

## 画幅扫描红外成像实时拼接中的光束法平差

王雨曦, 亓洪兴, 马彦鹏, 葛明锋

(中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 光束法平差是遥感图像实时拼接系统的关键步骤, 它需要消耗大量的运算时间, 同时也决定了系统的拼接精度。针对画幅扫描红外成像实时拼接系统中的光束法平差算法, 提出了一种实用的光束法平差策略, 利用相邻扫描行图像的配准平差, 将最新扫描行图像依次配准到已拼接图像中, 为拼接图像的实时更新奠定了基础。同时利用 GPGPU 对光束法平差算法进行了并行加速, 在保证精度的情况下, 提高了拼接算法速度。通过画幅扫描成像的实时平差实验, 验证了算法的精度和实时性。

**关键词:** 光束法平差; GPGPU; 画幅扫描; 图像拼接

**中图分类号:** P237 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0104002

## Bundle adjustment in real-time mosaicking of frame-sweep infrared imaging

Wang Yuxi, Qi Hongxing, Ma Yanpeng, Ge Mingfeng

(Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Bundle adjustment is the key step in real-time mosaicking of remote-sensing imaging. It takes too much calculation time and decides the accuracy of the mosaicking system. Aiming at bundle adjustment algorithm in real-time mosaicking system of frame-sweep infrared imaging, a practical policy of bundle adjustment was proposed. The bundle adjustment between images of two adjacent sweep lines was used to register the latest sweep line to the mosaicked image, which laid the foundation of real-time updating of mosaic image. The GPGPU platform was used to implement and accelerate, which improved the real-time performance of mosaicking system and also guaranteed the accuracy. By implementation of real-time bundle adjustment of frame-sweep images, the precision and real-time performance of the bundle adjustment algorithm were validated.

**Key words:** bundle adjustment; GPGPU; frame sweep; image mosaicking

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-06-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2012AA121102)

作者简介: 王雨曦(1989-), 男, 博士生, 主要从事红外遥感图像处理方面的研究。Email: wangyuxi2006@126.com

导师简介: 亓洪兴(1977-), 男, 研究员, 博士, 主要从事面向航天、航空遥感领域的光谱及光谱成像探测技术研究方面的研究。

Email: qhx@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

当前大视场机载热红外(8~12  $\mu\text{m}$ )成像仪在军事侦察、海上搜救、城市建筑热泄露监测等领域都具有广泛的应用需求。随着热红外小面阵探测器的发展,利用面阵探测器来进行画幅扫描成像比传统的利用单元器件或线阵器件物方扫描的方式空间分辨率更高,视场角更大。传统的单元/线阵器件的空间分辨率通常被限制在  $\text{mrad}$  量级。而利用目前从国际市场上能自由采购的  $640 \times 512$  热红外面阵探测器可以使得空间分辨率达到  $100 \mu\text{rad}$  的水平。采用画幅扫描成像方式,飞机向前飞行过程中,在翼展方向上利用光机扫描机构实行面阵探测器画幅扫描成像。扫描行内每一幅图像之间保持一定的重叠率,同时飞行方向上扫描行与行间也保持一定的重叠率。这样,通过实时的图像拼接就可以获取连续的大视场高分辨率热红外图像。

为了获得高精度的拼接图像,需要获取准确的相机外方位元素。对于画幅扫描实时拼接系统,需要通过图像配准得到的相邻图像间的空间变换矩阵来得到相机的外方位元素。由于图像重叠区域同名点定位误差和特征配准误差等因素,外方位元素精度会随着误差的累积而降低,所以必须采用光束法平差来消除误差,得到全局最优的相机外方位元素。

光束法平差是应用最广泛的全局配准方法。光束法平差(bundle adjustment)方法<sup>[1]</sup>最早由摄影测量领域提出并得到广泛的应用。光束法平差利用均匀的地面控制点来矫正相机外方位元素<sup>[2-3]</sup>,通过对相机的外方位参数和三维点坐标参数进行多次迭代来最小化全局误差,得到最优的相机外方位元素。当地面控制点数量较多时,光束法平差方法精度很高,但同时也存在着参数数量多,运算量大,无法实时运算等缺点。

在基于图像的遥感影像拼接方面<sup>[4-5]</sup>,光束法平差也被用于提高影像配准精度,主要是飞行后对获取的全部遥感图像进行整体平差,只需要进行一次平差,但计算量大,无法直接适用于对获取的扫描行图像进行多次实时平差的情况。在基于画幅扫描成像的红外图像实时拼接系统中,需要将新扫描行图像依次配准到已拼接图像中,所以需要在飞行过程

中进行多次实时平差。同时由于扫描行图像帧速率快,数量多,更容易累积配准误差,所以需要一种快速稳定的光束法平差方法。

文中针对红外画幅扫描成像的特点,提出了一种快速高效的光束法平差策略,该策略优化了光束法平差算法,在保持已拼接完好图像的前提下,通过对最新扫描行内的图像外方位元素进行平差,将最新扫描行图像实时配准到已拼接图像中,能很好地适应画幅扫描成像实时拼接的应用场景;同时减小了平差的图像数量,使得计算量大大减少,为实时性奠定了基础。文中利用画幅扫描红外成像硬件系统,在通用图形处理器 GPGPU 平台上对该优化算法进行了并行实现和性能验证,证明了该算法的有效性和实时性。

## 1 光束法平差

### 1.1 光束法平差的优化策略

在基于点特征的画幅扫描图像拼接中,由于特征点定位误差和特征误匹配,会导致相邻图像间存在配准误差,而且累积误差会随着图像数量的增加而增大。如果按照图像产生的次序依次加入到全局图像中,扫描行内的配准误差累积会导致扫描行尾的图像几何畸变较大,同时扫描行间拼接时会出现图像错位的情况。

为了减少扫描行内累积误差,需要利用扫描行与行间的图像配准信息。最新获得的图像  $I_{N_i}$  不仅与扫描行内的前一图像  $I_{N_{i-1}}$  进行配准,同时也需要与前一扫描行  $I_{N-1}$  的图像进行配准,并通过平差算法来同时调整扫描行  $I_{N-1}$  和  $I_N$  的所有图像的姿态参数。当扫描行的图像数量较多时,对每一幅加入的图像都进行平差算法的计算量太大,无法实现算法的实时性。同时传统的光束法平差算法需要对最新获得的扫描行和前一行所有图像的外方位元素同时进行调整,会影响到之前的拼接结果。为了完成相邻扫描行间的实时平差算法,可以利用画幅扫描成像的特点,采用新的平差策略:(1) 计算最新的扫描行  $I_N$  内的图像之间单应性矩阵;(2) 计算图像  $I_{N_1}$  和  $I_{N_M}$  与前一扫描行  $I_{N-1}$  的单应性矩阵;(3) 对步骤(1)、(2)计算出的单应性矩阵进行平差算法,使得全局配准误差最小化。

画幅扫描成像的平差策略如图 1 所示,将前一

扫描行图像作为单幅图像,利用扫描行首尾重叠图像间的配准信息,可以将扫描行内的配准累积误差分散到扫描行内的每一幅图像,解决了扫描行内的累积误差问题,同时将拼接结果作为单幅图像进行调整,避免了对之前拼接结果的影响。

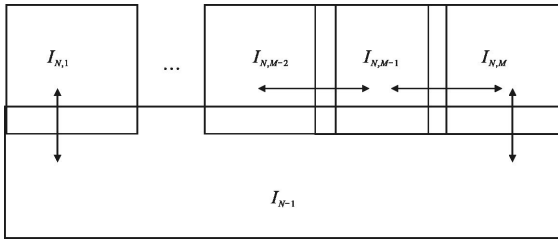


图 1 画幅扫描成像的光束法平差

Fig.1 Bundle adjustment of frame-sweep imaging

### 1.2 光束法平差的实现

光束法平差广泛应用在各种全局配准优化问题中。不同于局部配准只利用相邻图像间的配准误差,全局配准需要考虑多行图像间的全局配准误差,并同时调整所有图像的外方位元素,使得全局配准误差最小化。在画幅扫描红外图像拼接中,最新的扫描行图像需要依次加入到拼接图像中,所以可以将拼接结果作为单幅图像来考虑。设前一扫描行的图像索引为 0,当前扫描行的图像索引按成像顺序分别为 1~M,M 为扫描行的图像数量。假设相机模型已经进行了校正,文中不考虑相机的内方位元素。设图像  $i$  的外方位参数  $Q_i$  用  $(R_i, T_i)$  来表示,则全局配准误差可以利用三维射线空间对偶的能量函数<sup>[6]</sup>来描述:

$$E = \sum_i \sum_{jk} c_{ij} c_{ik} \|x_i(\hat{x}_{ij}; R_i, T_i) - x_i(\hat{x}_{ik}; R_k, T_k)\|^2 \quad (1)$$

式中: $i$  为所有配准图像中特征点的索引; $j$  和  $k$  为待配准的图像索引, $j, k \in [0, M]$ 。公式(1)代表了特征点  $i$  投影到重叠图像  $j$  和  $k$  的配准误差。

相邻图像间的配准误差的衡量采用射线误差<sup>[6]</sup>,射线误差衡量了图像特征点在拼接图像上的投影与相机光心连线的射线方程的方向差异。当相邻图像间的点特征完全匹配时,经过光心和特征点的射线方程完全重合。射线方程为:

$$\hat{x}_{ij} = \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ f_j \end{bmatrix} // l_{ij}, \text{ 其中 } l_{ij} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + f_j^2} \quad (2)$$

通过最小化目标能量方程,可以使得扫描行内

和扫描行间的配准误差最小化。公式(1)的非线性最小二乘问题可以通过求解规范表达式来得到。规范表达式求解方程表示为:

$$J^T J \delta_p = J^T \varepsilon \quad (3)$$

文中利用 Levenberg-Marquardt<sup>[7]</sup>算法来克服 Jacobian 矩阵病态时的优化求解问题,求解方程可以表示为:

$$N \delta_p = J^T \varepsilon, \text{ with } N \equiv J^T J + \mu I \quad (4)$$

公式(4)也被称为扩展规范表达式;式中: $J$  为能量函数  $E$  的 Jacobian 矩阵; $\varepsilon$  为误差观测向量; $\mu$  为迭代步长,为了避免对之前拼接结果有较大的参数调整,需要对图像 0 选取较小的迭代步长进行微调。

### 1.3 光束法平差的并行加速

对公式(4)直接求解的计算量仍然较大,主要是由于 Jacobian 矩阵的维度较高。Jacobian 矩阵需要计算所有匹配特征点误差的梯度,所以当扫描行图像数量较多时,Jacobian 矩阵的维度也会随着匹配特征点数量线性增加。对 Jacobian 矩阵的计算可以利用平差算法中 Jacobian 矩阵的稀疏性进行加速。Jacobian 矩阵的稀疏性是由于投影矩阵之间的不相关性。Jacobian 矩阵定义为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial Q_0} & \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial Q_M} \\ \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial Q_M} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \varepsilon_M}{\partial Q_0} & \frac{\partial \varepsilon_M}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_M}{\partial Q_M} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_j, j \in [0, M]$  为图像  $j$  和  $k = \text{mod}(j+1, M)$  之间的特征配准误差,即  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_M)^T$ 。由于  $\varepsilon_j$  只与参数  $Q_j$  和  $Q_k$  有关,所以公式(5)简化为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial Q_0} & \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial Q_1} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial Q_1} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \varepsilon_M}{\partial Q_0} & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial \varepsilon_M}{\partial Q_M} \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用 Jacobian 矩阵的稀疏性,可以简化 Jacobian 矩阵的运算。由于 Jacobian 矩阵中不同偏导因子的计算相互独立,所以可以利用 GPGPU 进行并行计算。

如图 2 所示,对 Jacobian 矩阵的加速计算利用 nvidia 的 CUDA 架构实现,图中  $F_{ij}$  代表图像  $i$  和图

像  $j$  之间所有匹配特征点的集合。利用 CUDA 中线程块 Block 的并行执行来分别计算 Jacobian 矩阵中的不同偏导因子,同时利用 Block 内的线程来分别计算不同特征点的射线投影误差。

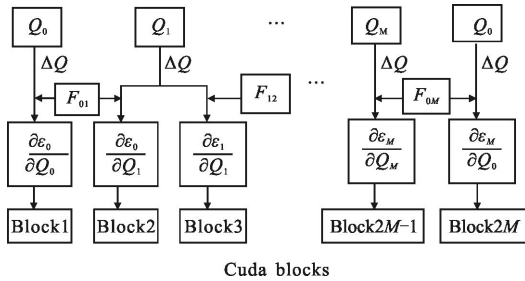


图 2 CUDA 加速 Jacobian 矩阵计算

Fig.2 CUDA accelerated Jacobian matrix computing

## 2 光束法平差验证

为了验证该光束法平差算法在画幅扫描红外成像实时拼接系统中的性能和速度,利用 Point Grey 公司可见光相机 GX-FW-28S5 模拟热红外探测器在山东威海进行了画幅扫描成像实验,飞行高度为 3 000 m,空间分辨率为 0.17 m,并利用实验图像进行了平差算法的性能验证。GPGPU 选用 nvidia 公司的 Tesla C2050,有 448 个 CUDA 核心和 2.5 G 显存。扫描行图像选取  $M=8$ 。验证步骤如下:

- (1) 利用传统光束法平差算法得到初始的拼接图像,作为基准图像 0;
- (2) 利用 SIFT 点特征算子从新加入的 8 幅图像中提取图像点特征信息;
- (3) 利用 RANSAC 算法按顺序消除最新图像和前一图像间的特征误匹配并得到图像的空间姿态;
- (4) 统计相邻扫描行图像间的特征匹配误差,即图像  $I_{N,i}$  和  $I_{N-1,i}$  的匹配误差,  $i \in [0, M-1]$ ;
- (5) 利用提出的光束法平差策略对 16 幅图像的空间姿态进行平差,最小化射线误差;
- (6) 同步骤(4),统计相邻扫描行图像间的特征匹配误差。

选用 3 组图像,每组包含两行相邻的扫描行图像。通过对最新扫描行内的图像与前一扫描行的配准误差来对简化的平差算法性能进行验证,平差前后的配准误差如图 3 所示。

图 3 横坐标代表了最新扫描行的图像序号,纵坐标代表了图像与前一扫描行间的配准误差,且对

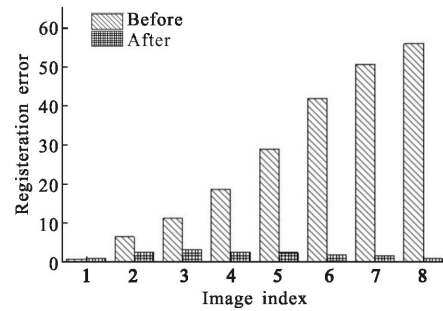


图 3 平差前后的图像配准误差

Fig.3 Registration error before and after bundle adjustment

所有特征点的配准误差取平均。配准误差采用射线误差的均方根值,无量纲。从图 3 中可以看出:平差前的图像由于误差累积与前一扫描行的误差越来越大,而经过平差后配准误差降低到较低的水平。

统计 3 组图像的配准误差随迭代次数变化的结果,如图 4 所示。

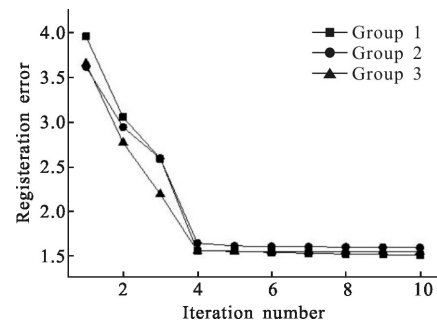


图 4 配准误差随迭代次数变化

Fig.4 Registration errors change with iter times

图 4 中纵坐标表示全局配准误差,是相邻行间所有图像的配准误差和,采用以 10 为底的对数表示,横坐标表示光束法平差的迭代次数。可以看出:配准误差随着平差迭代先快速下降,然后缓慢收敛。初始迭代时,由于存在行间错位,配准误差较大,所以迭代步长较大,配准误差下降较快。随着配准误差的降低,迭代步长减小,全局配准误差缓慢收敛到全局最优。

对 3 组扫描拼接图像的平差算法性能的统计结果见表 1。配准误差的衡量采用射线误差的均方根值,且对所有特征点的配准误差求和。

从表 1 中可以看出:在光束法平差前全局配准误差较大,在经过 10 次平差迭代后,配准误差得到很大改善。同时光束法平差的运算时间平均每幅图像为 28.6 ms,能很好地完成快速配准的工作,对于

画幅扫描成像的实时拼接系统具有重要的作用。

表 1 光束法平差的统计量

Tab.1 Statistic of bundle adjustment

Image number	Points number	Initial error	Final error	Iter number	Iter time /ms
8	1 471	6 965.51	32.57	10	268
8	1 509	4 108.4	39.54	10	216
8	1 313	4 471.1	35.59	10	202

利用光束法平差调整前和调整后的配准图像如图 5 所示。



图 5 平差前后的配准图像

Fig.5 Stitching image before and after bundle adjustment

从图 5 可以看到:光束法平差前扫描行图像在首尾位置上畸变较大,同时第二行图像也存在明显的错位。而通过平差后的相邻扫描行图像能获得更好的拼接效果。

由于红外图像对比度低、灰度范围窄、噪声多和图像模糊等特点,为了验证平差算法对红外图像的有效性,采用大立科技 D780 热红外成像仪在二维转台上获取了地面热红外图像并进行了拼接。扫描行图像数  $M=8$ ,拼接结果如图 6 所示。



图 6 热红外图像拼接结果

Fig.6 Stitching result of thermal infrared images

可以看到:光束法平差对于画幅扫描热红外图像仍然能较好地完成图像的全局配准,实现较好的拼接效果。

### 3 结束语

文中针对光束法平差在画幅扫描红外成像实时

拼接中的应用,提出一种优化的光束法平差策略。利用扫描行间的首尾配准,降低了误差累积导致的错位和畸变对拼接图像的影响。利用优化的平差算法,能够将新扫描行图像准确配准到已拼接图像上,并完成拼接图像的不断更新。同时针对该光束法平差的结构,进行了算法分解和并行加速,提高了算法的实时性。通过对画幅扫描图像的配准实验,验证了光束法平差算法对于扫描行间拼接的性能,实现了扫描成像的快速配准和拼接。文中的研究成果对于基于画幅扫描成像的大视场高分辨率红外观测技术的发展具有较好的推动作用。

### 参考文献:

- [1] Triggs B, McLauchlan P F, Hartley R I, et al. Bundle Adjustment—A Modern Synthesis [M]. Heidelberg: Springer, 2000: 298–372.
- [2] Shi Yi, Liu Changjie, Guo Yin, et al. Measurement system of geometric parameters for overhead line system based on binocular vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1936–1942. (in Chinese)  
石轶, 刘常杰, 郭寅, 等. 基于双目视觉的接触网几何参数测量系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1936–1942.
- [3] Liu Chun, Li Weiyue, Lei Weigang, et al. Strict mosaic of UAV images based on free network bundle adjustment [J]. *Journal of Tongji University(Nature Science)*, 2012, 40(5): 757–762. (in Chinese)  
刘春, 李巍岳, 雷伟刚, 等. 基于光束法自由网平差的无人机影像严格拼接 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2012, 40(5): 757–762.
- [4] Lu Heng, Li Yongshu, He Jing, et al. A automatic mosaic method in unmanned aerial vehicle images based on feature points [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, 26(5): 16–19. (in Chinese)  
鲁恒, 李永树, 何敬, 等. 一种基于特征点的无人机影像自动拼接方法 [J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(5): 16–19.
- [5] Xu Bin, Li Yingcheng, Liu Xiaolong, et al. The application of bundle block adjustment with constraint conditions in platform calibration of four-head aerial digital camera [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(1): 66–73. (in Chinese)  
徐斌, 李英成, 刘晓龙, 等. 附加约束条件的光束法区域网平差在四拼数码相机航空相机平台检校中的应用 [J]. 测绘学

报, 2014, 43(1): 66-73.

Springer, 2001: 227-268.

[6] Shum H Y, Szeliski R. Construction of Panoramic Image Mosaics with Global and Local Alignment [M]. New York:

[7] Moré J J. The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory[M]. Heidelberg: Springer, 1978: 105-116.

### 下期推荐

## 曲靖非相干散射雷达探测空间碎片初步成果

金 旺<sup>1,2,3</sup>, 刘拥军<sup>1,2</sup>, 孙明国<sup>3</sup>, 吴 健<sup>1,2</sup>

(1. 中国电波传播研究所昆明站, 云南 曲靖 655333; 2. 电波环境特性及模化技术国家重点实验室, 云南 曲靖 655333; 3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

**摘要:** 在介绍曲靖非相干散射雷达的基本情况和工作参量的基础上, 给出了雷达探测空间碎片的灵敏度, 报道了 2014 年 11 月 18 日空间碎片探测的实验结果, 与理论轨道计算值比较, 目标的距离值有很好的 consistency, 确认了 7 个编目碎片, 证实了利用曲靖非相干散射雷达开展空间碎片探测的可行性。经过进一步的技术革新, 曲靖非相干散射雷达有望观测直径为 5 cm 左右的空间碎片, 并通过组网等技术手段进一步扩充空间碎片和其他自然天体目标的跟踪能力。