0	1.0
p_2	6.98×10^4	6.24×10^4	5.98×10^4	5.60×10^4
p_3	3.53×10^{-3}	3.55×10^{-3}	3.56×10^{-3}	3.62×10^{-3}
σ_0	0.205 1	0.205 3	0.206 2	0.206 2

靠性矩阵的时间 t (单位: s)、平差系统的多余观测数 $r = \sum_{i=1}^3 \text{tr}(Q_{VV} p_i)$ 及单位权中误差 σ_0 (仅计算主对角线元素)。将实验结果列于表 4。

表 4 运算性能分析

Tab. 4 Performance analysis

	一般方法	Förstner 方法	本文方法
t	818.33	245.51	9.82
r	4 064.000	4 064.000	4 063.986
σ_0	0.206 2	0.206 2	0.206 2

表 4 表明本文方法的计算时间分别约是一般方法和 Förstner 方法的 1.2% 和 3.9%, Förstner 方法由于在计算像点坐标观测值的多余观测分量时用了近

似算法,所以计算时间约是一般算法的 30%,但从 r 及单位权中误差 σ_0 2 个指标来看,3 种方法的计算精度基本一致。

现将各类观测值先验权取 1.0 时自检校光束法平差后相机标定参数的计算结果及其中误差列于表 5。同时,为评价本文方法的相机标定的精度,采用 Zhang 的平面法^[2]利用本文数据进行了标定,将标定结果及其中误差一并列于表 5。表 5 的结果表

明本文方法的内方位元素的标定精度优于文献[2]的方法。此时,如将 130 个标志点的设计坐标当作真值,利用检查点的方式统计计算 3 个方向上的坐标差中误差 m_x, m_y, m_z ,本文方法和文献[2]方法的计算结果分别为 0.053 mm, 0.062 mm, 0.057 mm 和 0.067 mm, 0.072 mm, 0.113 mm。统计计算结果进一步证明了本文方法的正确性和有效性。

表 5 内方位元素及变形改正系数的平差结果/像素

Tab. 5 Results of bundle block adjustment for interior orientation elements and distortion parameters/pixel

标定方法	标定结果及其中误差						
	x_0	y_0	f	K_1	K_2	P_1	P_2
本文方法	1 932.999 8	1 343.264 1	3 068.066 9	-1.82×10^{-8}	1.56×10^{-15}	-3.14×10^{-7}	2.66×10^{-7}
	0.216	0.234	0.327	0.55×10^{-10}	1.08×10^{-12}	3.89×10^{-10}	1.32×10^{-10}
文献[2]方法	1 928.321 4	1 351.006 7	3 074.554 2	-0.82×10^{-9}	2.13×10^{-15}	-1.14×10^{-7}	4.13×10^{-7}
	0.284	0.316	0.408	4.06×10^{-11}	1.96×10^{-12}	2.02×10^{-10}	5.33×10^{-10}

6 结 论

探讨了一种基于灭点理论和 2 维控制标定场的相机标定方法。通过系统分析和实验可得如下结论:

- 1) 在硬件技术不断发展的条件下,在某些应用条件下,内方位元素的初值取理想值是合适的;
- 2) 提出并推导的 2 维场景中方位元素的初值计算公式计算简单,且仅涉及线性运算,便于程序编制;
- 3) 在本文的实验条件下,基于 2 维 DLT 的像点坐标检测与定位方法非常有效,其明确的物像对应关系便于后续的数据组织,结合观测值自动定权的自检校光束法平差,大大提高了相机标定的自动化水平和精度;
- 4) 标定板制作简单,便于实时标定;
- 5) 如何实现标志点检测与定位的全自动化,是本文需要进一步研究并加以完善的地方。

参考文献 (References)

[1] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3-D machine metrology using off-the-shelf TV cameras and lens[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3 (4): 323-344.

[2] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[3] Lv Chaohui, Zhang Zhaoyang, An Ping. Camera calibration for stereo vision based on neural network[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 93-96. [吕朝辉, 张兆杨, 安平. 基于神经网络的立体视觉摄像机标定[J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 93-96.]

[4] Xie Wenhan, Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. New method of camera calibration with vanishing points[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(11): 1384-1388. [谢文寒, 张祖勋, 张剑清. 一种新的基于灭点的相机标定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(11): 1384-1388.]

[5] Caprile B, Torre V. Using vanishing points for camera calibration[J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 4(2): 127-140.

[6] Huang Guiping, Li Xiaoyong, Qin Guiqin. Test-range calibration of digital camera[J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2005, 22(3): 163-165. [黄桂平, 李小勇, 钦桂勤. 数码相机内参数的实验场法标定[J]. 测绘学院学报, 2005, 22(3): 163-165.]

[7] Feng Wenhao. Close-range Photogrammetry. Wuhan: Wuhan University Publishing Press, 2002, 2. [冯文灏. 近景摄影测量[M], 武汉: 武汉大学出版社, 2002, 2.]

[8] Zhang Zuxun, Wu Jun, Zhang Jianqing. A method for determining orientation parameters in image-based reconstruction of architectural scenes[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2003, 28(3): 265-271. [张祖勋, 吴军, 张剑清. 建筑场景三维重建中影像方位元素的获取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(3): 265-271.]

[9] Straforini M, Coelho C, Campani M. Extraction of vanishing

- points from images of indoor and outdoor scenes[J]. *Image and Vision Computing*, 1993, 11(2): 91-99.
- [10] Heuvel F. Vanishing point detection for architectural photogrammetry[J]. *International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, 32(B5): 652-659.
- [11] Yang Min, Shen Chunlin. Uncalibrated two-views 3D reconstruction based on geometric constraints in scene[J]. *Journal of Images and Graphics*, 2003, 8(8): 872-875. [杨敏, 沈春林. 基于场景几何约束未标定两视图的三维模型重建[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(8): 872-875.]
- [12] Feng Wenhao, Li Jiansong, Yan Li, et al. Positioning of screw holes group by video photogrammetry and digital drilling holes[J]. *ACTA Geodetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(3): 229-233. [冯文灏, 李建松, 阎利, 等. 基于数码相机的孔群定位与数
控钻孔[J]. *测绘学报*, 2003, 32(3): 229-233.]
- [13] Cole Luke, Austin D, Cole Lance. Visual object recognition using template matching[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 23(10): 1152-1164.
- [14] Li Deren. A posterior weight estimation in self-calibrating bundle block adjustment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1982, 1: 16-24. [李德仁. 自检校光束法区域网平差中的验后权估计[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 1982, 1: 16-24.]
- [15] Shan Jie. A fast recursive algorithm for repeated computation of the reliability matrix $Q_{VV}P$ [J]. *Acta Geodetic et Cartographica Sinica*, 1988, 17(4): 269-286. [单杰. 多次计算可靠性矩阵 $Q_{VV}P$ 的逐次递归快速算法[J]. *测绘学报*, 1988, 17(4): 269-286.]