

文章编号: 1671-8860(2006)12-1039-05

文献标志码: A

机载 POS 系统视准轴误差检校

袁修孝¹ 杨 芬¹ 赵 青² 明 洋¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路129号, 430079)

(2 中飞通用航空公司, 西安市阎良区7390信箱, 710089)

摘要: 简要介绍了机载 POS (position and orientation system) 系统视准轴误差检校的基本原理和方法, 建立了相应的数学模型, 利用实际航摄影像资料验证了视准轴误差检校模型的正确性和可行性, 并分析了利用其实施对地目标定位的精度。

关键词: POS; GPS; IMU; 视准轴误差; 精度

中图法分类号: P231.5; P246.2

机载 POS 系统是由 GPS 接收机和惯性测量装置(IMU)组合而成的高精度定位定向系统, 它集差分 GPS(differential GPS)技术和惯性导航(inertial navigation system)技术于一体, 可用于获取移动物体在选定坐标系中的空间位置和姿态, 广泛应用于汽车、轮船、飞机、导弹等的导航定位中^[1]。

在航空遥感中, 将 POS 系统获取的机载 GPS 天线相位中心坐标(X_A, Y_A, Z_A)和 IMU 获取的翻滚 ϕ 、俯仰 θ 和偏航 ψ 等数据联合处理, 可得到影像的 6 个外方位元素。利用其进行摄影过程的几何反转, 能实现航空遥感直接对地目标定位(direct georeferencing, DG)。然而, 由 POS 系统获取的传感器姿态角(ϕ, θ, ψ)并不等同于 DG 所需的影像外方位角元素(ψ, ω, k), 需进行必要的坐标变换和系统误差校正, 这是因为 IMU 安装时不能保证其轴系与航摄仪的轴系严格平行的缘故。一般来说, 两坐标轴系之间总存在着一个小的角度偏差(小于 3°)^[2], 通常称为视准轴误差, 这一误差严重影响了航空遥感直接对地目标定位的精度, 需要采用合适的检校方法予以补偿。

1 POS 系统常用的坐标系^[3]

1) POS 系统导航坐标系($gxyz$)。 x 轴指向北, y 轴指向东, z 轴向下。

2) 地心直角坐标系($exYZ$)。以参考椭球体的质心为坐标原点, X 轴指向赤道与格林尼治子午线的交点, Z 轴指向北极, Y 轴按右手系规则确定, 这是一个笛卡尔三维空间直角坐标系。

3) IMU 本体坐标系($bxyz$)。以 IMU 传感器的三个视准轴作为坐标轴。

4) 航摄仪本体坐标系($cxyz$)。以投影中心为坐标原点, 取航线方向为 x 轴, z 轴向上, y 轴按右手系规则确定。

5) 摄影测量坐标系($mrXYZ$)。以地面上任一点为坐标原点, 取航线方向为 X 轴, 垂直向上方向为 Z 轴, Y 轴按右手系规则确定。

各种坐标系间的关系如图 1 所示。

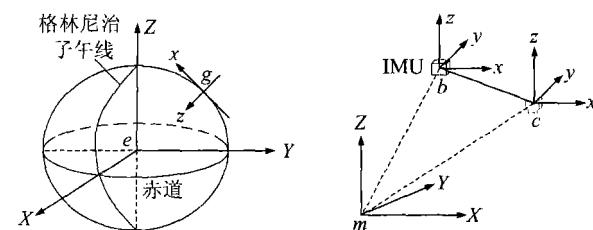


图 1 POS 系统各坐标系示意图

Fig. 1 Sketch Map of Coordinates Concerned with POS

上述坐标系中, POS 系统可提供 $bxyz$ 与 $gxyz$ 间相应坐标轴的夹角(ϕ, θ, ψ), 而航空遥感中需要利用 $cxyz$ 与 $mrXYZ$ 间相应坐标轴的夹角(ψ, ω ,

收稿日期: 2006-08-28。

项目来源: 国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0662); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(200142)。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

κ)。为使(ϕ, θ, ψ)能用于航空遥感, 可使用 POS 系统自带的 POSPac 软件完成两者之间的转换。

2 视准轴误差检校

2.1 视准轴误差

理想情况下, $bxyz$ 与 $cxyz$ 的相应轴应该平行, 但由于安装工艺上的原因, 将 IMU 安装在航摄仪上后, 两坐标系的相应轴实际是不可能平行的, 相应轴间的夹角为视准轴误差 e_x, e_y, e_z

$$\mathbf{R}_c^b(e_x, e_y, e_z) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos e_x & 0 & -\sin e_x \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin e_x & 0 & \cos e_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos e_y & -\sin e_y \\ 0 & \sin e_y & \cos e_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos e_z & -\sin e_z & 0 \\ \sin e_z & \cos e_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos e_x \cos e_z - \sin e_x \sin e_y \sin e_z & -\cos e_x \sin e_z - \sin e_x \sin e_y \cos e_z & -\sin e_x \cos e_y \\ \cos e_y \sin e_z & \cos e_y \cos e_z & -\sin e_y \\ \sin e_x \cos e_z + \cos e_x \sin e_y \sin e_z & -\sin e_x \sin e_z + \cos e_x \sin e_y \cos e_z & \cos e_x \cos e_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 视准轴误差检校模型

POS 系统误差校正需考虑 IMU、GPS 与航摄仪三者之间的空间偏移和视准轴误差。其中, GPS 天线相位中心与航摄仪投影中心、IMU 中心与航摄仪投影中心之间的空间偏移分量容易测得, 但视准轴误差无法直接测定, 只有利用已知外方位元素的影像来间接求取。由航摄像片的外方

$$\mathbf{R}_b^m(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \phi \sin \psi - \sin \phi \sin \theta \cos \psi & -\sin \phi \cos \theta \\ \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi & -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

由航摄像片的 3 个外方位角元素 ϕ, θ, ψ 所构成的正交变换矩阵为:

$$\mathbf{R}_c^m(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \phi \sin \psi - \sin \phi \sin \theta \cos \psi & -\sin \phi \cos \theta \\ \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi & -\sin \theta \\ \sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(3)可知,

$$\begin{aligned} \phi &= -\arctan\left(\frac{c_{13}}{c_{33}}\right) \\ \theta &= -\arcsin(c_{23}) \\ \psi &= +\arctan\left(\frac{c_{21}}{c_{22}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

当已知第 i 张像片的外方位元素时, 视 POS 系统获取的姿态角为观测值、视准轴误差为未知数, 将式(5)线性化可得如下误差方程矩阵式:

(图 2)。由其构成的正交变换矩阵^[4]为:

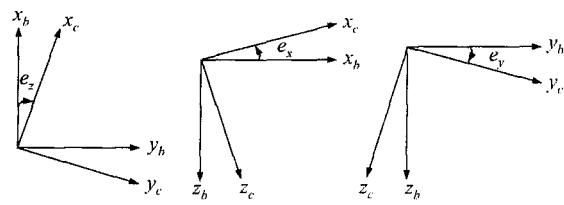


图 2 IMU 与航摄仪间的视准轴误差 e_x, e_y, e_z

Fig. 2 Boresight Misalignments Between IMU and Camera

位角元素构成的正交变换矩阵 \mathbf{R}_c^m 为:

$$\mathbf{R}_c^m(\phi, \theta, \psi) = \mathbf{R}_b^m(\phi, \theta, \psi) \cdot \mathbf{R}_c^b(e_x, e_y, e_z) \quad (2)$$

式中, \mathbf{R}_i^j 为将坐标系 i 中的点转换至坐标系 j 时的正交变换矩阵; $\mathbf{R}_b^m(\phi, \theta, \psi) = \mathbf{R}_b^m \mathbf{R}_g^e \mathbf{R}_b^e(\phi, \theta, \psi)$ 是由 POSPac 软件将 IMU 测得的角元素转换到摄影测量坐标系下的角元素组成的矩阵:

$$\mathbf{v} = \mathbf{Ax} - \mathbf{l}_i \quad (6)$$

式中, $\mathbf{v}_i = [v_\phi \ v_\theta \ v_\psi]^T$ 为 POS 测定的传感器三轴姿态角改正数向量; $\mathbf{x} = [\Delta e_x \ \Delta e_y \ \Delta e_z]^T$ 为待检校的视准轴误差增量向量; $\mathbf{l}_i = [l_\phi \ l_\theta \ l_\psi]^T$ 为 POS 测定的传感器三轴姿态角残差向量; \mathbf{A} 为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{c_{22}}{1 - c_{23}^2} & \frac{c_{21}}{1 - c_{23}^2} \cos e_x & a_{23} - \frac{c_{23}}{1 - c_{23}^2} (a_{13}c_{13} + a_{33}c_{33}) \\ -\frac{c_{21}}{\sqrt{1 - c_{23}^2}} & -\frac{c_{22}}{\sqrt{1 - c_{23}^2}} \cos e_x & \frac{1}{\sqrt{1 - c_{23}^2}} (a_{33}c_{13} - a_{13}c_{33}) \\ -\frac{c_{22}c_{23}}{1 - c_{23}^2} & \frac{c_{21}c_{23}}{1 - c_{23}^2} \cos e_x - \sin e_x & -\frac{1}{1 - c_{23}^2} (a_{13}c_{13} + a_{33}c_{33}) \end{bmatrix}$$

若已知 n 张像片的外方位元素, 利用 POS 系统测定了 ϕ 、 θ 和 ψ , 并假设这些观测值等精度且不相关, 考虑到一个飞行架次中视准轴误差的稳定性, 由最小二乘平差原理按式(6)可解算出 \mathbf{x} , 进而得到 e_x 、 e_y 、 e_z :

$$\mathbf{x} = \left(\sum_{i=1}^n (\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i) \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^n (\mathbf{A}_i^T \mathbf{l}_i) \right) \quad (7)$$

3 试验及其结果分析

3.1 试验资料概述

本文对 2004 年 11 月和 2005 年 1 月的不同地区的两组航摄像片(表 1)进行了试验。两组影像均为利用带机载 POS 系统的 Lecia RC-30 航摄仪成像于 Kodak 2444 和 Kodak 2044 胶片上所得。航摄前, 于航摄仪上加装了加拿大 Applanix 公司的 POS AV 510 系统, 在国产运-12 飞机顶部安装了 Novltal 双频航空 GPS 天线; 航摄时, 飞机上采用 POS 系统内置的 GPS 接收机。试验 1 在测区内的两个基准站上各安置一台 Astechn 双频 GPS 接收机, 数据更新率为 2 s; 试验 2 各安置一台 Trimble 5700 双频 GPS 接收机, 数据更新率为 0.5 s。两次试验中, 飞机起飞前均进行了 10 min 的初始化; 飞机着陆后, 各进行了 5 min 的静态观测。

航摄负片经扫描成 $21 \mu\text{m}$ 的数字影像后, 在自行研制的 POS 辅助光束法区域网平差软件 WuCAPS 系统^[5]上进行了自动转点和量测, 并人工立体量测了全部地面控制点。经粗差剔除后, 统计得到像点坐标的总体量测精度优于 $\pm 6.0 \mu\text{m}$ 。利用 POS 系统自带的软件 POSPac 对观测数据进行处理, 得到每张像片的 6 个外方位元素。同

表 1 试验区航摄资料参数

Tab. 1 The Flight Parameters of Two Test Blocks

项目	试验 1	试验 2
航摄仪主距/mm	153.84	303.64
像幅/cm ²	23×23	23×23
摄影比例尺	1:2500	1:3000
航向重叠/%	61	63
旁向重叠/%	32	33
航线数/条	9	10
像片数/张	255	377
地面控制点数/个	73	160
最大地形起伏/m	38.60	181.81
GPS 偏心分量/m	(0.303, -0.110, -2.029)	(0.303, -0.110, -2.002)
IMU 偏心分量/m	(0.000, 0.200, -0.559)	(0.000, 0.200, -0.710)

时, 按照常规密周边布点方案(区域周边每隔 3 条基线布设一个平高地面控制点、区域内部每隔 7 条基线布设一排高程地面控制点)实施光束法区域网平差, 获得了两个试验区所有像片的 6 个外方位元素, 其理论精度如下。试验 1: $m_x = 0.192$ m, $m_y = 0.240$ m, $m_z = 0.067$ m, $m^{\phi} = 0.026$, $m^{\theta} = 0.031$, $m^{\psi} = 0.021$; 试验 2: $m_x = 0.392$ m, $m_y = 0.413$ m, $m_z = 0.071$ m, $m^{\phi} = 0.101$, $m^{\theta} = 0.107$, $m^{\psi} = 0.040$ 。

3.2 视准轴误差检校结果

POS 系统是基于陀螺的姿态测定系统, 具有一定的系统偏差和慢速漂移。研究表明, 陀螺比例因子变化(OTR)会导致飞行方向相反的两条航线姿态角元素的跳变。因此, 必须将对向飞行的相邻两条航线作为一个检校场求解视准轴误差 e_x 、 e_y 、 e_z ^[6]。本文视 WuCAPS 求出的像片外方位元素为“真值”, 根据上述模型以相邻的两条航线为单元进行视准轴误差检校, 表 2 给出了两组试验的检校参数。

表 2 不同航线的视准轴误差检校值/(°)

Tab. 2 Boresight Misalignments of Two Flight Missions

航线	试验 1			试验 2		
	e_x	e_y	e_z	e_x	e_y	e_z
1~2	0.040 4	-0.147 3	1.220 2	0.028 3	-0.103 3	1.199 0
2~3	0.043 5	-0.140 3	1.225 9	0.029 3	-0.100 6	1.205 0
3~4	0.042 5	-0.138 7	1.218 4	0.029 8	-0.134 5	1.210 9
4~5	0.042 5	-0.137 5	1.215 9	0.028 2	-0.138 1	1.200 2
5~6	0.043 3	-0.137 6	1.219 9	0.026 6	-0.127 6	1.203 9
6~7	0.043 1	-0.139 7	1.222 1	0.030 0	-0.117 9	1.215 9
7~8	0.042 3	-0.138 2	1.222 2	0.029 3	-0.118 0	1.202 6
8~9	0.045 1	-0.142 6	1.228 9	0.028 3	-0.132 6	1.196 8
9~10				0.029 7	-0.123 8	1.207 0
均值	0.042 8	-0.140 2	1.221 7	0.028 8	-0.121 8	1.204 6

从表2数据可看出,使用本文方法得到的POS系统视准轴误差具有明显的系统性,基本是一个常数。利用POS系统自带软件POSCal对两试验区各一个 3×7 检校场(3条航线,每条航线7张像片,区域四角布设平高地面控制点)的检校结果如下。试验1: $e_x = -0.143^{\circ}$, $e_y = 0.037^{\circ}$, $e_z = 1.209^{\circ}$; 试验2: $e_x = -0.128^{\circ}$, $e_y = 0.029^{\circ}$, $e_z = 1.208^{\circ}$ 。将其与表2的均值比

较(考虑到POSCal软件采用以x轴为第一旋转轴的转角系统)可以看出,本文方法与POSCal获得的视准轴误差是一致的。此外,利用本文的检校方法将任意2条相邻航线作为检校场,得到的检校参数没有实质的差别。这表明将飞行方向相反的相邻两条航线作为一个检校场求解视准轴误差的方法是可行的。表3列出了将这一结果与POSCal软件输出的检校参数的较差,中误差均小于 $1'$ 。

表3 与POSCal软件检校参数的比较(′)

Tab. 3 Comparison to the Calibrated Parameters of Commercial Software POSCal

	最大差值			最小差值			中误差		
	e_x	e_y	e_z	e_x	e_y	e_z	e_x	e_y	e_z
试验1	-0.46	-0.35	-1.18	-0.18	-0.04	-0.40	0.36	0.28	0.84
试验2	-0.18	-1.68	0.71	-0.01	-0.06	0.10	0.08	0.90	0.44

3.3 精度分析

3.3.1 像片外方位角元素精度

根据本文提出的检校方法,分别对两个试验区均以飞行方向相反的相邻两条航线的像片作为检校场求解视准轴误差 e_x 、 e_y 、 e_z ,然后将其代入式(2),对所有像片的外方位角元素进行校正;利

用POSPac软件对所有像片进行视准轴误差检校同样可以得到一组像片的外方位角元素。将以上两种不同检校方法得到的像片姿态角分别与利用WuCAPS常规光束法区域网平差获得的像片外方位角元素进行比较,较差如表4所示(限于篇幅,每个试验区仅列出其中一组试验结果)。

表4 像片外方位角元素 φ 、 ω 、 κ 精度(′)Tab. 4 Accuracy Precision of Exterior Orientation Elements φ , ω , κ

视准轴误差	最大差值			最小差值			中误差			
	φ	ω	κ	φ	ω	κ	φ	ω	κ	
检校方法	-1.66	1.94	-1.26	0.00	-0.05	0.00	0.55	0.93	0.51	
	-1.83	1.95	1.11	0.00	0.01	-0.00	0.60	0.87	0.53	
试验1	本文方法	1.61	-1.89	-1.81	0.00	-0.00	-0.00	0.48	0.86	0.73
	POSCal	1.43	-1.95	-2.09	-0.00	0.00	-0.00	0.45	0.78	0.74
试验2	本文方法	1.61	-1.89	-1.81	0.00	-0.00	-0.00	0.48	0.86	0.73
	POSCal	1.43	-1.95	-2.09	-0.00	0.00	-0.00	0.45	0.78	0.74

从表4结果可以看出:①利用本文方法和POSCal解求的视准轴误差进行系统误差补偿后得到各像片外方位角元素的精度几乎没有差别。②由于常规光束法区域网平差解求的像片外方位角元素的精度优于 $2''$,表4中的中误差可作为POS系统测定的像片外方位角元素实际精度的测度。③消除视准轴误差以后,POS系统获得的像片外方位角元素精度明显低于常规光束法区域网平差的结果。

3.3.2 检查点精度

以POS系统输出的像片外方位元素为基础,

分别采用本文提出的方法和POS系统自带的POSCal软件进行视准轴误差检校,并利用解求的参数进行系统误差补偿后,得到各像片的外方位元素,最后进行立体像对前方交会,以完成直接对目标定位。经与利用WuCAPS常规光束法区域网平差获得的像片外方位元素进行立体像对前方交会坐标比对,得到表5所示的目标定位精度(试验1有206个检查点,试验2有425个检查点)。从表5可以看出,利用本文提出的检校方法得到的像片外方位元素较POSPac提供的外方位元素实现直接对地目标定位时,平面和高程精度基本一致。

表5 直接对地目标定位精度/m

Tab. 5 Accuracy of Direct Georeferencing

视准轴误差	最大残差				最小残差				中误差				
	X	Y	平面	高程	X	Y	平面	高程	X	Y	平面	高程	
检校方法	0.19	-0.22	0.287	0.857	0.00	0.00	0.002	-0.002	0.09	0.10	0.134	0.312	
	0.18	-0.23	0.294	0.862	0.00	0.00	0.001	0.000	0.09	0.11	0.140	0.311	
试验1	本文方法	0.35	0.48	0.591	0.879	0.00	0.00	0.002	0.000	0.09	0.24	0.257	0.242
	POSCal	0.32	0.48	0.574	0.886	0.00	0.00	0.001	0.001	0.11	0.23	0.249	0.242
试验2	本文方法	0.35	0.48	0.591	0.879	0.00	0.00	0.002	0.000	0.09	0.24	0.257	0.242
	POSCal	0.32	0.48	0.574	0.886	0.00	0.00	0.001	0.001	0.11	0.23	0.249	0.242

4 结语

机载POS系统采用惯性导航和GPS定位技术来直接测定航摄像片的外方位元素,可大量减少航空遥感外业控制联测工作量,缩短航测成图周期。但在直接对地目标定位中,由IMU获取的(ϕ, θ, ψ)必须转换到摄影测量坐标系下,由于存在系统误差,尤其是视准轴误差,转换后的像片外方位角元素仍无法用于精确的影像定向,必须进行视准轴误差校正。本文提出了一种利用常规光束法区域网平差结果对POS系统视准轴误差进行检校的方法,通过将POS系统测定的像片外方位角元素与常规光束法区域网平差结果进行比较,直接测定POS系统的视准轴误差,避免了复杂的POS辅助空中三角测量计算,对现行光束法区域网平差程序不需作任何改动,只需增加一个后处理模块就可完成对POS系统的检校。试验表明,经校正后的像片外方位元素可用于正射影像的制作和精度要求较低的对地目标定位中。

参考文献

[1] 郭大海,吴立新,王建超,等.机载POS系统对地定

位方法初探[J].国土资源遥感,2004,60(2):26-31

- [2] B umker M, Heimes F J. New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System [J]. Integrated Sensor Orientation, 2002, 43: 197-212
- [3] 董绪荣,张守信,华仲春. GPS/INS组合导航定位及其应用[M].长沙:国防科技大学出版社,1998
- [4] Applanix. Computation of Phi Omega Kappa from Roll Pitch and Heading[OL]. <http://www.applanix.com>, 2000
- [5] 袁修孝. GPS辅助空中三角测量原理及应用[M].北京:测绘出版社,2001
- [6] Cramer M, Stallman D. System Calibration for Direct Georeferencing[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 34: 79-84

第一作者简介:袁修孝,博士,教授,博士生导师。主要从事航空航天遥感高精度对地目标定位理论与方法、高分辨率卫星遥感影像几何处理等研究与教学工作。代表成果:GPS辅助空中三角测量等。已出版专著2部,发表论文60余篇。

E-mail: yxxqhyw@public.wh.hb.cn

Boresight Misalignment Calibration of Integrated DGPS/IMU System

YUAN Xiuxiao¹ YANG Fen¹ ZHAO Qing² MING Yang¹

(1) School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

(2) Zhongfei Aerial General Aviation Company, P. O. Box 7390, Yanliang District, Xi'an 710089, China

Abstract: This paper simply introduces the theory and method of the boresight misalignment calibration of integrated GPS/IMU, and then a corresponding function model is established. Based on the test flight data, this paper not only validates the validity and the feasibility of the boresight misalignment model, but also analyses the accuracy of direct georeferencing by using the model mentioned above.

Key words: POS; GPS; IMU; boresight misalignments; accuracy

About the first author: YUAN Xiuxiao, Ph. D, professor, Ph. D supervisor. He is concentrated on the research and education in remote sensing (RS), global positioning system (GPS) and their integration. He has made unique and original contribution to the areas of theories and methods for high precision photogrammetric positioning, GPS supported aerotriangulation, geometric processing of high resolution satellite imageries and digital image compression, etc. He published 2 monographs and more than 60 papers.

E-mail: yxxqhyw@public.wh.hb.cn