

# 面阵摆扫热红外航空影像分步几何校正方法

李 赛<sup>1,2,3</sup>, 胡 勇<sup>1,2\*</sup>, 巩彩兰<sup>1,2</sup>, 宋文韬<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对航空面阵摆扫数据无控制点几何校正问题, 提出了一种基于 POS 数据的面阵摆扫热红外影像的分步几何校正方法, 主要包括利用视矢量法对影像校正、投影至高斯地辅平面进行拼接、及提取虚拟控制点三个步骤。利用最小二乘法对全局影像进行第二次几何精校正, 实现研究区热红外图像几何校正。实验图像验证了该校正算法的有效性, 平面两点距离相对误差为 0.81%, 平面两点方位角相对误差为 0.72%, 相较于直接利用 POS 校正误差有显著改善。该研究方法可推广应用于其它面阵摆扫无地面控制点的航飞图像几何校正。

**关键词:** 航空摄影测量; 几何校正; 视矢量; 面阵摆扫

中图分类号: P237 文献标识码: A

## A step-by-step geometric correction and error analysis of swing-swept array thermal infrared aerial image

LI Sai<sup>1,2,3</sup>, HU Yong<sup>1,2\*</sup>, GONG Cai-Lan<sup>1,2</sup>, SONG Wen-Tao<sup>1,2,3</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of no control point geometric correction for plane array swabbing data, a step by step geometric correction method for plane array swabbing thermal infrared image based on POS data is proposed. The main steps include image correction using the visual vector method, projection to Gaussian auxiliary plane for splicing and virtual control points are extracted. The second geometric precision correction of the global image is carried out by using the least square method to realize the geometric correction of the thermal infrared image in the research area. The validity of the proposed algorithm is verified by obtaining experimental images, the relative error of the distance between two points in the plane is 0.81%, then the relative error of the azimuth angle of two points in the plane is 0.72%, which is significantly improved in comparison with the direct application of POS correction error. The method can be applied to the geometric correction of flight images without ground control points in other plane array swallows.

**Key words:** aerial photogrammetry, geometric correction, vision vector, swing-swept array

**PACS:**91. 10. Lh

收稿日期: 2019-03-19, 修回日期: 2019-11-29

Received date: 2019-03-19, Revised date: 2019-11-29

基金项目: 青年创新基金项目(GFZX04061502), 上海市水务局科研项目(2018-07)

**Foundation items:** Supported by Major Social Youth Innovation Fund Project (GFZX04061502), Research Project of Shanghai Water Bureau (2018-07)

作者简介(Biography): 李赛(1991-), 男, 山东临沂人, 博士研究生. 主要研究领域为遥感数字图像处理、计算机视觉. E-mail: 814100090@qq.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: huyong@mail.sitp.ac.cn

## 引言

随着科学进步与信息化的快速发展,采用航空平台搭载数码设备获得低空高分辨率图像的技术日益成熟。GPS和IMU单元的进步以及小型飞行器的成功设计,使具有多种能力的航空系统成为可能,比如航空机载热成像的技术已经被应用于环境热辐射监测、灾害预警和海事救援等领域<sup>[1-2]</sup>。然而航空影像视场比较小,无法满足大区域测图的应用需求,尤其红外焦平面探测器受限于器件的规模,使得面阵红外焦平面成像的视场相对比较小,摆扫成像方式对分辨率和成像幅宽同时要求较高的当今具有很大的优势<sup>[3]</sup>。随着面阵摆扫型技术的迅速发展,如何对这种类型的影像数据进行高质量的几何校正和拼接成为影响图像后续应用的一个关键技术问题<sup>[4]</sup>。

传统的摄影测量工作模式主要是采用“航空摄影-外业地面控制点-空三加密-内业成图”的模式,这种模式严重依赖控制点而且需要投入大量的人力物力成本。随着定位和惯导技术的发展,使无地面控制点进行数字正射影像制作成为可能。现阶段无人机影像几何校正的主要方法是利用POS提供的位置参数和姿态数据,经过转换后得到影像的外方位元素,基于共线方程法得到像点和物点的转换矩阵,然后通过少量地面控制点对影像进行校正。为了减小对控制点的依赖,一些学者研究了针对无控制点的航空影像的几何校正模型<sup>[5-6]</sup>,这些方法均基于无人机飞行姿态的影像校正,存在的不足是因为地球曲率的影响而带来误差。一些学者研究了基于卫星影像的无地面控制点区域网平差模型,并且取得了一定的成果<sup>[7-8]</sup>。

针对摆扫面阵热红外影像随着摆扫角度增大定位误差越来越大,基于卫星影像的无控制点几何校正方法不适用于本研究数据等问题。本文主要对摆扫热红外航空影像几何校正方法进行了重点研究,并采用无人机影像数据拼接进行验证。先引入地球椭球模型对每一帧影像进行校正,然后利用拼接算法对大区域进行拼接,再提取虚拟控制点,利用最小二乘法对全局影像进行第二次几何精校正。

## 1 摆扫面阵航空成像几何校正问题分析

### 1.1 成像原理和飞行参数

采用中国科学院上海技术物理研究所自研面

阵红外探测器对研究区进行双程摆扫,探测器为非制冷红外焦平面探测器。如图1所示为系统光学结构示意图,画幅式相机水平安装于横滚环架上,通过45°反射镜实现高分辨率对地成像;横滚环架可以绕横滚轴转动,带动面阵相机沿翼展方向扫描实现大视场成像<sup>[9]</sup>。

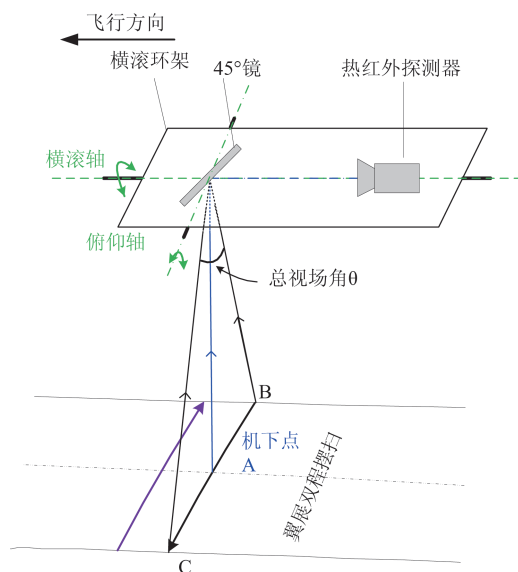


图1 系统光学结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical structure system

如图2所示,单航带6幅影像,借助飞行方向图像运动补偿,使每个扫描周期的图像垂直于飞行方向,而不是楼梯形状,便于后续镶嵌的过程。

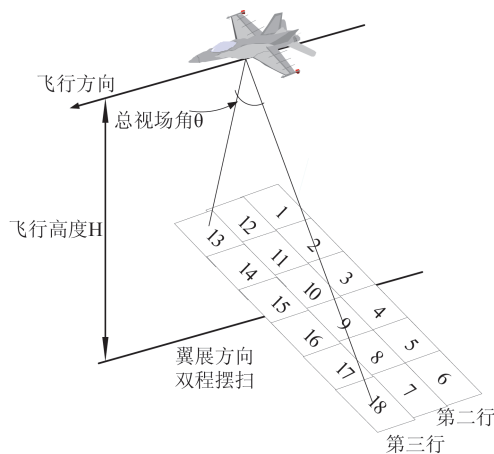


图2 翼展双程摆扫成像原理

Fig. 2 UAV bi-directional whiskbroom scanning system

摆扫热红外相机参数如表1所示,飞行试验区预设的影像航向和旁向重叠30%~40%左右,平均航高大致为1 300 m,六个摆扫角度的设计度数分别

为 $-30^\circ, -18^\circ, -6^\circ, 30^\circ, 18^\circ, 6^\circ$ 。

表1 摆扫热红外相机参数

Table 1 whiskbroom scanning thermal infrared camera parameters

序号	项目	参数
1	焦距	41 mm
2	角分辨率	0.4 mrad
3	面阵规模	640×480
4	摆扫一行拍摄张数	6

## 1.2 摆扫成像几何校正问题

### 1.2.1 像元比例尺不一致问题

在摆扫的过程中,成像的摆扫视角是发生变化的,每个影像内部的像素对应的地面实际大小都有差异,飞行方向和翼展方向的比例尺不一致。计算实际飞行高度在1300 m摆扫 $-30^\circ$ 情况下翼展方向点号空间分辨率,可以看到翼展方向点号每个分辨率都不同,这就对重采样方法提出要求。

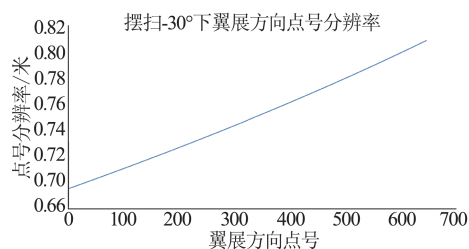


图3 摆扫 $-30^\circ$ 情况下翼展方向点号空间分辨率

Fig. 3 Wingspan direction point spatial resolution in  $-30^\circ$  whiskbroom scanning

### 1.2.2 摆扫角度对定位影响

由于受到系统误差等影响,同名像点并不能得到相同物方坐标,所以影像之间的拼接需要解决坐标不匹配的问题。利用蒙特卡洛法对六个摆扫角度分析对地目标定位的误差。相机位置信息、姿态角和IMU坐标轴与传感器坐标轴旋转偏角以及测量误差如表2所示。

分别对六个角度的主光轴目标进行定位,每个角度取次数 $N=1000$ ,通过蒙特卡洛算法对结果进行仿真分析。利用本文无人机影像定位模型进行定位,如图4所示可以看到六个摆扫角度主光轴目标定位仿真结果,可以看到摆扫角度变大时标准差也会变大,表明无控制点条件下随着摆扫角度的增大,定位误差就会变大。

六个摆扫角度误差对比如表3所示,可以看到

表2 POS仿真实验数据

Table 2 POS simulation experimental data

误差变量	标准差
经度/ $^\circ$	0.00001
纬度/ $^\circ$	0.00001
高度/m	1
横滚角/ $^\circ$	0.001
俯仰角/ $^\circ$	0.001
偏航角/ $^\circ$	0.001
IMU与传感器坐标轴误差/ $^\circ$	0.0001

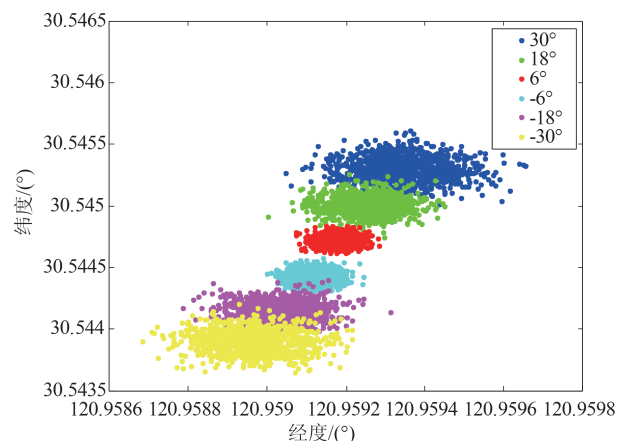


图4 六个摆扫角度主光轴目标定位仿真结果

Fig. 4 Positioning simulation results of six angles

当摆扫角度为正负 $30^\circ$ 时,定位误差在14 m左右,摆扫角度为正负 $18^\circ$ 时,定位误差为11 m左右,当摆扫角度为正负 $6^\circ$ 时,定位误差为6 m左右。

对所有摆扫角度进行了仿真计算。图5为经纬度方向 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 定位误差仿真结果,可以看到随着摆扫角度的增大定位误差越来越大,标准差也越来越大,摆扫角度在 $50^\circ$ 前,误差急剧上升,摆扫角度在 $50^\circ$ 后,误差上升趋于平缓,但是更易受系统误差因素的影响。

## 2 摆扫热红外影像无控制点几何校正模型

针对上面比例尺不一致和摆扫角度对定位精度影响问题,提出完整的无控制点几何校正模型。在区域平面化变形误差可以接受的前提下,首先构建基于光矢量的成像模型,计算视矢量与地球椭球的交点来确定物点在WGS84坐标系下的经纬度,然后根据机下点空间分辨率利用反解法重采样至等经度等纬度格网,通过这种网格规格化方法解决比例尺不一致的问题,然后投影至高斯克吕格平面进行拼接,因为没有实地控制点,提出角点法提取虚拟控制点,利用最小二乘法对全局影像进行第二次

表 3 六个摆扫角度误差对比

Table 3 Comparison of errors of six swing sweeps

角度/(°)	经度实测值 l(°)	经度标准差 l(°)	纬度实测值 l(°)	纬度标准差 l(°)	综合标准差/m
30	120.959344	0.000091	30.545302	0.000092	14.23
18	120.959255	0.000068	30.545011	0.000071	10.81
6	120.959177	0.000033	30.545011	0.000042	5.87
-6	120.959111	0.000037	30.544433	0.000045	6.41
-18	120.959033	0.000072	30.544144	0.000077	11.59
-30	120.958966	0.000088	30.543902	0.000093	14.08

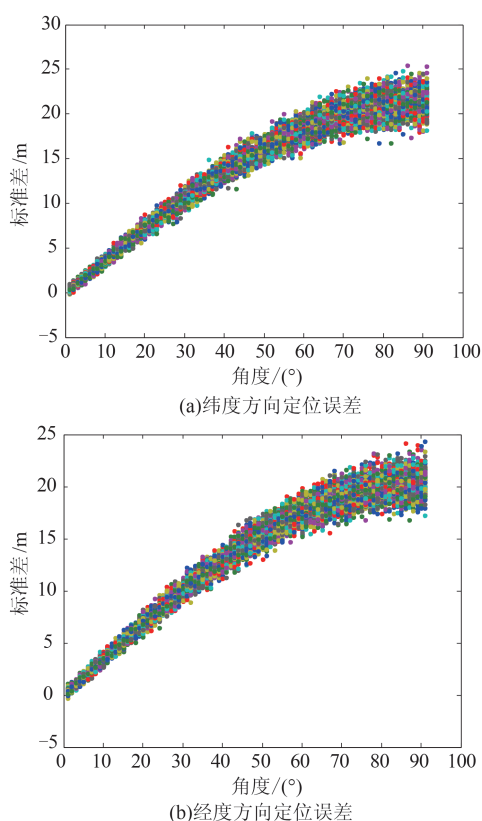


图 5 经纬度方向 0°到 90°定位误差仿真结果 (a) 纬度方向定位误差, (b) 经度方向定位误差

Fig. 5 Simulation results of positioning error from 0 to 90 degrees (a) latitude orientation error, (b) longitude orientation error

几何精校正, 得到最终摆扫热红外研究区大区域影像。

### 2.1 基于视矢量的成像模型

首先需要相机标定确定了内方位元素从而计算像空间坐标系下的视矢量。对于像平面上的任意一个像元, 像元尺寸为  $b$ , 焦距为  $f$ , 像元个数为  $M \times N$ , 目标在焦平面上的投影点在  $(i, j)$  像元内。经过此像元的视线  $\bar{A}_i$  在像空间坐标系下为:

$$\bar{A}_i = [b \times (i - \frac{M}{2} + 1) - b \times (j - \frac{N}{2} + 1) - f]^T. \quad (1)$$

建立基于视矢量的严格影像校正模型。如图 5 所示, 实现视线从像方坐标系到地辅坐标系的变换, 是后续所有步骤的基础。

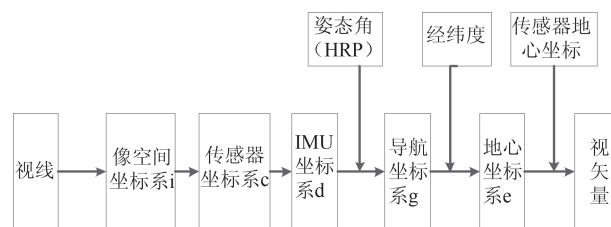


图 6 视矢量严格影像校正模型

Fig. 6 Visual vector rigorous image correction model

相机在地心坐标系下的坐标  $(x_e, y_e, z_e)$  可以通过 POS 记录的经纬高  $(lon, lat, h)$  获得, 它们的转换关系为:

$$x_e = (N + h) \cos(lat) \cos(lon) \quad , \quad (2)$$

$$y_e = (N + h) \cos(lat) \sin(lon) \quad , \quad (3)$$

$$z_e = (N(1 - e)^2 + h) \sin(lon) \quad , \quad (4)$$

$$N = R_a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2(lat)} \quad , \quad (5)$$

其中  $N$  为椭球的卯酉圈曲率半径,  $e$  是椭球体的第一偏心率。

所以视矢量  $R_e$  可以表示为:

$$\begin{bmatrix} R_{e_x} \\ R_{e_y} \\ R_{e_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} + \lambda T_g^e T_d^g T_c^d T_i^e \bar{A}_i \quad , \quad (6)$$

式中  $\lambda$  是比例系数,  $T_i^e$  是像空间坐标系和传感器坐标系的旋转矩阵,  $T_c^d$  为传感器坐标系和 IMU 坐标系的安装矩阵,  $T_d^g$  是 IMU 坐标系和导航坐标系的旋转关系矩阵,  $T_g^e$  为导航坐标系和地心坐标系的旋转矩阵。然后根据视矢量和地球的椭球体方程联立求解, 得到目标在地心坐标系下的坐标, 然后就可以获得精确的地物目标的经纬度坐标。



### 2.2 无控制点几何校正模型

由于会有系统误差的影响,纯利用POS数据进行拼接会有明显的拼接缝,对影像进行几何校正后必须用到拼接算法进行拼接,针对摆扫成像几何校正的问题,本文提出一种无控制点几何校正模型。首先根据2.1的视矢量严格成像模型确定物点在WGS84坐标系下的经纬度,根据机下点空间分辨率利用反解法重采样至等经度等纬度格网,然后投影至高斯克吕格辅助平面进行拼接。为了对拼接后的影像重新定位,对整个研究区域选取虚拟控制点,因为根据前面仿真结果摆扫角度越大误差越大,所以摆扫角度大的影像选取两个角点做虚拟控制点,摆扫角度小的影像选取四个角点做虚拟控制点,虚拟控制点基于POS计算的地辅坐标系中点坐标 $(x_m, y_m)$ 和在拼接后影像的坐标 $(x_p, y_p)$ 都可以得到。最小二乘法是摄影测量平差理论的核心思想,利用最小二乘法求 $(x_p, y_p)$ 到 $(x_m, y_m)$ 的旋转矩阵进行精校正,实现最终高精度大区域摆扫热红外影像,具体流程如图7所示。

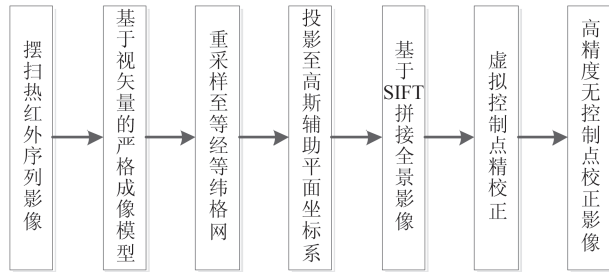


图7 无控制点几何校正流程

Fig. 7 No control point geometric correction process

校正后的每帧影像投影到辅助坐标系进行拼接,采用反解法重采样至等经等纬格网,然后投影至高斯克吕格辅助平面进行拼接,影像拼接是无人机影像应用的关键技术。目前,基于特征点的拼接算法是研究热点。Harris、SIFT、SURF、ORB等算法应用比较广泛<sup>[10]</sup>,SIFT<sup>[11]</sup>算法被广泛应用于无人机影像的拼接中。本文基于SIFT特征点匹配算法进行拼接,为了满足无控制图需求,必须通过区域网平差进行处理<sup>[12-18]</sup>,本文拼接阶段采用光束法平差,最终得到拼接后的大区域平面影像,可以有效避免影像错位的问题。

### 2.3 基于最小二乘的全局影像精校正模型

#### 2.3.1 RPC模型

RPC(Rational Polunomial Coefficients)模型也就

是有理函数改正模型(Rational Function Model-RFM),正则化的图像点坐标 $(X_r, Y_r)$ 表示为对应地面点坐标 $(X, Y, Z)$ 的函数。如式(7)与式(8)所示:

$$X_r = \frac{\text{Num}_L(X, Y, Z)}{\text{Den}_L(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 P_{ai,j,k} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 P_{bi,j,k} X_n^i Y_n^j Z_n^k}, \quad (7)$$

$$Y_r = \frac{\text{Num}_S(X, Y, Z)}{\text{Den}_S(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 P_{ci,j,k} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 P_{di,j,k} X_n^i Y_n^j Z_n^k}, \quad (8)$$

其中  $P_{ai,j,k}$ 、 $P_{bi,j,k}$ 、 $P_{ci,j,k}$ 、 $P_{di,j,k}$  ( $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3$ )为模型的有理多项式参数。正则化和非正则化的坐标关系如式(9)和式(10)所示:

$$X_r = \frac{l - l_1}{l_s}, Y_r = \frac{s - s_1}{s_s}, \quad (9)$$

$$X = \frac{P - P_1}{P_s}, Y = \frac{L - L_1}{L_s}, Z = \frac{H - H_1}{H_s}, \quad (10)$$

其中 $(l_1, s_1)$ 为图像点坐标的质心参数, $(l_s, s_s)$ 是图像点坐标的归一化参数, $(P_1, L_1, H_1)$ 是大地坐标的质心参数, $(P_s, L_s, H_s)$ 是大地坐标的归一化参数。

#### 2.3.2 基于虚拟控制点的平差模型

提取虚拟控制点控制区域网自由度来改善平差模型。对整个研究区域选取虚拟控制点,因为根据前面仿真结果摆扫角度越大误差越大,所以摆扫角度最大的影像选取两个角点做虚拟控制点,摆扫角度小的影像选取四个角点做虚拟控制点,每一幅影像的四个角点 $p_1, p_2, p_3, p_4$ ,通过视矢量法得到物方点坐标 $P_1, P_2, P_3, P_4$ ,构成虚拟控制点,如图8所示。

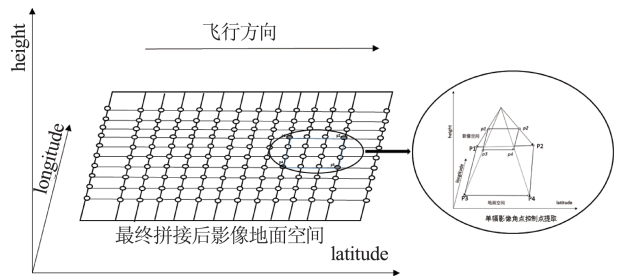


图8 虚拟控制点的提取

Fig. 8 Extraction of virtual control points

全部连接点图像点和虚拟控制点图像点构成的误差方程组以矩阵的形式写出,如式(11)与式(12)所示:

$$V_{vc} = A_{vc}x - K_{vc} P_{vc} \quad (11)$$

$$V_{tp} = A_{tp}x + B_{tp}t - K_{tp} P_{tp} \quad (12)$$

其中式(11)是由虚拟控制点图像点构成的观测误差方程矩阵,式(12)是连接点图像点构建的误差方程矩阵。 $A$ 和 $B$ 分别是相应未知数的偏导系数矩阵, $K$ 和 $P$ 分别是对应常向量和权重矩阵。 $x$ 和 $t$ 是平差待求参数。将两个误差方程合并,如式(13)所示:

$$V = Ax + Bt - K P \quad (13)$$

$$\text{式中, } V = \begin{bmatrix} V_{vc} \\ V_{tp} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} A_{vc} \\ A_{tp} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{tp} \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} K_{vc} \\ K_{tp} \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_{vc} & 0 \\ 0 & P_{tp} \end{bmatrix} \circ$$

### 2.3.3 最小二乘法平差求解

依据最小二乘法的原理,对误差方程(13)进行法化,可得到法方程如式(14)所示:

$$\begin{bmatrix} A^T P A & A^T P B \\ B^T P A & B^T P B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P K \\ B^T P K \end{bmatrix} \quad (14)$$

首先消掉连接点物方坐标这些待求的参数,得到需要求解参数 $x$ 的方程,如式(15)所示:

$$x = N^{-1} M \quad (15)$$

式中,  $N = A^T P A - A^T P B (B^T P B)^{-1} B^T P A$ ,  $M = A^T P K - A^T P B (B^T P B)^{-1} B^T P K$ 。在迭代中当区域网平差结果小于限差时迭代完成,然后利用初始RPC模型和已经求得的附加模型参数 $x$ 逐点计算物方坐标。

## 3 试验与分析

本文利用双程摆扫面阵红外成像仪(30万像素)对浙江海盐县一区域进行影像的获取,获取时间为2016年春,成像高度为1300m,影像航向重叠度和旁向重叠度不低于30%。实验针对红外影像无控制点几何校正精度进行分析。

### 3.1 严格视矢量成像模型定位结果

首先对严格视矢量成像模型定位误差进行分析,选取连续12幅不同摆扫角度的影像,对比Google地图经纬度获取影像的平均中误差。结果在经度方向上误差为7.571m,纬度方向上误差8.280m,在无控制点的情况下几何定位误差11.223m,如表4所示。

通过上述结果可以看出摆扫角度大的影像定位中误差较大,符合上面仿真分析结果,从图9可以直观的摆扫影像定位误差随着摆扫角度的变化而变化,误差变化基本符合规律,两个航带相同摆扫

表4 摆扫影像定位误差结果

Table 4 positioning error results of swing scan images

摆扫角度/(°)	经度方向中误差/m	纬度方向中误差/m	联合中误差/m
29.5957	8.24	9.89	12.873
17.7925	6.84	7.36	10.048
5.9379	5.92	6.21	8.580
-5.9460	6.24	6.82	9.244
-17.7798	7.96	8.09	11.349
-29.5961	8.17	8.74	11.964
-29.6422	8.41	10.09	13.135
-17.7875	8.04	8.13	11.433
-5.9058	7.75	8.52	11.517
5.9414	6.82	7.81	10.368
17.7509	8.13	8.83	12.003
29.6149	8.33	8.86	12.161
平均	7.571	8.280	11.223

角度中误差不同,因为相邻两个航带摆扫方向不同,说明此数据有双程扫描误差,后续需要具体研究改正双程扫描误差的影响。

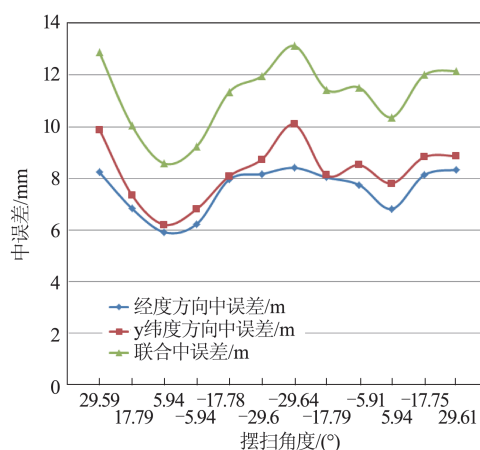


图9 摆扫影像定位误差直观图

Fig. 9 Diagram of positioning error results

图10为利用视矢量法对一个航带六幅影像进行校正,然后重采样至等经等纬网格后的结果。

### 3.2 无控制点几何校正反演结果

利用最小二乘法求解拼接后图像点到虚拟控制点的旋转矩阵。经过计算,拼接后图像到精校正图像旋转矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} 0.9829 & -0.3485 & -1.6531 \times 10^{-6} \\ 0.3336 & 1.0256 & -1.5297 \times 10^{-6} \\ 1.0054 & 7.2442 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

图11分别为利用本文方法对实验图像进行校正拼接、根据地理坐标贴图到google earth结果图和

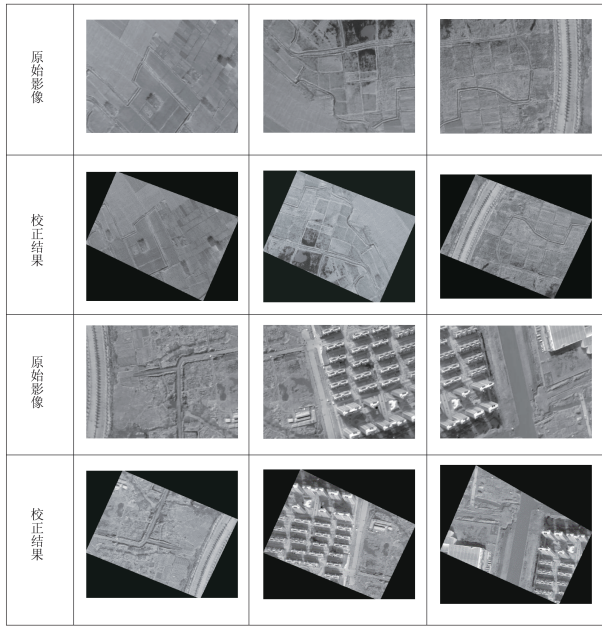


图10 视矢量法几何校正结果  
Fig. 10 Geometric correction results of visual vector method

通过对相机温度定标,反演后的研究区摆扫热红外温度图。

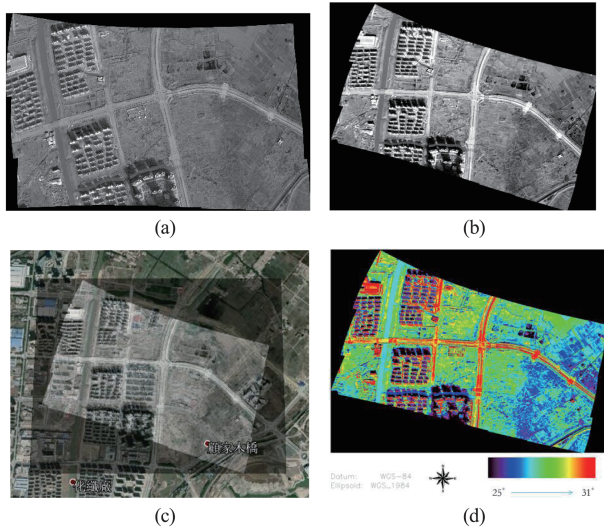


图11 摆扫热红外拼接和温度反演图(a)研究区拼接后结果图,(b)研究区拼接后精校正结果,(c)贴图到 google earth 结果图,(d)摆扫热红外温度图  
Fig. 11 Infrared mosaic and temperature inversion diagram (a) the result of the study area after Mosaic, (b) correction result after Mosaic, (c) map to Google earth result, (d) infrared temperature inversion diagram

因为没有实地控制点,所以选用本文方法拼接后,平面内相对位置需要利用 Google earth 选择控制点来计算拼接后影像中两点的相对距离和相对角

度。在地图上选了8个点,如图12所示,其中3个点位于摆扫角度最大的区域内,3个点位于摆扫角度第二大的区域内,2个点位于摆扫角度最小的区域内。分别计算8个点点对的相对距离误差和相对角度误差,并和POS直接校正结果对比。距离和角度相对误差计算如式17所示。

$$\delta = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad , \quad (17)$$

式中 $\delta$ 为距离和角度相对误差, $x$ 为本文结果图像的控制点对的实际测量距离和角度, $x_0$ 为 google earth 中测量的实际距离和角度。

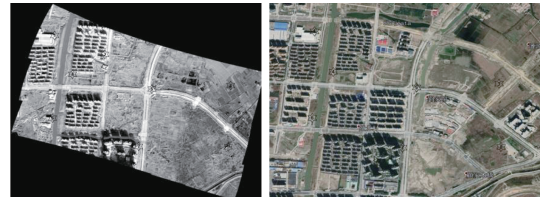


图12 8个控制点在结果图像和 google earth 的位置  
Fig. 12 The 8 control points in the result image and Google earth

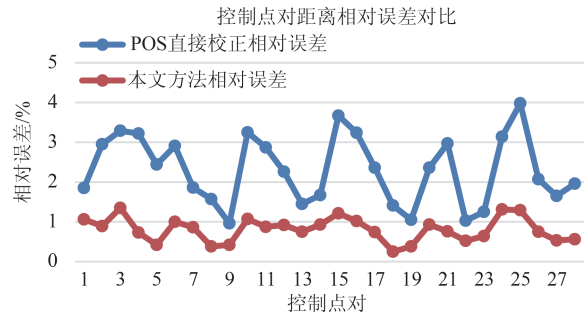


图13 控制点对距离相对误差对比  
Fig. 13 Comparison of distance relative errors of control point pairs

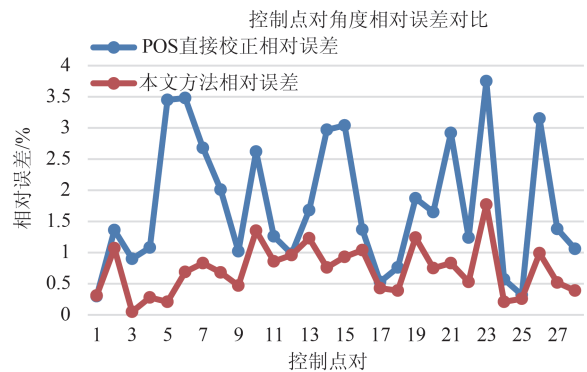


图14 控制点对的角度相对误差对比  
Fig. 14 Comparison of angular relative errors of control point pairs



如图 13-14 所示,利用本文方法拼接后和根据 POS 直接利用视矢量法校正结果对比效果明显变好。利用 POS 直接校正距离相对误差为 2.31%,本文方法平面两点距离相对误差为 0.81%,利用 POS 直接校正角度相对误差为 1.76%,本文方法平面两点角度相对误差为 0.72%。根据点对组合所在摆扫角度大、中、小的区域,计算点对距离相对误差和角度相对误差。如图 15 所示,在不同摆扫角度,控制点对的距离相对误差和角度相对误差基本都在 1% 以下,虽然精度和摆扫角度还有一定关系,但是经过本文方法处理后,一定程度上降低了摆扫角度对精度的影响。

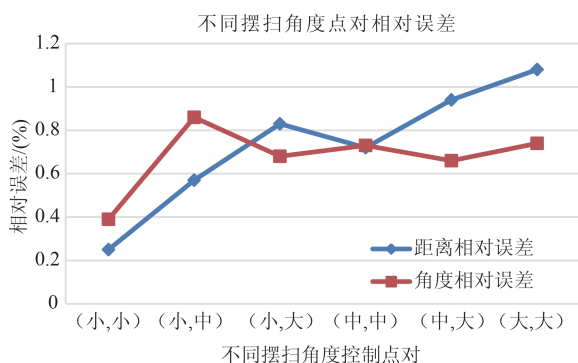


图 15 不同摆扫角度点对相对误差

Fig. 15 Relative errors of different swing-angle pairs

## 4 结论

针对航空面阵摆扫无控制点数据几何校正问题,提出了一种基于 POS 数据的面向摆扫面阵热红外影像分步几何校正方法,得出以下结论。

1) 通过仿真分析结果表明随着摆扫角度的增大定位误差越来越大,摆扫角度在  $50^\circ$  前,误差急剧上升,摆扫角度在  $50^\circ$  后,误差上升趋于平缓,但是更容易受系统误差的影响。

2) 要得到精确的研究区全景影像,只利用 POS 数据误差很大,必须和拼接算法相结合,才能达到满意的效果。

3) 通过本文分步几何校正方法,得到平面两点距离相对误差为 0.81%,平面两点方位角相对误差为 0.72%,较直接利用 POS 数据校正误差减少明显。

下一步工作针对高程对拼接和定位的影响,将引入研究区域的数字高程信息(DEM),进一步做分析研究。

## References

- [1] Sheng H, Chao H, Coopmans C, *et al.* Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: Platform, calibration and applications [C]. In Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications. Montreal; IEEE, 2010: 38-43.
- [2] LI Xiang-Di, HUANG Ying, ZHANG Pei-Qing, *et al.* Infrared imaging system and applications [J]. *Laser & Infrared* (李相迪, 黄英, 张培晴, 等. 红外成像系统及其应用. *激光与红外*) 2014, **44**(3): 229-230.
- [3] WANG Yi-Kun. Research of wide swath imaging technology based on area-array detector adopting whiskbroom scanning mode [D]. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (王义坤. 面阵摆扫宽幅成像技术研究. 上海技术物理研究所) 2015.
- [4] SONG Yao-Xin. Study on the geometric correction and seamless stitching of array Whiskbroom scanner aerial image [D]. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (宋耀鑫. 面阵摆扫式航空影像几何校正与无缝拼接技术研究. 上海技术物理研究所) 2014.
- [5] LI Zheng. Research on geometric correction of uav remote sensing image without control points [D]. University of Electronic Science and Technology. (李峥. 缺少控制点的无人机遥感影像几何校正技术研究. 电子科技大学) 2010.
- [6] XU Qiu-Hui. A method of geometric correction and mosaic of unmanned aerial vehicle remote sensing image without ground control points. [D] Nanjing University. (徐秋辉. 无控制点的无人机遥感影像几何校正与拼接方法研究. 南京大学) 2013.
- [7] Lei C, Kang L, Wang W. Application of POS technology in fast making DOM from digital aerial images [C]. In Cheng Du. IEEE International Conference on Computer and Communications, 2017: 167-189.
- [8] PI Ying-Dong, YANG Bo, LI Xin. Block-adjustment and accuracy validation for patch-images based on RFM [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. (皮英冬, 杨博, 李欣. 基于有理多项式模型的 GF4 卫星区域影像平差处理方法及精度验证. *测绘学报*) 2016, **45**(12): 1448-1454.
- [9] WANG Yi-Kun, QI Hong-Xing, HAN Gui-Cheng, *et al.* Study on light-small whiskbroom scanning thermal imaging system with area-array detector [J]. *Laser & Infrared* (王义坤, 亓洪兴, 韩贵丞, 等. 轻小型面阵摆扫热红外成像系统研究. *激光与红外*) 2015, **45**(10): 1216-1220.
- [10] CHEN Zhi-Ang, XU Xiao-Gang, Xu Guan-Lei. Research on image mosaic technology [J]. *Computer Science* (陈志昂, 徐晓刚, 徐冠雷. 图像拼接技术研究. *计算机科学*) 2015, **42**(S2): 160-161+182.
- [11] Brown M, Lowe D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features [J]. *International journal of computer vision*, 2007, **74** (1): 59-73.
- [12] GONG Jian-Ya, WANG Mi, YANG Bo. High-precision geometric processing theory and method of high-resolution optical remote sensing satellite imagery without GCP [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. (龚健雅, 王密, 杨博. 高分辨率光学卫星遥感影像高精度无地面控制



- 精确处理的理论与方法. *测绘学报*)2017, **46**(10): 1255-1261.
- [13] Rottensteiner F, Weser T, Lewis A, *et al.* A strip adjustment approach for precise georeferencing of ALOS optical imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(12): 4083-4091.
- [14] LI De-Ren, ZHANG Guo, JIANG Wan-Shou *et al.* SPOT-5 HRS Satellite Imagery Block Adjustment Without GCPS or with Single GCP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. (李德仁, 张过, 江万寿, 等. 缺少控制点的SPOT-5 HRS影像RPC模型区域网平差. *武汉大学学报(信息科学版)*)2006, **31**(5): 377-381.
- [15] ZHENG Mao-Teng, ZHANG Yong-Jun. DEM-aided bundle adjustment with multisource satellite imagery ZY-3 and GF-1 in large areas[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, **6**(13): 880-884.
- [16] CHENG Chun-Quan, DENG Ka-Zhong, SUN Yu-Shan, *et al.* Study of block adjustment for long-strip satellite CCD images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. (程春泉, 邓喀中, 孙钰珊, 等. 长条带卫星线阵影像区域网平差研究. *测绘学报*)2010, **39**(2): 162-168.
- [17] Li C C, Zhang G S, Lei T J, *et al.* Quick image-processing method of UAV without control points data in earthquake disaster area [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, **21**(S3): s523-s528.
- [18] Passini R, Blades A, Jacobsen K. Handling of large block of high resolution space images[J]. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 2005, (36.1).