

基于非参数测量模型的摄影测量方法研究

隆昌宇¹ 郝继贵¹ 郭寅^{2*} 林嘉睿¹ 叶声华¹

(¹ 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)
² 清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要 由于近景摄影测量具有测量范围广、精度高和效率高等优点,其在大尺寸精密测量任务中承担越来越重要的角色。其中,基于平差优化的自标定测量模型是保证该方法实现高精度测量的重要原因。然而,随着越来越多的商业级单反相机应用到三维空间测量,发现其测量精度与专业相机相比有一定差距。经过大量分析发现,除了相机本身原因外,自标定模型过多地依赖相机内部参数,尤其是畸变参数,是导致测量精度降低的重要原因。为了降低参数化模型对测量结果的影响,提出一种不依赖相机内部参数的摄影测量方法。结合垂线法和 Zeiss 实验室标定方法,设计了一种针对大视场相机的非参数标定方法。经过不同图像间同名点匹配和平差初值确定后,便可建立基于角度信息的非参数测量模型。结合平差优化算法,完成对空间被测点三维坐标的精确解算。经过与传统摄影测量结果比对,证明该方法可以有效提高大视场单反相机的摄影测量精度。

关键词 测量;摄影测量;非参数模型;共线方程;平差算法

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1215004

Study on Close-Range Photogrammetry Based on Nonparametric Measurement Model

Long Changyu¹ Zhu Jigui¹ Guo Yin² Lin Jiarui¹ Ye Shenghua¹

¹ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Because of the advantage of wide measurement range, high measurement accuracy and high efficiency, the close-range photogrammetry plays more and more important role in large-size accurate measurement tasks. The self-calibration measurement model optimized via bundle adjustment is considered to be the most reliable technique to high-accuracy close-range photogrammetry. As more and more off-the-shelf single lens reflex (SLR) cameras are adopted to three-dimensional measurement applications, the measurement results are not ideal compared with that of professional cameras. After being analyzed carefully, the self-calibration parameterized model has some limitations to the improvement of measurement accuracy in addition to the issues inherent in the qualities of cameras. In order to solve the problem, the close-range photogrammetry without relying on camera internal parameters is studied. The nonparametric calibration method is proposed, which is suitable to the calibration of large-field cameras. The nonparametric measurement model based on orientation information is established after the image points is matched and the initial value are determined. The three-dimensional coordinates of target points can be solved accurately via the optimization of bundle adjustment. Compared with measurement results of traditional photogrammetry, it is proved that our method is effective to improve the three-dimensional measurement accuracy with large-field SLR cameras.

Key words measurement; photogrammetry; nonparametric model; collinear equation; bundle adjustment

OCIS codes 150.0155; 150.4232; 110.5200; 150.1135

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-07-08

基金项目: 国家 863 计划(2012AA041205)、国家自然科学基金(51305297)

作者简介: 隆昌宇(1988—),男,博士研究生,主要从事移动视觉测量方面的研究。E-mail: cylong@tju.edu.cn

导师简介: 郝继贵(1970—),男,博士,教授,主要从事大尺寸精密测量方面的研究。E-mail: jigui@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: guoyin@tsinghua.edu.cn

1 引 言

随着数字成像技术及器件的快速发展,近景摄影测量以其大视场、高精度、高自动化、高效率等特点被越来越多地应用到大尺寸物体形貌精密测量中。在该测量方法中,相机校准精度直接影响最终测量精度,因此相机标定是摄影测量的一个重要环节。由于摄影测量所用相机需要配备广角镜头,因此像面畸变会比较严重。再加上摄影测量对测量精度的高要求,传统视觉标定方法已无法应用于摄影测量中^[1-2]。

经过多年的研究,基于平差算法的自标定方法以其高精度、高自动化等优点,被认为是最适合高精度近景摄影测量的标定方法并得到了广泛的应用。对于用于摄影测量的专业相机,比如 V-star 测量系统的 INCA3a 相机,经过标定后可以达到 1" 的分辨率,像面残差的均方根分布在 0.025~0.05 pixel 范围内。然而,随着越来越多的商业级单反相机应用到摄影测量中,其测量精度与专业相机比会有较大的差距。经研究发现,除了受相机本身制造精度相对低的影响外,相机自标定模型存在的局限性也是重要的影响因素。比如像面的不平整会导致相机焦距无法精确标定;自标定的畸变参数间存在很高的相关性大大降低了标定结果和测量结果的稳定性;畸变校准模型只是对镜头畸变的逼近和仿真,不能准确校正镜头畸变,从而导致测量精度受到影响等^[3]。

基于上述原因,大视场商业级单反相机的精密标定问题成为一个研究重点。针对该问题,国外研究出了垂线标定法和 Zeiss 实验室标定法等非在线相机标定方法^[4-5]。但是它们都没摆脱对相机畸变参数模型的依赖,校准精度依然受到了限制。为了解决该问题,本文提出了一种不基于参数模型的相

机标定方法和摄影测量方法,详细介绍了该标定方法的原理及实现方法,并研究了基于非参数测量模型的摄影测量方法。经过与传统摄影测量方法的结果比对,验证了该方法可以有效提高商业级单反相机的摄影测量精度。

2 非参数标定方法

为了避免摄影测量模型对相机内部参数的过度依赖而影响测量精度,借助垂线法和 Zeiss 实验室标定方法的思路,提出了一种不基于参数模型的相机标定方法。该方法通过外部精密测角装置的辅助,可以直接建立空间入射光线的方位信息(水平角和垂直角)与实际图像点间对应关系。从而使相机变成一个精密测角装置,摆脱内部参数标定误差对测量精度的影响。

2.1 非参数测量模型

传统的摄影测量模型是基于共线方程建立起来的。在每个站位中,相机测量模型满足小孔成像原理,即空间中的被测点 P 、对应的成像点 p 和相机主点 O_c 共线,如图 1 所示^[6]。参数化的共线方程如(1)式所示:

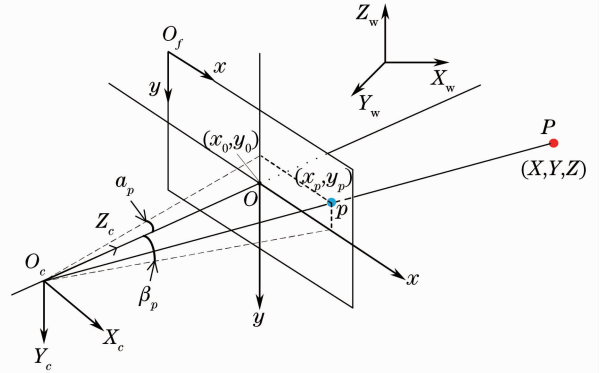


图 1 相机测量模型

Fig. 1 Camera measurement model

$$\begin{cases} x_p = x_0 - \Delta x_p - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y_p = y_0 - \Delta y_p - f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix},$$

$$\begin{cases} \Delta x_p = \bar{x}_p r_p^2 k_1 + \bar{x}_p r_p^4 k_2 + \bar{x}_p r_p^6 k_3 + (2\bar{x}_p^2 + r_p^2) P_1 + 2P_2 \bar{x}_p \bar{y}_p + b_1 \bar{x}_p + b_2 \bar{y}_p \\ \Delta y_p = \bar{y}_p r_p^2 k_1 + \bar{y}_p r_p^4 k_2 + \bar{y}_p r_p^6 k_3 + 2P_1 \bar{x}_p \bar{y}_p + (2\bar{y}_p^2 + r_p^2) P_2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中图像点坐标 (x_p, y_p) 是唯一的已知信息。实际应用中,由于镜头畸变的存在,图像点坐标需要借助参数化畸变模型 $(\Delta x_p, \Delta y_p)$ 进行校正,以精确逼近

理想模型^[7]。然而相机本身制造存在的问题,使得相机内部参数无法精确描述相机模型。同时,相机内部参数间也存在很大的相关性等问题,使得相机

校准结果存在较大误差及不稳定性,从而影响到测量精度。

为了摆脱对相机内部参数的依赖,共线方程还可以借助入射光线方位信息(图 1 中的水平角 α_p 和垂直角 β_p)确定,如(2)式所示。多个站位中所有图像点结合(2)式组成的大型共线方程组称为非参数测量模型。

$$\begin{cases} \tan \alpha_p = \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \tan \beta_p = \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 非参数标定模型及实现方法

为了能够不依赖相机内部参数便可精确确定入射光线的方位角度,设计了一种相机非参数标定方法。该方法融合了垂线法和 Zeiss 实验室标定方法的思路,利用空间直线作为标定目标,同时通过精密转台带动相机旋转并拍照来确定入射光线方位信息。经过标定便可建立图像点坐标和入射光线方位信息之间对应关系,从而精确确定每个图像点对应入射光线的方位角度(α_p, β_p)。

设计的非参数标定模型如图 2 所示,包括空间直线目标、激光准直器、六维微调装置和精密细分转台。

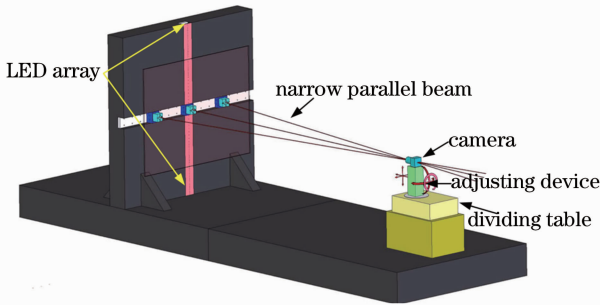


图 2 非参数标定模型

Fig. 2 Nonparametric calibration model

由于线边缘的图像提取精度较低,会影响图像直线拟合精度。而图像点有很高的提取精度并且红外 LED 有很高的发光稳定性,将近红外 LED 点阵调成共线作为空间直线目标^[8]。具体的标定方法如下:

1) 借助精密直线导轨,将近红外 LED 点阵调成共线,调节过程如图 3 所示。经过激光干涉仪测量,该导轨的直线度在 0.02 mm 以内。参考延直线导轨运动的 LED,依次调节每个 LED 与其有相同的间距,便可将 LED 点阵调成共线。

2) 如图 4 所示,借助千分尺、六维(6D)微调装置,通过旋转精密细分转台将物理轴与转台轴调至

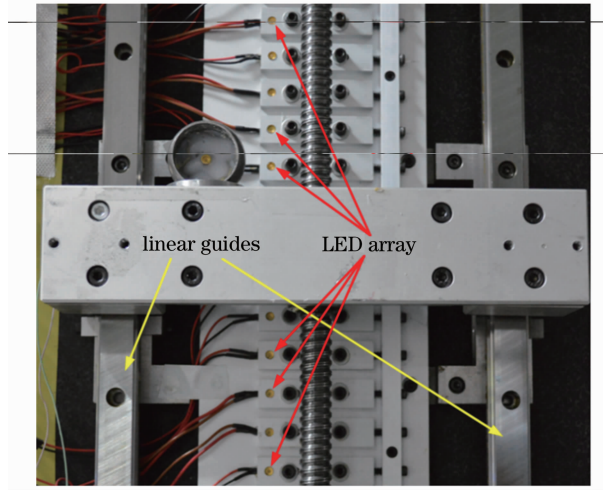


图 3 LED 点阵调整方法

Fig. 3 LED array adjusting method

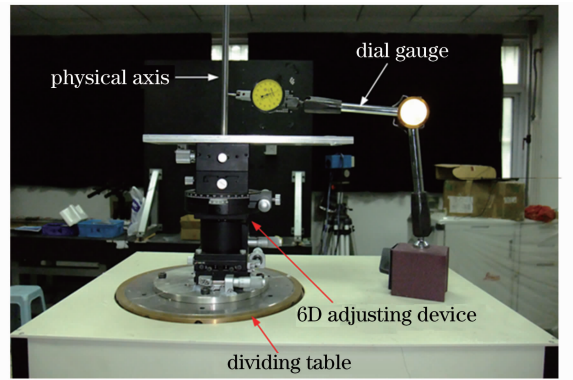


图 4 转台旋转轴确定方法

Fig. 4 Axis determination of dividing table

重合。

3) 调节图 2 中的三个激光准直器,将三条平行激光束调至相交于物理轴上一点。将相机取代物理轴放到六维微调装置上,通过调节六维微调装置和观察成像图像,使相机主点与激光束的交点重合。这时相机主点便落到精密细分转台旋转轴上。

4) 精密细分转台带动相机在视场范围内按同一方向以一定角度间隔旋转。每旋转一次,相机对空间直线目标拍照并记录当前精密细分转台的角度值。模型所用精密细分转台的最小旋转角为 1",全程精度为 $\pm 0.6''$ 。

由于空间目标的方位信息是由水平角和垂直角共同确定的,相机在水平方向完成标定后,需旋转 90°再对垂直方向进行标定。由于图像畸变的存在,空间直线在图像中会被投影成一条曲线。经过上述标定,便可建立起在相机视场范围内任意方向入射直线的方位信息与其对应成像线间的对应关系,从而形成了一个由大量角度—图像线组成的数据表,

如图 5 所示。

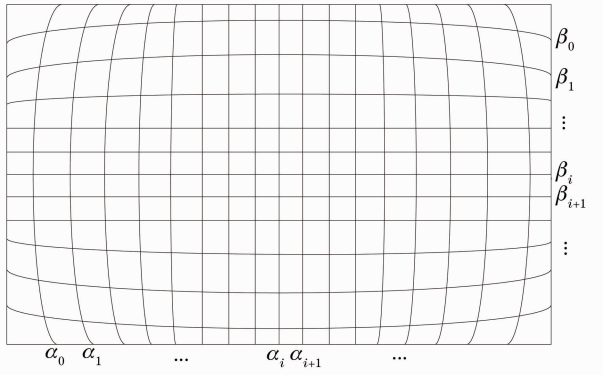


图 5 非参数校准结果

Fig. 5 Nonparametric calibration result

2.3 图像点方位角确定方法

相机标定时精密细分转台以一定角度间隔转动,因此标定获得的数据表不可能覆盖整个像面,而是把像面分割成一个个的小方块。当相机对空间目标点进行成像时,其对应的图像点必然落在两条相邻水平线和垂直线之间,如图 6 所示。

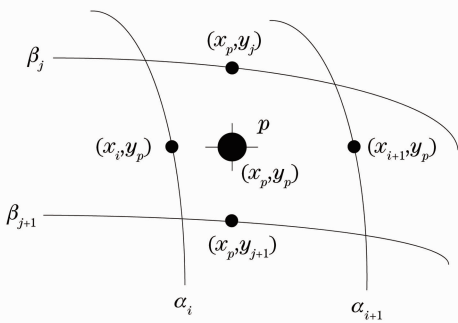


图 6 图像点方位角确定方法

Fig. 6 Direction angle determination of image point

设图像点 p 的图像坐标为 (x_p, y_p) 。通过在数据表里搜索便可确定其相邻水平线和垂直线对应的角度值,分别为 $\alpha_i, \alpha_{i+1}, \beta_j, \beta_{j+1}$ 。通过线性插值的方法便可确定图像点 p 对应空间点的入射方位角 (α_p, β_p) ：

$$\begin{cases} \alpha_p = (\alpha_{i+1} - \alpha_i) \times \frac{x_p - x_i}{x_{i+1} - x_i} \\ \beta_p = (\beta_{j+1} - \beta_j) \times \frac{y_p - y_j}{y_{j+1} - y_j} \end{cases} \quad (3)$$

标定时角度间隔越小,方位角定位精度越高。实际应用中,可以根据测量精度的要求来确定角度间隔的大小。

3 非参数摄影测量方法

相机经过标定后,便可在不同站位对被测物进

行测量,如图 7 所示。利用被测点的成像特征定位信息,根据摄影测量中的共线方程,便可建立不同站位间同名点对应光束的交会约束关系。经由平差算法优化实现被测点三维坐标的精确计算^[9]。

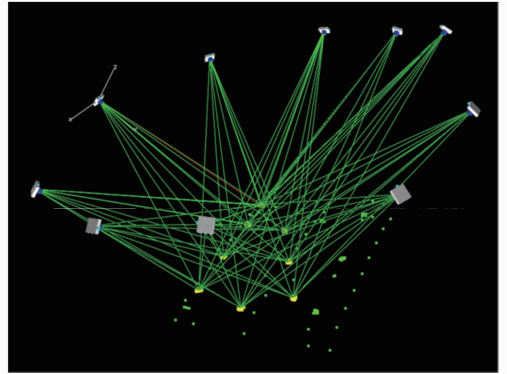


图 7 摄影测量模型

Fig. 7 Photogrammetry model

为了能够正确建立所有图像点的大规模共线方程组,同名点在不同图像间的对应关系需要事先确定,即图像点匹配过程。另外,平差优化算法需要所有未知数的初值,而且初值的准确度直接决定算法结果的收敛性和正确性,因此初值的获取也是实现摄影测量的重要环节。由于所用非参数测量模型的已知信息是目标点入射光线的方位信息,而不是传统模型中的图像点坐标,因此图像点匹配方法和平差初值获取方法与传统方法会有一定差异。

3.1 图像点匹配方法

摄影测量中图像点匹配结果直接决定着大型共线方程组能否正确建立,是完成测量的重要基础。经过多年研究,极线匹配方法被认为是实现不同图像间图像点匹配最有效的方法。该方法中最重要的任务是求取两图像间的基本矩阵来恢复极几何模型,再利用点到极线最近的原则确定匹配点,如图 8

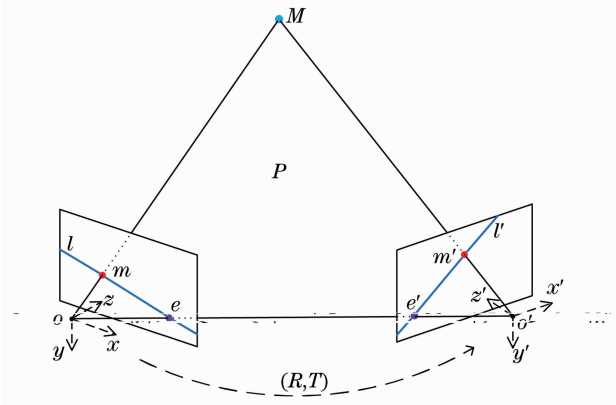


图 8 极几何模型

Fig. 8 Epipolar geometry model

所示^[10]。

假设这两个站位间基本矩阵为 F, m 和 m' 点的图像坐标分别是 $(x_m, y_m, 1)^T$ 和 $(x'_m, y'_m, 1)^T$, 则极几何模型满足(4)式:

$$(x'_m, y'_m, 1)F(x_m, y_m, 1)^T = 0, \quad (4)$$

由于基本矩阵是定义在一定比例因子之上的, 因此(4)式中 m 和 m' 的图像坐标都除以焦距 f 后同样成立。经处理, m 和 m' 点的图像坐标就变成角度信息 $(\alpha_m, \beta_m, 1)^T$ 和 $(\alpha'_m, \beta'_m, 1)^T$, 因此角度信息也适用于极几何模型。并可来计算基本矩阵。

借鉴传统的 L-M 迭代匹配算法, 利用图像间公共编码点来对基本矩阵进行求解。其中, 迭代初值是通过八点线性匹配算法确定的^[11]。两两图像间完成基本匹配后, 再利用三张量方法来检测并剔除两图像间的误匹配点, 从而保证较高的正确匹配

率^[12]。同名点匹配完成后, 结合(2)式便可以建立大型非参数共线方程组。

3.2 平差初值确定方法

由于大型共线方程组是利用平差算法进行优化的, 因此需要事先确定所有未知数的初值。非参数测量模型中所有未知数分为两类: 每个站位的外部方位参数和所有空间点的三维坐标。由双目视觉测量原理知, 两站位间相对方位关系确定后同名点的空间三维坐标即可确定^[13]。因此获取每个站位的外部方位参数是求解平差初值的重点。

利用两个相机进行交会测量时, 如果已知两站位间相对方位关系为 (R, T) , 空间点 P 在两个相机中的方位角分别是 (α_p, β_p) 、 (α'_p, β'_p) , 那么 P 点的空间三维坐标为

$$\begin{aligned} X &= Z \cdot \tan \alpha_p, \\ Y &= Z \cdot \tan \beta_p, \\ Z &= \frac{t_1 - \tan \alpha'_p \cdot t_3}{\tan \alpha'_p \cdot (r_{31} \cdot \tan \alpha_p + r_{32} \cdot \tan \beta_p + r_{33}) - (r_{11} \cdot \tan \alpha_p + r_{12} \cdot \tan \beta_p + r_{13})} = \\ &= \frac{t_2 - \tan \beta'_p \cdot t_3}{\tan \beta'_p \cdot (r_{31} \cdot \tan \alpha_p + r_{32} \cdot \tan \beta_p + r_{33}) - (r_{21} \cdot \tan \alpha_p + r_{22} \cdot \tan \beta_p + r_{23})}. \end{aligned} \quad (5)$$

在获取站位的外部方位参数时, 传统的摄影测量常常利用外部方位装置来对站位进行绝对定位。在对大尺寸物体进行测量时, 受相机视场范围和遮挡的影响^[14], 不能保证每个站位都能覆盖外部方位

装置。否则会增加拍摄过程的约束性或者后续处理过程的复杂性。

为了解决该问题, 研究了绝对定位和相对方位结合的方法来同时确定所有站位的外部方位参数, 如图 9 所示。利用绝对定位方法确定所有能覆盖外部方位装置站位的外部方位参数, 如图中的 (R_{C1W}, T_{C1W}) 。借助公共的编码点建立两站位间的相对位置关系, 如图中的 (R_{CjCj}, T_{CjCj}) 。利用上述建立的转换关系链将所有的站位坐标系统一到外部方位装置坐标系下^[15]。

3.2.1 绝对方位定向方法

绝对方位定向方法是利用外部方位装置上多个

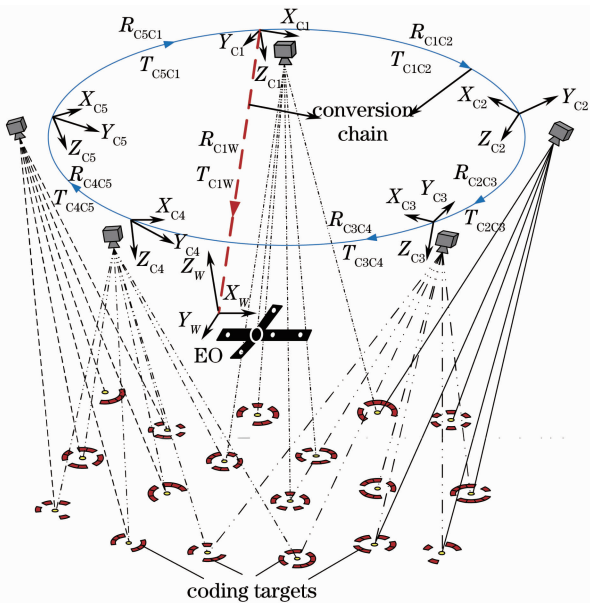


图 9 外方位参数确定方法

Fig. 9 Determination of external orientation parameters

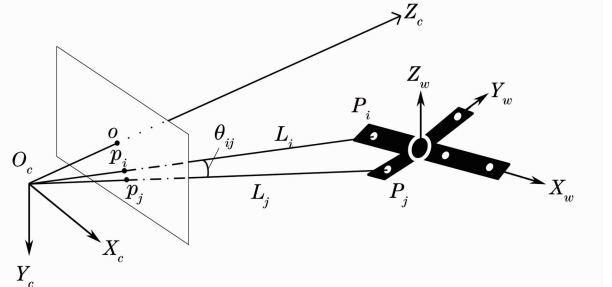


图 10 绝对方位确定方法

Fig. 10 Determination of absolute orientation parameters

相互之间空间坐标(或距离)已知的特征点,来确定相机坐标系相对于外部方位装置坐标系的关系,如图10所示。

设 P_i 、 P_j 是外部方位装置上任意两点, O_iP_i 、 O_iP_j 的长度分别为 L_i 、 L_j 。相机经过标定后, O_iP_i 、

O_iP_j 的方位角 (α_i, β_i) 、 (α_j, β_j) 可以通过对应图像点 p_i 、 p_j 确定。另外, P_i 、 P_j 两点之间的距离 D_{ij} 为已知量,那么由余弦定理知

$$D_{ij}^2 = L_i^2 - 2L_iL_j \cos \theta_{ij} + L_j^2, \quad (6)$$

式中

$$\cos \theta_{ij} = \frac{1 + \tan \alpha_i \tan \alpha_j + \tan \beta_i \tan \beta_j}{\sqrt{1 + (\tan \alpha_i)^2 + (\tan \alpha_j)^2} \sqrt{1 + (\tan \beta_i)^2 + (\tan \beta_j)^2}}. \quad (7)$$

如果外部方位装置上有 n 个特征点,那么可以构建 $n(n-1)/2$ 维的余弦方程组,其中未知数是 n 个长度量 L_i 。方程组可以求解的前提是 n 大于3,所以只要外部方位装置上有三个以上的点即可确定这些点在相机坐标系下的三维坐标,从而获取相机坐标系对外部方位装置坐标系的关系^[16]。

3.2.2 相对方位定向方法

当两个站位图像存在公共目标点并已知对应图像点的图像坐标时,由(5)式得到如下关系:

$$(t_1 - \tan \alpha'_p \cdot t_3)(r_{21} \cdot \tan \alpha_p + r_{22} \cdot \tan \beta_p + r_{23}) - (t_2 - \tan \beta'_p \cdot t_3)(r_{11} \cdot \tan \alpha_p + r_{12} \cdot \tan \beta_p + r_{13}) = (\tan \beta'_p \cdot t_1 - \tan \alpha'_p \cdot t_2)(r_{31} \cdot \tan \alpha_p + r_{32} \cdot \tan \beta_p + r_{33}), \quad (8)$$

式中的未知数为两站位间的相对位置关系 (\mathbf{R}, \mathbf{T}) , 共12个未知数($r_{11} \sim r_{33}$ 和 $t_1 \sim t_3$)。由于旋转矩阵 \mathbf{R} 本身具有正交性,故所有未知数的自由度是6。因此,利用6个或更多的公共编码点组成的方程组即可确定相对位置关系^[17]。

由于传统摄影测量方法的相机标定是与平差运算同时进行的,因此求取平差初值时所用的图像点坐标有较大的畸变误差,从而导致初值求解精度较低。特别是在利用畸变较大的非专业相机进行测量

时,该现象尤为明显,经常有平差迭代过程有不收敛的情况出现。而本方法中相机是事先经过标定的,平差初值有较高的求解精度,可以提高后续平差优化过程的运算效率和成功率。

3.3 平差算法

设所有站位中图像点总数为 J , 经过同名点匹配后便可构建维数为 $2J$ 的大型共线方程组。为了进行平差优化,要将方程组线性化:

$$\begin{cases} \tan \alpha_p \approx \mathbf{A}_{x1} \delta_1 + \mathbf{A}_{x2} \delta_2 + \omega_x = \tan \alpha'_p \\ \tan \beta_p \approx \mathbf{A}_{y1} \delta_1 + \mathbf{A}_{y2} \delta_2 + \omega_y = \tan \beta'_p \end{cases}, \quad (p = 1, 2, \dots, J), \quad (9)$$

式中 δ_1 、 δ_2 分别代表站位外部方位参数和被测点的三维坐标的变化量。 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 分别代表了两类变量的偏导数系数矩阵。 (α'_p, β'_p) 为共线方程(2)式线性化后通过未知变量计算得到的估计值。平差算法目标就是通过调整所有未知数使得

$$\min[\phi(\alpha'_p, \beta'_p)] = \|\tan \alpha_p - \tan \alpha'_p\|^2 + \|\tan \beta_p - \tan \beta'_p\|^2, \quad (p = 1, 2, \dots, J). \quad (10)$$

结合(9)式可以得到

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \tan \alpha_1 - \tan \alpha'_1 \\ \tan \beta_1 - \tan \beta'_1 \\ \vdots \\ \tan \alpha_J - \tan \alpha'_J \\ \tan \beta_J - \tan \beta'_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan \alpha_1 - \omega_x^1 - (\mathbf{A}_{x1}^1 \delta_1 + \mathbf{A}_{x2}^1 \delta_2) \\ \tan \beta_1 - \omega_y^1 - (\mathbf{A}_{y1}^1 \delta_1 + \mathbf{A}_{y2}^1 \delta_2) \\ \vdots \\ \tan \alpha_J - \omega_x^J - (\mathbf{A}_{x1}^J \delta_1 + \mathbf{A}_{x2}^J \delta_2) \\ \tan \beta_J - \omega_y^J - (\mathbf{A}_{y1}^J \delta_1 + \mathbf{A}_{y2}^J \delta_2) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} - \mathbf{A} \hat{\boldsymbol{\delta}}. \quad (11)$$

那么目标函数(10)式的最小二乘解为

$$\hat{\boldsymbol{\delta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}. \quad (12)$$

为了避免正规矩阵 $(\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A})$ 非正定和迭代初值不合理导致迭代过程不收敛,采用 Levenberg-

Marquardt (L-M) 优化算法进行迭代^[18]。在 Netown 迭代算法的基础上, L-M 算法对正规矩阵进行修正,构成修正的正规矩阵 $(\mathbf{N}' = \mathbf{N} + \lambda \mathbf{I})$ 。当 \mathbf{N} 奇异或非正定时,通过调节 λ , 使 \mathbf{N}' 满秩且正定,

那么最小二乘求解公式为

$$\hat{\delta} = (A^T A + \lambda I)^{-1} A^T Q. \quad (13)$$

平差求解方法如下：

1) 结合 3.2 节方法确定未知参数的初始值 $\delta^0 = (\omega^0, \varphi^0, \kappa^0, X^0, Y^0, Z^0)$, 置残余误差和 $s_0 = 0$, 给定 λ 值, 一般设 $\lambda = 0.001$, 设定增长因子 $u > 1$ (通常取 10)。

2) 根据求解参数的当前估计值 δ^k 及对应特征像点的角度信息, 构成正规方程(13) 式。

3) 对正规方程求解, 得到校正向量 $\Delta\delta = (\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$ 。

4) 如果(10) 式中 $\Phi(\delta^k + \Delta\delta) \geq \Phi(\delta^k), \lambda = \lambda u$ 并返回到步骤 2) 重新计算。

5) 如果 $\Phi(\delta^k + \Delta\delta) < \Phi(\delta^k), \lambda = \lambda/u$, 对求解参数进行校正 $\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta\delta$ 。

6) 计算 $s_0 = \Phi(\delta^{k+1})$, 如果 s_0 或 $\Delta\delta$ 小于设定的收敛极限, 输出估计值, 否则返回到步骤 2) 进行下一次迭代。

经过上述优化, 便可精确计算空间点的三维坐标, 从而实现被测物的精密测量。

4 实 验

用相机 Leica Monochrom 进行摄影测量。该相机分辨率为 $5212 \text{ pixel} \times 3468 \text{ pixel}$, 像元大小为 $6.8 \mu\text{m}$, 并配备 Leica 21mm 镜头, 测量系统如图 11 所示。

按照 2.2 节方法对相机进行了非参数标定, 标定时精密细分转台的角度间隔是 $40''$, 如图 12 所示。

由于空间点的方位信息是测量模型中唯一已知信息, 其获取精度直接决定最终测量精度, 因此需要



图 11 摄影测量系统配置

Fig. 11 Configuration of our measurement system

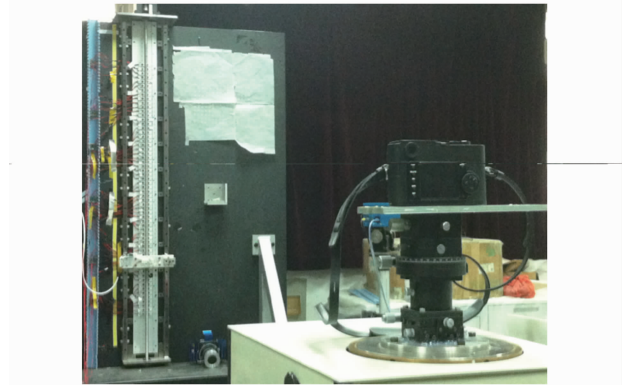


图 12 相机标定平台

Fig. 12 Camera calibration platform

验证标定后的相机对空间点方位信息的测量精度。为了能精确验证相机的测角精度, 把相机固定到分辨率为 $0.36''$ 的转台上进行实验。在水平方向视场范围内, 利用精密细分转台带动相机按同一方向旋转 1° 并拍照, 将通过 2.3 节方法确定的图像点方位信息与精密细分转台的角度值进行比对。由像面水平方向尺寸和镜头焦距可知, 水平方向的视场角为 80.9° , 那么视场范围内按同一方向旋转拍摄可以测出 80 组数据, 结果如图 13 所示。

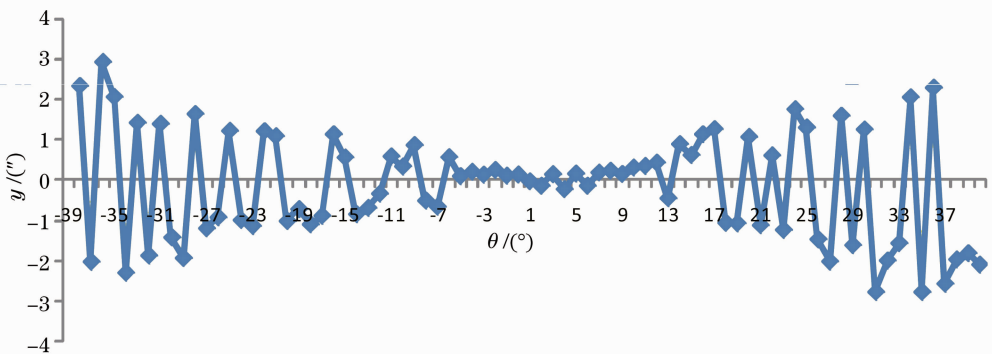


图 13 相机测角误差分布

Fig. 13 Error distribution of camera angle measurement result

通过图 13 可以看出,经过校准后的相机测角精度可以控制在 $\pm 3''$ 以内。经统计,80 组比对结果取绝对值后的平均值是 $1.13''$,标准差为 $0.78''$ 。比对结果证明,提出的相机标定方法可以保证大视场相机有较高的测角精度。

另外可以发现,测角误差会随着入射光线偏离光学中心而整体趋势变大,这是因为图像边缘处畸变较大而且误差的非线性更加严重。针对测量精度

要求高的情况,可以通过减小图像边缘处的标定间隔角来提高测角精度。

为了验证该方法摄影测量精度,分别对汽车发动机前盖和大型三维标定架进行了测量。测量站位均匀分布在被测物前方,站位数分别是 16 和 28。被测物尺寸分别大概为 $1.2\text{ m} \times 1\text{ m}$ 和 $3.5\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ m}$,如图 14 所示。



(a)



(b)

图 14 被测物。(a)汽车发动机前盖;(b)三维标定架

Fig. 14 Measurement objects. (a) Car engine cover; (b) spatial calibration frame

利用相同的测量图片分别采用自标定测量模型和非参数测量模型进行平差结算,得到两组被测点的空间三维坐标。任意选择被测物上两点间的距离

与 V-star 测量结果进行比对。汽车前盖和三维标定架分别选择了 40 组数据和 50 组数据,比对结果如图 15 所示。

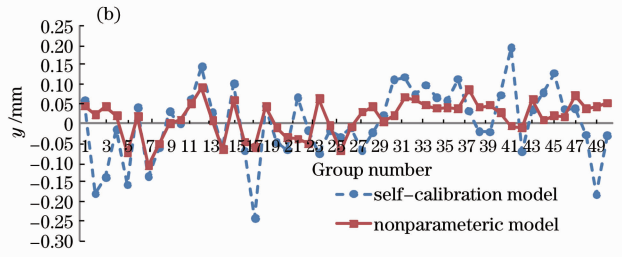
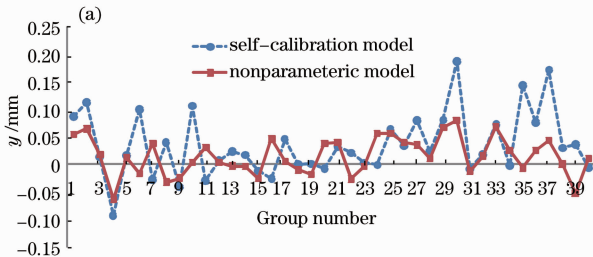


图 15 两被测物测量误差分布。(a)汽车发动机前盖;(b)三维标定架

Fig. 15 Measurement error of two measurement objects. (a) Car engine cover; (b) spatial calibration frame

通过比对可以清晰地发现,该方法的测量精度明显优于传统摄影测量方法,测量误差基本控制在 $\pm 0.1\text{ mm}$ 以内。另外,传统摄影测量结果的稳定性也相对较差,两个被测物的测量结果都有误差较大的情况出现。经过统计两种测量模型测长误差的绝对值,汽车前盖的平均值分别为 0.0475 mm 和 0.0296 mm ,标准差分别为 0.0473 mm 和 0.0220 mm ;三维标定架的平均值分别为 0.0726 mm 和 0.0398 mm ,标准差分别为 0.0539 mm 和 0.0251 mm 。经实验证明,本文提出的摄影测量方法可以有效地提高测量精度,特别是对于商业级单反相机有更明显的提高。

5 结 论

为了摆脱传统自标定模型中相机内部参数存在的局限性对摄影测量精度的影响,特别是针对非专业相机摄影测量精度不够理想的问题,提出一种基于非参数模型的摄影测量方法并详细描述了原理和实现方法:

- 1) 对相机进行非参数标定,建立图像点和入射光线方位信息间的对应关系。
- 2) 结合不同图像间同名点的匹配,建立非参数摄影测量模型。
- 3) 获取平差初值并对测量模型进行平差优化,完成被测物三维空间坐标精密测量。

通过实验证明,该方法可以实现高精度的相机校准,并且有效提高了非专业单反相机的摄影测量精度。

参 考 文 献

- 1 T Luhmann. Close range photogrammetry for industrial applications [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(6): 558–569.
- 2 F Remondino, C Fraser. Digital camera calibration methods, considerations and comparisons [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2006, 36: 266–272.
- 3 C S Fraser. Automatic camera calibration in close range photogrammetry [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2013, 79(4): 381–388.
- 4 F Devernay, O Faugeras. Straight lines have to be straight [J]. *Machine Vision and Applications*, 2001, 13(1): 14–24.
- 5 W Zeitler, C Doerstel, K Jacobsen. Geometric calibration of the DMC: Method and Results [J]. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, 34: 324–332.
- 6 Wang Zichen, Dai Ming, Li Gang, *et al.*. Apparatus design for surveying relative angular translation of airborne optoelectronic platform [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0908007.
王子辰, 戴明, 李刚, 等. 机载光电平台相对角位移测量系统设计[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0908007.
- 7 C Y Long, J G Zhu. Study on global control network precision positioning method in visual shape measurement [J]. *SPIE*, 2013, 8908: 89081I.
- 8 Zhu Jigui, Zou Jian, Lin Jiarui, *et al.*. Error-compensation algorithm with high-accuracy for photographic image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0912004.
郝继贵, 邹剑, 林嘉睿, 等. 摄影测量图像处理的高精度误差补偿法[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0912004.
- 9 Zhu Jigui, Yu Zhijing. *The Principle of Vision Metrology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
郝继贵, 于之靖. *视觉测量原理与方法* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- 10 X Armangué, J Salvi. Overall view regarding fundamental matrix estimation [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(2): 205–220.
- 11 P Chen. Why not use the Levenberg-Marquardt method for fundamental matrix estimation? [J]. *IET Computer Vision*, 2010, 4(4): 286–294.
- 12 O Faugeras, L Robert. What can two images tell us about a third one? [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 800: 485–492.
- 13 Guo Yin, Liu Changjie, Zhu Jiguan, *et al.*. Measurement system for dynamic envelope curve of high-speed train [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0208002.
郭寅, 刘常杰, 郝继贵, 等. 高速列车动态包络线测量系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0208002.
- 14 Wang Wei, Yu Zhijing, Guo Yin, *et al.*. Study on the occlusion problem in dynamic space intersection measurement with multi-camera systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0415003.
王伟, 于之靖, 郭寅, 等. 多摄像机空间交会动态测量中遮挡问题的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0415003.
- 15 Wang Wei, Yu Zhijing, Guo Yin, *et al.*. Study on the camera stations optimization of stereoscope system based on plane intersection model [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0408001.
王伟, 于之靖, 郭寅, 等. 基于异面交会模型的立体视觉像机站位优化研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0408001.
- 16 H Araújo, R L Carceroni, C M Brown. A fully projective formulation to improve the accuracy of Lowe's pose-estimation algorithm [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1998, 70(2): 227–238.
- 17 Zhang Guangjun. *Vision Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2008.
张广军. *视觉测量* [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- 18 M I Lourakis, A A Argyros. SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 2009, 36(1): 2.

栏目编辑: 何卓铭