

文章编号: 1007-4619(2006)01-0021-06

# INS/DGPS支持的机载线阵推扫影像几何校正

刘 军<sup>1</sup>, 张永生<sup>1</sup>, 王冬红<sup>1</sup>, 徐卫明<sup>2</sup>

(1. 信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052; 2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘 要:** 论述了利用 INS/DGPS系统的导航输出计算外方位元素的原理, 介绍了行方位数据支持下机载线阵 CCD 影像直接和间接法几何校正的基本方法, 重点分析并解决了直接法纠正中的目标定位、灰度重采样及间接法校正中最佳扫描行的确定问题。PHI高光谱影像的实验结果表明, 文中的校正算法可达到优于 1.5m 的绝对定位精度及 0.7m 的相对精度。

**关键词:** INS/DGPS; 线阵 CCD; 几何校正; 外方位; 扫描行

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A

## Geometric Rectification of Airborne Linear Array Pushbroom Imagery Supported by INS/DGPS System

LIU Jun<sup>1</sup>, ZHANG Yong-sheng<sup>1</sup>, WANG Dong-hong<sup>1</sup>, XU Wei-ming<sup>2</sup>

(1. Institute of Surveying and Mapping Information Engineering University, Henan Zhengzhou 450052, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences Shanghai 200083, China)

**Abstract** The computation of exterior orientation elements using the navigation outputs of INS/DGPS system is addressed, then the direct and indirect geometric rectification of airborne linear array CCD imagery based on the line orientation data is introduced. The emphasis is put on the positioning and resampling problems in the direct rectification and the determination of the best scan line in the indirect rectification. Test results using PHI hyperspectral image prove that the rectification algorithm developed in this paper can reach the absolute positioning accuracy of better than 1.5 meters and the relative accuracy of 0.7 meters.

**Key words** INS/DGPS; linear array CCD; geometric rectification; exterior orientation; scan line

## 1 引 言

相对卫星平台而言, 机载线阵 CCD 传感器受气流影响较大, 姿态变化剧烈, 导致其影像几何畸变严重, 不仅难以有效地识别目标, 更难以进行立体影像匹配。因此, 几何校正就成了机载线阵 CCD 影像应用的首要问题。但长期以来, 由于没有一套行之有效的的手段来获取各扫描行的外方位元素, 致使几何

校正成了制约机载线阵 CCD 传感器走向实用的瓶颈。INS/DGPS组合导航与定位系统能以较高的精度和频率提供传感器的位置和姿态, 因而可以直接测定影像的外方位元素, 从而使机载线阵 CCD 传感器的应用成为可能。本文探讨利用加拿大 Applanix 公司的 INS/DGPS 产品——POS/AV 系统的导航输出计算外方位数据的方法, 并利用其对机载线阵 CCD 影像进行直接法和间接法几何校正, 最后对校正误差进行深入分析。

收稿日期: 2004-12-24; 修订日期: 2005-06-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2001AA131090)资助。

作者简介: 刘 军(1978—), 男, 2000年毕业于信息工程大学测绘学院, 在读博士生, 主要从事数字摄影测量等技术研究。已发表论文 10 余篇。E-mail: junliu\_rs@yahoo.com.cn.

## 2 POS/AV 系统外方位元素的计算

### 2.1 POS/AV 系统

POS/AV (Position and Orientation System for Airborne Vehicles)系统专门为机载传感器的直接地理定位而设计,它通过集成高精度的 GPS和惯性测量装置 (Inertial Measurement Unit IMU),提供传感器实时或后处理的位置和翻滚、俯仰及偏航角度,适用于画幅式相机、激光雷达、线阵 CCD 以及 SAR 等多种类型的传感器<sup>[1]</sup>。

POS/AV 系统采用 GPS、INS 紧组合方式,主要包括四个部分<sup>[2]</sup>: MU 单元,双频低噪声 GPS 接收机,主控计算机系统 PCS 和后处理软件包 POSPac<sup>TM</sup>。整个系统的核心是集成的惯性导航算法软件,它由 POSRT、POSGPS、POSProc 及 POSEO 四个独立的软件模块组成,可以实时运行在 PCS 上,也可以后处理时使用。它利用 GPS 观测数据来校正 MU 获得的姿态和位置,使之输出的数据保持动态高精度和绝对高精度。图 1 是 POS/AV 系统的原理结构图,表 1 是其性能指标。

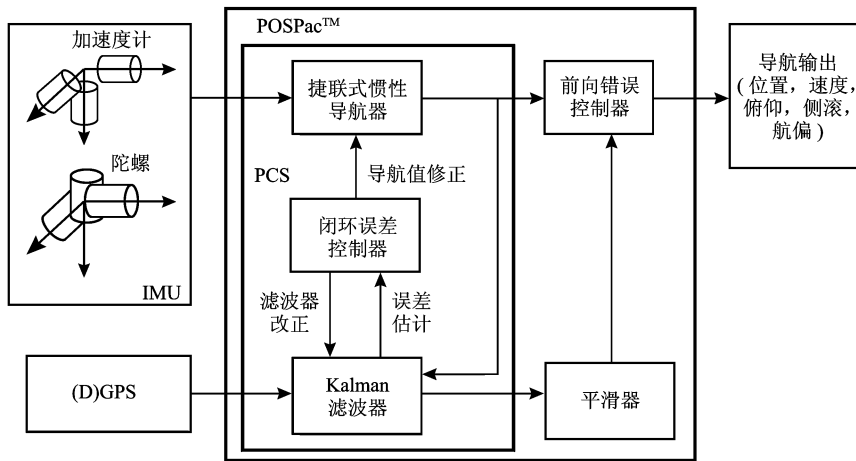


图 1 POS/AV 系统原理图

Fig 1 Theory of POS/AV system

表 1 POS/AV 510 系统精度指标

Table 1 Specifications of POS/AV 510 system

	C/A GPS	DGPS	后处理
位置精度 /m	4.0-6.0	0.5-2.0	0.05-0.30
速度 /(m/s)	0.05	0.05	0.005
俯仰、侧滚 /(°)	0.008	0.008	0.005
偏航 /(°)	0.070	0.050	0.008

### 2.2 POS/AV 系统的输出

POS/AV 系统的后处理过程涉及到多种坐标系,包括像空间坐标系 (i)、传感器坐标系 (c)、MU 坐标系 (b)、导航坐标系 (g)、地心坐标系 (E) 和用户定义的成图坐标系 (m)<sup>[3]</sup>。通常情况下,POSProc 模块输出的是导航解,即 MU 坐标系 (b) 在导航坐标系 (g) 中的侧滚、俯仰和偏航角  $(\Phi, \Theta, \Psi)$ , 以及 MU 坐标系 (b) 原点在地心坐标系 (E) 中的坐标

$(X_{MU}, Y_{MU}, Z_{MU})$ , 并非影像的外方位元素  $(X_S, Y_S, Z_S, \omega, \phi, \kappa)$ 。POSEO 模块用于计算影像的外方位数据,但需另行购买。本文首先给出利用 POS 系统导航解计算外方位数据的方法。

### 2.3 外方位元素的计算

依据外方位元素的定义,将成图坐标系 (m) 依次经过绕 X、Y、Z 轴  $\omega, \phi, \kappa$  角度的旋转,各坐标轴与像空间坐标系 (i) 保持一致,这一过程可分解为:成图坐标系 (m)  $\rightarrow$  地心坐标系 (E)  $\rightarrow$  导航坐标系 (g)  $\rightarrow$  MU 坐标系 (b)  $\rightarrow$  传感器坐标系 (c)  $\rightarrow$  像空间坐标系 (i)。因此,成图坐标系 (m) 到像空间坐标系 (i) 的旋转矩阵  $C_i^m(\omega, \phi, \kappa)$  可表示为<sup>[3]</sup>:

$$C_i^m(\omega, \phi, \kappa) = C_E^m C_E^g C_g^b C_b^c C_c^i(\Phi, \Theta, \Psi) C_c^b C_i^c \quad (1)$$

旋转矩阵  $C_E^m, C_E^g, C_g^b, C_b^c$  和  $C_i^c$  可由 POSProc 输出的导航角  $(\Phi, \Theta, \Psi)$  以及传感器相对于 MU 固定的安装角度得到。根据式 (1),可直接求解出外方位角元素  $(\omega, \phi, \kappa)$ 。

考虑到 MU 几何中心与传感器镜头透视中心不重合, 如果传感器镜头透视中心在 MU 坐标系  $b$  中的坐标为  $(x_p, y_p, z_p)$ , 则依据解析几何中点的坐标变换公式, 得到线元素  $(X_s, Y_s, Z_s)$  的计算式为:

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = C_E^m \begin{bmatrix} X_{MU} \\ Y_{MU} \\ Z_{MU} \end{bmatrix} + C_g^E C_b^g(\Psi, \Theta, \Phi) \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, 偏心矢量  $(x_p, y_p, z_p)$  可在系统安装时直接测量得到,  $(X_0, Y_0, Z_0)$  为地辅坐标系原点的地心直角坐标。

### 3 直接法几何校正

#### 3.1 坐标变换函数

直接法纠正是从原始影像像点  $p(I, J)$  出发, 计算其对应的地面点坐标  $P(X, Y, Z)$ , 并将像点  $p(I, J)$  的灰度值赋给校正影像像点  $P(X, Y, Z)$ <sup>[4]</sup>。设第  $i$  扫描行的外方位元素为  $X_{si}, Y_{si}, Z_{si}, \omega_i, \phi_i, \kappa_i$ , 则直接法校正的坐标变换函数为:

$$\begin{cases} X = X_{si} + (Z - Z_{si}) \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \\ Y = Y_{si} + (Z - Z_{si}) \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$  为旋转矩阵  $C_i^m(\omega_i, \phi_i, \kappa_i)$  的元素。特别指出, (3) 式描述的是各扫描行成像时的物像中心投影关系, 因此  $\bar{x} = 0$ 。

#### 3.2 高程 $Z$ 的确定

通常情况下地面点  $P$  的高程  $Z$  是未知的, 如果摄区地势较平坦, 可将  $Z$  取为平均高程进行近似的几何校正。在数字高程模型 DEM 的支持下, 也可通过迭代算法求出高程  $Z$ , 并进一步确定  $X, Y$ 。主要步骤如下 (图 2):

- ① 给定  $Z$  值的初值  $Z_0$  (可用该地区平均高程);
- ② 由像平面坐标  $(x, y)$  和  $Z_0$ , 利用 (3) 式求得  $X, Y$ , 即  $A_1$  的平面坐标;
- ③ 根据  $A_1$  的  $X, Y$  在 DEM 中内插出  $Z_1$ , 得点 “1”;
- ④ 用像平面坐标  $(x, y)$  和高程  $Z_1$ , 重新按 (3) 式计算  $X, Y$ , 得  $A_2$  点;
- ⑤ 重复步骤③—④, 直至前后两次点位较差小于规定限差时为止。

上述算法当投影光线的倾斜度与地面坡度成对

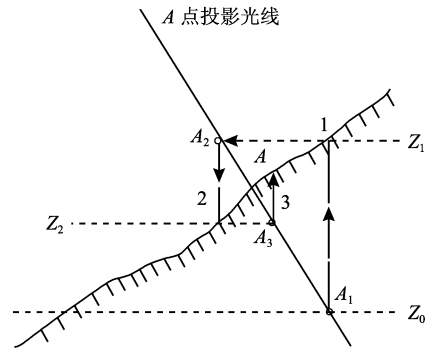


图 2 目标定位示意图

Fig 2 Illustration of object positioning

称或投影光线的倾斜度小于地面坡度时, 会导致迭代计算不收敛, 此时需要进行适应性更强的迭代计算<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 灰度重配赋

由于  $X$  和  $Y$  一般不是整数值, 所以校正影像上整数像点位置的灰度值必须通过内插得到。由于直接计算出的校正影像像点坐标排列不规则, 因此采用常规的重采样方法面临着巨大的搜索量, 致使校正效率很低。本文采用灰度加权分配的方法。

如图 3 所示, 如果原始影像上的像点  $p(I, J)$  所计算出的地面点  $P$  位于校正影像的  $A, B, C, D$  四个像元之间, 则认为像点  $p$  是  $A, B, C, D$  共同作用的结果, 因此将像点  $p$  的灰度值分配给  $A, B, C, D$ 。灰度分配的权函数可采用面积法 ( $w = dx \times dy$ ) 或距离法 ( $w = e^{-(dx^2 + dy^2)}$ )。

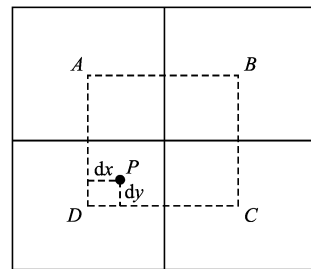


图 3 直接法校正的灰度分配

Fig 3 Gray distribution of direct rectification

### 4 间接法几何校正

#### 4.1 基本原理

间接法校正根据校正影像像点  $P$  的坐标  $(X, Y)$ ,

Z), 反求其在原始影像上的像点  $p(I, J)$ , 并将  $p$  的灰度值赋给  $P$ 。间接法校正的坐标变换函数采用共线条件方程:

$$\begin{cases} x=0 = -f \frac{a_1(X-X_{S_i}) + b_1(Y-Y_{S_i}) + c_1(Z-Z_{S_i})}{a_3(X-X_{S_i}) + b_3(Y-Y_{S_i}) + c_3(Z-Z_{S_i})} \\ y = -f \frac{a_2(X-X_{S_i}) + b_2(Y-Y_{S_i}) + c_2(Z-Z_{S_i})}{a_3(X-X_{S_i}) + b_3(Y-Y_{S_i}) + c_3(Z-Z_{S_i})} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $(X_{S_i}, Y_{S_i}, Z_{S_i}, \omega_i, \phi_i, \kappa_i)$  为 POS/AV 系统获取的第  $i$  扫描行的外方位元素,  $a_1, a_2, \dots, c_3$  是由  $\omega_i, \phi_i, \kappa_i$  构成的旋转矩阵的元素,  $(x, y)$  为像点  $p(I, J)$  的像平面坐标。

同样的, 按照 (4) 式计算出的像点坐标一般也不是整数值, 也必须进行灰度重采样。由于原始影像是规则排列的, 因此间接法校正的重采样较直接法简单, 常用的有最临近点法、双线性内插和双三次褶积法等。

### 4.2 最佳扫描行的确定

间接法纠正的关键问题是确定地面点的最佳曝光时刻, 即成像的扫描行号, 进而确定该扫描行的外方位元素。如图 4 所示, 地面点  $P(X, Y, Z)$  在  $T$  时刻 (对应于扫描行  $L$ ) 成像, 则根据 POS 系统获取的  $T$  时刻的外方位元素  $(X_{S_L}, Y_{S_L}, Z_{S_L}, \omega_L, \phi_L, \kappa_L)$ , 可确定出像点  $p$  此时在第  $L$  个扫描行的像空间坐标系中, 像点  $p$  的  $x$  坐标应接近于 0, 这是最佳扫描行的判定依据。显然, 对于给定地面点对所有扫描行逐一进行判断是费时的、不切实际的, 必须有效缩小像方搜索范围。

从图 4 可知, 在地面平坦、姿态不变、飞机匀速直线航行的理想条件下, 地面点  $P$  对于  $T_1$  时刻 (对应于扫描行  $L_1$ ) 将成像在  $p'$ 。  $p'$  到  $T_1$  时刻的距离  $\|p'p_1\|$ , 亦即利用  $L_1$  扫描行计算出的像点  $x$  坐标是确定  $L$  的关键参数。

根据图示的成像几何, 有以下数学关系:

$$\frac{\|p'p_1\|}{\|p'p\|} = \frac{\|p_1S_1\|}{\|pP\|} = \frac{\|p_1S_1\|}{\|p_1P_1\|}$$

$$\frac{\|p_1S_1\|}{\|S_1P_1\|} = \frac{f}{H/\cos\alpha} = \frac{f\cos\alpha}{H}$$

式中,  $f$  为传感器光学系统的焦距,  $H$  为航高 (经模型缩小),  $\alpha$  为传感器沿轨道方向的倾角。

于是:

$$\frac{\|p_1S_1\|}{\|p_1P_1\|} = \frac{f\cos\alpha}{f\cos\alpha + H}$$

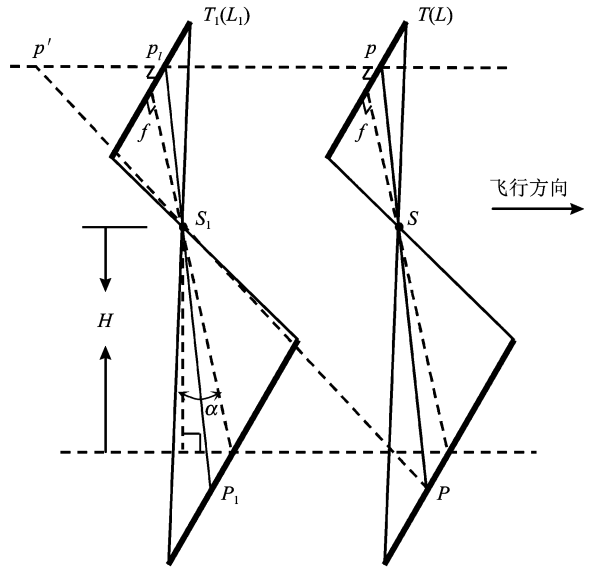


图 4 最佳扫描行 (曝光时刻) 的确定

Fig 4 Determination of the best scan line (exposing time)

因此:

$$\|p'p_1\| = \frac{f\cos\alpha}{H} \|p_1p\| \quad (5)$$

(5) 式表明  $\|p'p_1\|$  与扫描行  $L_1$  到  $L$  的距离成正比, 因此根据  $\|p'p_1\|$  即可确定时刻  $T$  对应的扫描行号  $L$ 。但是, 在实际作业中上述理想飞行条件一般难以满足, 因而不能简单利用 (5) 式直接计算  $L$ 。

本文提出了一种折半查找的迭代算法, 通过逐步缩小搜索窗口 (由起始行  $L_s$  和结束行  $L_e$  构成) 来最终确定最佳扫描行, 具体步骤为:

① 给定最佳扫描行和搜索窗口的迭代初始值。如果影像由  $N$  条扫描行构成, 则  $L$  的初始值  $L^{(0)}$  取为  $N/2$ , 初始搜索窗口取为  $[1, N]$ , 即  $L_s^{(0)} = 1, L_e^{(0)} = N$ 。

② 将  $L_s^{(0)}, L^{(0)}, L_e^{(0)}$  扫描行的外方位数据代入 (4) 式, 分别计算出  $x$  值, 记为  $x_s^{(0)}, x^{(0)}$  和  $x_e^{(0)}$ 。

③ 计算  $(x_s^{(0)} \cdot x^{(0)})$  及  $(x_e^{(0)} \cdot x^{(0)})$ 。如果  $(x_s^{(0)} \cdot x^{(0)}) \leq 0$ , 则根据 (5) 式知  $L$  位于  $L_s^{(0)}$  与  $L^{(0)}$  之间, 于是令  $L_s^{(1)} = L_s^{(0)}, L_e^{(1)} = L^{(0)}, L^{(1)} = (L_s^{(1)} + L_e^{(1)})/2$ ; 反之如果  $(x_e^{(0)} \cdot x^{(0)}) \leq 0$ , 则  $L$  位于  $L^{(0)}$  与  $L_e^{(0)}$  之间, 于是令  $L_s^{(1)} = L^{(0)}, L_e^{(1)} = L_e^{(0)}, L^{(1)} = (L_s^{(1)} + L_e^{(1)})/2$ 。

④ 判断搜索窗口的宽度  $|L_s^{(1)} - L_e^{(1)}|$ 。如果小于指定的阈值 (20 个扫描行), 即  $|L_s^{(k)} - L_e^{(k)}| \leq 20$ , 则进行下一步, 否则返回第 ② 步重新计算  $L_s, L_e$ 。

⑤ 将最终的搜索窗口  $[L_s, L_e]$  内每条扫描行的外方位数据代入 (4) 式, 计算出  $x$  最小值对应的

扫描行,即为地面点 P 成像的最佳扫描行。

## 5 实验与分析

### 5.1 实验数据

采用 PHI(Pushbroom Hyperspectral Imager)影像及 POS/AV 510 系统同步采集的行方位数据作为实验资料。PHI是由中国科学院上海技术物理研究所研制的高光谱成像仪,它采用线阵 CCD 传感器推帚式扫描成像,在 1000m 的航高下相应的地面分辨率为 0.6m。图 5 是 PHI 获取的常州洪庄机场影像(缩小四倍),共 650 条扫描行。图 6 是 POS 系统获取的各扫描行的姿态参数。从图 5 可明显看出,由于受气流的影响,原始影像存在严重的扭曲,大大降低了判读性能,如果不进行几何校正,难以进行后续处理。

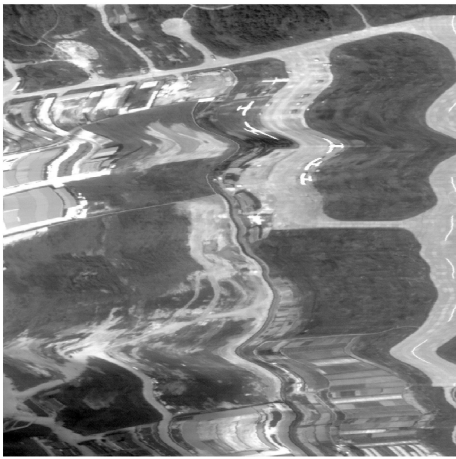


图 5 常州地区 PHI 影像(缩小四倍)

Fig 5 PHI image of changzhou (m inified by 4 times)

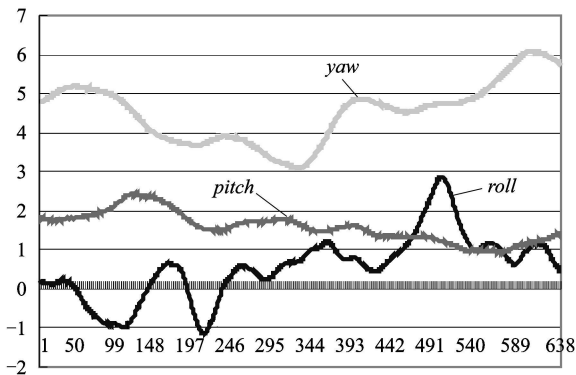


图 6 PHI 传感器姿态变化趋势图

Fig 6 Attitude changing of the PHI sensor

从图 6 可进一步分析成像期间传感器的姿态变化情况。PHI 传感器每个扫描行的积分时间为

0.02s 获取图 5 影像用时 13s。从图 6 可知,在这 13s 时间内传感器航偏角 (yaw) 先降后升,在 325 行到 410 行的 1.7s 时间内上升约  $1.9^\circ$ ;侧滚角 (roll) 变化更加剧烈,尤其从 165 行到 205 行共 0.8s 时间内连续下降了约  $1.7^\circ$ ,相当于机下点在扫描方向摆动 了 29.6m。对于传感器姿态这种无规律的、不可预知的变化,难以采用数学公式进行描述,必须采用诸如 MU/DGPS 系统的辅助仪器直接获取各扫描行的外方位数据。

### 5.2 结果分析

实验首先利用 POS 系统输出的导航解计算出 行方位数据,接着分别采用直接法和间接法对图 5 所示影像进行几何校正。直接法校正中的灰度重配赋采用面积加权法,间接法校正采用双线性内插法。由于地势平坦,这里将物方高程设定为 0,其结果分别如图 7(a)和 7(b)所示(缩小四倍)。

通过对校正过程及结果影像的分析,可得出以下结论:

(1)原始影像因气流扰动等因素导致的影像几何畸变已基本消除,同时,校正影像已具有地理编码特性,可直接进行几何量测。

(2)间接法校正的重采样过程是在规则的像方空间进行的,因此可更好地保持影像边缘的清晰度,精度较高;直接法校正对边缘的平滑作用明显,结果相对较模糊。

(3)间接法校正计算量小,执行速度快;直接法校正需要同时记录对校正影像各像点作用的所有原始影像像点个数,占用系统资源较多,运算量大,校正速度较为缓慢。

### 5.3 几何校正误差分析

为了定量分析校正的精度,在机场跑道上量测了 6 个明显地物点作为检查点,各点误差见图 8。经统计,直接法校正检查点的平面精度(均方差)为  $X_{m_s} = 1.46m$ ,  $Y_{m_s} = 1.15m$ ,间接法精度与此相当。这不仅表明文中给出的各种算法正确、可行,也证明 POS/AV 系统获取的位置和姿态参数具有很高的精度,可用于遥感影像的直接地理编码。

实验中发现,POS 数据的定位误差呈现较强的系统性。PHI/POS 集成遥感系统的主要误差源是偏心矢量和偏心角,即 MU 几何中心、传感器镜头透视中心与 GPS 天线相位中心不重合以及 MU 坐标系与 PHI 传感器坐标系存在交角。由于手段的

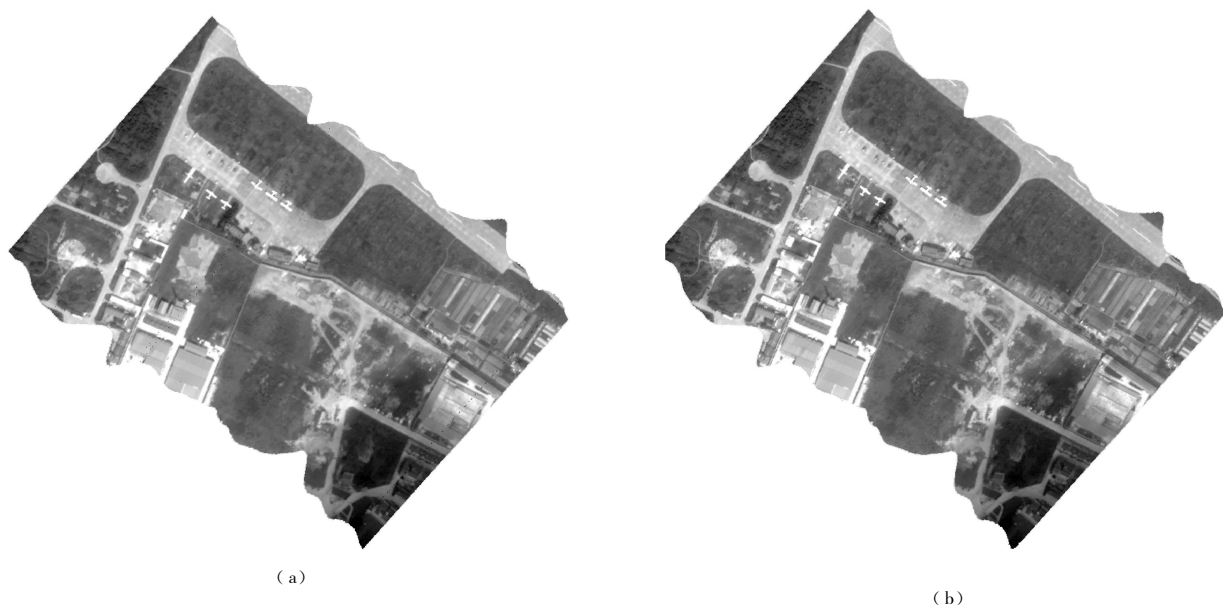


图 7 直接法校正结果 (a)与间接法校正结果 (b)

Fig 7 Result of direct rectification (a) and Result of indirect rectification(b)

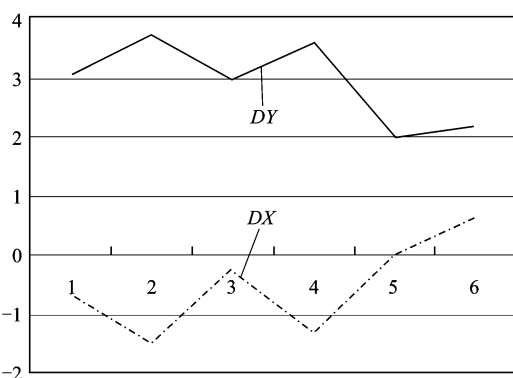


图 8 检查点定位误差分布图

Fig 8 Positioning error on 6 check points

局限性,偏心矢量和偏心角度的直接测量很难达到期望的精度,从而直接影响最终的外方位元素的精度,而且它们导致的定位误差是系统性的。在 POS 系统辅助的航空摄影测量作业中,偏心矢量和偏心角一般都要纳入到摄影测量平差模型中统一求解,以提高最终的定位精度。另外,本文的校正过程没有使用 DEM,由地形起伏引起的误差也最终反映到校正影像的定位误差中。

## 6 结 论

INS/DGPS 系统提供的高精度位置和姿态参

数,可广泛用于航空摄影测量、遥感影像直接地理定位、LIDAR 系统激光点位置的解求等多个领域,本文只从线阵 CCD 影像几何校正的角度进行了有益的探索。目前,许多遥感系统都集成了高性能的 INS/DGPS 系统,如 LH 公司 ADS40 三线阵相机与 ALS40 激光雷达、Z/I Imaging 公司 DMC 大面阵数字相机、Optech 公司 ALTM 系列产品等,它们都采用了 Applanix 公司的 POS/AV 系统。高性能 INS/DGPS 系统的出现,必将有力地推动现代遥感技术的进展。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Applanix POS AV 510 Specifications[EB/OL]. [http://www.applanix.com/pdf/AV510-V4\\_rev0901\\_spec\\_sheet.pdf](http://www.applanix.com/pdf/AV510-V4_rev0901_spec_sheet.pdf) 2003, 11, 8
- [2] Applanix POSpac User Manual [M]. Ontario: Applanix Corporation, 2002
- [3] Joe Hutton, Tatyana Savina. Computation of Phi Omega Kappa from Roll Pitch and Heading. Applanix Technical Notes, 1997.
- [4] Zhang Y S. Remote Sensing Image Information System [M]. Beijing: Science Press, 2000. [张永生. 遥感图像信息系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [5] Guo H T. Study on Mono Mapping and Revision Based on Satellite Remote Sensed Images[D]. Zhengzhou: Surveying and Mapping Institute of Information Engineering University, 2002. [郭海涛. 基于卫星遥感影像的单片测图与修测技术的研究 [D]. 郑州: 信息工程大学测绘学院, 2002.]