

# 机载三线阵 CCD 影像自检校光束法区域网平差

王 涛<sup>1</sup> 张 艳<sup>1</sup> 潘申林<sup>1</sup> 林丽霞<sup>1</sup>

(1 信息工程大学测绘学院, 郑州市陇海中路 66 号, 450052)

**摘 要:** 将基于附加参数的自检校光束法区域网平差技术应用于机载三线阵 CCD 传感器 ADS40 影像的几何定位处理, 分析了机载三线阵 CCD 传感器成像的误差特性, 建立了相适有效的自检校附加参数模型, 以及 3 种形式的外方位元素变化模型和自检校光束法区域网平差模型。实验结果表明, 自检校光束法区域网平差能够有效补偿 ADS40 影像存在的系统误差, 显著提高定位精度。

**关键词:** 机载三线阵 CCD 影像; 自检校光束法区域网平差; ADS40; 系统误差

**中图分类号:** P237.3; P231.4

采用 CCD 数字航空摄影系统是当前摄影测量发展的重要方向之一, 基于三线阵概念的数字航摄相机在业界受到了普遍关注<sup>[1,2]</sup>。但从实际应用来看, 直接获取的外方位元素精度还难以满足高精度定位的要求<sup>[3,4]</sup>, 因此, 有必要在少量地面控制的支持下, 通过区域网平差来获取加密点坐标和更高精度的定向数据。光束法区域网平差是理论上最直接、最严密、精度最高的空中三角测量区域网平差方法, 但在解析空中三角测量的生产和科学实践中, 其优势却往往难以体现。基于附加参数的自检校光束法区域网平差是最有效的系统误差补偿方法, 将自检校光束法区域网平差技术应用于传统胶片式模拟相机影像, 摄影测量学者进行过大量研究和实验<sup>[5]</sup>, 但目前针对新型机载三线阵 CCD 传感器影像的研究相对较少<sup>[6-8]</sup>。

本文将基于附加参数的自检校技术应用于机载三线阵 CCD 影像的精确定位处理, 建立了自检校光束法区域网平差模型, 并利用登封地区 ADS40 全套航摄飞行数据, 对不同平差模型、不同控制点数量对影像定位精度的影响进行了评估。

## 1 自检校区域网平差模型

### 1.1 自检校平差的基本误差方程

自检校光束法平差的基本公式为:

$$\begin{aligned}
 x + \Delta x &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\
 y + \Delta y &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  表示该像点处引入的附加参数函数。如果将控制点也处理成带权观测值的话, 则平差的基本误差方程式为:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_x &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{X}_g + \mathbf{C}\mathbf{X}_s - \mathbf{L}_x, \mathbf{P}_x \\
 \mathbf{V}_g &= \mathbf{E}_g\mathbf{X}_g - \mathbf{L}_g, \mathbf{P}_g \\
 \mathbf{V}_s &= \mathbf{E}_s\mathbf{X}_s - \mathbf{L}_s, \mathbf{P}_s
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

式中,  $\mathbf{X}$  为外方位元素和坐标未知数改正数矢量;  $\mathbf{A}$  为相应的误差方程式系数矩阵;  $\mathbf{L}_x$  为像点坐标的观测值矢量;  $\mathbf{P}_x$  为像点坐标的权矩阵;  $\mathbf{X}_g$  为控制点坐标的改正数矢量;  $\mathbf{B}$  为相应的误差方程式系数矩阵;  $\mathbf{L}_g$  为控制点坐标改正数的观测值矢量;  $\mathbf{P}_g$  为控制点坐标的权矩阵;  $\mathbf{X}_s$  为自检校附加参数矢量;  $\mathbf{C}$  为相应的误差方程式系数矩阵;  $\mathbf{L}_s$  为附加参数的观测值矢量;  $\mathbf{P}_s$  为附加参数的权矩阵。

### 1.2 自检校附加参数模型

#### 1.2.1 镜头光学畸变引起像点误差的分析

1) 镜头光学畸变差是指相机物镜系统设计、制作和装配引起的像点偏离其理想位置的点位误

差。镜头的光学畸变是非线性的,主要包括径向畸变和偏心畸变。径向畸变可表示为:

$$\Delta x = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots \quad (3)$$

分别将其分解到像平面坐标系的  $x$  轴和  $y$  轴上:

$$\begin{cases} \Delta x_r = k_1 \bar{x} r^2 + k_2 \bar{x} r^4 + k_3 \bar{x} r^6 + \dots \\ \Delta y_r = k_1 \bar{y} r^2 + k_2 \bar{y} r^4 + k_3 \bar{y} r^6 + \dots \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\bar{x} = (x - x_p)$ ;  $\bar{y} = (y - y_p)$ ;  $r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$ ;  $(x_p, y_p)$  为像主点坐标。

偏心畸变主要是由光学系统光心与几何中心不一致造成的,即镜头器件的光学中心不能严格共线,它使像点既产生径向偏差又产生切向偏差,表达式为:

$$p(r) = \sqrt{p_1^2 + p_2^2} \cdot r^2 \quad (5)$$

将其分解到像平面坐标系的  $x$  轴和  $y$  轴上,则有:

$$\begin{cases} \Delta x_d = p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y} \\ \Delta y_d = 2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $p_1, p_2$  为偏心畸变系数。偏心畸变在数量上要比径向畸变小得多。

2) 传感器镜头主点坐标  $(x_p, y_p)$  的偏移,该偏移量在  $x, y$  方向上的偏移量用常量  $\Delta x_p, \Delta y_p$  表示,同时,设传感器焦距的变化量为  $\Delta f$ ,该变化量在像点上的影响可以模拟为:

$$\begin{aligned} dx_f &= -\frac{\Delta f}{f} (x - x_p) \\ dy_f &= -\frac{\Delta f}{f} (y - y_p) \end{aligned} \quad (7)$$

则某像点  $p$ , 镜头畸变造成的像点误差模型为:

$$\begin{cases} \Delta x' = \Delta x_p - \frac{\Delta f}{f} \bar{x} + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{x} + p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y} \\ \Delta y' = \Delta y_p - \frac{\Delta f}{f} \bar{y} + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \bar{y} + 2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) \end{cases} \quad (8)$$

1.2.2 线阵 CCD 畸变和移位引起像点变化的分析

1) 像元尺寸的变化主要影响成像比例尺。如图 1 所示,建立线阵 CCD 扫描线坐标系,定义  $x$  轴为飞行方向,  $y$  轴为 CCD 扫描方向,  $N_p$  为线阵 CCD 像元数。设单个像元原尺寸为  $(p_x, p_y)$ , 变化率为  $(dx_p, dy_p)$ , 沿  $x$  和  $y$  轴方向总变化为  $(dp_x, dp_y)$ , 由于沿  $y$  轴方向有  $N_p$  个像元,  $x$  轴方向仅有 1 个像元,显然有:

$$\begin{cases} dp_x = dx_p \\ dp_y = N_p \cdot dy_p \end{cases} \quad (9)$$

可以只考虑沿  $y$  轴方向的变形影响,忽略  $x$  轴方

向。

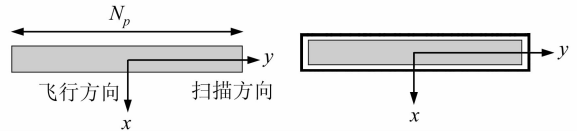


图 1 线阵 CCD 像元尺寸变化的影响

Fig. 1 Influence of Linear CCD Pixel Size Change

2) CCD 在焦平面内的平移将使得像主点偏离原定位置,沿  $x$  和  $y$  轴方向的移动影响可用常量  $dx_c$  和  $dy_c$  表示,如图 2 所示。

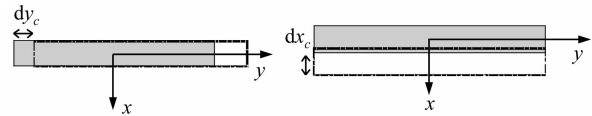


图 2 线阵 CCD 沿  $y$  轴和  $x$  轴平移

Fig. 2 Translation of Linear CCD Along  $x$  Axis and  $y$  Axis Respectively

3) 设线性 CCD 在焦平面内旋转了角度  $\theta$ ,  $dx_\theta$  和  $dy_\theta$  分别为由于 CCD 旋转而造成的在飞行方向和扫描方向的像坐标误差,如图 3 所示,则有:

$$\begin{cases} dx_\theta = \bar{y} \sin \theta \\ dy_\theta = \bar{y} - \bar{y} \cos \theta = \bar{y} (1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (10)$$

一般情况下  $dy_\theta$  很小,常不予考虑,只进行  $x$  轴方向的改正。

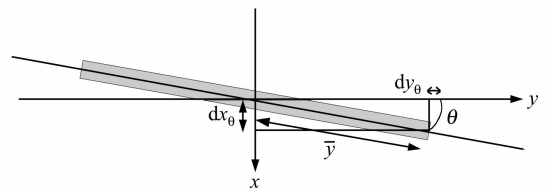


图 3 线阵 CCD 在焦平面内的旋转

Fig. 3 Rotation of Linear CCD in Focal Plane

因此,对单线阵 CCD,在考虑沿  $y$  轴方向的比例尺变化影响、线阵 CCD 在焦平面内的平移影响、沿  $x$  轴方向的旋转影响后像点误差模型为:

$$\begin{cases} \Delta x' = (\Delta x_p + dx_c) - \frac{\Delta f}{f} \bar{x} + (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \bar{x} + p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y} + \bar{y} \sin \theta \\ \Delta y' = (\Delta y_p + dy_c) - \frac{\Delta f}{f} \bar{y} + (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \bar{y} + 2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + \bar{y} s_y \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $dx_c$  和  $dy_c$  可合并到主点坐标偏移量  $\Delta x_p, \Delta y_p$  中;  $\theta$  为线性 CCD 在焦平面内旋转的角度;  $s_y$  为比例因子。ADS40 采用的是单镜头多线阵 CCD 传感器,各线阵 CCD 安置在同一焦平面上,

共用一套光学系统,因此可采用同一组光学畸变系数。对线阵 CCD<sub>j</sub> (j=1,2,3),将 dx<sub>oj</sub> 和 dy<sub>oj</sub> 合并到主点坐标偏移量 Δx<sub>bj</sub>、Δy<sub>bj</sub> 中,旋转角度为 θ<sub>j</sub>,比例因子为 s<sub>yj</sub>,则有:

$$\begin{cases} \Delta x'_j = \Delta x_{bj} - \frac{\Delta f}{f} \bar{x} + (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \bar{x} + p_1 (r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x}\bar{y} + \bar{y} \sin \theta_j \\ \Delta y'_j = \Delta y_{bj} - \frac{\Delta f}{f} \bar{y} + (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \bar{y} + 2p_1 \bar{x}\bar{y} + p_2 (r^2 + 2\bar{y}^2) + \bar{y} s_{y_j} \end{cases} \quad (12)$$

### 1.3 POS 数据支持的自检校平差模型

如何在三线阵影像的自检校光束法平差中引入 POS 数据是关键问题之一。三线阵传感器定向参数众多,且每个采样周期都对应一套外方位元素,解算过程中不可能、也没有必要一一求解,因此,选择合适的描述外方位元素变化的数学模型就十分关键。本文采用 3 种模型进行研究,分别为低阶多项式模型(LPM)、分段多项式模型(PPM)和定向片内插模型(OIM)。

1) LPM 模型。考虑 POS 系统直接测定的外方位元素仍存在一定测量误差,且呈现较强的系统性,因此,采用 LPM 来描述 POS 数据的测量误差,其实质是对 POS 数据进行漂移误差改正,此时,瞬时时刻 t 的外方位元素可表示为:

$$\begin{cases} X_S = X_{GPS} + a_X + b_X \cdot (t - t_0) \\ Y_S = Y_{GPS} + a_Y + b_Y \cdot (t - t_0) \\ Z_S = Z_{GPS} + a_Z + b_Z \cdot (t - t_0) \\ \omega = \omega_{IMU} + a_\omega + b_\omega \cdot (t - t_0) \\ \varphi = \varphi_{IMU} + a_\varphi + b_\varphi \cdot (t - t_0) \\ \kappa = \kappa_{IMU} + a_\kappa + b_\kappa \cdot (t - t_0) \end{cases} \quad (13)$$

2) PPM 模型。将飞行轨道分成若干段,每一段采用一个时间 t 的 LPM 来描述外方位元素,并在轨道分段处考虑外方位元素变化的连续和光滑。对于第 i 个轨道分段内的时刻 t,PPM 模型可表示为:

$$\begin{cases} X_S = X_{GPS} + X_0^i + X_1^i \cdot \bar{t} + X_2^i \cdot \bar{t}^2 \\ Y_S = Y_{GPS} + Y_0^i + Y_1^i \cdot \bar{t} + Y_2^i \cdot \bar{t}^2 \\ Z_S = Z_{GPS} + Z_0^i + Z_1^i \cdot \bar{t} + Z_2^i \cdot \bar{t}^2 \\ \omega = \omega_{IMU} + \omega_0^i + \omega_1^i \cdot \bar{t} + \omega_2^i \cdot \bar{t}^2 \\ \varphi = \varphi_{IMU} + \varphi_0^i + \varphi_1^i \cdot \bar{t} + \varphi_2^i \cdot \bar{t}^2 \\ \kappa = \kappa_{IMU} + \kappa_0^i + \kappa_1^i \cdot \bar{t} + \kappa_2^i \cdot \bar{t}^2 \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\bar{t} = t - t_0$ ,在分段边界处,由相邻分段多项式 i 和 i+1 计算出的外方位元素应满足相等的约束条件。此外,如果考虑到轨道光滑,也可附加一阶导数相等的条件。

3) OIM 模型。在飞行轨道上按照一定时间间隔抽取若干离散的扫描周期,称为定向片,并以定向片时刻的外方位元素作为平差未知数,其他采样时刻的外方位元素利用定向片时刻的外方位元素通过 Lagrange 多项式内插得到。设下视像点 P<sub>N</sub> 成像于扫描行 j,其位于定向片 K 和 K+1 之间,当采用三次 Lagrange 多项式内插时,则第 j 扫描行的外方位元素 (X<sub>S</sub><sup>i</sup>, Y<sub>S</sub><sup>i</sup>, Z<sub>S</sub><sup>i</sup>, ω<sup>j</sup>, φ<sup>j</sup>, κ<sup>j</sup>) 需利用相邻的 4 个定向片内插得出:

$$P(t_j) = \sum_{i=K-1}^{K+2} \left( P(t_i) \cdot \prod_{\substack{k=K-1 \\ k \neq i}}^{K+2} \frac{t - t_k}{t_i - t_k} \right) \quad (15)$$

其中, P(t) 表示 t 时刻的某一外方位元素分量。

## 2 实验与分析

### 2.1 实验数据与方法

实验采用 2009 年 8 月获取的河南登封地区 ADS40 影像数据,选取航高为 600 m 和 1 000 m 的数据进行测试,分别记为数据 A 和数据 B。数据 A 相对于地面的平均航高约 600 m,相应地面分辨率为 6 cm(GSD),选择了其中的 4 条东西航线和 2 条南北构架航线,影像覆盖区内共选取控制点 65 个。数据 B 相对于平均地面的航高约 1 000 m,平均地面分辨率为 10 cm,包括 12 条东西向平行航线,测区两端加飞 4 条南北向构架航线,选择其中的 4 条东西航线和 2 条构架航线,影像覆盖区内共选取控制点 43 个。

采用自行研制的 ADS40 影像平差软件,对每一组 ADS40 数据分别进行常规光束法平差和自检校光束法区域网平差,平差模型分别采用 LPM、PPM 和 OIM 三种实验结果见表 1、2。为验证控制点数量对平差精度的影响,实验中分别设置了 5 种不同数量的控制点配置方案。

### 2.2 实验结果分析

通过实验可以看出,本文设计的自检校光束法区域网平差模型可以有效消除或削弱系统误差的影响,显著提升定位精度。① 在无地面控制的条件下,常规区域网平差精度较差,如果以 GSD 计,采用 LPM 模型,数据 A 的 X、Y、Z 方向精度分别为 3.9、3.6 和 4.6 个 GSD,数据 B 则分别为 2、2.7 和 2.9 个 GSD,采用 PPM 和 OIM 模型情况稍好,但总体看定位精度不够理想;采用自检校平差后则能有效提高定位精度,数据 A 提高到 3.0、2.0 和 2.2 个 GSD,数据 B 则分别提高到 1.8、2.1 和 1.4 个 GSD。② 采用不同控制点数量的实验表明,无论是常规区域网平差,还是自检校

平差,增加控制点数量均有助于改善定位精度,但程度有限,当控制点数量到一定程度后,平差精度趋于平稳,再增加控制点意义不大。③采用自检校光束法平差后,同种控制条件下定位精度有明显改善,以 PPM 模型为例,在 8 个控制点条件下数据 A 的 X、Y、Z 方向精度分别由 0.059 m、0.172 m 和 0.151 m,提高到 0.043 m、0.046 m 和 0.092 m,数据 B 的精度分别由 0.106 m、0.179 m 和 0.209 m,提高到 0.087 m、0.126 m 和 0.205 m。④在 3 种平差模型中,LPM 模型最为简单方便,解算速度最快,但定位精度较差;PPM 模型由于在每个轨道分段内引入一组漂移改正参数,相比 LPM 模型精度有所提升,但幅度不大,且由于引入过多模型参数,导致解算不够稳定;OIM 模型解算最为稳定,精度最优,对三线阵影像区域网平差有良好的适用性,但解算速度稍慢,有待进一步改进。

图 4 显示的是数据 A 和 B 采用 OIM 模型进行常规区域网平差和自检校平差后的精度对比。

其中,OIMX、OIMY、OIMZ 分别表示常规区域网平差后 X、Y、Z 三个方向的均方根误差;SOIMX、SOIMY、SOIMZ 分别表示自检校区域网平差后 X、Y、Z 三个方向的均方根误差。可以看出,随着控制点数量的增加,两种方式的平差在精度上均逐步提升,当控制点多于 8 个以后,精度变化趋于平稳;在相同控制条件下,自检校平差的平面及高程精度均优于常规区域网平差。其中,平面 Y 方向精度改善最为明显,在采用 12 个控制点解算趋于稳定时,数据 A 由 0.165 m 提高到 0.034 m,数据 B 由 0.119 m 提高到 0.045 m,提升幅度为 62%;Z 方向次之;平面 X 方向精度改善幅度不大。进一步分析发现,在常规区域网平差情况下,Y 方向定位精度要明显低于 X 方向,这表明沿线阵 CCD 扫描方向可能存在较大的系统性误差,采用自检校平差后对 Y 方向的系统误差进行了有效补偿,定位精度有显著改善。从总体情况上看,数据 A 和 B 表现出了比较相近的变化趋势,体现出 OIM 模型平差的稳定性较好。

表 1 数据 A 光束法平差结果

Tab.1 Block Adjustment Results of Data A Sets

| GCP      | LPM 模型 RMS/m |       |       | PPM 模型 RMS/m |       |       | OIM 模型 RMS/m |       |       |       |
|----------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|          | X            | Y     | Z     | X            | Y     | Z     | X            | Y     | Z     |       |
| 常规<br>平差 | 0            | 0.236 | 0.219 | 0.273        | 0.243 | 0.189 | 0.234        | 0.230 | 0.182 | 0.177 |
|          | 1            | 0.129 | 0.210 | 0.183        | 0.132 | 0.209 | 0.167        | 0.148 | 0.166 | 0.163 |
|          | 4            | 0.072 | 0.179 | 0.178        | 0.078 | 0.177 | 0.145        | 0.067 | 0.158 | 0.126 |
|          | 8            | 0.061 | 0.174 | 0.176        | 0.059 | 0.172 | 0.151        | 0.064 | 0.16  | 0.125 |
|          | 12           | 0.065 | 0.176 | 0.169        | 0.057 | 0.168 | 0.144        | 0.067 | 0.165 | 0.121 |
| 自检<br>平差 | 0            | 0.178 | 0.123 | 0.134        | 0.209 | 0.117 | 0.132        | 0.165 | 0.087 | 0.121 |
|          | 1            | 0.057 | 0.046 | 0.102        | 0.061 | 0.052 | 0.099        | 0.102 | 0.049 | 0.083 |
|          | 4            | 0.043 | 0.047 | 0.098        | 0.044 | 0.043 | 0.089        | 0.057 | 0.039 | 0.052 |
|          | 8            | 0.041 | 0.049 | 0.087        | 0.043 | 0.046 | 0.092        | 0.053 | 0.037 | 0.051 |
|          | 12           | 0.040 | 0.045 | 0.085        | 0.038 | 0.041 | 0.079        | 0.052 | 0.034 | 0.049 |

表 2 数据 B 光束法平差结果

Tab.2 Block Adjustment Results of Data B Sets

| GCP      | LPM 模型 RMS/m |       |       | PPM 模型 RMS/m |       |       | OIM 模型 RMS/m |       |       |       |
|----------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|          | X            | Y     | Z     | X            | Y     | Z     | X            | Y     | Z     |       |
| 常规<br>平差 | 0            | 0.201 | 0.271 | 0.299        | 0.224 | 0.277 | 0.268        | 0.238 | 0.284 | 0.268 |
|          | 1            | 0.121 | 0.223 | 0.259        | 0.119 | 0.223 | 0.254        | 0.121 | 0.237 | 0.221 |
|          | 4            | 0.096 | 0.189 | 0.224        | 0.089 | 0.182 | 0.219        | 0.084 | 0.198 | 0.211 |
|          | 8            | 0.110 | 0.168 | 0.216        | 0.106 | 0.179 | 0.209        | 0.087 | 0.126 | 0.205 |
|          | 12           | 0.093 | 0.170 | 0.217        | 0.094 | 0.169 | 0.211        | 0.076 | 0.119 | 0.207 |
| 自检<br>平差 | 0            | 0.179 | 0.212 | 0.143        | 0.177 | 0.209 | 0.131        | 0.178 | 0.088 | 0.173 |
|          | 1            | 0.071 | 0.101 | 0.110        | 0.066 | 0.089 | 0.103        | 0.076 | 0.054 | 0.097 |
|          | 4            | 0.057 | 0.073 | 0.105        | 0.059 | 0.073 | 0.092        | 0.038 | 0.062 | 0.082 |
|          | 8            | 0.059 | 0.080 | 0.101        | 0.054 | 0.070 | 0.084        | 0.037 | 0.055 | 0.077 |
|          | 12           | 0.054 | 0.067 | 0.102        | 0.049 | 0.067 | 0.087        | 0.036 | 0.045 | 0.074 |

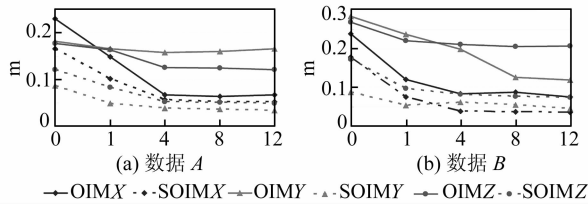


图 4 数据 A、B OIM 模型区域网平差结果对比

Fig. 4 Comparison Between OIM Block Adjustment Results of Data A and B

### 3 结 语

由于镜头畸变、CCD 变形和移位等因素引起的影像几何畸变给 ADS40 机载三线阵 CCD 影像定位带来系统性误差影响,常规区域网平差方法难以获得理想的定位精度,采用基于附加参数的自检校光束法区域网平差是实现影像精确定位的一种可行途径。本文建立的顾及像差特点的自检校附加参数模型和自检校光束法区域网平差方法能有效补偿 ADS40 影像系统误差的影响,在平差精度上优于常规区域网平差方法。

#### 参 考 文 献

[1] Cramer M. Digital Airborne Cameras: Status and Future [C]. ISPRS Workshop "High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information", Hannover, Germany, 2005

[2] Sandau R, Braunecker B, Driescher H, et al. Design Principles of The LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor [C]. IAPRS, Amsterdam, 2000

[3] 刘军,王冬红. IMU/DGPS 辅助 ADS40 影像的直接定位与精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(11): 138-141

[4] 袁修孝,傅建红. 机载 POS 系统用于航空遥感直接对地目标定位的精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(10): 847-850

[5] 李德仁,袁修孝. 误差处理与可靠性理论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002

[6] Casella V, Franzini M, Kocaman S, et al. Triangulation and Self-calibration of the ADS40 Imagery: a Case Study over the Pavia Test Site [C]. The 8th Conference on "Optical 3D Measurement Techniques", Zurich, Switzerland, 2007

[7] Kocaman S, Zhang L, Gruen A. Self-calibrating Triangulation of Airborne Linear Array CCD Cameras [C]. EuroCOW Workshop, Castelldefels, 2006

[8] Gruen A, Zhang L. Sensor Modeling for Aerial Triangulation with Three-Line-Scanner (TLS) Imagery [J]. Journal of Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2003(2): 85-98

第一作者简介:王涛,副教授,博士生。主要从事航空航天摄影定位理论与方法、遥感图像信息处理等方面的研究与教学工作。  
E-mail: wangtaoynl@163.com

## Airborne Three-Line-Scanner CCD Imagery Self-calibration Block Adjustment

WANG Tao<sup>1</sup> ZHANG Yan<sup>1</sup> PAN Shenlin<sup>1</sup> LIN Lixia<sup>1</sup>

(1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The self-calibration block adjustment based on the additional parameters is applied to ADS40 imagery geometric positioning. Upon the detailed investigation on the imaging error properties of the three-line-scanner CCD sensor, the suitable self-calibration parameter model is built up. Then three types of exterior orientation parameter models and the self-calibration block adjustment model are set up. Finally the normal block adjustment test and the self-calibration block adjustment are carried out using the ADS40 data. Experimental results prove that the self-calibration block adjustment technique can efficiently compensate the system errors of ADS40 image and significantly enhance the positioning accuracy.

**Key words:** airborne three-line array CCD image; self-calibration block adjustment; ADS40; systemic errors