

doi:10.3788/gzxb20154404.0422001

DMZ 内视场光学分割型航摄相机子影像 高准确度几何拼接

胡海彦^{1,2,3}, 杨楹澜⁴, 方勇^{2,3}, 余旭初¹, 王刚⁵

(1 信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450052)

(2 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054)

(3 西安测绘研究所, 西安 710054)

(4 61363 部队, 西安 710054)

(5 南京尖兵遥感信息技术有限公司, 南京 210005)

摘 要:针对内视场光学分割型相机, 利用子影像同名像点虚拟影像坐标相等这一约束条件, 提出一种高准确度子影像几何拼接方法. 首先在分析各 CCD 几何安置误差的基础上, 设计拼接关系并给出拼接参量计算方法; 其次结合 SIFT 等高准确度影像匹配算子对拼接模型进行优化选择, 给出子影像拼接流程; 最后采用附加参量自检校技术进行畸变参量再精化处理. 利用所提方法对一款自行设计的数字大面阵复合相机进行几何拼接试验, 结果表明该方法能够有效解决高准确度子影像几何拼接、高量测性能大幅面虚拟影像生成问题, 拼接后影像内符合准确度可达子像元级, 满足航测作业对数字航摄相机测图准确度和摄影效率的应用要求.

关键词:数字航摄相机; 光学分割器; 视场; 子影像; 拼接; 几何量测性能; 虚拟影像; 中心投影

中图分类号: P236

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)04-0422001-8

High Accuracy Sub-images Stitching for DMZ Airborne Camera in Kind of Optical FOV Splitting

HU Hai-yan^{1,2,3}, YANG Yun-lan⁴, FANG Yong^{2,3}, YU Xu-chu¹, WANG Gang⁵

(1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

(2 State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China)

(3 Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China)

(4 61363 troops, Xi'an 710054, China)

(5 Nanjing JianBing Remote Sensing Information Technology Ltd, Nanjing 210005, China)

Abstract: An approach about how to stitch the sub-images to produce a high accuracy metric virtual image for optical splitting field of view camera was presented utilizing the constraint condition that virtual image coordinated of corresponding points in sub-images must be equal. Firstly, based on the analyzing of CCDs installation geometry error the stitching relations were designed and the sketch of stitching parameters was given; secondly, the optimized model assisted with the image matching operator was selected, such as SIFT etc. and workflow of sub-image stitching was expounded; lastly, stitch images distortion parameters refinement were processed making use of additional parameters self-calibration technology. The proposed method was verified by one self-design and manufacturing synthesized camera, and the inner precision of stitched images is within sub-pixel level that meets completely the requirements of mapping accuracy and imaging efficiency for a digital aerial photogrammetric camera.

基金项目:国家高分对地观测重大专项(No. GFZX04030301)和国家自然科学基金(No. 40901199)资助

第一作者:胡海彦(1977-),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为航空航天高精度对地目标定位理论与方法. Email: hhyanyan@sina.com

导 师:余旭初(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为遥感图像处理与模式识别. Email: xc_yu@yahoo.com.cn

收稿日期:2014-09-24; **录用日期:**2014-12-10

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Digital airborne camera; Optical splitter; Field of View (FOV); Sub-image; Stitching; Geometry metric performance; Virtual image; Perspective projection

OCIS Codes: 220. 1000; 220. 2740; 220. 3620; 220. 4830; 220. 4840

0 引言

随着数字航摄影相机的兴起,胶片型模拟航摄影相机已被取代,但受到 CCD 制造工艺的限制,由单个面阵 CCD 所生成的单张数字航摄影像,其像幅规模始终无法达到原先模拟相机的像面尺寸,很大程度上影响了数字航摄影相机摄影效率和测图准确度^[1-3]。

在大量的应用需求推动下,国内外出现了多种复合型大面阵航摄影相机,以解决数字航摄影像像幅规模受限于单个面阵 CCD 大小的问题,这些复合型相机可按物镜个数及影像最终合成机理分为外视场分割型和内视场分割型两大类^[4]。其中外视场分割型相机是利用多个单台中小面阵 CCD 相机捆绑而成,典型代表有美国 Intergraph 公司生产的 DMC 相机、中国测绘科学研究院制造的 SWDC 相机等。王慧^[5]、王鑫^[6]、Jacobsen^[7]等针对 DMC 这一类型相机,围绕如何将多视角多中心影像生成虚拟等效中心投影影像展开了研究。此类相机的优势是系统实现简单,但缺点是在形成等效中心投影虚拟像片时存在理论近似,对高程准确度有影响。内视场分割型相机是将单个物镜视场进行光学分割,每个被分割视场对应一个面阵 CCD 以实现子影像成像,典型代表包括 Microsoft/Vexcel 生产的 UltraCam 系列相机、西安测绘研究所与南京尖兵遥感信息技术有限公司联合制造的 DMZ 相机等。与外视场分割型相机相比,内视场分割型相机具有唯一的光学系统和焦平面,物理意义明确,理论严密,最符合理想的数码相机状态,既满足测绘准确度要求,又具有高覆盖率^[8]。Gruber M^[9]、Richard^[10]等针对 UltraCam 相机,围绕如何规避和降低相机间分时曝光控制及相机间存在的制造差异性对拼接误差的影响展开研究。即使同为内视场分割型相机,也存在构造上的差异——UltraCam 是利用多镜头分时摄影模式予以实现,而 DMZ 是直接单个镜头的后节点视场内利用光学半透半反棱镜一次性进行整体分割,优势是避免了较为复杂的严格分时曝光摄影相机控制操作,从而很大程度上保证了相机摄影的稳定性,具有良好的拼接准确度以及拼接后影像具有良好的量测性能,这对满足后期测图准确度要求至关重要^[11-14]。但是由于是多个面阵 CCD 共同构成焦平面,因此光学系统较为复杂,对各面阵 CCD 的拼接准确度也要求较高。本文针对首次出现的利用光学分割器进行内视场分割的国产 DMZ 内视场光学分割型相机,在分析相机成像机理的基础上,提出一种内视场光学分割大面阵 CCD 影像高精度几何拼接方法,该方法有效降低了各 CCD 面阵安置误

差对影像拼接准确度的影响,包含特定拼接关系设计下的模型选择、利用特定拼接关系进行子影像拼接及影像拼接后畸变参量精化等三个技术环节,从而解决高精度子影像拼接、高精度性能的大幅面影像复合生成问题。要得到高质量的大面阵复合影像,子影像间的辐射校正同样需要考虑,本文仅关注影像几何量测特性,辐射特性研究暂不涉及。

1 子影像拼接

1.1 相机设计及几何误差成因分析

这里以二代 DMZ 相机为例,简要分析相机光学设计特点,确定可能影响几何拼接准确度的误差成因,为拼接关系数学模型设计及参量计算提供依据,并给出具体拼接算法。其它包含不同 CCD 数量(例如一代 DMZ 相机为 2×3 块 CCD 拼接模式, UltraCam 系列相机为 3×3 块 CCD 拼接模式等)的内视场分割型相机的拼接算法与此处类似。

1分12内视场分割型二代 DMZ 相机 I ~ XII 号 CCD 机背外形安置及内视场分割器见图 1(a)和图 1(b), I ~ XII 号 CCD 对应生成 12 个子影像,所有相邻子影像存在一定宽度的影像重叠区(宽度约 200 个像

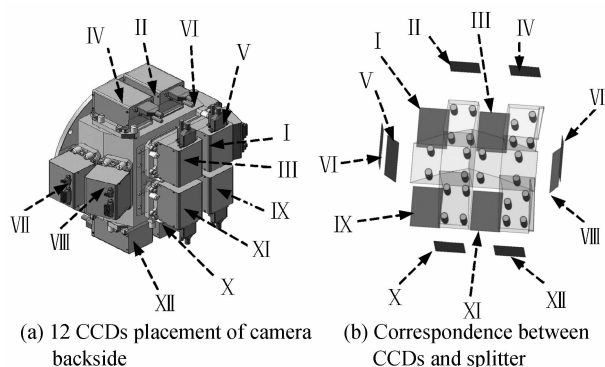


图 1 1分12内视场分割型二代 DMZ 相机 I ~ XII 号 CCD 机背外形安置及内视场分割器

Fig. 1 FOV optical splitted to 12 CCDs of 2nd Generation for DMZ camera backside, FOV optical splitter

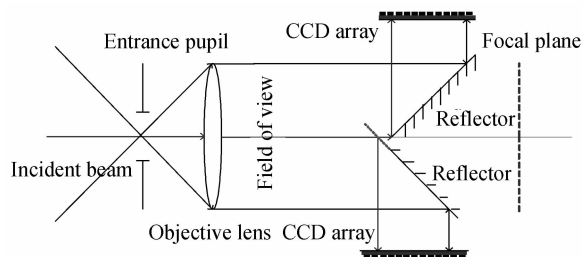


图 2 相邻子影像重叠区半透半反棱镜实现
Fig. 2 Overlap of adjacent sub-images realized by semi-transmitted and semi-reflective prism

素),这些重叠区影像是分割器在相邻影像拼接处采用半透半反棱镜实现的,如图2.理论上,只要满足任意像点光路经分割器折返后,其在CCD上成像的光程等于该像点在虚拟设计焦面上成像设计光程这一条件,则该像点等价于在虚拟焦面上成像.如果这一条件严格满足,就不存在子影像间的几何拼接误差^[15-16],但主要是由于受到实验室物理设备测量极限准确度及安装集成工艺水平限制,光学分割器安置误差是客观存在的,光程相等条件不能严格满足,从而导致各子影像相对于其理论位置存在一定的变形,相对于理想子影像位置,这种变形主要由两平面间的平移、旋转及缩放等误差因素构成,采用二维等形变换、仿射变换或投影变换即可描述与变形相关的子影像间拼接数学模型^[17].

具体实际操作中,到底哪一种模型更为适宜,需要试验分析.

1.2 拼接关系设计及拼接参量计算

I~XII号CCD对应的12个子影像拓扑关系见图3,要将子影像在虚拟设计焦面上进行拼接,需要两类像点,第一类是存在于某个/些子影像上的基准像点(或简称基准点),如图3中的A~G号基准像点,这些基准点确定了拼接后的合成影像在相机焦面上的实际位置,其在焦面上的位置控制坐标需要由相机厂商提供;第二类是子影像间重叠区内的同名像点,如图3中的1~33号同名像点,这些同名像点确定了子影像间的相对拼接关系,其像点坐标需要利用影像匹配技术进行高准确度量测而得.

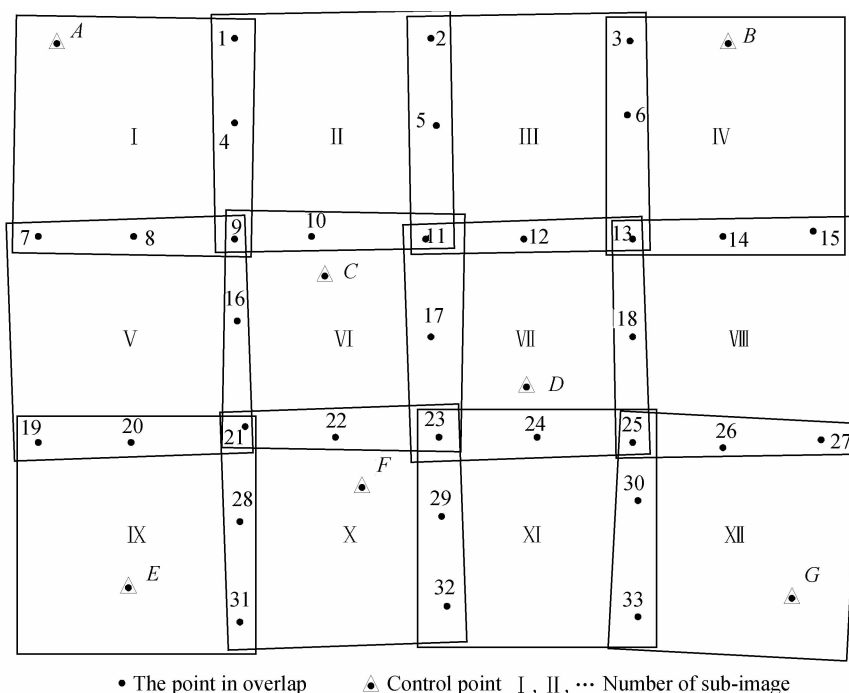


图3 图1对应的子影像拓扑关系以及假定的同名像点和基准点分布

Fig.3 Control, tie point configuration and topological relation between sub-images of Fig.1

为便于描述,这里暂假定子影像到相机焦面的变换关系满足二维等形变换,见式(1),其中, x, y 为子影像坐标系坐标, X, Y 为拼接后合成影像坐标系坐标。 a, b, T_x, T_y 为4个变换参量.

$$X = ax - by + T_x \quad (1)$$

$$Y = ay + bx + T_y$$

那么可得关于基准像点和关于相邻子影像同名像点两种拼接关系的设计:

1)关于基准像点

以VI号子影像上的基准像点C为例,根据式(1),有

$$X_c = a_{VI} x_{c_{VI}} - b_{VI} y_{c_{VI}} + T_{X_{VI}} \quad (2)$$

$$Y_c = a_{VI} y_{c_{VI}} + b_{VI} x_{c_{VI}} + T_{Y_{VI}}$$

式中, $x_{c_{VI}}, y_{c_{VI}}$ 为子影像VI上基准点C在其子影像坐标

系下的像点坐标,则为基准点C在焦面上控制点位置的合成后影像坐标, $a_{VI}, b_{VI}, T_{X_{VI}}, T_{Y_{VI}}$ 为子影像VI的拼接参量,对于其它I、IV、VII、IX、X、XII子影像上的A、B、D、E、F、G基准点同样可按式(2)写出一组对应的拼接关系方程组.

2)关于相邻子影像同名像点

利用相邻子影像上同名点所对应的拼接后影像像点坐标相等这一条件列出拼接关系方程,以相邻子影像I和子影像II上的同名点1为例,有

$$a_I x_1 - b_I y_1 + T_{X_I} - (a_{II} x_{1_{II}} - b_{II} y_{1_{II}} + T_{X_{II}}) = 0 \quad (3)$$

$$a_I y_1 + b_I x_1 + T_{Y_I} - (a_{II} y_{1_{II}} + b_{II} x_{1_{II}} + T_{Y_{II}}) = 0$$

与图3中各个同名像点及与之对应的相邻子影像拼接关系见表1,依据表1对于其它每对相邻子影像,重叠区中出现的每个同名点可按式(3)写出一组对应

的拼接关系方程组.

表 1 各个同名像点及与之对应的相邻子影像关系

Table 1 Connections between sub-images of Fig. 3 based on tie point

Point	Photo <i>i</i>	Photo <i>j</i>	Point	Photo <i>i</i>	Photo <i>j</i>	Point	Photo <i>i</i>	Photo <i>j</i>	Point	Photo <i>i</i>	Photo <i>j</i>
1	I	II	6	III	IV	21	V	IX	25	VII	XI
4	I	II	13	III	IV	21	V	X	25	VII	XII
9	I	II	11	III	VI	11	VI	VII	25	VIII	XI
7	I	V	11	III	VII	17	VI	VII	25	VIII	XII
8	I	V	12	III	VII	23	VI	VII	26	VIII	XII
9	I	V	13	III	VII	21	VI	IX	27	VIII	XII
9	I	VI	13	III	VIII	21	VI	X	21	IX	X
2	II	III	13	IV	VII	22	VI	X	28	IX	X
5	II	III	13	IV	VIII	23	VI	X	31	IX	X
11	II	III	14	IV	VIII	23	VI	XI	23	X	XI
9	II	V	15	IV	VIII	13	VII	VIII	29	X	XI
9	II	VI	9	V	VI	18	VII	VIII	32	X	XI
10	II	VI	16	V	VI	25	VII	VIII	25	XI	XII
11	II	VI	21	V	VI	23	VII	X	30	XI	XII
11	II	VII	19	V	IX	23	VII	XI	33	XI	XII
3	III	IV	20	V	IX	24	VII	XI			

这样,将所有基准点及同名像点所列出的拼接关系观测方程组进行组合,最后得到的观测方程组矩阵形式为

$${}_m A^n X^1 = {}_m L^1 + {}_m V^1 \quad (4)$$

式中,系数矩阵 A 按照两种拼接关系组建, X 为所有子影像的拼接参量, L 为由元素 0 和基准点焦面位置坐标组成的常量矩阵, V 为残差向量, m 大小由基准点个数、同名点个数及其对应的重叠度来决定 ($(63+7) \times 2=140$), n 大小为子影像数量的四倍 ($12 \times 4=48$). 合成后影像拼接参量 X 可通过最小二乘平差解求, $X = (A^T A)^{-1} (A^T L)$, 这些参量确定了所有子影像到合成后影像的几何拼接关系. 对于拼接准确度,可按式(5)、(6)进行计算.

$$V = AX - L \quad (5)$$

单位权标准差为: $\sigma_0 = \sqrt{\frac{V^T V}{r}}$, $r = m - n$. Q_{r, r_i} 为 $(A^T A)^{-1}$ 的第 i 行、第 i 列元素, 则 X 中第 i 个拼接参量的内部准确度为

$$\sigma_{x_i} = S_0 \sqrt{Q_{r, r_i}} \quad (6)$$

1.3 子影像重采样及拼接

实际操作中应将这些拼接参量“反向”应用,对式(1)反向求解,矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X - T_x \\ Y - T_y \end{bmatrix} = \frac{1}{a^2 + b^2} \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - T_x \\ Y - T_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

使用假定已拼接后影像的某像素 (X, Y) 及其对应子影像变换参量,通过式(7)可计算出该像素所对应

子影像上相应的像素位置,然后可采样得到灰度信息,具体采样方法可采取双线性等内插方法.

对于拼接后影像(图 3 中的外接矩形)中的某一个像素,其必然落在以下三类区域之一——第一种像素点位于“无效区”,即使用对应子影像拼接参量计算所得像点位置不会落在相应子影像的有效像坐标范围内,即是无效的,这时拼接后影像此处的灰度值可用特定代表无效灰度的某一数值填充;第二种像素点位于非重叠区,其灰度值只能直接使用所在子影像对应位置处的采样灰度值进行填充;第三种像素点位于相邻子影像重叠区域内,此时,可在包含重叠区的多个子影像上采样得到灰度值,而后依重叠度对这些灰度值进行均值即可.至此,逐像素依据三种情况中的对应一种进行像素灰度值的采样和填充,直至最终拼接影像的生成.

2 拼接影像量测性能评价及提升

2.1 试验数据

此处的子影像拼接方法已在一代 DMZ 航摄影机的演示验证试验中得到具体应用,该相机为 6 合 1 CCD 组成,其中 I、VI 号 CCD 直接安置于焦面上,作为基准 CCD,见图 4. 与几何特性相关的主要相机标称参量见表 2. 航摄区域为汉中某山地与平地接壤区,成图范围约 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$,最大高差 300 m,摄影高度 4 500 m, GSD 约为 25 cm,东西方向三条航线,航片数 37 张,见图 5. 为验证相机几何量测特性,在整个测区内进行了密集均匀高准确度布控,如图 5 中矩形框,控制点数量 329, XYZ 三个方向准确度小于 1 cm.

表 2 DMZ 相机主要几何特性参量

Table 2 Geometry parameters of DMZ camera

Focal length	Pixel size	Frame format	Number of CCDs
171 mm	9 μ	14 K \times 12 K	6(2 \times 3)

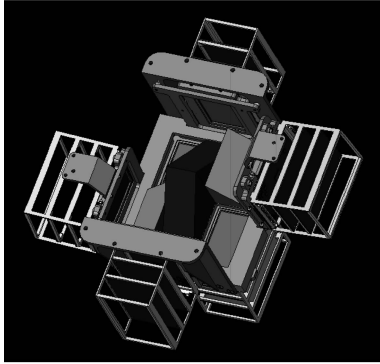
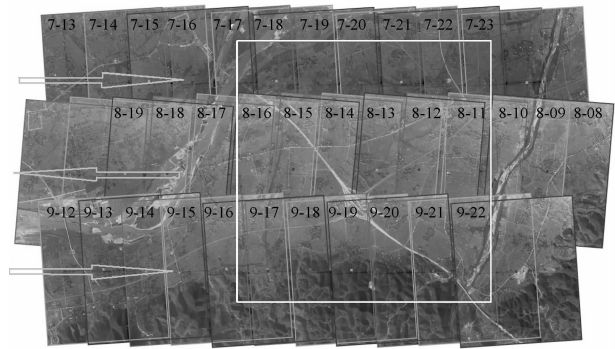


图 4 6合1视场分割器 CCD 组成
Fig. 4 Composition of optical splitting FOV to 6 CCDs



Arrow: flight direction; rectangle: control field area

图 5 测区内实际航摄数据

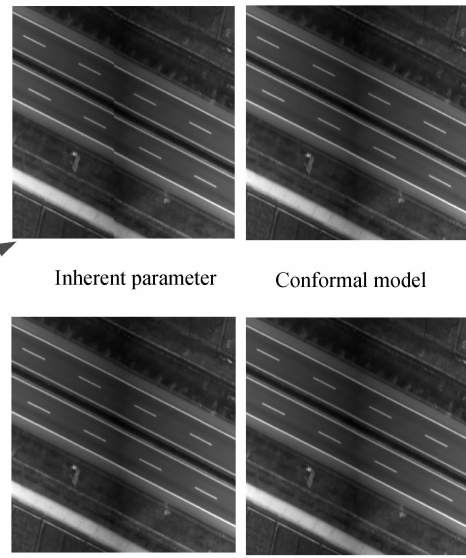
Fig. 5 Aerial photograph data in the test field

2.2 拼接效果分析与拼接模型选择

对小节 1.2 中的拼接算法,分别按照二维等形变换、仿射变换及投影变换三种拼接模型予以软件实现,



(a) Corresponding points overlay the stitched image



(b) Stitched region magnified locally in different models

图 6 数字影像拼接处几何错位效果(为目视便利,未进行辐射拼接处理)

Fig. 6 Resultant stitching image (radiometry error not be calibrated for convenience of observation)

并基于 SIFT 算子实现了同名像点的高准确度匹配量测功能,剔除粗差后,匹配准确度达到 1/10 像元^[18-20],对测区内 37 \times 6 幅航摄影像进行子影像拼接,生成 37 幅拼接后全幅面数字航摄影像.随机抽取一幅影像,进行拼接缝处的目视几何错位检查(图 6),在该影像的 7 条重叠区域内以 1/10 像元匹配准确度匹配得到了 892 个同名像点(图 6(a)),基准点是 I、VI 号子影像的八个角点,其在焦面上的实际物理位置事先已由相机厂商准确测定.

从试验效果可以看出,用相机厂商直接提供的拼接参量(仅考虑平移影响,每个子影像对应有两个固定的平移参量)进行子影像拼接,拼接缝处的几何错位还是十分明显的,放大查看约一个多像元;而利用基于二

维等形变换、仿射变换及投影变换模型实现的拼接算法进行拼接后,影像目视几乎无法察觉拼接缝处的几何错位,可谓严丝合缝.进一步利用同名像点进行拼接准确度统计,如表 3 第 3 行所示,从统计结果的比较来看:仿射变换模型的拼接准确度最高($\sigma_0=0.13$),略高于二维等形变换($\sigma_0=0.18$),这说明经过光学分割器对视场分割后,子影像相对于理想焦面位置,不光会产生平移、旋转及缩放等几何位置误差影响,也存在轻微的二维平面非正交性变形影响;而更为复杂的非线性投影变换模型的拼接准确度并没有得到进一步提升($\sigma_0=0.15$),这也进一步表明:该相机采用内视场分割器对光路进行透反而得的 6 个子影像,采用仿射变换模型已经能够完全刻画其间的拼接关系.

表 3 随机抽取某样片及测区内所有 37 张影像的三种拼接模型准确度统计

Table 3 Statistic accuracy of three stitching model for a random example image/total 37 images

Model/accuracy	Inherent parameter	Conformal model	Affine model	Projective model
Statistic accuracy of a stitched image be selected at random				
σ_0 /(unit: pixel)	1.02	0.18	0.13	0.15
Statistic accuracy of 37 stitched images totally				
Mean(σ_0)/(unit: pixel)	0.98	0.16	0.11	0.17
S. t. d(σ_0)/(unit: pixel)	0.010	0.008	0.007	0.013

为验证相机在摄影过程中的稳定性及拼接算法的适用性,对所有 37 幅影像逐个进行的单位权中误差拼接准确度统计后,又进行了拼接准确度稳定性统计,即统计了 37 幅影像拼接准确度单位权中误差的均值和标准差,见表 3 第 5、6 行,结果表明:用相机自带拼接参量、等形变换及仿射变换拼接模型的稳定度很接近(0.010,0.008,0.007),这说明相机在摄影过程中子影像间的相对关系是十分稳定的.但采取投影变换后,稳定性要差一些(0.013),主要原因是投影变换并不能完全反应子影像间的拼接关系,且由于其为非线性变换,也会导致数据处理过程中或多或少引入少量误差,见图 7.总之,综合考虑拼接准确度和稳定度,最适合该相机子影像拼接的模型应为仿射变换模型,其拼接准确度最高,也最稳定,当然,二维等形变换模型也是很好的备选方案.

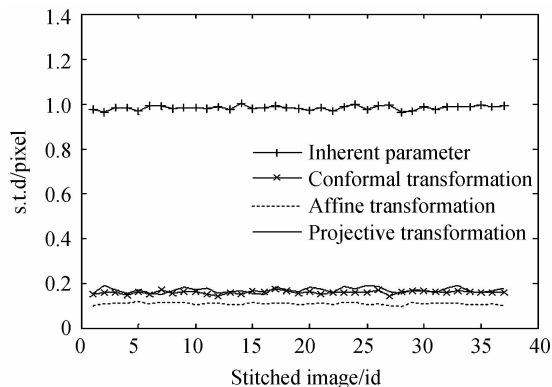


图 7 37 幅数字影像单位权标准差拼接准确度
Fig. 7 Std. dev of stitching for total 37 images

2.3 空三定位准确度及自检校准确度分析

为了验证拼接后影像的定位量测能力,将测区内的所有航摄影像依仿射变换模型进行拼接后,按两种方案进行试验验证.

方案一:对测区进行常规空三加密处理(利用基本位于测区四角及中央共计 5 个野外测量点作为控制点),并利用剩余的 324 个密集控制野外测量点作为检查点进行外部准确度统计,平差的内部准确度和外部

检查准确度见表 4 的 3、4 行.

方案二:利用涵盖密集控制区的 19 张拼接后影像进行区域网自检校空三相机航摄动态自检校处理(采用 10 参量模型^[21-22]的检校结果见表 5),并利用标定结果对相机摄影测量参量进行更新改正,而后重新进行常规空三加密处理,平差的内部准确度和外部检查准确度见表 4 的 6、7 行.

表 4 常规/自检校空三平差准确度统计

Table 4 Statistic accuracy of check points by aerial triangulation/self-triangulation

Statistics accuracy/item	Number	X/m	Y/m	Z/m
Convention aero-triangulation				
Control points	5	0.062	0.075	0.081
Check points	324	0.239	0.243	0.489
Self-calibration aero-triangulation				
Control points	5	0.036	0.035	0.050
Check points	324	0.087	0.098	0.213

从试验结果来看,拼接后的复合影像量测性能是满足航摄相机作业准确度要求的——常规空三平差处理检查点平面准确度优于 1GSD,高程准确度优于 2GSD.尤其是自检校空三处理后的准确度更为优良——检查点平面准确度优于 1/2GSD,高程准确度优于 1GSD,检校前后像方像点残差标准差由 $\sigma_0 = 7.8 \mu$ 提高到 $\sigma_0 = 1.8 \mu$,这一几何量测性能与国际上的 UltraCam 系列相机是一个准确度水平的,值得一提的是,欧洲空间数据研究组织(EuroSDR)所开展的研究项目 EuroDAC²(European Digital Airborne Camera Certification)中给出了 UCD 相机认证结论——平面准确度 1/4~1/3 像元,高程准确度 1/3~1 像元,拼接稳定度 0.01 个像元(DMZ 为 0.007 个像元,应该说稳定度更好些)^[23-25].需要注意的是,进一步分析表 4、表 5 可以发现,相机厂商所给出厂称参量并不是十分精准,要想更好地提升相机的几何量测性能,采用地面静态或航摄动态相机检校手段对相机进行精密标定是十分必要的,至于相机几何参量的长周期稳定性问题,当然还需要更为广泛的相机航摄作业试验和评定.

表5 自检校空三相机系统误差改正参量

Table 5 MPV of systematic error correction parameters by self-calibration triangulation

Additional parameter	Initial/nominal value	Correction	Estimation value	Accuracy
C/mm	17.0000E+01	3.8225E-02	17.0038E+01	8.3989E-04
XP/mm	-1.7571E-01	-2.3889E-03	-1.7332E-01	4.2120E-04
YP/mm	3.9301E-01	1.5138E-03	3.9149E-01	3.3081E-04
$K_1/(mm^{-2})$	3.0710E-05	5.6833E-08	3.0653E-05	2.8944E-08
$K_2/(mm^{-4})$	-1.5510E-08	-1.5008E-10	-1.5360E-08	7.0887E-11
$K_3/(mm^{-6})$	-2.0619E-12	1.1754E-13	-2.1794E-12	5.3115E-14
$P_1/(mm^{-1})$	-5.5987E-07	8.9467E-08	-6.4934E-07	6.0355E-08
$P_2/(mm^{-1})$	2.6470E-06	-1.9868E-07	2.8457E-06	4.6877E-08
B_1	2.1277E-04	6.4607E-06	2.0631E-04	1.3641E-06
B_2	-1.3409E-05	-4.1530E-06	-9.2556E-06	1.3458E-06

Before calibrating: $\sigma_0 = 7.8 \mu$; After calibrating: $\sigma_0 = 1.8 \mu$

3 结论

本文给出了内视场分割型数字航摄相机子影像高准确度无缝拼接具体算法,其是大面阵航摄相机数据预处理的关键技术环节.以国产DMZ航摄相机为例详细阐述了子影像拼接的具体技术流程,并对相机的量测性能予以评定,配合相机摄影标定技术,能够使得相机的量测准确度达到很高的量测水平.虽然这里仅以DMZ相机为例进行了相关试验,但对于其它内视场分割型数字航摄相机而言(如UltraCam系列相机),其成像机理本质上与DMZ相机是类似的,所以本文提出的方法同样适用于这些具体机型,能够无缝拼接生成高准确度无几何错位的大幅面航摄影像,从而满足航测作业对数字航摄相机高摄影效率和高几何量测性能的实际应用需求.

参考文献

- [1] SANDAU R. Digital airborne camera[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2010: 66-78.
- [2] JACOBSEN K. Recent developments of digital cameras and space imagery[J]. *Geographic Information System Ostrava*, 2011, (1): 23-26.
- [3] YU Yong-sheng, YOU Ning-jun. Aerial digital camera-replacer of traditional aerial film camera[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2005, (3): 6-10.
余咏胜,游宁君.数码航摄像机——传统胶片航摄像机的替代者[J].测绘通报,2005,(3):6-10.
- [4] FANG Yong, CUI Wei-ping, MA Xiao-feng, et al. Image stitching algorithm of digital camera with single field lens and multiple area CCD[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 906-910.
方勇,崔卫平,马晓峰,等.单镜头多面阵CCD相机拼接算法[J].武汉大学学报,2012,37(8):906-910.
- [5] WANG Hui, WU Yun-dong, ZHANG Yong-sheng. Modeling and analyzing of geometric joint error for CCD matrix images of digital aerial camera[J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2004, 20(4): 257-262.
王慧,吴云东,张永生.面阵CCD数字航测相机影像几何拼接误差模型与分析[J].测绘学院学报,2004,20(4):257-262.
- [6] WANG Xin, JIANG Ting. Application and improving performance of DMC II[J]. *Image Technology*, 2012, 24(2):

32-32.

王鑫,姜挺. DMC II 数字航空摄影传感器性能改进及应用[J]. 影像技术, 2012, 24(2): 32-32.

- [7] JACOBSEN K. Geometric property of large format digital camera DMC [J]. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 2011, 2011(2): 71-79.
- [8] HE Ying-hong, YANG Jian-feng, MA Xiao-long, et al. Optical system design of lander camera with focusing type[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 0422004.
贺应红,杨健峰,马小龙,等.对焦式着陆探测相机光学系统设计[J].光子学报,2014,43(4):042204.
- [9] GRUBER M, LADSTADTER R. XXIst international society for photogrammetry and remote sensing congress proceedings: BI[C]. Beijing: ISPRS Press, 2008: 115-121.
- [10] RICHARD L, MICHAEL G. American society for photogrammetry and remote sensing annual conference proceedings [C]. California: ASPRS Press, 2010: 26-30.
- [11] ALAMUS R, KORNUS W. DMC geometry analysis and virtual image characterization [J]. *The Photogrammetric Record*, 2008, 23(124): 353-371.
- [12] ZOU You-feng, LI Tian-zi, LIU Xian-lin. Technology and application of large array digital airborne photogrammetric camera-SWDC [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(15): 4302-4310.
邹友峰,李天子,刘先林.大面阵数字航摄影仪SWDC的关键技术及应用[J].科学技术与工程,2013,13(15):4302-4310.
- [13] LI Jian, LIU Xian-lin, WAN You-chuan, et al. Generation of SWDC-4 aerial digital camera virtual images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(5): 450-453.
李健,刘先林,万幼川,等. SWDC-4 数码航空相机虚拟影像生成[J].武汉大学学报:信息科学版,2008,33(5):450-453.
- [14] LI Jian, LIU Xian-lin, LIU Feng-de, et al. Mosaic model of SWDC-4 large format aerial digital camera and accuracy analysis of stereo mapping [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(2): 104-106.
李健,刘先林,刘凤德,等. SWDC-4 大面阵数码航空相机拼接模型与立体测图准确度分析[J].测绘科学,2008,33(2):104-106.
- [15] YAN A-qi, YANG Jian-feng, CAO Jian-zhong. Optical design of aerial digital camera based on large planar array CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 222-225.
闫阿奇,杨建峰,曹剑中.大面阵CCD航空数码相机光学系统设计[J].光学学报,2011,31(6):222-225.
- [16] XU Lei. Optical system design and image quality appraisal of

- the digital aerial camera[J]. *Optical Instruments*, 2009, **31**(4): 30-33.
- 许蕾. 数字型航空相机的光学系统设计和像质评估[J]. *光学仪器*, 2009, **31**(4): 30-33.
- [17] WANG Hong, TIAN Tie-yin. Focusing analysis on optical system of three line array stereoscopic mapping camera. [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0822001.
- 王红, 田铁印. 三线阵立体测绘相机光学系统的调焦分析[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 042204.
- [18] LOWE D. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. *International Journal on Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91-110.
- [19] KE Tao, ZHANG Yong-jun. The application of SIFT features in the automatic matching for low altitude aerial images[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, **34**(4): 23-26.
- 柯涛, 张永军. SIFT 特征算子在低空遥感影像全自动匹配中的应用[J]. *测绘科学*, 2009, **34**(4): 23-26.
- [20] YANG Hua-chao, ZHANG Shu-bi, ZHANG Qiu-zhao. Least squares matching methods for wide base-line stereo images based on SIFT features [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, **39**(2): 187-194.
- 杨化超, 张书毕, 张秋昭. 基于 SIFT 的宽基线立体影像最小二乘匹配方法[J]. *测绘学报*, 2010, **39**(2): 187-194.
- [21] WANG Rui-ru, MA Jian-wen, CHEN Xue. SIFT algorithm based on visual matching window for registration between multi-sensor imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, **36**(2): 163-166.
- 王瑞瑞, 马建文, 陈雪. 多传感器影像配准中基于虚拟匹配窗口的 SIFT 算法[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2011, **36**(2): 163-166.
- [22] FRASERC S. Digital camera self-calibration [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, **52**(4): 149-159.
- [23] HONKAVAARA E, NURMINEN K, MARKELIN L, et al. Calibrating and validating multispectral 3D imaging systems at a permanent test site-case study with an Intergraph DMC[J]. *The Photogrammetric Record*, 2011, **26**(134): 229-249.
- [24] LEBERL F, GRUBER M. Flying the new large format digital aerial camera Ultracam-D [J]. *Photogrammetric Week*, 2003(3): 67-76.
- [25] MICHAEL C. An European network on camera calibration [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, **70**(12): 1328-1334.