

论 CCD 成像系统检校的 DLT 方法

朱 庆 张庆珩

(北方交通大学土建系)

提 要 这篇报告详细评述了用于 CCD 像机检校(或称定标)的直接线性变换 DLT 方法,特别是对系统误差的处理,针对实际应用的需要,本文通过实验分析了控制点数量与分布,误差模型的选择等对定标精度的影响。

关键词 直接线性变换 数字近景摄影测量 计算机视觉 自检校 验后补偿

1 引言

从模拟法到解析法乃至今天的准数字化时代,摄影测量(photogrammetry)的面貌已发生了巨大变化,随着各种新学科,新思想,新技术的不断出现和相互渗透相互促进,摄影测量正积极朝长期追求的实时化和自动化目标迈进,由于处理对象的特殊性,基于 CCD 数字摄影机的数字近景摄影测量被认为是有可能首先达到这一目标的领域^[1]。由于数字化,实时化和自动化的要求,加上良好的分辨率,稳定性及其它一些优良的物理性能,CCD 阵列数字摄影机便成为计算机视觉图像传感器理想的选择^[2],摄影测量和计算机视觉最基本也是最具挑战性的工作之一是精确获取处理对象的三维数据,而对成像系统的精确定标,确定像空间对应的几何关系则是先决条件^[3]。

尽管在摄影测量的发展历史中对量测摄影机(metric camera)或非量测摄影机的检校已形成了比较严密、完整、实用的理论和技术^{[4]、[5]},但由于 CCD 像机的特殊性如几何误差不仅来源于光学误差,机械误差,而且还来源于电学误差;数字图像的分辨率相对还较低,镜头畸变失真也较大等。因此,对 CCD 成像系统的检校在摄影测量和计算机视觉界又得到了进一步研究^{[6]~[13]}。

2 系统误差处理简介

众所周知,测量平差理论的发展是基于对误差特别是偶然误差(random error)的处理,其中,最重要的莫过于最小二乘理论(least square method),当只有偶然误差时,平差的数学模型为

$$E(L) = AX$$

其中, L 为观测量, X 为未知数, A 是系数阵,那么, X 的最小二乘估计为

$$\tilde{X} = (A^T A)^{-1} A^T L$$

其中, $A^T A$ 又称为法方程(normal equation)系数阵,可以证明

$$E(\tilde{X}) = X$$

即 \tilde{X} 为 X 的最优线性无偏估计(optimal linear unbiased estimate)。如果存在系统误差 V_s (Systemetric error),那么,平差模型为 $E(L) = AX + V_s$,显然 \tilde{X} 将不再是 X 的无偏估计,因而也不是最优估计,为了得到 X 的良好估计,若仍用最小二乘法,则必须对 V_s 进行修正,最有效的方法当然是在平差前对观测量 L 进行补偿。

$$L' = L - V_s, \text{使 } E(L') = AX$$

但这只是在知道系统误差的规律和大小时才能做到,而实际情况往往并非如此,多种因素的综合影响使得问题复杂化。

在摄影测量界被广泛采用的方法是用数学模型来描述系统误差,如 $V_s = HS$,并由此扩

展平差模型

$$E(L) = AX + HS$$

将 (X, S) 均作为未知数再按最小二乘法平差,这便是所谓的带附加参数的自检校平差(self-calibration),这种方法已公认可有效补偿系统误差,改善成果质量。

正如自检校所表示的那样,其初衷是专门用于在缺乏三维绝对控制资料时完整地恢复内定向^[14]。因此早期的自检校方法实际上只限于确定基本内定向参数(主点 (u_0, v_0) 和主距 f_x, f_y),而没有将像变形作为未知数,后来的发展将系统性像变形也用许多变量参数化。依据加入附加参数的实际考虑,这些参数可分为两大类^[15],最一般的参数化模型被认为是基于物理模型的,将像变形分解为透镜畸变和其它变形的各种分量,其处理以所有影响像点的因素都可用物理方法解释的假设为依据,因此对于一个特定的变形分量(如径向畸变)可预定一个单一的数学模型,为此,必须首先通过大量的检测弄清造成系统性畸变的原因和影响规律,比如光学误差在摄影测量界已有严密完整的研究结论^[4]。而关于电学误差的检测也已有报道^[6]。从确保补偿系统误差的有效性和数值解的稳定性出发,把像畸变看成是全部系统误差的总和,而对每项误差不作明确的说明,这便形成第二类参数化的基础,典型的代表是以Ebner, Grun, El-Hakim等人提出的经验模型—正交多项式,由于函数正交的特性,可较好地控制病态引起的计算问题而使解算方便,但大量对光学误差补偿的试验表明物理模型要优于经验模型,这也许是因为物理模型对系统误差主项有较好的逼真度的缘故。

值得注意的是,要用数学模型来完整地描述物理因素引起的系统偏差往往是十分困难的,并且各种因素引起的偏差可能有种种相似性,难于严格区分,加之参数间的相关或一些作用不显著的参数的引入,反而会造成严重的数学问题,使法方程系数阵状况变坏,同时也不利于进行统计检验——即所谓的过度参数化现

象,因此为了解决参数间的强相关和病态问题,不少学者对此进行了深入的研究,如参数自动选择,方程组病态问题的解决,非常数系统误差的补偿等等,尽管作了大量的理论工作,参数的选择仍然是凭经验。因此,自检校的精度很大程度上依赖于如何选择参数以符合“实际”。

不管怎样,参数化技术仍有非议之处,畸变的实际情况不完全符合规定的畸变函数,因为随机近似的性质,实际上任何一个函数都不能完全综合各种畸变因素而不能把无法预知的成分排除在外,鉴于此,在摄影测量平差中,基于对平差后像点坐标观测值残差的分析,提出了验后补偿法,其基本思想是利用局部范围的像点残差内插中心结点的系统误差改正数,并据此内插各像点坐标系统误差改正数,用改正后的像点坐标重新进行平差,如此反复迭代,直到相邻两次平差结果之差小于一限值。可见,该法不改变原有的平差模型,而且一般均能使平差结果获得稳定可靠的改善,但该法往往需要更多的控制点,且由于其只能对“可见”部分进行补偿,加之最小二乘平差是有偏的,因此结果往往不太理想^[16]。从理论上讲,自检校与验后补偿相结合的方法应能取得更理想的效果。

3 CCD 像机定标的 DLT 模型

在近景摄影测量和计算机视觉领域,广泛采用直接线性变换 DLT (Direct Linear Transformation) 作为平差的数学模型:

$$U = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1},$$

$$V = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$

可见,DLT 具有两个显著的特点:(1)由像空间坐标 (U, V) 直接变换到物空间坐标 (X, Y, Z) ,因而不需要内外方位元素的近似值。(2)直接使用原始观测量——像点坐标,因而可望进行有效的系统误差补偿,因此特别适用于 CCD 像机的定标,与常规摄影机检校之不同处主要表现在以下两个方面:①考虑电学误差的影响。②算法上要求快速最好实时且稳定可靠,基于此,对 CCD 像机的定标较多地采用了带附

加参数的 DLT 方法,此时的平差模型变为:

$$U + dU = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1},$$

$$V + dV = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

有关研究集中在对 (U, V) 进行改正的误差模型 (dU, dV) 的选择和解的算法实现。

文献[4]推荐了只考虑径向光学畸变主项的方案,即

$$dU = K_1 (U - U_0) R^2, dV = K_1 (V - V_0) R^2$$

其中, $R^2 = (U - U_0)(U - U_0) + (V - V_0)(V - V_0)$, [7][8]采用这一方案,由于未考虑电学误差的影响,结果不太理想(见表 1),文献[9]提出的误差拟合校正算法如下:

(1)根据一组控制点的已知物空间坐标和像空间坐标观测值,由直接线性变换解算出 11 个参数。

(2)由物空间坐标和解出的 DLT 参数反算像空间坐标,据此可得其与像坐标观测值的差——像变形值。

(3)用三次正交多项式对残差进行拟合,并内插出控制点的像坐标改正值。

(4)用改正后的像坐标重新参与 DLT,重复执行前面的运算,直到相邻两次平差结果之差小于一限值为止。

可见,该法类似于前述的验后补偿法,根据这样定标的结果计算其它像点对应的物空间坐标时,须先由多项式内插其像坐标观测值的修正值。必须注意的是,为了比较充分反应图像范围内总的畸变,应有较多的分布均匀的控制点,特别的还应利用一些不曾参与 DLT 参数解算的控制点残差以进行误差拟合,否则这种补偿的结果从理论上讲只能稳定地提高参与平差的点的精度,这也是[9]未能取得理想定标结果的原因之一。

最近,[10]对 DLT 定标方法作了进一步改进,其特点表现在以下两方面:

(1)在 DLT 平差模型中引入考虑数字化尺度因子影响的镜头畸变主项的误差模型。

$$dU = f_x (K_1 U R^2 + t_1 (R^2 + 2U_r^2) + 2t_2 U_r V_r)$$

$$dV = f_y (K_1 V R^2 + t_2 (R^2 + 2V_r^2) + 2t_2 V_r U_r)$$

其中, $U_r = (U - U_0)/f_x, V_r = (V - V_0)/f_y, R^2 = U_r^2 + V_r^2$

(2)用三次多项式拟合其余在误差模型中未顾及的残差。

从表 1 可见[10]取得了比较好的定标结果。

4 本文的贡献

针对实际工作的需要,本文通过实验分析重点考查了以下三个问题:

(1)控制点数量与分布对 DLT 定标的影响。

(2)在误差模型中考虑一项或者几项畸变会带来多少改进。

(3)插值多项式中高次项的引入对误差拟合校正的影响。

摄影测量的研究表明,DLT 定标的精度最弱处位于图像的周边附近,以径向畸变和偏心畸变为例,离主点越远处其变形值越大,基于此,用于解算 DLT 参数的控制点应能充分覆盖有效的图像范围,那么,是不是点越均匀越好?最少又要多少点才能满足需要?因为点越多,代价也越大。如果当点的增加并不能产生多大效果,那么就没必要多布点,实际工作要求最有效的控制点数量与分布。为此,笔者利用 TOP-1011 CCD 像机,对距离为 0.94 米,大小为 260mm×260mm 的控制场进行了定标实验。

(1)利用不同数量和分布的控制点进行简单 DLT 定标,表 2 所示为相应数量控制点最佳分布情况下由不带任何补偿的 DLT 定标的结果,未予列出的其它分布情况均导致更坏的定标结果,由此可得出如下结论:

① 采用较强的控制点分布图形,即使用最基本的 6 个点简单 DLT 定标,其相对平面和深度方向的精度分别可达 1/4 000 和 1/3 000。这比[7]~[10]所报道的一般小于 1/2 000 的情况有显著改善。

② 控制点的增加对平面定位的精度提

高不大,而对深度方向的定位有显著影响,但当控制点多于13个时,简单DLT定标的精度不再有明显改善而稳定在1/6 000左右。

③ 在引入附加参数和进行验后补偿时,控制点的分布尤为重要,定标结果对此十分敏感,很容易造成运算不收敛,因此有必要根据需要优化设计控制点分布。

(2)在处理中,就附加参数项的选择,插值多项式高次项的取舍等对定标精度的影响进行了实验,结果如表3所示。由此可得出如下结论:

① 在较强的控制点分布图形条件下,仅用验后补偿,对平面定位精度无明显改善,而对深度方向的定位精度有一定改善。

② 误差拟合多项式三次项的引入反而使结果恶化,本文的实验均在二次多项式条件下取得最好的结果。

③ 引入考虑数字化尺度因子的镜头畸变主项作为附加参数参与DLT,对平面定位精度

有显著改善,而只考虑 K_1 项与 K_1, t_1, t_2 三项均考虑的差别很微弱。

④ 采用[10]的算法,在引入附加参数的同时进行验后补偿,平面定位精度有明显提高。

⑤ 如果利用一些额外未曾参与平差的控制点残差参与[10]的误差拟合,那么最终定标的平面精度可达1/20 000。

5 存在问题

(1)在处理中,发现有些控制点的图像坐标有明显的粗差(gross error)。如何在定标过程中自动剔除这些粗差而不让其参与定标是算法实用化必须解决的问题之一。

(2)在本文的定标实验中,深度方向的相对定位精度一直在1/7 000左右,没有[10]报道的好,究其原因应与摄影基线长度,交角角度等有关。

(3)本文只涉及定标算法的研究,而对有关图像处理如控制点识别与图像坐标的提取等将在报告2中讨论。

[附实验结果表]

表1 DLT定标精度比较

| 作者 | 附加参数 | 验后补偿 | M_x | M_y | M_z | M_{σ} | 平面/深度 相对精度 |
|-----|-----------------|------|---------|---------|---------|--------------|-------------------|
| 李锦成 | 无 | 三次项 | 0.0803 | 0.127 4 | 0.252 6 | 0.21 | 1/2 500, 1/3 500 |
| 徐青 | K_1 | 无 | 0.247 | 0.158 | 0.272 | 0.20 | 1/2 000, 1/5 500 |
| 范洪 | K_1, t_1, t_2 | 三次项 | 0.019 8 | 0.034 5 | 0.079 4 | 0.09 | 1/9 000, 1/11 000 |
| 朱庆 | K_1' | 无 | 0.029 5 | 0.071 1 | 0.132 4 | 0.14 | 1/4 700, 1/7 000 |
| 朱庆 | K_1' | 二次项 | 0.011 4 | 0.014 2 | 0.126 8 | 0.08 | 1/20 000, 1/7 400 |

表2 控制点分布对DLT定标的影响

| 控制点数 | 分布图形 | M_x | M_y | M_z | M_{σ} | 平面/深度 相对精度 |
|------|-------|---------|---------|---------|--------------|------------------|
| 6 | * * * | 0.065 9 | 0.067 7 | 0.278 5 | 0.215 | 1/4 000, 1/3 000 |
| | * * * | | | | | |

表 2 (续)

| | | | | | | |
|----|----------------------------------|---------|---------|---------|-------|------------------|
| 10 | **** * * **** | 0.058 1 | 0.067 2 | 0.217 9 | 0.202 | 1/4 000, 1/4 000 |
| 12 | **** ** ** **** | 0.067 4 | 0.081 0 | 0.156 9 | 0.185 | 1/3 400, 1/6 000 |
| 13 | **** ** ** **** | 0.048 8 | 0.074 7 | 0.148 3 | 0.177 | 1/4 000, 1/6 300 |
| 15 | ***** ** * ***** | 0.050 6 | 0.060 0 | 0.151 4 | 0.172 | 1/4 600, 1/6 200 |
| 18 | ***** * * * * * * ***** | 0.052 3 | 0.066 8 | 0.141 4 | 0.182 | 1/4 200, 1/6 600 |

表 3 自检校与验后补偿对 DLT 定标的影响

| 附加参数 | 验后补偿 | M_x | M_y | M_z | M_{uv} | 平面/深度 相对精度 |
|----------------|------|---------|---------|---------|----------|-------------------|
| 无 | 二次项 | 0.057 5 | 0.064 4 | 0.109 8 | 0.171 | 1/4 000, 1/8 500 |
| 无 | 三次项 | 0.076 1 | 0.036 1 | 0.136 7 | 0.174 | 1/4 200, 1/6 800 |
| K_1' | 无 | 0.029 5 | 0.071 1 | 0.132 4 | 0.141 | 1/4 700, 1/7 000 |
| K_1' | 二次项 | 0.024 4 | 0.052 2 | 0.128 6 | 0.130 | 1/6 200, 1/7 300 |
| $K_1' t_1 t_2$ | 二次项 | 0.028 8 | 0.041 0 | 0.125 6 | 0.116 | 1/7 200, 1/7 400 |
| K_1' | 二次项* | 0.011 4 | 0.014 2 | 0.125 2 | 0.075 | 1/20 000, 1/7 400 |

注: K_1' 为考虑尺度因子的畸变参数。

* 使用了未参与平差的控制点数据。

参 考 文 献

- 1 李德仁. 大有希望的数字摄影测量技术. 测绘通报, 1992(2).
- 2 D. H. Ballard and Brown, C. M. . Computer Vision. Prentice-Hall, 1982.
- 3 Toni Schenk, Machine vision and Close Range Photogramme-

try. ISRPS congress, Washington, 1992.

- 4 王之卓. 摄影测量原理. 测绘出版社, 1979.
- 5 王之卓. 摄影测量原理续编. 测绘出版社, 1986.
- 6 林宗坚, 卢键, 陶闯. CCD 像机几何误差的检测. 武测科技, 1992(4).

(下转第 24 页)

一栋房屋的边界或一个地形单元,工作站会自动选取最佳投影中心从输入影像中采集像元。如果在输入中无法看到这个多边形,则由人工构成法来形成这个多边形。

3.7 正射影像、影像地图及镶嵌处理

正射影像是原始影像经过纠正处理后的一种影像,即真正处于每点正直上方观察所获取的影像。它不带有因像机的几何特性(中心投影)或地面起伏(投影差)而引起的变形。为了生成正射影像,所必须的输入资料是原始影像及相应的传感模式,覆盖此区域的包含有DTM的地形数据库。调用该功能后能自动生成正射影像。

影像地图是一个或若干个正射影像镶嵌的结果,同时它还包含有彩色的地物图形和符号;并且周边有图廓标注。影像地图的输出可以是数字的软拷贝也可以是硬拷贝的图件。

如简单地将若干单独的正射影像拼接起来会由于几何定位误差和灰度控制的不一致而形成难看的拼接边缝。所以通常的办法是在拼接两幅正射影像时让接边变成一条弯曲的折线以使拼接缝成为不可见,而DPW则是用镶嵌处理程序在两幅影像相邻的区域内自动补偿改正几何定位差同时用辐射改正算法来自动消除影

像接边部分的密度差异,最后形成无缝隙的影像地图。

4 DPW 的最后产品

1. 大地定位信息
2. 按核线重组后的影像
3. 地模数据(DTW)
4. 已格式化的平面地图及地貌图附带接边数据
5. 正射影像
6. 影像地图
7. 透视图,单幅或动画飞行透视图

上述产品可以是软拷贝,输出到1/4英寸,9道或8mm的磁带上。输出格式可以是商用的或军用的可交换DTED格式,也可以转换成AutoCAD, SunRaster 或GIS等。

若是硬拷贝输出,可以选用以下设备:激光打印机,彩色打印机或大型彩色绘图机。

参 考 文 献

- 1 Automatic Terrain Extraction and Terrain Data Quality Control by Mark S. Kingsley Helava Associates, Inc.
- 2 Automatic Elevation Extraction and the Digital Photogrammetric Workstation by Scott Miller & Kurt De Venecia Helava Associates, Inc.
- 3 Leica Digital Photogrammetric Workstation by Helava.
- 12 H. A. Beyer. Some Aspects of the Geometric Calibration of CCD—Cameras, ISPRS "Fast Processing of Photogrammetry Data". Interlaken, 1987.
- 13 L. Paquette, etc. A New Camera Calibration Method For Robotic Vision, "Close—Range Photogrammetry Meets Machine Vision", 1990.
- 14 H. Moniwa. A Flexible Methode of Selfcalibration for Aerial and Close—Range Photogrammetric System. Commission V. ISP. , Helsinki, 1976.
- 15 刘文熙. 解析摄影测量. 西南交通大学研究生教材, 1986.
- 16 李德仁. 解析摄影测量. 测绘出版社.

(上接第5页)

- 7 徐青. 面阵 CCD 像机几何精度的初步评定. 解放军测绘学院学报, 1990(2).
- 8 徐青. 数字近景摄影测量系统 PV-1 的几何精度. 解放军测绘学院学报, 1991(2).
- 9 李锦成. 一种用于三维立体视觉的精密摄像机定标算法. 计算机学报, 1990(3).
- 10 范洪. 3D 计算机视觉系统的高精度定标. 北京交通大学博士论文, 1992.
- 11 Juyang Weng , Paul Cohen and Mare, Hernior. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation, IEEE TRANS. PAMI—14. 1992, pp965—980.