

文章编号: 1001-1595(2011)03-0338-07

高斯-克吕格投影坐标系下 POS 角元素的转换方法

袁修孝¹, 张雪萍^{1,2}, 付建红¹

1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 2. 国家测绘局 第一航测遥感院, 陕西 西安 710054

Transformation of Angular Elements Obtained via a Position and Orientation System in Gauss-Kruger Projection Coordinate System

YUAN Xiuxiao¹, ZHANG Xueping^{1,2}, FU Jianhong¹

1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. The First Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, State Bureau of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: Data obtained via airborne position and orientation system (POS) are in WGS-84, however, the topographic mapping coordinate systems in China are generally Gauss-Kruger projection coordinate system. Owing to the effects of earth curvature and meridian deviation, there are some errors in the process of angle transformation from roll, pitch and heading (ϕ, θ, ψ) obtained directly by a POS to the attitude angles of images (φ, ω, κ) needed in photogrammetry. Based on the fundamental formula of earth curvature and meridian deviation effecting on angular elements, the method using a compensation matrix to correct the transformation errors is proposed in this paper. Moreover, the rigorous formula of the compensation matrix is deduced. Two sets of actual data obtained by POS AV 510 which are different in scale and terrain are selected and used to perform experiments. The empirical results indicate that the compensation matrix proposed in this paper is correct and practical. Furthermore, the transformation accuracy of exterior orientation angular elements computed based on compensation matrix is relevant to the choice of vertical axis (a projection of central meridian) of Gauss-Kruger projection coordinate system. Thus proper vertical axis should be the central meridian of projection zone of survey area. However, the transformation accuracy is irrelevant to the choice of the origin of coordinate system. It is appropriate that the origin of coordinate system locates at the center point of the survey area. Moreover, transformation accuracy of exterior orientation angular elements computed based on the compensation matrix deduced in this paper is higher than that provided by the POS.

Key words: position and orientation system (POS); exterior orientation elements of image; earth curvature; meridian deviation; compensation matrix

摘要: 我国的地形测量坐标系通常采用高斯-克吕格投影坐标系, 由于地球曲率和子午线偏差的影响, POS 系统提供的传感器姿态角向影像外方位角元素的转换过程中存在误差, 需要引入一个额外的补偿矩阵进行修正。从分析地球曲率和子午线偏差对影像外方位角元素的影响入手, 推导补偿矩阵的严密计算公式, 并完善了 POS 角元素的转换公式。通过对带有 POS 数据的实际航摄影像资料处理, 验证补偿矩阵的正确性和实用性。试验结果表明, 高斯-克吕格投影坐标系下 POS 外方位角元素的转换与中央经线的选取密切相关, 与坐标原点的选取无关。利用补偿矩阵转换的影像外方位角元素精度明显高于 POS 系统提供值的精度。

关键词: POS 系统; 外方位元素; 地球曲率; 子午线偏差; 补偿矩阵

中图分类号: P237

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40771176); 国家创新研究群体科学基金(41021061)

1 引言

定位定向系统(Position and Orientation System, POS)用于航空遥感, 可直接获取摄影曝光时刻影像的空间位置和姿态信息, 以实现直接对地目标定位, 具有广阔的应用前景^[1-4]。然而, 为实现高

精度的直接对地目标定位, 需要得到可靠的影像外方位元素, 尤其是外方位角元素。POS 获取的姿态数据向影像外方位角元素转换过程中, 主要的误差来源有: ①视准轴误差; ②坐标系之间的转换误差^[5]。

由于 POS 系统获取的数据是相对于 WGS-

84 地心参考坐标系的, 必须经过转换才能得到测图坐标系下的摄影测量产品。这些转换主要有三种类型: ① 转换最终产品, 在一个合适的笛卡儿直角坐标系中恢复摄影场景, 并将整个场景转换到测图坐标系中; ② 转换虚拟控制点, 先在摄影区域内确定部分控制点, 再利用这些点所求出的转换参数恢复摄影场景; ③ 转换外方位元素, 首先变换影像外方位元素, 然后在测图坐标系中恢复摄影场景^[6]。其中, 第 ③种转换方法是最实用的, 但必须顾及地球曲率和地图投影对其产生的影响^[7]。

POS 系统中 IMU 直接获取的传感器姿态角为 IMU 本体坐标系在导航坐标系中的侧滚、俯仰和偏航(Φ, Θ, Ψ), 而摄影测量中需要的是物方坐标系旋转到像空间坐标系的 3 个旋转角(φ, ω, κ), 即影像的 3 个外方位角元素。由像空间坐标系到物方坐标系的转换可以利用(φ, ω, κ)所构成的正交变换矩阵来直接实现, 也可以利用(Φ, Θ, Ψ)通过一系列坐标系统间的变换来间接实现^[8]。根据上述两种变换的等价关系, POS 系统测得的姿态角可以转换为曝光时刻影像的 3 个外方位角元素, 而无需进行摄影测量加密。如果物方坐标系采用笛卡儿直角坐标系, 则转换中所有的坐标系统都是严格的三维空间直角坐标系, 相互之间可以通过严格的旋转矩阵进行变换。然而, 由于我国的地形测量坐标系通常采用高斯-克吕格投影, 必须顾及地球曲率和子午线偏差对角度转换的影响, 需要进行额外的补偿^[9]。文献[9]中给出了一个补偿矩阵, 但其不适用于我国的地形测量坐标系。

本文基于我国的地形测量坐标系, 以高斯-克吕格投影下 POS 系统角元素的转换为研究目标, 主要针对高斯-克吕格投影坐标系下角元素转换的补偿进行研究。首先从理论上分析地球曲率和子午线偏差对影像姿态角的影响, 并在此基础上推导角度补偿矩阵的严格形式; 然后完善我国地形测量坐标系下 POS 系统角元素转换的公式; 最后用实测的 POS 数据进行验算, 旨在证实所给出的补偿矩阵的正确性和实用性。

2 高斯-克吕格投影坐标系下角度变换的影响因素

2.1 地球曲率对角度变换的影响

一般说来, 我国的地形测量坐标系系统平面采

用高斯-克吕格投影, 当测区范围较大或者精度要求较高时, 需顾及地球曲率的影响^[10]。在将 POS 测定的传感器姿态角(Φ, Θ, Ψ)转换到影像外方位角元素(φ, ω, κ)的过程中, 物方坐标系的原点一般选定测区中央的某一点(B₀, L₀), 由于地球曲率的存在, (B₀, L₀)处的局部切平面坐标系与每个投影位置天底点(B, L)处的独立切平面坐标系不同, 为了消除两个坐标系之间的偏差, 需要引入合理的修正矩阵。两个坐标系均是严格的笛卡儿直角坐标系, 因此, 此修正过程可以利用笛卡儿坐标系之间的变换严格实现。

对于图 1 中椭球面上两点之间的转换, 由椭球面上点的位置关系可知, 由 P₂(B, L) 点处切平面直角坐标系到 P₁(0, 0) 点处切平面直角坐标系之间的转换过程是^[10]: 首先以 X_m 轴为主轴旋转角度 - B, 然后绕旋转过的 Y_m 轴旋转角度 - L, 则变换矩阵为

$$R_{(B,L)}^{(0,0)} = R_{(B,L)}^{(0,L)} R_{(0,L)}^{(0,0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos B & -\sin B \\ 0 & \sin B & \cos B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos L & 0 & -\sin L \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin L & 0 & \cos L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos L & 0 & -\sin L \\ -\sin B \sin L & \cos B & -\sin B \cos L \\ \cos B \sin L & \sin B & \cos B \cos L \end{bmatrix} \quad (1)$$

参照上述旋转矩阵, 物方坐标原点(B₀, L₀)处到投影点(B, L)处切平面直角坐标系的旋转矩阵为

$$R_{(B,L)}^{(B_0,L_0)} = R_{(B_0,L_0)}^{(0,0)} R_{(0,0)}^{(B,L)} = R_{(B_0,L_0)}^{(0,0)} [R_{(0,0)}^{(B,L)}]^T = \begin{bmatrix} \cos L_0 & 0 & -\sin L_0 \\ -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 & -\sin B_0 \cos L_0 \\ \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 & \cos B_0 \cos L_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \sin L \\ 0 & \cos B & \sin B \\ -\sin L & -\sin B \cos L & \cos B \cos L \end{bmatrix} \quad (2)$$

为便于式(2)的表达, 引入 ΔB = B₀ - B, ΔL = L₀ - L。以 3° 投影带为例, 在同一投影带内, ΔL 最大为 1.5°, 计算过程中若以弧度为单位, 其值很小, 则 ΔL 可视为小角度; 当测区纬度跨度较小时, ΔB 也可视为小角。采用小角度的近似计算公式: cos ΔB = 1, cos ΔL = 1, sin ΔB = ΔB, sin ΔL = ΔL, 将式(2)展开并舍弃小角 ΔB、ΔL 的

二次项后可得

$$R_{B_0, L_0}^{(B, L)} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta L \sin B & -\Delta L \cos B \\ -\Delta L \sin B & 1 & -\Delta B \\ \Delta L \cos B & \Delta B & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (L_0 - L) \sin B & -(L_0 - L) \cos B \\ -(L_0 - L) \sin B & 1 & (B - B_0) \\ (L_0 - L) \cos B & -(B - B_0) & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

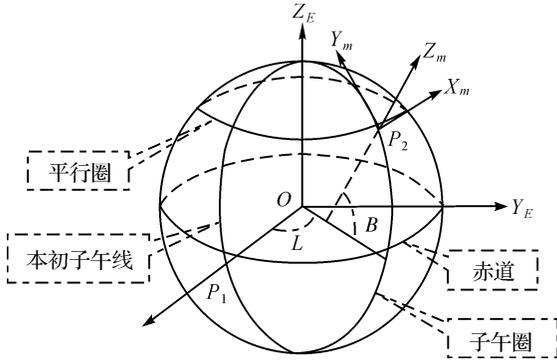


图1 椭球面上点的关系

Fig. 1 Relationship of points on ellipsoidal surface

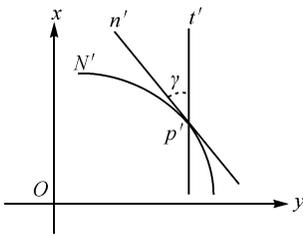


图2 子午线收敛角

Fig. 2 Meridian convergence

2.2 子午线偏差对角度变换的影响

在高斯-克吕格投影坐标系中, 投影带中央子午线和赤道经高斯-克吕格投影后成为相互垂直的直线, 而投影带内的其他子午线则变为曲线, 于是产生了投影点处子午线与中央子午线之间的夹角(称为投影点处的子午线收敛角)。图2中 p' 和 $p'N'$ 分别为椭球面上点 p 和过 p 点的子午线 pN 在高斯平面上的投影。由图2可知, 投影点 p' 的子午线收敛角就是 $p'N'$ 在 p' 点上的切线 $p'n'$ 与坐标纵轴平行线 $p't'$ 之间的夹角, 用 γ 表示^[12]。

子午线收敛角 γ 的一般计算式为^[12]

$$\gamma = \sin B \cdot l + \frac{1}{3} \sin B \cos^2 B \cdot (1 + 3\eta^2 + 2\eta^4) \cdot l^3 + \frac{1}{15} \sin B \cos^4 B \cdot (2 - t^2) \cdot l^5 + O(l^5) \quad (4)$$

式中, $t = \tan B$, $\eta^2 = e'^2 \cos^2 B$ 。这里, e' 为第二偏心率; B 为投影点的纬度; l 为投影点相对于中央子午线的经差。

高斯-克吕格投影前后在方位向产生子午线收敛角大小的子午线偏差, 需对其进行修正。只需要将坐标系绕旋转之后的 Z_m 轴旋转角度 $-\gamma$, 其旋转矩阵为

$$R_\gamma = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

普通测量中, 子午线收敛角一般用近似公式表示

$$\gamma = l \sin B \quad (6)$$

由于 γ 为小角度, 则有 $\cos \gamma = 1$, $\sin \gamma = \gamma$ 。于是, 式(5)可表示为

$$R_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & 0 \\ \gamma & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -l \sin B & 0 \\ l \sin B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -(L_{0gk} - L) \sin B & 0 \\ (L_{0gk} - L) \sin B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, L_{0gk} 和 L 分别为投影带中央经线和投影点的经度。

2.3 角度变换的补偿矩阵

由2.1和2.2节的分析可知, POS系统获取的姿态数据经过一系列转换可转换到原点位于 (B_0, L_0) 处的局部切平面坐标系下, 若继续转换到我国国家地形测量坐标系下, 则需要考虑地球曲率和子午线偏差对角度影响。综合两个因素, 对POS系统测定的传感器姿态角变换影响的修正可联合式(2)和式(7)进行, 由此获得高斯-克吕格投影坐标系下对角度的补偿矩阵 R_{B_0, L_0}^m 为

$$R_{B_0, L_0}^m = R_{(B_0, L_0)}^{(B, L)} R_\gamma = \begin{bmatrix} \cos L_0 & 0 & -\sin L_0 \\ -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 & -\sin B_0 \cos L_0 \\ \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 & \cos B_0 \cos L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \sin L \\ 0 & \cos B & \sin B \\ -\sin L & -\sin B \cos L & \cos B \cos L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -(L_{0gk} - L) \sin B & 0 \\ (L_{0gk} - L) \sin B & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

在测区范围不大的情况下, 可以按照式(2)的简化原则对式(8)进行简化, 其简化形式为

$$R_{0}^m = \begin{bmatrix} 1 & (L_0 - L_{0k}) \sin B & - (L_0 - L) \cos B \\ - (L_0 - L_{0k}) \sin B & 1 & (B - B_0) \\ (L_0 - L) \cos B & - (B - B_0) & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 高斯-克吕格投影坐标系下 POS 外方位角元素的转换

前已述及, 将 IMU 获取的传感器姿态角转换成影像的 3 个外方位角元素(φ, ω, κ)可通过一系列坐标变换来实现, 即像空间坐标系(i)→载体坐标系(c)→IMU 本体坐标系(b)→导航坐标系(n)→地心直角坐标系(E)→物方坐标系(m)^[8]。变换矩阵的具体形式为

$$R_i^m(\varphi, \omega, \kappa) = R_i^m R_c^E R_b^c(\Psi, \Theta, \Phi) R^b R_i^c \quad (10)$$

式中, R_i^j 表示将物点由坐标系 i 变换到坐标系 j 的正交变换矩阵。

如果物方坐标系采用笛卡儿直角坐标系, 式(10)将严格成立。考虑到我国地形测量坐标系通常采用高斯-克吕格投影坐标系, 在上述转换过程中, 必须顾及地球曲率和子午线偏差对角度变换的影响。综合第 2 节的分析, 式(10)应扩充为

$$R_i^{m_0}(\varphi, \omega, \kappa) = R_{m_0}^m R_c^E R_b^c(\Psi, \Theta, \Phi) R^b R_i^c \quad (11)$$

式中, $R_{m_0}^m$ 为式(9)中矩阵 R_{0}^m 的转置矩阵; m_0 为我国地形测量坐标系; m 为原点位于 (B_0, L_0) 处的局部切平面坐标系。其他参数与式(10)中一致, 具体的矩阵形式见文献[8]。

$$\text{若令 } R_i^{m_0}(\omega, \varphi, \kappa) = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}, \text{ 当采用}$$

φ, ω, κ 转角元素系统时, 则可根据式(11)中的 $R_i^{m_0}(\omega, \varphi, \kappa)$ 计算出摄影测量中所需的影像外方位角元素

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= -\arctan\left(\frac{a_3}{c_3}\right) \\ \omega &= -\arcsin\left(b_3\right) \\ \kappa &= \arctan\left(\frac{b_1}{b_2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

4 试验及其结果分析

4.1 试验设计

本文对摄于 2004 年 11 月和 2005 年 10 月的

两个不同地区、不同摄影比例尺的航摄影像进行了试验。表 1 给出了用于试验影像的主要技术参数。

表 1 试验航摄影像技术参数

Tab. 1 Technical data of the experimental images

项 目	试验 1	试验 2
航摄影仪	Leica RC-30	Leica RC-30
机载定位定向系统	POS AV 510	POS AV 510
航摄胶片	Kodak 2442	Kodak 2402
航摄影主距/mm	153.84	153.53
像幅/cm ²	23×23	23×23
摄影比例尺	1: 2 500	1: 60 000
航向重叠/(%)	61	64
旁向重叠/(%)	32	30
航线数	9	4
像片数	255	48
地面控制点数	73	29
最大地形起伏/m	38.60	107.50

4.2 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下 POS 角元素的转换

由于影像外方位元素的真值无法得到, 试验利用自行研制的 POS 辅助光束法区域网平差系统 WuCAPS^[13-14] 去间接解求, 并视其为影像外方位元素的“真值”。利用 WuCAPS 系统对两个试验区影像进行 GPS 辅助光束法区域网平差, 获得全部试验影像的 6 个外方位元素及其理论精度。其中, 试验 1 的外方位角元素理论精度分别为: $m_\varphi = \pm 11.7''$, $m_\omega = \pm 12.6''$, $m_\kappa = \pm 4.3''$; 试验 2 的外方位角元素的理论精度分别为: $m_\varphi = \pm 17.9''$, $m_\omega = \pm 19.4''$, $m_\kappa = \pm 6.5''$ 。

对 POS 系统获取的 IMU 本体坐标系在导航坐标系中的侧滚、俯仰和偏航角(Φ, Θ, Ψ)数据根据式(10)进行一系列变换, 可以得到未经地球曲率和子午线偏差改正的 WGS-84 椭球经过高斯-克吕格投影之后的坐标系(本文中简称为 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系)下的影像外方位角元素, 与利用 WuCAPS 系统实施带四角地面控制点的 GPS 辅助光束法区域网平差计算的 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下的影像外方位角元素比较, 可获得未经补偿的外方位角元素的精度(表 2 中记为“未补偿”)。利用上文导出的补偿矩阵(8)对地球曲率和子午线偏差引起的影像外方位角元素误差进行改正, 通过式(11)可得到补偿后的 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下影像的外方位角元素, 然后将其与利用 WuCAPS

系统提供的外方位角元素值比较, 得到 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下的外方位角元素的精度(表 2 中记为“补偿后”)。同时, 将 POS 系统提供的 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下的外方

位角元素也与 WuCAPS 系统提供的外方位角元素进行比较, 得到 POS 系统提供的 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下外方位角元素的精度(表 2 中记为“POS”), 一并列入表 2。

表 2 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下影像外方位角元素的转换精度

Tab. 2 Accuracy of exterior orientation angular elements in WGS-84 Gauss-Kruger projection coordinate system (°)

比较方案	误差	未补偿			补偿后			POS		
		φ	ω	κ	φ	ω	κ	φ	ω	κ
试验 1	最大值	217.6	1 393.6	1 537.7	128.1	- 132.4	- 146.6	- 144.9	- 104.4	- 145.5
	最小值	0.0	0.1	455.8	0.1	0.8	- 0.3	- 0.1	- 0.1	0.2
	平均值	16.8	- 37.1	1 429.4	16.8	- 26.8	- 23.1	- 13.1	- 5.0	- 22.2
	中误差	52.4	156.1	1 434.1	31.4	36.9	46.6	31.6	36.8	45.6
试验 2	最大值	919.7	486.4	- 789.4	88.0	61.0	103.1	- 157.8	69.5	103.3
	最小值	8.5	122.0	- 556.8	6.2	- 1.2	- 1.3	3.8	0.6	- 1.3
	平均值	- 8.5	6.0	- 673.7	- 9.7	2.5	17.2	- 31.3	12.6	17.2
	中误差	535.1	324.5	702.3	35.5	34.6	65.2	47.5	35.3	65.2

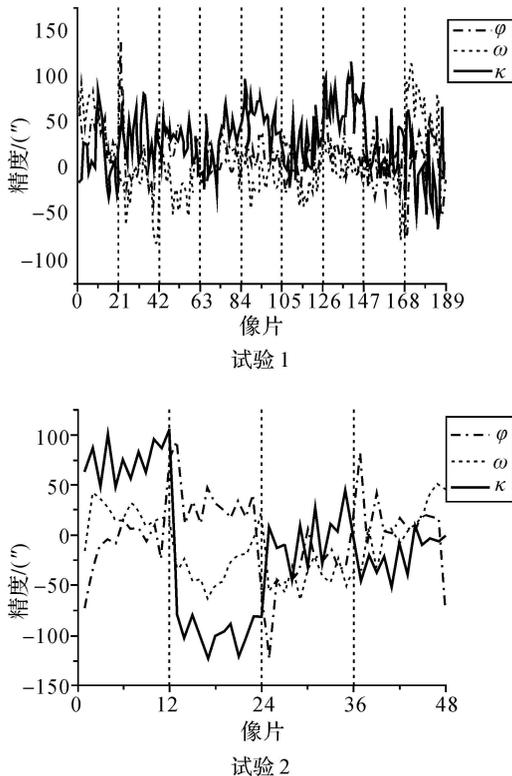


图 3 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下的影像外方位角元素的转换精度(与 WuCAPS 结果比较)

Fig. 3 Accuracy of exterior orientation angular elements in WGS-84 Gauss-Kruger projection coordinate system (compared to WuCAPS)

分析表 2 和图 3 可以得出如下结论:

(1) 未经角度补偿的 WGS-84 高斯-克吕格投

影坐标系下影像的外方位角元素的转换精度是很低的, 存在明显的误差; 引入补偿矩阵后, 显著提高了外方位角元素的转换精度。这说明在 POS 系统角元素转换过程中引入补偿矩阵是必要的。

(2) WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下, 利用补偿矩阵转换得到的影像外方位角元素与 POS 系统提供的外方位角元素没有明显差别, 证明了补偿矩阵的正确性。

(3) 相对于摄影测量加密方法获得的影像外方位角元素, 利用补偿矩阵得到的 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下的影像外方位角元素有显著的差异, 在每条航线内部呈现系统性, 航线之间则呈现跳跃, 尤以小比例尺试验区更为明显。究其原因, 是因为影像外方位角元素转换过程中, 整个试验区只采用了一个视准轴误差补偿矩阵, 可体现检校场区域的总体系统误差, 未必能反映各航线内的误差变化规律。由于 IMU 本身具有航线内随时间变化的漂移误差, 因此, 试验场检校法处理后, POS 影像外方位元素仍在每航线内残存少量误差, 更严密的 POS 影像外方位元素的系统检校方法仍需进一步研究。

4.3 WGS-84 高斯-克吕格投影坐标系下取不同纵坐标轴时角元素的转换

为了分析 POS 角元素的转换与纵坐标轴的关系, 在试验区所在投影带(采用 3° 带投影)的两侧各选取了两个相邻的投影带, 分别取用 5 个投影带的中央经线投影作为高斯-克吕格投影坐标系的纵坐标轴进行外方位角元素的转换, 比较转

换结果与 WuCAPS 的计算结果, 得到表 3 所列的不同中央经线下影像外方位角元素的转换精度。

表 3 不同中央经线下的外方位角元素的转换精度

Tab. 3 Accuracy of exterior orientation angular elements with different central meridian (")

坐标系 纵轴	测区中央经线			测区中央经线- 3°			测区中央经线+ 3°			测区中央经线- 6°			测区中央经线+ 6°		
	φ	ω	K	φ	ω	K	φ	ω	K	φ	ω	K	φ	ω	K
试验 1	31.4	36.9	46.6	91.6	54.0	6 973.1	85.6	69.7	7 030.7	172.2	96.8	13 974.9	164.9	116.6	14 032.4
试验 2	35.5	34.6	65.2	130.5	68.6	6 909.7	131.8	110.2	6 916.8	253.7	151.7	13 822.5	256.2	193.2	13 829.6

从表 3 可以看出, POS 角元素的转换与中央经线的选取密切相关。外方位角元素转换精度随着试验区到中央经线距离的增加而降低。原因是子午线收敛角是在每个投影带中定义的, 为投影变换后投影点处的子午线与其所在投影带的中央子午线之间的夹角。因此, 当摄影区域跨越多个投影带时, 每一个投影带内影像外方位角元素的转换应选取摄区所在投影带的中央子午线作为角度转换坐标系的纵轴。

4.4 WGS 84 高斯-克吕格投影坐标系下取不同坐标原点时角元素的转换

为了分析坐标原点的选取对 POS 角元素转换精度的影响, 在试验区的中央点两侧以纬度为 1° 的间隔各选取了两个点, 分别取用 5 个点作为外方位元素转换统一坐标系的坐标原点进行外方位角元素的转换。将转换结果与 WuCAPS 计算的外方位角元素值比较, 得到不同坐标原点下外方位角元素的转换精度, 结果列于表 4。

表 4 不同坐标原点下的外方位角元素的转换精度

Tab. 4 Accuracy of exterior orientation angular elements with different origin of coordinate system (")

坐标原点	测区中央点			测区中央点- 1°			测区中央点+ 1°			测区中央点- 2°			测区中央点+ 2°		
	φ	ω	K												
试验 1	31.4	36.9	46.6	31.4	36.9	46.6	31.4	36.9	46.6	31.4	36.9	46.6	31.4	36.9	46.6
试验 2	35.5	34.6	65.2	35.5	34.6	65.2	35.5	34.6	65.2	35.5	34.6	65.2	35.5	34.6	65.2

由表 4 可知, 坐标原点的选取对 POS 角元素的转换精度没有实质性影响。主要原因是坐标原点的选取是为了将所有投影点处的小切平面坐标系转换到测区内统一的切平面坐标系, 这与坐标原点的位置无关。一般情况下, 坐标原点选在测区的中央是比较合适的。

4.5 1980 国家高斯-克吕格投影坐标系下的 POS 角元素转换

根据 POS 系统直接输出的 WGS-84 参考椭球导航坐标系下的 IMU 姿态角, 利用布尔莎 7 参数中的 3 个角度变换参数可以获得 1980 国家大地坐标系采用的参考椭球导航坐标系下的 IMU 姿态角。根据式 (11), 经一系列坐标系的旋转变换并利用补偿矩阵进行角度误差改正, 最终可得到 1980 国家大地坐标系经高斯-克吕格投影后的坐标系(本文中简称为 1980 国家高斯-克吕格投影坐标系)下的影像外方位角元素。将此数据与 WuCAPS 平差得到的 1980 国家高斯-克吕格投影坐标系下的外方位角元素进行比较, 即可得到 1980 国家高斯-克吕格投影坐标系下外方位角元

素的转换精度。同时, 比较 POS 系统提供的外方位角元素也与 WuCAPS 获取的外方位角元素, 得到 POS 角元素的转换精度。结果一并列入表 5。

表 5 1980 国家高斯-克吕格投影坐标系下外方位角元素的转换精度

Tab. 5 Accuracy of exterior orientation angular elements in 1980 national Gauss-Kruger projection coordinate system (")

转换方法	误差	本文的			POS 提供的		
		φ	ω	K	φ	ω	K
试验 1	最大值	132.9	-126.9	-128.6	178.0	-189.6	-81.2
	最小值	0.5	-0.6	-0.2	0.1	-1.2	-0.3
	平均值	23.9	-29.4	-22.3	26.3	-48.9	-16.8
	中误差	34.0	33.7	38.4	42.6	53.9	31.6
试验 2	最大值	127.3	-97.6	111.5	-159.6	-90.9	122.2
	最小值	0.5	2.8	2.0	-0.1	0.5	2.2
	平均值	3.2	-19.0	11.4	-28.3	-16.5	11.5
	中误差	34.6	39.9	60.8	50.7	35.1	65.8

从表 5 可以看出, 相对于利用 WuCAPS 系统实施的 GPS 辅助光束法区域网平差的影像外方位角元素, 利用本文中的补偿矩阵进行转换所得

到的影像外方位角元素的精度明显高于 POS 系统所提供的影像外方位角元素的精度。

5 结束语

考虑到我国地形测量坐标系统通常采用高斯-克吕格投影坐标系,在利用 POS 系统测定航空遥感影像外方位元素的计算过程中,必须顾及地球曲率和子午线偏差对影像姿态角的影响。本文在分析了地球曲率和子午线偏差对航空影像外方位角元素影响机理的基础上,提出了利用补偿矩阵消除 POS 系统提供的传感器姿态角向影像外方位角元素转换误差的方法,并推导出了补偿矩阵的严密计算公式。通过对带有 POS 数据的真实航摄影像的试验表明,本文给出的补偿矩阵是正确的,方法是行之有效的。试验结果揭示,基于补偿矩阵的 POS 角元素的转换精度与中央经线的选取密切相关,转换时应该选择测区所在投影带的中央子午线作为坐标系统的纵轴;但与坐标原点的选取无关,坐标原点选在测区的中央某点就可以了。试验结果也表明,经补偿矩阵修正后的影像外方位角元素精度明显高于 POS 系统所提供的影像外方位角元素精度。由于试验所限,对于 POS 角元素的转换方法,还有待更进一步的试验研究。

参考文献:

- [1] LI Xueyou. Principle, Method and Practice of IMU/DGPS-based Photogrammetry [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2005. (李学友. IMU/DGPS 辅助航空摄影测量原理、方法及实践 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2005.)
- [2] MOSTAFA M, HUTTON J. Airborne Remote Sensing without Ground Control [C] // Proceedings of IGARSS'01. Sydney: [s. n.], 2001: 2961-2963.
- [3] MULLER R, LEHNER M, MULLER R, et al. A program for Direct Georeferencing of Airborne and Spaceborne Line Scanner Images [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 34(A1): 148-153.
- [4] CRAMER M, STALLMANN D, HAALA N. Direct Georeferencing using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B3): 198-205.
- [5] YASTIKLIN, JACOBSEN K. Influence of System Calibration on Direct Sensor Orientation [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(5): 629-633.

- [6] LEGAT K. Approximate Direct Georeferencing in National Coordinates [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(4): 239-255.
- [7] SKALOUD J, LEGAT K. Theory and Reality of Direct Georeferencing in National Coordinates [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, 63(2): 272-282.
- [8] LIU Jun, ZHANG Yongsheng, WANG Dondhong, et al. Computing Method of Exterior Orientation Elements of POS AV 510-DG System [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2004, 6(4): 43-47. (刘军, 张永生, 王冬红, 等. POS AV 510-DG 系统外方位元素的计算方法 [J]. 测绘技术装备, 2004, 6(4): 43-47.)
- [9] BAUMKER M, HEIMES F J. New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data using the Position and Angular Data of a Hybrid Inertial Navigation System [C] // Proceedings of OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation. Hanover: [s. n.], 2002: 197-212.
- [10] GRAY I D. Effects of the Earth's Curvature on Radar Tracking System [J]. Radar System, 1997, 449: 606-608.
- [11] RESSL C. The Impact of Conformal Map Projections on Direct Georeferencing [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 34(3A): 283-288.
- [12] KONG Xiangyuan, MEI Shiyi. Control Surveying [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1996. (孔祥元, 梅是义. 控制测量学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1996.)
- [13] YUAN Xiuxiao. A Novel Method of Systematic Error Compensation for a Position and Orientation System [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(8): 953-963.
- [14] YUAN Xiuxiao. POS-supported Bundle Block Adjustment [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(3): 342-348. (袁修孝. POS 辅助光束法区域网平差 [J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 342-348.)

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2009-11-20

修回日期: 2011-01-10

第一作者简介: 袁修孝(1963—), 男, 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。First author: YUAN Xiuxiao (1963—), male, PhD, professor, PhD supervisor, majors in research and teaching of theory and method for high precision airborne and spaceborne photogrammetric positioning and geometric processing of high-resolution satellite remote sensing imagery.

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