

# 惯导约束下的高光谱图像行相关几何校正算法

胡海斌<sup>1,2</sup>, 张浩<sup>2</sup>, 李聪<sup>3</sup>, 魏志奇<sup>4</sup>, 阎跃观<sup>3</sup>, 郭新慧<sup>5</sup>

(1. 山西建筑职业技术学院, 太原 030006;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100190;

3. 中国矿业大学, 北京 100083;

4. 北京欧普特科技有限公司, 北京 100016;

5. 山西省遥感中心, 太原 030001)

**摘要:** 搭载于无人机的推扫式高光谱成像仪受气流影响显著, 获取的高光谱图像几何畸变明显, 难以进行后续应用。限于成本、大小和重量等因素的考虑, 无人机搭载 POS (Positioning & Orientation System) 精度相对较低, 采用基于 POS 的传统方法难以消除图像几何畸变。基于此, 本文提出了结合图像行相关和低精度 GPS 惯导数据校正的思路, 首先进行行相关匹配完成图像行之间的相对平移量, 然后经过反算修正 POS 的翻滚角数据, 最后基于更新后的 POS 数据进行几何校正。经过对无人机图像验证, 本文提出的方法充分结合了行相关匹配和 POS 校正的优势, 最大程度消除了几何畸变, 比其他单一方法处理效果更为明显, 对于这种低成本 POS 系统下的线阵无人机行扫描传感器图像的几何校正具有一定推广价值。

关键字: 几何校正; 行相关匹配; POS; 平滑

【中图分类号】P

【文献标识码】A

【文章编号】1009-2307 (20 ) 0 - -

## The line related geometric correction algorithm under the inertial navigation constraint for the hyperspectral image

HU Haibin<sup>1,2</sup>, ZHANG Hao<sup>2</sup>, LI Cong<sup>3</sup>, WEI Zhiqi<sup>4</sup>, YAN Yueguan<sup>3</sup>, GUO Xinhui<sup>5</sup>

(1. Shanxi Architectural College, Taiyuan 030006; 2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; 3. China University of Mining & Technology, Beijing 100083; 4. The Company of Golden Way Scientific, Beijing 100016; 5. Provincial Center for Remote Sensing of Shanxi, Taiyuan 030001)

**Abstract:** Hyperspectral imager that carrying Unmanned Aerial Vehicle significantly affected by the air flow, the line scan characteristics caused significant geometric distortion, so it is difficult to conduct the subsequent remote sensing application without geometric correction. But limited to the cost, size, and weight factors, the precision of current POS which carried by domestic hyperspectral drone platform is low, so it is difficult to eliminate the geometric distortion. Based on this, we put forward the thinking of combining with image line related and low precision GPS to derivative correction, first, conducting the line correlation matching and complete image translation amount of relative position and then use the GPS data to complete the constraint correction, then revising POS data of roll Angle, finally using the updated POS data for geometric correction. After validationing the image of UAV, The proposed method fully combines the advantage of correlation matching and POS correction, eliminates the geometric distortion to the

greatest extent,treatment effect is more apparent than any other single method,it has certain promotion value for this kind of geometric correction to low cost airlines line scan image of linear UAVunderPOSsystem.

**Key words:** geometric correction; line related matching; POS; smoothing

## 0 引言

无人机由于其体积小、重量轻，高空飞行易受风力的影响，飞行姿态不及有人驾驶飞机平稳，导致影像扭曲变形比较大<sup>[1-2]</sup>。无人机图像成像包括两类：一类是框幅式成像，一类是线阵推扫成像。第一类框幅式形成的图像内部几乎没有相对畸变，主要考虑图像的绝对位置校正和不同图像间的拼接即可，针对这种图像的几何校正过去常采用两种方法：一是利用数量充足且均匀分布的地面控制点，采用多项式拟合校正，二是使用大比例尺地形图作为底图，通过同名点配准校正。这两种几何校正方法的不足之处在于工作量很大，对于无人机获取的缺少控制点的很多图像校正来说并不适用，针对这种情况，有学者研究开展了基于飞行姿态变化的无人机遥感图像几何校正模型研究，对缺少控制点条件下的无人机遥感图像几何校正具有很大意义，大大提高了无人机框幅式图像的几何校正效率。第二类线阵推扫形成的图像往往畸变严重，加之无人机姿态稳定性差，不同扫描行之间错位严重，不进行几何校正往往无法进行后续进一步处理。随着导航定位技术的发展，POS 系统逐步应用到航空图像获取中。POS 系统可以在传感器成像过程中实时测量其位置和姿态，无需对地面控制点进行空三加密就可以获得较高精度的影像内外方位元素<sup>[3,4]</sup>。张浩等人基于 POS 系统对线阵高光谱图像几何校正提出的直接法和间接法两种快速处理思路<sup>[14]</sup>，对于高精度 POS 系统支持下的线阵航空图像能够实现快速几何校正。

对有人机而言，由于飞行高度较高、姿态相对稳定，往往还搭载了数据采集频率高于成像载荷的 POS 系统，从而能够基于共线方程的方法完全实现线阵航空图像的几何校正。而无人机高光谱成像系统基于成本和重量考虑，一般无法搭载较高精度和较高采样频率的 POS 系统，直接借用有人机条件下的线阵航空图像几何校正算法无法达到预期效果，特别是图像扫描行会造成严重错位以及“毛刺”现象无法消除，从而极大影响了低成本无人机高光谱图像的应用价值。针对以上情况，本文从图像相邻行之间的相关性出发，提出了根据行相关匹配的思路来降低不同扫描行之间的严重错位，并结合 POS 数据的翻滚角进行约束，通过对某实验区影像进行几何校正后得到了较为满意的效果。

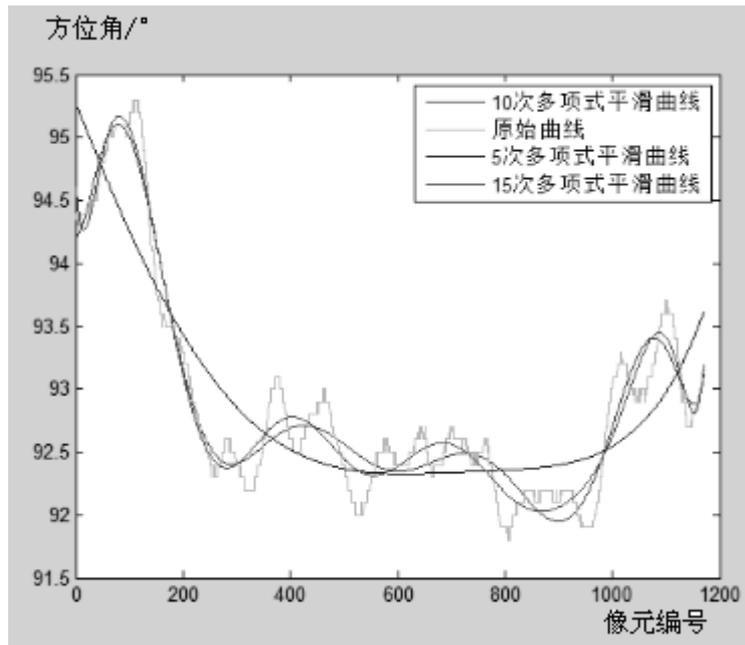
## 1 无人机系统介绍

无人驾驶飞机 (Unmanned Aerial Vehicle, 缩写 UAV), 简称无人机, 是一种利用无线电遥控设备和自备的程序控制装置操纵的非载人飞机<sup>[5]</sup>。按照系统组成和飞行特点, 无人机可以分为固定翼型无人机和无人驾驶直升机两大类。搭载遥感仪器的无人机遥感系统是获取遥感数据的重要工具之一<sup>[6]</sup>。无人机遥感系统是继传统航空、航天遥感平台之后的第三代遥感平台, 它可以快速获取地理、资源、环境等空间遥感信息, 完成遥感数据采集、处理和应用分析<sup>[7]</sup>。无人机遥感系统主要由八大部分组成: 无人机飞行平台、数据链路、遥感监测平台、实时监控平台、地面测控系统、地面保障系统 (含发射系统)、动态遥感监测决策支持系统和后期处理系统<sup>[8]</sup>。为了采集图像和后期处理数据, 无人机需要搭载成像光谱仪、POS 系统等, 本文获取的图像来自于北京欧普特科技有限公司研制的 Hysip 机载高光谱成像传感器吊舱 (www.goldway.com.cn), 该系统搭载了 HeadWall Photonics 公司的高光谱成像光谱仪和法国 SBG 公司的 GPS 惯导系统。高光谱成像光谱仪波段覆盖 400-1000nm, 其 CCD 尺寸为  $7.5 \mu\text{m}$ , 焦距为 16mm, 相机采样频率为 50HZ; GPS 惯导系统仰角精度为  $0.5^\circ$ , 航向角精度为  $1^\circ$ , 姿态数据采样频率为 10HZ, GPS 水平精度为 2.5m, 竖向精度为 5m。

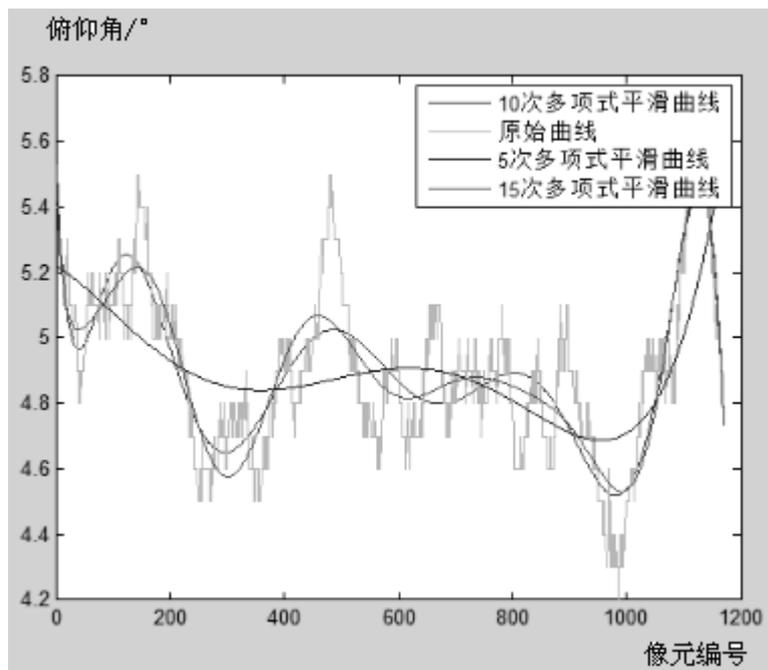
## 2 惯导数据平滑

噪声是用来描述所观察现象提取信息中附加的不易区别的任意错误, 而数据平滑能消除所有带有较大误差障碍的数据点, 或者从图形中作出初步而又粗糙的简单参数估算<sup>[9]</sup>。在本文中, 惯导数据平滑采用的是一种特殊的低通滤波器—Savitzky-Golay 平滑器<sup>[10]</sup>, 该低通滤波器可以高质量地平滑噪声数据。Savitzky-Golay 平滑器最初由 Savitzky A 和 Golay M 于 1964 年提出, 随后被广泛地运用于数据流平滑去噪, 是一种在时域内、基于多项式、通过移动窗口、利用最小二乘法进行最佳拟合的方法<sup>[11]</sup>。

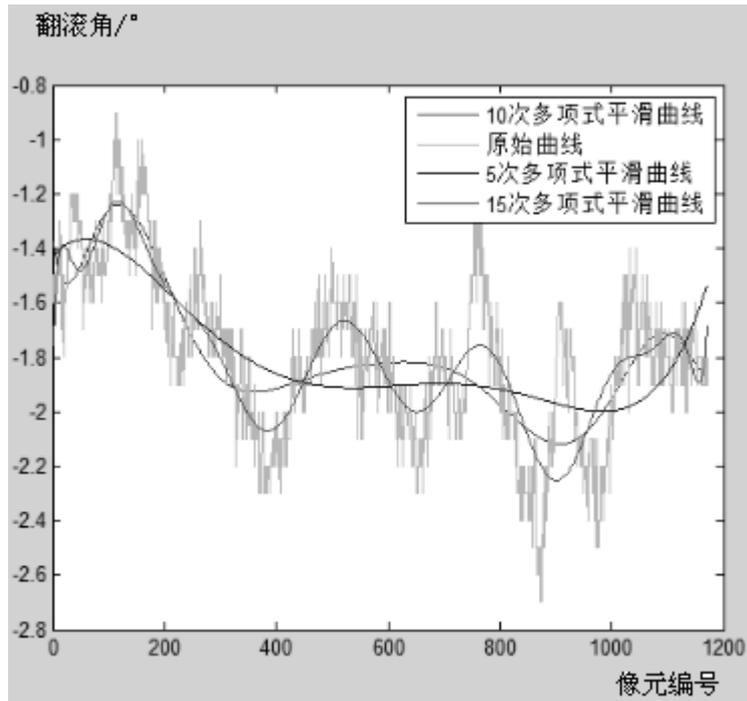
Savitzky-Golay 平滑器的主要工作思路是通过选取点  $x_i$  附近固定个数的点拟合一个多项式, 此多项式中  $x_i$  的值就是它的光滑数值  $g_i (g_i \in G)$ 。假设  $m$  表示  $x_i$  左边点的个数,  $n$  表示  $x_i$  右边点的个数,  $p_i(x)$  表示相对于点  $x_i$  的一个  $r$  次多项式, 在最小二乘法原理下拟合这  $m+n+1$  个点<sup>[12]</sup>。通过多次实验, 得出了最佳平滑时的多项式次数为 10, 图 1 是实验结果对比图。



(a) POS 数据方位角平滑



(b) POS 数据俯仰角平滑



(C) POS 数据翻滚角平滑

图 1 POS 数据方位角、俯仰角、翻滚角不同参数平滑曲线对比

Figure 1 The comparing of different smooth curve parameters of POS azimuth and pitching Angle, roll Angle

### 3 低精度 POS 和行相关法几何校正原理

行相关法几何校正可以根据相邻行之间同一地物相关性最大的原理,通过比较两相邻行在各个位置的相关系数找到相关系数最大的位置,从而确定偏移量予以改正。此方法的不足之处在于:一是易出现误匹配,二是得到的图像往往没有地理信息。尽管如此,但可以根据误匹配区域突变行的偏移量计算出误匹配区域需要的改正量,以此作为修改 POS 数据的依据。POS 数据虽然精度较低,但是对于改善误匹配和增加图像的地理信息有较大的优势,因此可以将二者结合起来进行无人机影像的几何校正。

#### 3.1 图像行相关计算原理

根据地理学第一定律,地理位置临近区域的地物分布具有较高的相似性。因此,几何校正后的无人机图像中相邻两行之间必然具有较高的相似性,可将相关系数作为衡量数据之间相关程度的一个指标,一般情况下,相关系数越大,相关程度就越高。相关系数的数学表达式如下:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

其中， $x_i$ 、 $y_i$  代表两组变量， $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  分别是两组变量的平均值，这里对应图像相邻两行像元值数组以及对应的平均值。

无人机原始图像中相邻两行由于姿态抖动造成几何位置错位，可通过不断移动相邻两行，直到两行重叠区域得到最大相关系数，此时便可认为完成了两行之间的相对几何校正，重复此步骤即可完成整幅图像的几何校正，这就是图像行相关计算的基本原理。

考虑到实际的成像过程，无人机的有效图像往往是在风速较小或者增加了稳定平台时来获取，由于抖动造成两行之间的错位程度一般不会太大，比如，两行完全错开的情况会导致数据很难使用，实际错位一般不会超过总列数的一半(包括向左和向右两种情况)。本文对两行之间的错位度定义为：图像相邻两行实际重叠的像元数占总像元数的比例。为了减少两行之间比较次数，引入最大错位度进行限制，对不可能出现的错位情况不进行相关系数计算。

假设一幅图像参考行为 R，比较行为 C，图像宽度为 n 个像元，不同行之间最大错位度为 r ( $0 < r < 1$ , 0 代表两行完全错位，1 代表两行无错位)。根据相关系数的数学表达式，针对参考行和比较行，相邻行之间相关系数计算公式如下：

$$\rho = \frac{\sum_{i=1 \sim n - [nr] + 1, j=[nr] \sim n} (R_i - \bar{R}) \cdot (C_j - \bar{C})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{[nr] + 1} (R_i - \bar{R})^2 \cdot \sum_{j=[nr]}^n (C_j - \bar{C})^2}} \quad (2)$$

其中， $R_i$ 、 $C_j$  分别代表参考行像元值和比较行像元值， $\bar{R}$ 、 $\bar{C}$  分别是参考行和比较行像元值的平均值。

以下结合实例更加直观的说明整个计算过程（图 2）：

假定  $n=8$ ， $r=0.4$ （表明行重叠像元至少为  $n*r=3.2$  个，即错位像元数为： $8-3.2=4.8$  个，包括左边和右边重叠两种情况）。因此，两行之间计算相关系数时，重叠区在参考行上起始位置为  $\text{INT}[n*r]=\text{INT}[8*0.4]=3$ ，终止位置为  $n-\text{INT}[n*r]+1=8-3+1=6$ 。

具体计算过程如下：

1) 比较行 (C 行) 右侧第 1 个像元与参考行 (R 行) 左侧第 3 个像元对齐, 计算两者之间的相关系数 (R1、R2、R3 与 C6、C7、C8), 即图 2 中 i1 行显示的情形;

2) 此后对比较行每次向右移动 1 个像元, 比较参考行和比较行之间重叠像元的相关系数, 直到比较行的从右数最后一个像元 (也即左侧第一个像元) 移动到参考行的第 6 个像元处 (图 2 中 i11 行显示的情形), 结束整个计算过程。

3) 找到相关系数最大的情形。从起始位置到终止位置一共要比较 11 次, 相关系数最大情况下对应的比较行相对参考行偏移的位置, 记录为相对偏移量。

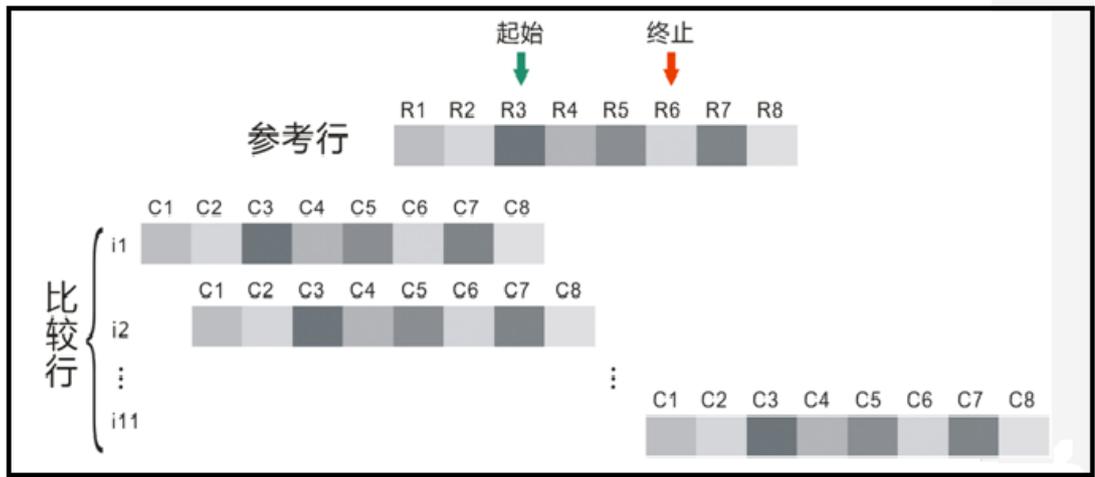


图 2 比较示意图

Figure 2 Comparison diagram

### 3.2 基于 GPS 惯导数据的几何校正原理

由于 POS 数据含有位置和姿态信息, 航空成像时高光谱图像的每一行都有自己的 POS 记录, 因此, 可以利用经度、纬度、海拔、侧滚角和俯仰角等参数可以计算出每个像元的地面实际坐标, 最后对原始影像像元进行重采样, 从而得到校正图像<sup>[13]</sup>。

本文 POS 校正的核心思想还是利用 POS 数据进行几何校正, 具体方法是按照分块处理的思想, 基于 POS 后处理的导航解, 根据校正影像像点对应的地面点 P 的投影坐标反求在原始影像的像点 p 的位置, 同时将 p 的灰度值赋给 P, 从而对影像进行快速几何纠正<sup>[14-15]</sup>。

### 3.3 结合惯导数据约束与行相关的图像几何校正过程

根据以上相关系数的计算公式并结合 POS 数据, 本文提出无人机影像几何校正的流程如下:

(1) 根据输入的无人机图像, 选择信噪比较高的波段 (比如 500-800nm 之间的波段信噪比一般比较高, 选择其中某个波段), 同时根据飞行的实际情况, 图像行之间错位一般不会超过 50%, 因此可以设置 r 为 0.5。

(2) 根据 3.1 节图像行相关计算原理，以图像第  $i$  行为参考行，第  $i+1$  行为比较行，计算比较行不同偏移量情况下的相关系数，将最大相关系数对应偏移量记录为  $\Delta J_{i+1}$ ，此偏移量为第  $i+1$  行相对第  $i$  行的偏移量。

(3) 重复执行第 2 步，得到从第二行到最后一行 ( $m$  行) 的偏移量  $\Delta J$ ，以第一行为参考，则其他所有行相对第一行的绝对偏移量计算为： $\Delta K_i = \sum_{j=2}^i \Delta J_j$  ( $j=2, \dots, i$ )。

(4) 根据无人机每行图像的航高，将偏移量转换为翻滚角，形成翻滚角曲线（注意第一行角度为 0） $roll_i = \Delta K_i * d_i / H_i$ ，其中  $d_i, H_i$  分别为第  $i$  行对应的图像分辨率和航高。

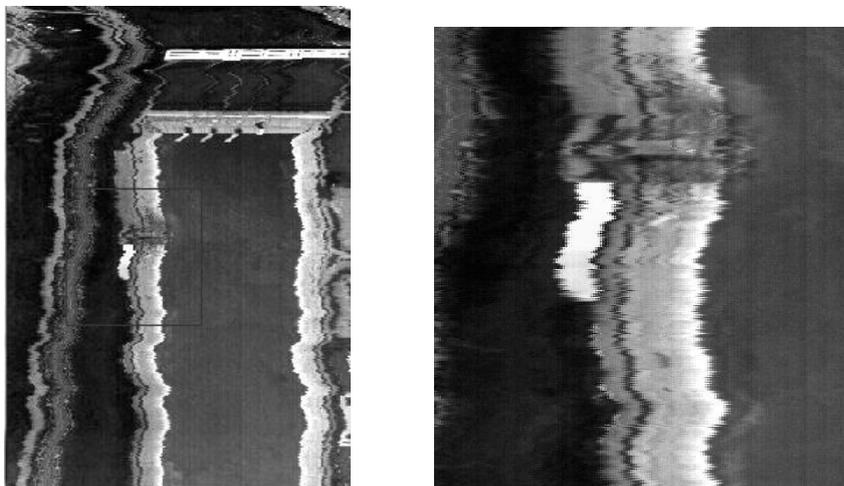
(5) 采用 Savitzky-Golay 平滑方法对 POS 数据中的翻滚角、方位角、俯仰角进行平滑处理。

(6) 将 POS 数据平滑得到的翻滚角曲线与经过行相关计算转换的翻滚角曲线进行对比，对比时后者所有行的角度加上 POS 数据平滑的第一行翻滚角（POS 数据平滑的翻滚角总体趋势应符合无人机实际情况）。图像行相关得到的可能出现的误匹配情况，可以参考 POS 数据去掉这些误匹配情况，对图像行相关的结果进行同样的平滑处理，然后将平滑处理前后的增量作为实际改正量，加到 POS 数据平滑的翻滚角曲线上，生成新的 POS 数据。

(7) 利用 (6) 中生成的新的 POS 数据原始图像进行基于 POS 数据的几何校正<sup>[13]</sup>，得到校正后的结果影像。

## 4 实验与分析

本文借助 Hysip 影像及对应的 POS 解算文件作为试验数据，其中，POS 解算文件包含了每行影像成像时刻的导航解。该试验数据来自于 2013 年 7 月 26 日在陕西省杨陵区永东堡地区的航高为 800m 左右的影像，共 1004 行，5001 列，162 波段。图 3 按照标准假彩色显示了 Hysip 的部分影像，其中图 3(b) 图是 (a) 图红色区域放大效果图。

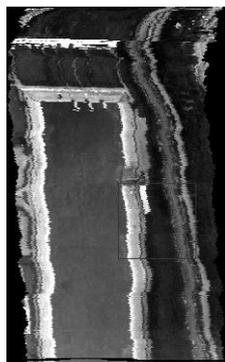


(a) 整体校正效果 (b)局部放大显示

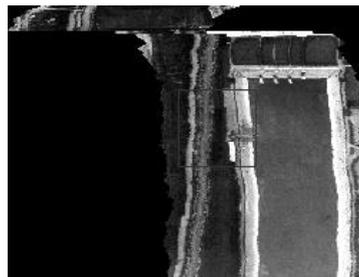
图 3 陕西省杨陵区永东堡地区数据

Figure 3 The data of Shanxi Yang land

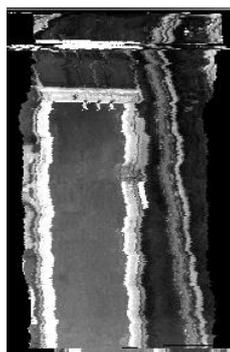
由于该数据的获取没有稳定平台，原始影像严重扭曲，必须进行几何纠正才能进行后续的处理和应用。在实验过程中，为了分析本文提出的方法是否有效可行，与 POS 数据直接校正方法等进行了直观对比，其结果如图 4 所示：



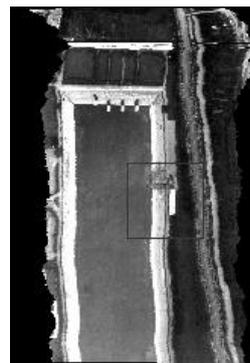
(a) POS 数据直接校正结果



(b) 行相关匹配校正结果



(c) POS 数据约束下行相关匹配校正结果



(d) 本文方法校正结果

图 4 各方法校正结果

Figure 4 The result of different correction methods

图 4 中，(a) 是 POS 数据直接校正结果，(b) 是行相关匹配校正结果，(c) 是 POS 数据约束下行相关匹配校正结果，(d) 是本文方法得到的结果。

由于 POS 数据精度低，即使经过直接校正，变形也比较大，所以图 4 (a) 校正结果中地物变形还是很大。

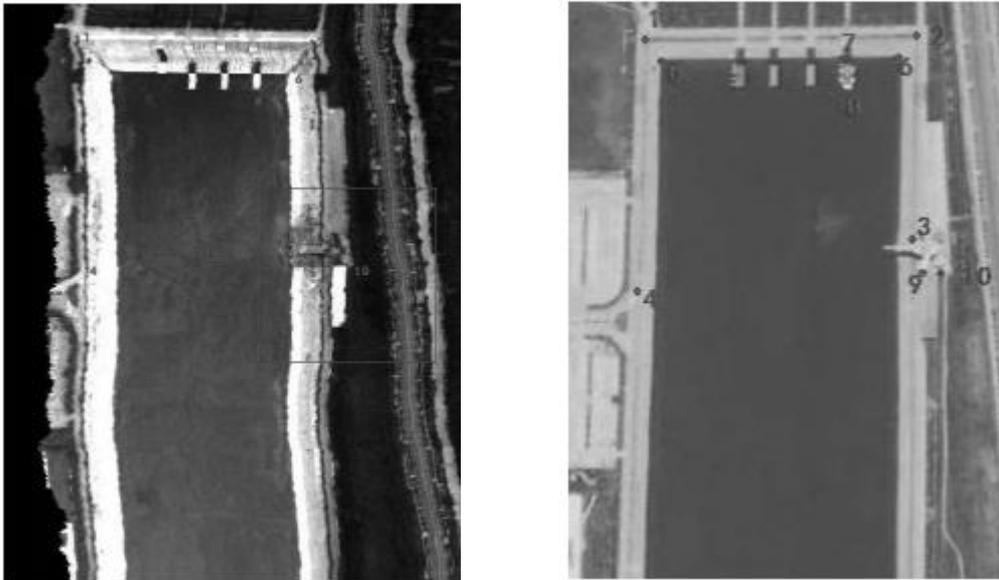
行相关匹配校正适用于地物变化明显的图像，若大片区域为同一种地物的区域，相关系数最大的点较多，容易出现误匹配，如图 4 (b) 的上半部分，大片的农田出现了误匹配的情况，而且此时的图像无地理坐标。

在行相关匹配之前用 POS 数据进行约束，消除了误匹配情况，但同时也限制了行相关匹配的范围，导致了校正结果变形还是比较大，如图 4 (c) 效果。

通过对 POS 数据平滑处理并根据行相关平移量替换 POS 数据中的滚转角生成新的 POS

数据，再次进行几何校正，得到的结果比较理想，而且具有地理信息，图 4 (d) 就是结合了行相关匹配和修改后 POS 数据校正的结果。

校正后的影像质量好坏，可以用图像内部几何畸变来评价（主要表现在长度变形方面）。本文通过在校正后影像和对应的 Google Earth 区域中选择 10 个特征点（如图 5），计算出了其航向和垂直于航向方向的长度，其结果如表 1 所示。



(a) 校正后图像

(b) Google Earth 影像图

图 5 校正后影像与实地区域选点图

Figure 5 The point in the corrected image and the field area

表 1 影像内部畸变评价表

Table 1 The evaluation form of internal image distortion

编号	影像长度 (米)	实际长度 (米)	方向	$\frac{\text{影像长度}-\text{实地长度}}{\text{实地长度}} \times 100\%$
1-2	213.67	201.93	垂直于航向	5.81%
5-6	170.12	158.80	垂直于航向	7.13%
9-10	12.60	12.14	垂直于航向	3.79%
7-8	20.79	17.17	航向	21.08%
2-3	188.11	166.97	航向	12.66%
1-4	210.86	192.15	航向	9.74%

从表 1 可以看出，由于影像采集采用的是推扫式，垂直于航向方向的精度总体上比航向的精度要高；在航向抖动比较大而且在影像采集的过程中，由于无人机姿态在竖直方向的变化导致了信息采集的遗漏。因此，不论是行相关匹配还是 POS 数据改正的过程中，航向的误

差都不能完全消除。另外，7-8 的相对精度较低，原因是地物被破坏，导致量测的误差较大。

通过对校正原理和校正结果的分析，可以得到如下结论：

(1) 通过分析计算相邻行之间的相关系数，从而找到相关系数最大的点，然后计算平移量进行无人机影像的几何校正是可行的，但不适用于地物无明显差异的区域；

(2) 在行相关处理的过程中会出现误匹配，通过 POS 数据进行约束，误匹配可以得到很大改善，但是此时影像变形依然很大，原因是 POS 数据约束误匹配的同时也约束了行相关匹配的范围。

(3) 通过对比平移量曲线与 POS 曲线，并根据平移量突变行对应的滚转角来修改对应区域的 POS 数据，在此基础上再进行 POS 几何校正可以得到较理想的结果；

(4) 在影像采集的过程中，由于相机采样频率和 IMU 频率的不同，导致了图像和真实地物在航向的不一致，而 POS 数据在行相关的基础上校正了这一差异。

## 5 结束语

本文针对低精度 POS 条件下线阵推扫成像的无人机图像几何校正的难题，提出了综合 POS 数据和行相关匹配的算法，实现了较好的几何校正效果。本文的主要思路是：根据图像相邻行地物的相关性特点确定相邻行的偏移量，将此偏移量与 POS 获取的翻滚角总体趋势进行结合，形成能够兼顾无人机翻滚角总体趋势与高频变化的新数据，从而在较大程度上消除了线阵无人机高光谱图像的严重畸变。此方法可以改善仅仅依赖图像行相关的无匹配现象，同时也可以改善由于 POS 采样频率低于图像采样频率造成的相邻行之间严重错位的现象。通过对校正结果的分析表明，本文采用的方法提高了低精度 POS 数据辅助线阵高光谱成像仪图像几何校正的应用能力，该方法一定程度上有利于推广低成本无人机高光谱系统的应用范围。当然，经此方法校正后的地物和实际地物相比还有一定的变形。若想得到更好的校正效果，仍需进一步提高 POS 系统数据获取精度和采样频率，另外，为了减少图像扫描行的剧烈抖动现象，建议无人机增加稳定平台。

## 参考文献

- [1]Applanix.POSPac User Manual[M].Canada: Applanix corporation, 2013: 1-14.
- [2]You Hongjian , Shao Yun, Li Shukai.Fast rectifying airborne infrared scanning image based on GPS and INS[J]. Future Generation Computer

---

Systems, 2004, (20) :1209 - 1214.

[3]王伟, 童小华, 谢锋, 等. 基于 POS 数据的 OMIS 影像几何校正[J]. 遥感信息, 2010, (1) :89-93.

WANG Wei, TONG Xiaohua, XIE Feng, SHURong, et al. The OMIS image geometric correction based on POS data[J]. Remote sensing information, 2010, (1) : 89-93.

[4]程春泉, 张继贤, 黄国满, 等. 地心直角坐标系下的航摄光学影像严密定位模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41 (5) :605-610.

CHENG Chunquan, ZHANG Jixian, HUANG Guoman, et al. Rigorous positioning with airborne optical images in ECEF[J]. Geomatics and information science of wuhan university, 2016, 41 (5) :605-610.

[5]何敬, 李永树, 李何超, 等. 无人机影像数字处理及在地震灾区重建中的应用[J]. 西南交通大学学报: 自然科学版, 2010, 45 (4) :533-538.

HE Jing, LI Yongshu, LI Hechao, et al. Unmanned aerial vehicle (uav) digital image processing and its application in the earthquake disaster area reconstruction[J]. Journal of Southwest Jiaotong University: Natural science edition, 2010, 45 (4) :533-538.

[6]刘小龙, 基于无人机遥感平台图像采集处理系统的研究[D]. 硕士学位论文, 杭州:浙江大学, 2013:1-83。

LIU Xiaolong, The research of image collection and processing system based on UAV Remote Sensing platform[D]. Master's degree thesis, Zhejiang University, Hangzhou, 2013:1-83。

[7]马瑞升. 微型无人机航空遥感系统及其影像几何校正研究[D]. 南京:南京农业大学, 2004:1-77。

MA Ruisheng. Micro uav remote sensing system and its image geometric correction[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2004:1-77。

[8]LegatK. Approximate direct georeferencing in national coordinates[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (S0924-2716), 2006, 60(44):239-255.

- 
- [9]Grimble M J, El Sayed A. Solution of the H optimal linear filtering problem for discrete time systems[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1990, 38(7):1092-1104.
- [10]RajagopalanS. Image smoothing with Savitzky-Golayfilters[M]. America:Proceedings of SPIE, 2003: 1-520.
- [11]蔡天净, 唐瀚. Savitzky-Golay 平滑滤波器的最小二乘拟合原理综述[J]. 数字通信, 2011, (1) :63-68.
- CAI Tianjing, TANGHan. The review of Savitzky - Golay smoothing filter least-square fitting principle[J]. Digital Communication, 2011, (1) :63-68.
- [12]李亢, 杨绍清. 基于 Savitzky-Golay 算法的图像平滑去噪[J]. 数据采集与处理, 2010, (S1) :72-74.
- LI Kang, YANG Shaoqing. The Image smoothing denoising based on Savitzky - Golay algorithm[J]. Data Acquisition and Processing, 2010, (S1) :72-74.
- [13]吴传庆. 基于 POS/DG 的无稳定平台机载高光谱图像几何校正[D]. 硕士学位论文, 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2002:1-65。
- Wu Chuanqing. Geometric Correction of Airborne Hyperspectral Images by POS/DG data [D]. Master's degree thesis, Institute of Remote Sensing Applications, BeiJing:Chinese Academy of Sciences, 2002:1-65.
- [14]张浩, 张兵, 卫征. 基于 POS 的高光谱影像快速几何纠正[J]. 测绘通报, 2009, (1) :14-17.
- ZHANG Hao, ZHANGBing, WEI Zheng. Fast Rectifying Hyperspectral Image Based on POS System[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009, (1) :14-17.
- [15]Henrik Stewénius, Christopher Engels , David Nistér. Recent developments on direct relative orientation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, (60) :284 - 294.

---

作者简介和联系方式:

第一作者简介:

胡海斌（1983-），男，山西洪洞人，讲师，硕士，主要研究方向为工程测量、测量数据处理与研究。

E-mail: 1055164818@qq.com



身份证:142625198306284333

手机号:13835120732

通讯作者简介: 张浩, 副研究员, E-mail: [zhanghao612@radi.ac.cn](mailto:zhanghao612@radi.ac.cn)

基金项目:本研究得到国家重点研发计划(2016YFB0501501)和国家自然科学基金资助项目(51404272)的支持。

通信地址: 山西省晋中市榆次区文华街 369 号山西建筑职业技术学院

市政工程系测量教研室 胡海斌 13835120732 030619