

基于构建初始测量网络的相机内部参数校准

于之靖 潘 晓*

(中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300)

摘要 提出了一种基于构建初始测量网络的相机内部参数校准方法,有效解决了二维平面靶标在深度方向信息的不足以及三维靶标空间的限制等问题。通过对靶标板进行初始成像,按照测量网络的构建原则建立初始测量网络,经过后方交会求解外方位、前方交会求解空间三维靶标点坐标,最后由光束平差优化求解相机内部参数。利用标定后内部参数求解空间点坐标,实验结果表明,采用构建初始测量网的误差平均值为 0.0794,优于平面靶标和立体靶标标定的一0.2443 和-0.1916。同时校准所用时间也明显小于虚拟立体校准,即该方法具有快速、精确和方便等优点,满足大空间视觉测量中相机内部参数现场校准的要求。

关键词 测量;相机内部参数;校准;测量网络;迭代优化

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1112003

Camera Internal-Parameters Calibration Based on the Construction of Initial Measurement Network

Yu Zhijing Pan Xiao

(Department of Aviation Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract The camera internal parameters calibration method based on building the initial measurement of the network is put forward. The lack of direction depth of the plane target, as well as the constraints in three-dimensional target space, is solved effectively. In accordance with the principle of measurement network, after the imaging of the target board, the initial measurement network is established. After resection for solving the exterior orientation, forward intersection for the spatial coordinates of encoded points attached on the target board, the camera parameters are solved by the iterative optimization finally. And then, the internal parameters are used for solving the space coordinates. The experimental results show that an average error of building the initial network value of 0.0794 is superior to values of -0.2443 and -0.1916 of planar-target and three-dimensional-target calibration. Besides, the calibration time is significantly less than the virtual three-dimensional calibration. This method has the advantages of fast, accurate and efficient, can meet the requirements of the current large-scale vision measurement in the internal parameters calibration on site.

Key words measurement; camera internal parameters; calibration; measurement network; iterative optimization

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.1135; 150.6044

1 引 言

视觉测量技术是以光学为基础,结合计算机、图像处理 and 人工智能等技术而发展起来的一门新兴技术,它通过电荷耦合器件(CCD)摄像机获取图像,经过计算机进行图像处理和数学计算,进而得出空间

被测点的三维坐标。经过大量研究,许多基于视觉的测量设备被广泛应用^[1~4]。邱茂林等^[5]总结的目前相机内部参数校准方法可分为两类:传统的相机标定方法和相机自标定方法。

传统相机标定方法可分为独立内部参数校准

收稿日期: 2012-03-19; 收到修改稿日期: 2012-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(60979005,60939001)、国家科技支撑计划(2012BAG04B02)和民航局科技基金(60932016)资助课题。

作者简介: 于之靖(1963—),男,博士,教授,主要从事自动化测试技术、光纤传感技术和计算机视觉测量等方面的研究。

E-mail: hit_yu@126.com

* 通信联系人。E-mail: panxiao0620541@163.com

法、基于二维平面靶标和基于三维靶标的相机内部参数校准法等。由于各个内部参数之间具有很强的相关性,因此独立内部参数校准方法不能获得较高的校准精度。基于二维平面靶标的相机内部参数校准方法具有易于实现、校准简单等优点,但由于靶标尺寸有限,各方向的校准信息不足,因此校准精度低,主要用于小范围的校准场合^[6]。基于三维立体靶标进行相机校准是将一个三维立体靶标放置在摄像机前,靶标上的特征点相对于世界坐标系的位置已精确测定。相机获取靶标上特征点的图像,由靶标上特征点的约束信息即可计算出相机的内部参数。基于三维立体靶标的相机内部参数校准过程简单且容易实现,但由于靶标尺寸较小且校准优化算法为传统算法,结果不够精确^[7]。葛宝臻等^[8]提出一种基于共面点直接线性变换的相机畸变校正方法,由于采用的是直接线性变换方法,因此校准精度不及自校准技术。姜光文等^[9]提出一种基于可控旋转的主动视觉标定方法,将等效焦距与其他参数分离开来,以实现单独精确求解,然后在此基础上将传统标定方法与该方法结合实现其他参数的标定,该方法虽然在有效焦距标定上可取得相对较高精度,但其他参数的标定精度有待提高。

相机自校准技术主要有:利用本质矩阵和基本矩阵的相机校准方法、利用绝对二次曲线和外极线变换性质的相机校准方法、利用主动系统控制相机做特定运动的自校准方法以及利用多幅图像之间的直线对应关系的相机校准方法等^[10~12]。张征宇等^[13]提出直接在同名像对的共面条件方程中引入非线性畸变模型的思想,并推导包含非线性畸变模

型的共面条件方程,求解相机非线性畸变参数。由于其采用自由拍摄方式采集图像,且没有多基站整体优化平差,所以精度还有待提高。樊超等^[14]提出使用光学联合变换相关器测量空间相机的亚像素偏移的方法,由于只给出了相机像素偏移的平均值,且由于相机镜头畸变分布的不均匀性等因素,单靠补偿像素偏移量并不能很好提高视觉测量的精度。并且有研究提出一种虚拟立体校准的相机自校准技术^[15],该方法很大程度地提高了校准精度,但是由于基于导轨的靶标移动装置限制了测量的灵活性和校准效率。

为满足大空间视觉测量中相机现场校准的需求,本文提出一种基于构建初始测量网络的相机内部参数校准方法。即利用相机在靶标板周围多次成像,利用姿态估计方法计算得出相机外方位,同时通过编码点识别与匹配完成相机相对方位计算,前方交会求解特征点坐标,最后通过光束平差优化方法得出相机内部参数^[16]。

2 初始测量网络的建立

2.1 靶标板

编码点采用 GSI 编码点,如图 1(a)所示,采用如图 1(b)所示实验平面标定模板,反射特征点为直径为 6 mm 的反光点,共 96 组编码点位于同一平面靶标板上,靶标板为 1.0 m×0.85 m 大小的平面板。利用被标定相机在测量范围不同深度位置成像,为消除摄像机行列之间的不对称性误差,需在同一基站附近采用摄像机正常和绕光轴旋转 90°两次成像。

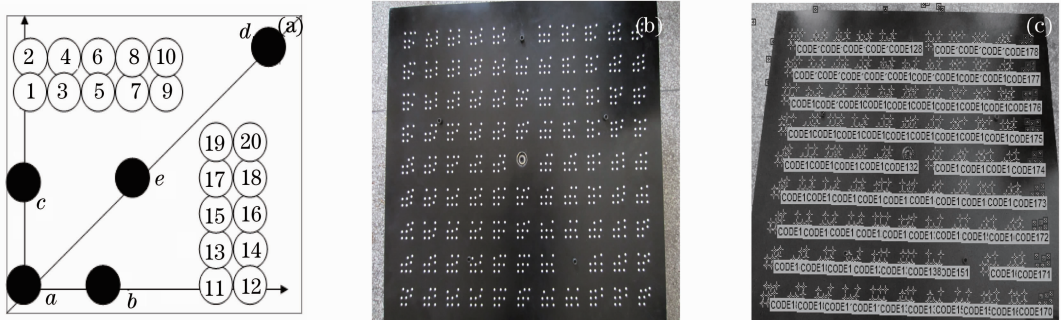


图 1 靶标板。(a) GSI 编码设计标志;(b) 靶标板;(c) 编码点识别

Fig. 1 Target board. (a) GSI codes and designed marks; (b) target board; (c) identification of encoded points

2.2 测量角度等因素的影响

为了达到高精度测量,应该尽可能使相机具有良好交会角的方位来拍摄。如图 2 所示,分别为交会角过小、交会角适中和交会角过大三种情况。太

小则增加了识别和计算的时间;太大则使反射点成像形状过大,从而影响识别精度。因此选择适合交会角度直接关系到测量的精度。

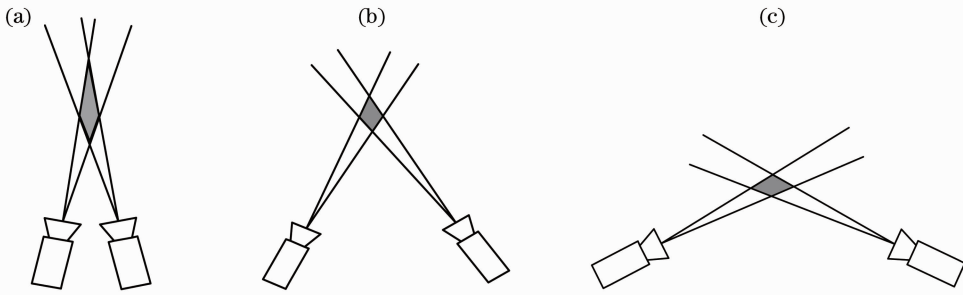


图 2 相机交会角度对测量影响示意图。(a)交会角过小；(b)交会角适中；(c)交会角过大
Fig. 2 Influence of the camera intersection angles on measurement results. Intersection angle is (a) too small; (b) moderate; (c) too large

2.3 测量基本约束原则

3 个主要测量原则：

- 1) 使每个反射特征点在 4 个或者更多基站中成像,保证交会精度和稳定性;
- 2) 保持相机的交会角度在 $60^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 之间,如图 3(a)所示;
- 3) 使视线和反射特征点平面之间的夹角小于 60° ,如图 3(b)所示。

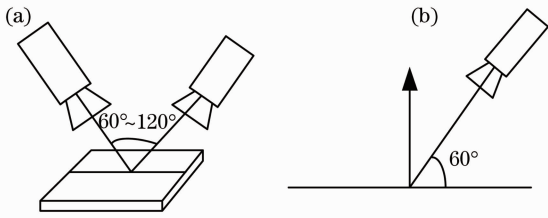


图 3 相机最优交会角示意图。(a)相机的最优交会角；
(b)视线和反射特征点平面之间的夹角

Fig. 3 Camera optimal intersection angle diagram. (a) Optimal intersection angle of cameras; (b) angle between the line of sight and the plane with reflective characteristic points

上述提到的测量原则也称为成像原则,即在保证良好成像原则下,还需要摄相机基站与被测目标之间的距离根据被测物体大小进行合理规划,同时根据该距离选择合适尺寸的反射特征点,在保证适当的特征像点像素数量的同时,避免由于过大的特征像点造成质心与形心不重合引起的定位误差。在图像采集过程中需要根据测量现场环境条件等合理设置光圈大小,一般采用小光圈以增大景深范围,因此在本次校准中将光圈开到 8,调节曝光时间和同轴闪光灯的闪光指数,以获得良好的成像灰度比来提高特征点的识别率和质心定位精度。

基于上述的测量网络构建原则,以及参考文献 [17,18] 中分布式摄相机网络在当今计算机视觉中的应用,文献 [19] 中提出采用发光二极管作为空间特征约束信息,通过在空间中移动相机来实现相机内部参数校准,特别在文献 [20] 中采用双摄相机为校准单元,参考空间中人工特征信息来实现相机校准。然而上述两种方法具有空间约束信息不足以及测量网络空间受限等缺点,难以实现相机内部参数的精确校准。提出采用贴附有 GSI 编码点的靶标

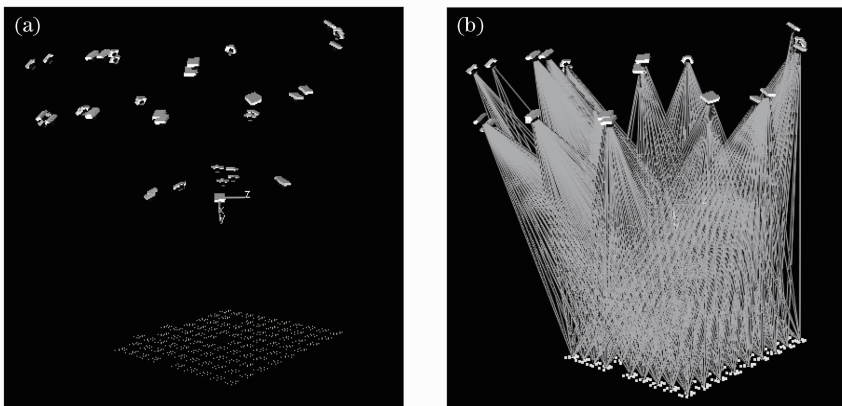


图 4 初始测量网络构建示意图。(a)相机基站空间布局；(b)靶标板和相机空间方位

Fig. 4 Construction diagram of initial measurement network. (a) Spatial distribution of the camera base stations; (b) spatial orientation of the target board and camera

板作为成像对象,由于采用的反射特征点的直径为 6 mm,因此在 2 m 范围内成像即可。将相机在其周围不同深度方向多次成像,通过姿态估计方法计算出各个基站的外方位和相对方位,以此来构建测量网络的方法,具体分布如图 4 所示。

3 相机内部参数模型

完整的相机内部参数包括有效焦距 c 、相机原点坐标 (x_p, y_p) 、径向畸变 (k_1, k_2, k_3) 、切向畸变 (p_1, p_2, p_3) 和仿射及非正交项 (b_1, b_2) 。其中有效焦距和相机原点坐标确定了像素坐标系到相机坐标系的转换关系:

$$\begin{cases} x_c = (u - u_0) p_{sx} \\ y_c = (v - v_0) p_{sy} \\ z_c = -c \end{cases} \quad (1)$$

式中 (x_c, y_c, z_c) 为特征像点在相机坐标系中的坐标, (u, v) 为特征像点的像素坐标, (u_0, v_0) 为 CCD 中心像素点坐标, (p_{sx}, p_{sy}) 为水平和垂直方向的像素间隔尺寸(出厂时给定)。从(1)式可以看出,畸变项等并未加入像面坐标系到相机坐标系的变换,在优化平差过程中,将这些引起误差的项作为附加参数加入:

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_a \\ \Delta y = \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_a \end{cases} \quad (2)$$

式中径向畸变为

$$\begin{cases} \Delta x_r = x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ \Delta y_r = y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \end{cases} \quad (3)$$

表 1 15 个基站的外方位参数

Table 1 Exterior orientation parameters of the 15 base stations

Station ID	x /mm	y /mm	z /mm	Azimuth /($^\circ$)	Elevation /($^\circ$)	Roll /($^\circ$)
1	-606.069	-46.616	143.168	-35.99	-5.99	-135.20
4	-97.742	-402.061	352.279	1.37	-18.05	40.13
7	143.454	-405.158	-203.877	-0.01	12.85	73.24
10	13.803	-368.494	-482.779	-0.98	25.07	-40.78
13	-367.816	-143.047	-780.533	-24.17	36.90	4.48
16	-720.683	-25.562	-667.199	-46.81	30.53	-135.53
19	-874.294	-330.185	581.101	-45.65	-27.95	140.95
22	-299.755	-492.723	489.850	-9.30	-22.38	151.28
25	-145.358	-517.322	-490.143	-1.69	26.41	48.87
28	-495.797	-363.092	-749.023	-23.09	39.56	-92.91
31	-1019.778	-181.990	49.860	-54.09	-10.05	-122.83
34	-532.202	180.243	53.395	-39.32	-3.07	141.73
37	0.000	-0.000	0.000	-0.00	0.00	-0.00
40	-527.444	264.483	-215.692	-43.05	16.38	-82.64
43	-483.153	142.723	-16.152	-40.29	-2.80	132.86

式中 $r = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}$ 。

切向畸变为

$$\begin{cases} \Delta x_d = p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2xy \\ \Delta y_d = 2p_1xy + p_2(r^2 + 2y^2) \end{cases} \quad (4)$$

仿射和非正交项表示像素沿 x 和 y 轴方向尺寸的不一致性和像素行和列之间的不垂直度,其引起的误差可表示为

$$\begin{cases} \Delta x_a = -b_1x + b_2y \\ \Delta y_a = b_1y \end{cases} \quad (5)$$

虽然在构建相机内部参数模型的时候定义了 p_3 ,但经过实验表明,在没有标定 p_3 的情况下,利用当前校准的相机内部参数可以达到预期大空间视觉测量测量精度,所以为提高校准效率,可以不校准 p_3 。

4 测量基站

通过构建初始测量网络,对每次摄相机基站进行后方交会求解当前相机的外方位,并通过空间特征点在多基站中成像的约束信息,从而求得相机的相对方位,进而获得整个初始测量网络的外部参数。本文对靶标板在 3 层不同深度方向上共采集 46 张图像,如图 4 所示,其中成功实现外方位求解的为 43 个基站并选取 37 号基站作为测量基准。由于在实际成像过程中难免有成像不满足解算条件的基站存在,但小数量的求解失败的基站并不影响测量网络的空间信息,最终解算精度也不会受到影响,以此构建初始测量网络。表 1 为其中 15 个基站的外方位信息。

5 优化平差方法求解

根据透视投影模型,使每一个空间特征点和成像点对应,考虑到相机的畸变因素,得到共线性方程为

$$\begin{cases} x = x_p - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \\ y = y_p - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y \end{cases}, \quad (6)$$

式中 (X, Y, Z) 为特征点在物体坐标系中的坐标, (X_0, Y_0, Z_0) 为相机坐标系原点在物体空间坐标系中的坐标(平移矢量), r_{11}, \dots, r_{33} 为相机坐标系到物体坐标系的正交旋转矩阵元。

在相机标定过程中,对应每一个相机基站位置有多个物体空间坐标 (X, Y, Z) 已知的特征点、与之相对应的图像观测值 (x, y) 和一组未知参量(平移矢量和旋转矩阵),同时对着所有的基站位置,包含一组未知的相机内部参数变量。根据这些已知信息、观测值、约束(如旋转矩阵的正交约束)和要求解的未知参数,通过合理设计以及利用一些先验初值,对该系统来进行求解。

共线性方程组通过 Taylor 级数展开线性化,并利用 Gauss-Markov 模型构成误差模型,可表示为

$$-e = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}; \quad \mathbf{P} = \sigma_0^2 \boldsymbol{\Sigma}^{-1}, \quad (7)$$

$$\mathbf{X}^T = [\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, \Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa, \mathbf{AP}_1, \dots, \mathbf{AP}_n], \quad (8)$$

式中 e 为真实误差; \mathbf{A} 为设计矩阵; \mathbf{x} 为未知参数向量; \mathbf{y} 为观测值向量; \mathbf{P} 为权矩阵; $\Delta X_0, \dots, \Delta k$ 为外

部方位参数的变化; \mathbf{AP}_i 为附加参数; σ_0^2 为先验的方差(或先验的单位权重的方差); $\boldsymbol{\Sigma}$ 为观测值的方差/协方差矩阵。

其最小二乘估计为

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{y}, \quad (9)$$

其求解采用 Levenberg-Marquardt 迭代算法进行。

6 实验数据分析

选用 NIKON D3 相机作为校准对象,其技术参数如表 2 所示。表 3 为通过利用构建初始测量网络的方法进行相机内部参数校准的结果。

表 2 NIKON D3 相机技术参数

Table 2 Technical parameters of NIKON D3 camera

Item	Data
Camera model	Nikon D3
Number of pixels	4256 × 2832
Size of CCD /mm	8.45 × 8.45
Lens model	Nikkor 24 mm/F1.8
Focal length /mm	24

表 3 构建测量网络方法校准相机内部参数比较

Table 3 Comparison of building measurement network method with other methods

Internal parameters	Planar calibration	Three-dimensional calibration	Virtual three-dimensional calibration	Calibration based on construction of initial measurement network
f /mm	24.656000	24.532000	24.463000	24.464000
x_p /mm	0.235100	0.179100	0.201600	0.202000
y_p /mm	-0.024900	-0.023700	-0.006700	-0.001000
k_1	1.598537×10^{-4}	1.587010×10^{-4}	1.559070×10^{-4}	1.559000×10^{-4}
k_2	-2.258062×10^{-7}	-2.123185×10^{-7}	-2.128120×10^{-7}	-2.130000×10^{-7}
k_3	0.000000	0.000000	$-6.862580 \times 10^{-11}$	$-6.881000 \times 10^{-11}$
p_1	-1.181171×10^{-6}	1.214309×10^{-6}	-1.896550×10^{-5}	1.907000×10^{-5}
p_2	6.831778×10^{-6}	-8.042698×10^{-6}	-1.422120×10^{-5}	-1.408000×10^{-5}
b_1	0.000000	0.000000	-1.275600×10^{-4}	-1.278000×10^{-4}
b_2	0.000000	0.000000	2.041310×10^{-4}	1.992000×10^{-4}
t /s	352	468	800	300

应用上述标定的内部参数进行三角测量求解得出空间编码点的坐标,靶标板上编码点之间的相对距离已知,选取靶标板上横向的 9 中两端编码点距

离作为测量评价依据,其标准距离为 680 mm。测量结果如表 4 所示。

表 4 测量结果对比
Table 4 Contrast of measurement results

Encoding point group	Planar calibration	Deviation /mm	Three-dimensional calibration	Deviation /mm	Virtual three-dimensional calibration	Deviation /mm	Calibration based on construction of initial network of measurement	Deviation /mm
188-196	679.6827	-0.3173	679.6579	-0.3421	679.8655	-0.1345	679.9334	-0.0666
101-109	679.7696	-0.2304	679.7797	-0.2203	679.9164	-0.0836	680.0566	0.0566
118-110	679.7852	-0.2148	679.8171	-0.1829	680.0591	0.0591	680.0851	0.0851
119-127	679.8018	-0.1982	679.8500	-0.1500	680.0811	0.0811	680.1069	0.1069
136-128	679.7587	-0.2413	679.8022	-0.1978	679.9055	-0.0945	680.0832	0.0832
152-144	679.7992	-0.2008	679.8651	-0.1349	679.9016	-0.0984	680.1539	0.1539
153-160	679.7427	-0.2573	679.8330	-0.1670	680.0544	0.0544	680.1053	0.1053
169-161	679.7355	-0.2645	679.9101	-0.0899	680.0164	0.0164	680.1439	0.1439
170-178	679.7259	-0.2741	679.7601	-0.2399	679.8932	-0.1068	680.0466	0.0466
Average mean value of deviation /mm		-0.2443		-0.1916		-0.0341		0.0794

通过对比各种方法的测量结果,可得出采用平面标定内部参数编码点的误差平均值为-0.2443,立体校准后的误差平均值为-0.1916,采用虚拟立体校准后的误差平均值为-0.0341,采用初始测量网后的误差平均值为0.0794。同时基于构造43个测量基站的初始测量网络的解算时间为300s,明显小于虚拟立体校准所用时间800s。由测量误差曲线可以看出,如图5所示,上面两条分别为平面校准

和立体校准后的测量误差分布曲线,误差相对比较。下面两条分别为虚拟立体校准和构造初始测量网络校准的测量误差分布,明显看出两者误差分布接近,且精度满足大空间视觉测量要求。所以,构造初始测量网络的内部参数校准方法可以在大空间视觉测量条件下用来现场内部参数校准,为后续精确空间测量奠定基础。

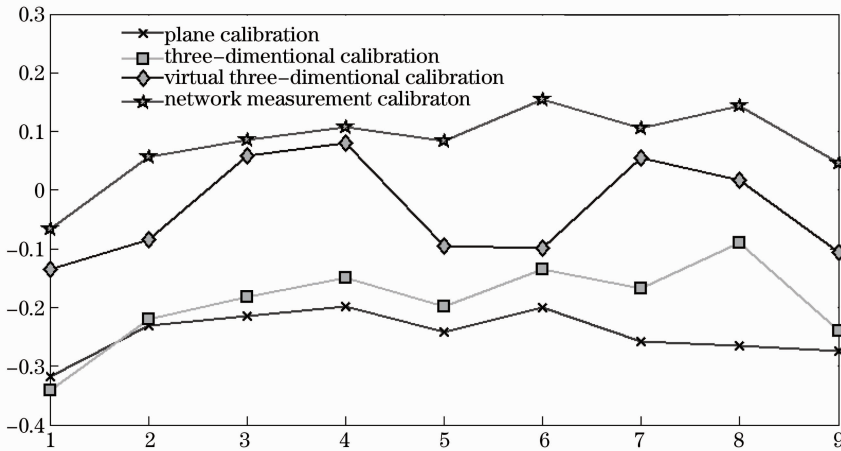


图 5 误差分布曲线
Fig. 5 Error distribution curves

7 结 论

提出了基于构建初始测量网络的相机内部参数现场校准方法,并进行了大量实验。实验结果表明,基于构建初始测量网络的相机内部参数校准方法充分利用了靶标板编码点信息,同时克服了平面靶标

深度方向的不足以及三维靶标空间的限制,解决了当前相机自校准效率低等问题,可实现相机内部参数现场快速、高效和精确校准。此外也可在测量网络的构建上加以改进,比如采取多块靶标板摆放,并使其在空间增加深度信息;或者通过分别构建局部

测量和全局网络相结合的方法来进行内部参数校准,以此提高校准精度。

参 考 文 献

- 1 F. Blais. Review of 20 years of range sensor development [J]. *J. Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 231~243
- 2 F. Blais. Review of 20 years of range sensor development [C]. *SPIE*, 2003, **5013**: 62~76
- 3 R. Garcia, J. Battle, J. Salvi. A new approach to pose detection using a trinocular stereovision system [J]. *Real-Time Imaging*, 2002, **8**(2): 73~93
- 4 H. Y. Lin, M. Subbarao. Vision system for fast 3D model reconstruction [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(7): 1651~1664
- 5 Qiu Maolin, Ma Songde, Li Yi. Overview of camera calibration for computer vision [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1): 43~55
- 6 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中相机标定综述[J]. *自动化学报*, 2000, **26**(1): 43~55
- 7 Zhang Guangjun. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005
- 8 张广军. *机器视觉* [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 9 Tang Yangshan, Li Jiang, Bai Yan *et al.*. Extended-two-step camera calibrated method of traffic accident scene measurement [J]. *Traffic and Transportation Engineering*, 2007, **7**(1): 81~85
- 10 唐阳山, 李江, 白艳等. 交通事故摄影测量中相机标定的扩展两步法 [J]. *交通运输工程学报*, 2007, **7**(1): 81~85
- 11 Ge Baozhen, Li Xiaojie, Qiu Shi. Camera lens distortion correction based on coplanar point direct linear transformation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 488~494
- 12 葛宝臻, 李晓洁, 邱实. 基于共面点直接线性变换的相机畸变校正 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 488~494
- 13 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1308~1314
- 14 姜光文, 晁志超, 伏思华等. 基于可控旋转的相机高精度标定技术 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1308~1314
- 15 Mao Jianfei, Chen Lihong, Liu Xiaofeng. A novel self-calibration method for robotic vision system [J]. *J. Zhejiang University (Engineering Science)*, 2003, **37**(3): 283~288
- 16 毛剑飞, 陈利红, 刘晓峰. 机器人视觉系统的自标定新算法 [J]. *浙江大学学报(自然科学版)*, 2003, **37**(3): 283~288
- 17 Li Xi, Zheng Nanning, Cheng Hong. Camera linear self-calibration method based on Kruppa equation [J]. *J. Xi'an Jiaotong University*, 2003, **37**(8): 820~823
- 18 李析, 郑南宁, 程洪. 一种基于 Kruppa 方程的摄像机线性自标定方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2003, **37**(8): 820~823
- 19 Pei Mingtao, Yu Lianqing, Liu Peng. Camera self-calibration in computer vision with precise estimation of initial parameters [J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 2004, **13**(2): 152~156
- 20 Zhang Zhengyu, Huang Shijie, Luo Chuan *et al.*. Nonlinear distortion correction of camera based on coplaner condition equations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0115002
- 21 张征宇, 黄诗捷, 罗川等. 基于共面条件的摄像机非线性畸变自校正 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0115002
- 22 Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang *et al.*. Research on measurement method of image motion of space camera based on optical correlator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712006
- 23 樊超, 李英才, 傅洪亮等. 光学相关法测量空间相机像移的性能研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0712006
- 24 Li Xinxin. The Research of Calibration Algorithm for Camera Internal Parameters of 3D Coordinates Measurement in Large Space [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2009
- 25 李欣欣. 大空间视觉三维坐标测量中的相机内部参数数校准算法研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2009
- 26 Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenghua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1872~1880
- 27 郝继贵, 郭磊, 叶声华. 现场条件下大空间三维精密定位原理与方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1872~1880
- 28 M. Galetto, L. Mastrogiacomo, B. Pralio. An innovative indoor coordinate measuring system for large-scale metrology based on a distributed IR sensor network [C]. West Lafayette: Proceedings of the ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2009. 453~461
- 29 D. Devarajan, Z. L. Cheng, R. J. Radke. Calibrating distributed camera networks: individual cameras estimate the position, orientation and focal length of neighboring cameras, and a distributed system-wide algorithm refines these estimates to produce accurate calibration [J]. *Proc. IEEE*, 2008, **96**(10): 1625~1639
- 30 G. Kurillo, Z. Y. Li, R. Bajcsy. Framework for hierarchical calibration of multi-camera systems for teleimmersion [C]. Brussels: Proceedings of the 2nd International Conference on Immersive Telecommunications, 2009. 1
- 31 A. Mavrinac, X. Chen, K. Tepe. An automatic calibration method for stereo-based 3D distributed smart camera networks [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2010, **114**(8): 952~962

栏目编辑: 何卓铭