

doi: 10.3788/gzxb20124104.0425

两线阵 CCD 相机几何指标差异对立体测绘的影响

智喜洋, 张伟, 侯晴宇

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 哈尔滨 150001)

摘要:为了准确、全面地揭示相机几何指标在立体测绘中的误差传播规律,研究了双线阵 CCD 相机几何指标差异与定位准确度之间的关系. 针对双线阵立体测绘特点,分析了影响测绘定位的几何指标差异参量. 在前方空间交会地面点计算公式的基础上,推导并建立了双线阵相机定位准确度模型,据此研究了内方位元素标定误差间的几何指标差异对定位准确度的影响规律. 结果表明:主点位置 x 方向误差间的差异对定位准确度影响显著,当其值从 $1 \mu\text{m}$ 增至 $2.5 \mu\text{m}$ 时,定位准确度明显下降了 60%,焦距 f 误差间的差异对定位准确度的影响几乎可忽略. 本文所建立的模型与相关研究结论对双线阵 CCD 相机指标的量化与优化设计具有重要指导意义.

关键词:双线阵 CCD 相机; 立体测绘; 定位准确度模型; 几何指标差异

中图分类号: TP75

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)04-0425-5

0 引言

双线阵 CCD 相机立体测绘是由两个线阵 CCD 光学成像系统从不同角度摄取立体影像时,经影像匹配对目标进行定位. 与三线阵相机相比,其体积和复杂度有所降低,又比单线阵相机具备更高效的对地立体摄影覆盖能力. 成像时刻卫星平台轨道、姿态及成像环境基本相同,相机能获取无明显时间差、辐射畸变的同轨立体像对,同时可达到较好的交会条件,有利于提高立体测绘定位准确度. 因此利用双线阵相机完成高精度立体测绘任务已成为重要发展趋势之一^[1-4]. 由于相机由两台单部相机构成,因此同一指标间存在差异. 相机内方位元素、几何畸变^[5-6]等几何指标误差及其差异直接影响测绘定位准确度. 目前,学者们针对几何指标误差与定位准确度之间的几何关系,推导了定位准确度的计算公式^[7-8]. 然而公式推导中,假设立体成像的两台单部相机同一指标误差相同,将其合并^[9-10],尚未考虑其差异对定位准确度的影响. 在高精度立体测绘系统中,这些指标差异的影响更为明显,因此明确双线阵相机指标差异与定位准确度之间的关系对提高立体测绘准确度有重要意义.

本文针对双线阵立体测绘原理,分析影响测绘定位的相机几何指标差异参量. 在前方空间前方交会计算公式的基础上,建立定位准确度与几何指标

差异参量间的关系模型,在此基础上,量化定位准确度随几何指标差异参量的变化规律.

1 两线阵相机指标差异对立体测绘的影响

双线阵 CCD 相机包括向前倾斜成像的前视相机与向后倾斜成像的后视相机,各相机配备完整的光学成像系统,分别独立工作,立体测绘原理如图 1 所示. 假定前视与后视相机线阵列分别为 l 与 r ,它们相互平行排列,并垂直于飞行方向 v . 在卫星平台同一轨道运行中,每个阵列依推扫原理,以一个同步周期连续扫描地面,在不同时刻得到同一地面不同投影中心的两条相互重叠的航带影像. 图中 t_l, t_r 分

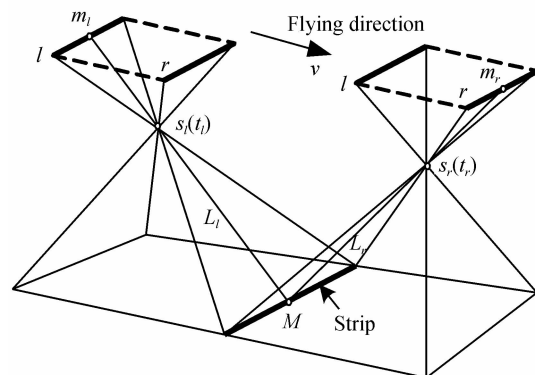


图 1 两线阵 CCD 相机立体测绘原理示意图
Fig. 1 Diagrammatic sketch of stereo mapping principle for double-linear-array CCD camera

基金项目:总装预研重点基金(No. 513210804)资助

第一作者:智喜洋(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为航天测绘相机与遥感图像处理. Email: zhibofa1230@yahoo.com.cn

导师:张伟(1962-),男,教授,博导,主要研究方向为空间光学工程与应用技术等. Email: wz6262@gmail.com

收稿日期:2011-10-18; **修回日期:**2011-11-29

别为前视与后视线阵影像的拍摄时刻, S_l, S_r 分别为相应的投影中心.

从图 1 可见, 过 m_l 与 S_l 的直线 L_l , 与过 m_r 与 S_r 的直线 L_r 交会得到地面点 M , 因此 t_l 与 t_r 时刻 S_l 与 S_r 的位置、姿态、 S_l 与 S_r 相对 l 与 r 的位置及地面点 M 在影像上的像点坐标 m_l 与 m_r 直接决定其定位准确度. 其中, S_l 与 S_r 的位置、姿态为相机外方位元素, S_l 与 S_r 相对线阵列的位置为相机内方位元素, m_l 与 m_r 为影像上的同名像点. 由于现有加工与标定技术水平及卫星发射后空间环境的影响, 很难保证前视与后视相机的内方位元素(包括焦距 f 、主点位置 x_0 与 y_0) 标定误差与几何畸变完全一致, 将导致同一指标误差间存在差异.

图 2 中 M 为理想像点前方空间交会地面点; S_l' 为存在焦距误差 $\Delta f'$ 时的前视影像的投影中心, l', r' 分别为存在 $\Delta x_0'$ 的前视、后视线阵, x_0', y_0' 分别为

存在误差 $\Delta x_0', \Delta y_0'$ 时的主点位置坐标, M' 为两个线阵存在相同上述误差时的空间交会地面点, $\Delta X', \Delta Y'$ 为相应的定位误差. x_0'', y_0'' 分别为存在误差 $\Delta x_0'', \Delta y_0''$ 时的主点位置坐标, S_l'' 为存在焦距误差 $\Delta f''$ 时的后视影像的投影中心, r'' 为存在 $\Delta x_0''$ 时的后视线阵, 其中 $\Delta x_0'' \neq \Delta x_0', \Delta y_0'' \neq \Delta y_0', \Delta f'' \neq \Delta f'$, M'' 为两个线阵在存在不同误差时的空间交会地面点, $\Delta X'', \Delta Y'', \Delta Z''$ 为相应的定位误差.

从图 2 可见, 两线阵相机内方位元素误差间的差异直接影响目标定位. 主点位置 x 方向误差间的差异将引起定位高程与平面 X 方向误差发生变化, 焦距 f 与主点位置 y 方向误差间的差异, 将引起定位平面 Y 方向误差发生变化. 相机几何畸变与内方位元素中的主点位置 y 方向误差间的差异对定位结果的影响规律相同, 因此将其示意图省略.

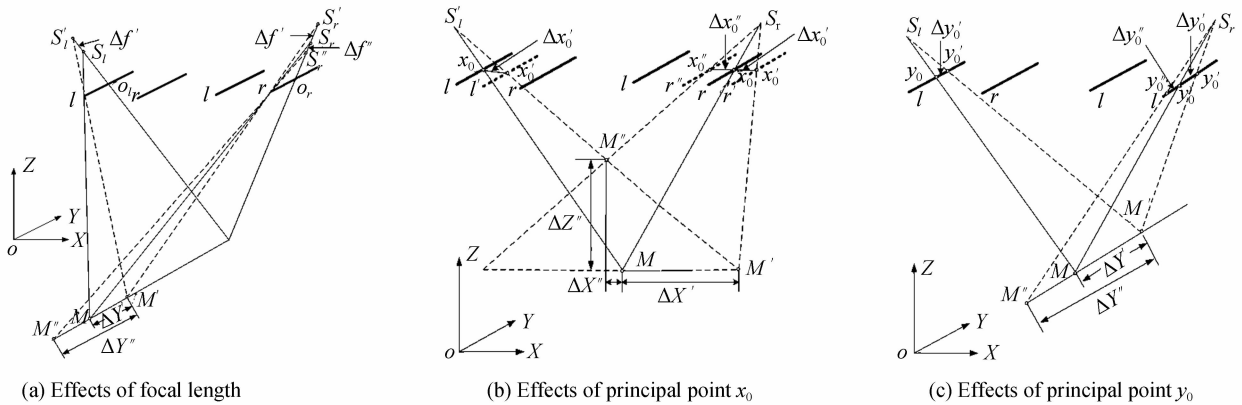


图 2 内方位元素误差间差异对定位结果的影响
Fig. 2 Effects of difference between interior orientation elements errors on positioning results

2 两线阵 CCD 相机几何指标差异对目标定位的影响

2.1 两线阵 CCD 相机定位准确度模型的建立

现有研究^[7-9]多针对三线阵相机立体测绘定位原理, 推导几何指标误差与定位准确度之间的关系. 三线阵相机是由具有一定交会角的前视、正视与后视线阵 CCD 构成的相机, 三个线阵 CCD 影像都是一直参与摄影测量处理, 三台相机采样时刻获取的三线阵影像在几何上近似于相同参量的框幅像片上的 3 条影像. 根据等效框幅像片(Equivalent Frame Photo, EFP)光束法空中三角测量原理^[11-12], 可利用影像自身解算 EFP 时刻的外方位元素, 再将线阵推扫像平面上的 x 方向坐标转换为框幅像平面上的坐标, 即前视与后视影像上的像点 x 方向坐标可表示为: $x_l = f \cdot \tan \alpha$ 与 $x_r = -f \cdot \tan \alpha$, 并将其直接引入空间前方交会地面点的计算公式. 其中, α 为前视、后视相机与正视光轴间的夹角, f 为正视相机的

焦距. 然而, 两线阵相机无法构建三角锁立体影像, 像点坐标 x 用于确定该扫描行的成像时刻, 进而计算该时刻卫星平台的位置与姿态. 对于任意时刻, 相应的卫星平台位置与姿态角分别为^[13]

$$\begin{cases} (X, Y, Z)_{sl} = (X, Y, Z)_{sl}(t_i) + [(X, Y, Z)_{sl}(t_{i+1}) - (X, Y, Z)_{sl}(t_i)] \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \\ (\varphi, \theta, \psi)_l = (\varphi, \theta, \psi)_l(t_i) + [(\varphi, \theta, \psi)_l(t_{i+1}) - (\varphi, \theta, \psi)_l(t_i)] \times \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $(X, Y, Z)_{sl}(t_{i+1})$ 与 $(\varphi, \theta, \psi)_{sl}(t_{i+1})$ 分别为 t_i, t_{i+1} 时刻卫星平台的位置与姿态角. 由于每景影像的中心扫描行成像时刻已知, 将一景影像的中心时刻作为 0 点, 任意扫描行的成像时刻 t 由影像的景心成像时刻与像点 x 方向坐标确定, 可表示为

$$t = t_c + t_e(x_l/p - l_c) \quad (2)$$

式中, t_c 为景心成像时刻; t_e 为扫描行采样时间间隔; l_c 为景心扫描行; p 为像元大小. 对式(2)微分, 计算误差公式为 $m_t^2 = m_x^2 (t_e/p)^2 + m_{t_c}^2$, 对式(1)微分计算误差公式, 得到像点 x_l 坐标误差与卫星平台位置、姿态误差之间的关系为

$$\begin{aligned} m_{X_{sl}, Y_{sl}, Z_{sl}}^2 &= m_{X_{slo}, Y_{slo}, Z_{slo}}^2 + \dot{\zeta}_{X_{sl}, Y_{sl}, Z_{sl}}^2 \left[\left(\frac{t_e}{p} \right)^2 m_{x_l}^2 + m_{t_c}^2 \right] \\ m_{\varphi_l, \theta_l, \psi_l}^2 &= m_{\varphi_{l0}, \theta_{l0}, \psi_{l0}}^2 + \dot{\tau}_{\varphi_l, \theta_l, \psi_l}^2 \left[\left(\frac{t_e}{p} \right)^2 m_{x_l}^2 + m_{t_c}^2 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $m_{X_{sl}, Y_{sl}, Z_{sl}}$ 为前视相机任意成像时刻卫星平台位置误差, $m_{X_{slo}, Y_{slo}, Z_{slo}}$ 为相应 GPS 轨道位置的测定误差, $\dot{\zeta}_{X_{sl}, Y_{sl}, Z_{sl}}$ 为相应位置的变化率; $m_{\varphi_l, \theta_l, \psi_l}$ 为前视影像相应卫星平台姿态角误差, $m_{\varphi_{l0}, \theta_{l0}, \psi_{l0}}$ 为相应星敏感器姿态角的测定误差, $\dot{\tau}_{\varphi_l, \theta_l, \psi_l}$ 为相应姿态角速率; m_{x_l} 为像点 x_l 坐标误差; m_{t_c} 为计时误差. 本文通过式(3), 将像点 x 方向坐标间接引入空间前方交会地面点的计算公式.

另外, 现有研究^[9-10]通常假设 $m_{x_{ol}} = m_{x_{or}} = 0$, $m_{y_{ol}} = m_{y_{or}} = 0$, $m_{x_l} = m_{x_r}$, $m_{y_l} = m_{y_r}$, $m_{f_l} = m_{f_r}$. 其中, $m_{x_{ol}}$ 、 $m_{y_{ol}}$ 、 m_{f_l} 与 $m_{x_{or}}$ 、 $m_{y_{or}}$ 、 m_{f_r} 分别为前、后视相机内方位元素误差, m_{y_l} 与 m_{y_r} 分别为前、后视相机几何畸变. 由于该假设没有考虑主点位置误差及前视、后视相机上述误差间的差异对定位结果的影响, 因此会降低地面点 M 坐标的求解准确度, 本文将主点位置 x_{ol} 、 x_{or} 与 y_{ol} 、 y_{or} 引入定位准确度的计算模型, 并将上述误差作为独立项, 它们之间的关系为

$$m_{x_r}^2 = m_{x_l}^2 + m_{\Delta x}^2, m_{y_r}^2 = m_{y_l}^2 + m_{\Delta y}^2$$

$$\begin{aligned} m_{x_{or}}^2 &= m_{x_{ol}}^2 + m_{\Delta x_0}^2, m_{y_{or}}^2 = m_{y_{ol}}^2 + m_{\Delta y_0}^2 \\ m_{f_r}^2 &= m_{f_l}^2 + m_{\Delta f}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $m_{\Delta x_0}$ 、 $m_{\Delta y_0}$ 、 $m_{\Delta f}$ 为相机内方位元素标定误差间的差异; $m_{\Delta y}$ 为几何畸变间的差异.

摄影光线的空间前方交会地面点计算公式为

$$\begin{cases} X_M = X_{sl} + N_l X_{cl} \\ Y_M = Y_{sl} + \frac{1}{2} (N_l Y_{cl} + N_r Y_{cr} + B_y) \\ Z_M = Z_{sl} + N_l Z_{cl} \end{cases} \quad (5)$$

式中, X_M 、 Y_M 、 Z_M 为地面点 M 的坐标; X_{cl} 、 Y_{cl} 、 Z_{cl} 与 X_{cr} 、 Y_{cr} 、 Z_{cr} 分别为 M 点在左与右像空间坐标系坐标; B_x 、 B_y 、 B_z 为摄影基线在 3 个方向上的分量; N_l 、 N_r 为左、右投影光线缩放系数^[14].

计算 X_{cl} 、 Y_{cl} 、 Z_{cl} 与 X_{cr} 、 Y_{cr} 、 Z_{cr} 为

$$\begin{bmatrix} X_{cl, cr} \\ Y_{cl, cr} \\ Z_{cl, cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11l, 11r} & b_{21l, 21r} & b_{31l, 31r} \\ b_{12l, 12r} & b_{22l, 22r} & b_{32l, 32r} \\ b_{13l, 13r} & b_{23l, 23r} & b_{33l, 33r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta_{l, r} & 0 & \sin \beta_{l, r} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_{l, r} & 0 & \cos \beta_{l, r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_{ol, r} \\ y_{l, r} - y_{ol, r} \\ -f_{l, r} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, (x_{ol}, y_{ol}, f_l) 与 (x_{or}, y_{or}, f_r) 分别为前视与后视相机的内方位元素; y_l 与 y_r 为相应影像上的像点 y 方向坐标; b_{ijl} 与 b_{ijr} ($i, j = 1, 2, 3$) 为相应卫星平台姿态角 φ 、 ψ 、 θ 组成的旋转矩阵方向余弦值, β_l 与 β_r 为前、后视相机与正视光轴间的夹角.

对式(5)和(6)微分计算误差公式, 得到两线阵相机定位准确度模型为

$$\begin{aligned} m_{X_M}^2 &= m_{X_{sl}}^2 + \left(\frac{X_{cl} Z_{cr}}{m} \right)^2 m_{B_x}^2 + \left(\frac{X_{cl} X_{cr}}{m} \right)^2 m_{B_z}^2 + \left(\frac{-N_l f_l f_r \sin \beta_r}{m} \right)^2 [(-\sin \beta_l y_l)^2 m_{\varphi_l}^2 + f_l^2 m_{\theta_l}^2 + \\ & \quad (\cos \beta_l y_l)^2 m_{\psi_l}^2 + m_{x_{ol}}^2] + \left(\frac{-N_r f_l f_r \sin \beta_l}{m} \right)^2 [(\sin \beta_r y_r)^2 m_{\varphi_r}^2 + f_r^2 m_{\theta_r}^2 + (\cos \beta_r y_r)^2 m_{\psi_r}^2 + m_{x_{or}}^2] \\ m_{Y_M}^2 &= m_{Y_{sl}}^2 + T_1 m_{B_x}^2 + \frac{m_{B_y}^2}{4} + T_2 m_{B_z}^2 + N_r^2 \left[\left(\frac{1}{2} f_r \cos \beta_r - T_2 y_r \right)^2 m_{\varphi_r}^2 + f_r (-T_1 \cos \beta_r - T_2 \sin \beta_r)^2 m_{\theta_r}^2 + \right. \\ & \quad \left. (-T_1 y_r - \frac{1}{2} f_r \sin \beta_r)^2 m_{\psi_r}^2 + (-T_1 \cos \beta_r - T_2 \sin \beta_r)^2 m_{x_{or}}^2 + \frac{1}{4} (m_{\Delta y}^2 + m_{\Delta y_0}^2) + (-T_1 \sin \beta_r + T_2 \cos \beta_r)^2 m_{\Delta f}^2 \right] + \\ & \quad N_l^2 \left[\left(\frac{1}{2} f_l \cos \beta_l + T_2 y_l \right)^2 m_{\varphi_l}^2 + (T_1 f_l \cos \beta_l + T_2 f_l \sin \beta_l)^2 m_{\theta_l}^2 + \left(T_1 y_l - \frac{1}{2} f_l \sin \beta_l \right)^2 m_{\psi_l}^2 + \right. \\ & \quad \left. (T_1 \cos \beta_l + T_2 \sin \beta_l)^2 m_{x_{ol}}^2 + \frac{1}{4} (m_{y_l}^2 + m_{y_{ol}}^2) + (T_1 \sin \beta_l - T_2 \cos \beta_l)^2 m_{f_l}^2 \right] \\ m_{Z_M}^2 &= m_{Z_{sl}}^2 + \left(\frac{Z_{cl} Z_{cr}}{m} \right)^2 m_{B_x}^2 + \left(\frac{X_{cr} Z_{cl}}{m} \right)^2 m_{B_z}^2 + \left(\frac{-N_l f_l f_r \cos \beta_r}{m} \right)^2 [(-\sin \beta_l y_l)^2 m_{\varphi_l}^2 + f_l^2 m_{\theta_l}^2 + \\ & \quad (\cos \beta_l y_l)^2 m_{\psi_l}^2 + m_{x_{ol}}^2] + \left(\frac{-N_r f_l f_r \cos \beta_l}{m} \right)^2 [(\sin \beta_r y_r)^2 m_{\varphi_r}^2 + f_r^2 m_{\theta_r}^2 + (\cos \beta_r y_r)^2 m_{\psi_r}^2 + m_{x_{or}}^2] \end{aligned} \quad (7)$$

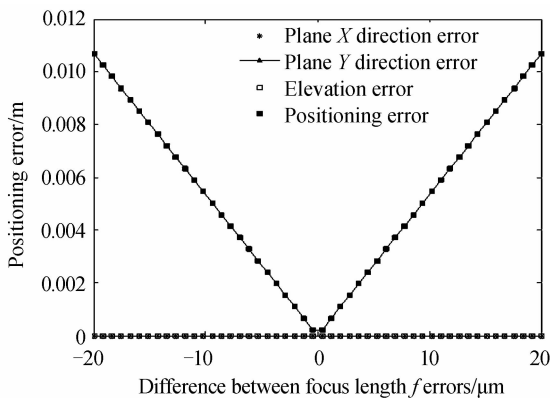
式中, m_{X_M} 、 m_{Y_M} 与 m_{Z_M} 为地面目标点的定位平面 X、Y 及高程方向误差, 定义定位准确度为 $\sqrt{m_{X_M}^2 + m_{Y_M}^2 + m_{Z_M}^2}$; $m_{X_{sl}}$ 、 $m_{Y_{sl}}$ 、 $m_{Z_{sl}}$ 为卫星摄站位置误差, $m_{\varphi_1, \theta_1, \psi_1}$ 、 $m_{\varphi_r, \theta_r, \psi_r}$ 分别为前、后视相机相应卫星平台的姿态角误差, 如式(3)所示; m_{B_x} 、 m_{B_y} 、 m_{B_z} 为摄影基线测定误差; $m = \frac{X_{cl}Z_{cr} + Y_{cr}Z_{cl}}{2m}$, $T_1 = \frac{Y_{cl}Z_{cr} + Y_{cr}Z_{cl}}{2m}$, $T_2 = \frac{Y_{cr}Z_{cl} + Y_{cl}Z_{cr}}{2m}$.

2.2 两线阵相机几何指标误差间差异对定位准确度的影响

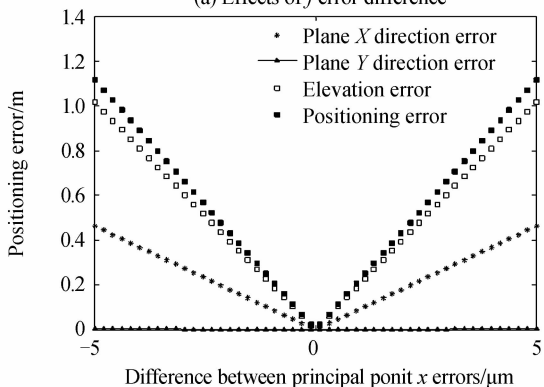
设计参量: 轨道高度为 500 km, 焦距为 3.25 m, 像元尺寸为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$, 线阵像元数为 12 000, 两线阵相机的前视与后视线阵相机夹角为 $\pm 25^\circ$.

假定前视、后视相机的内方位元素标定误差的差异分别为^[15-16]: $\Delta f \in [-20 \mu\text{m}, +20 \mu\text{m}]$, Δx_0 , $\Delta y_0 \in [-5 \mu\text{m}, +5 \mu\text{m}]$, 其它几何指标误差均为 0. 利用式(7), 计算相应的定位准确度, 绘制其影响曲线如图 3.

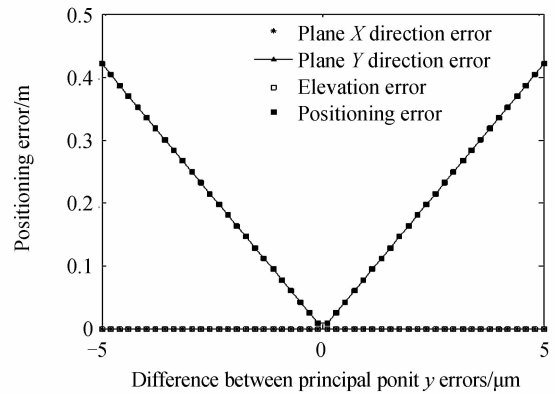
从图 3 可见, 两线阵相机内方位元素标定误差间存在的差异将影响定位准确度. 主点位置 x 方向误差间的差异对定位准确度的影响显著, 当其差异从 $1 \mu\text{m}$ 增大到 $2.5 \mu\text{m}$ 时, 定位准确度变化 0.33 m , 明显下降了 60% . y 方向误差间的差异的影响相对较小, f 误差间的差异的影响几乎可忽略.



(a) Effects of f error difference



(b) Effects of x_0 error difference



(c) Effects of y_0 error difference

图 3 内方位元素标定误差的差异对定位准确度的影响
Fig. 3 Effects of difference between interior orientation elements calibration errors on positioning accuracy

由式(7)可知, $\partial Y_M / \partial m_{y_1} = \partial Y_M / \partial m_{y_{01}}$, $\partial Y_M / \partial m_{\Delta y} = \partial Y_M / \partial m_{\Delta y_0}$, 即几何畸变与主点位置 y 方向误差的影响相同.

3 结论

本文提出了两线阵 CCD 相机的两台单部相机几何指标间的差异制约立体测绘准确度, 分析了影响立体测绘定位的几何指标差异参量, 推导并建立了定位准确度模型, 得出了内方位元素标定误差间的差异对定位准确度的影响, 由大到小依次为: 主点位置 x 方向误差、主点位置 y 方向误差与焦距 f 误差. 其中, x 方向误差间的差异对定位准确度的影响显著, 因此为满足高精度立体测绘需求, 应充分重视对相机主点位置、几何畸变, 尤其是主点位置 x 方向误差的精确标定.

本文建立的定位准确度模型及得出的相关结论, 可为两线阵 CCD 相机指标量化与优化设计提供理论支持, 具有理论意义和工程应用价值.

参考文献

- [1] KASSIS Y, TEBOURBI R, BELHADJ Z, *et al.* DSM extraction from spots stereo-pairs [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems, Grammarth, Tunisia, 2005: 1-4.
- [2] GLEYZES J P, MEYGRET A, FRATTER C, *et al.* Spots: system overview and image ground segment [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003, 1: 300-302.
- [3] BALSAVIAS E, KOCAMAN S, WOLFF K. Analysis of cartosat-1 images regarding image quality, 3D point measurement and DSM generation [J]. *The Photogrammetric Record*, 200, **23**(123): 305-322.
- [4] BARBATO F, CRESPI M, De VENDICTIS L, *et al.* Cartosat-1 stereo imagery: potentialities about orientation, DSM extraction and orthorectification [C]. Proceedings of 27th EARSeL Symposium "Geoinformation in Europe". Italy: Bolzano, 2007: 4-7.

- [5] LIGHT D. Characteristics of remote sensors for mapping and earth science applications[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1990, **56**(12): 1613-1623.
- [6] LI Xu-yang, LI Ying-cai, MA Zhen, *et al.* Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2657-2661.
李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2657-2661.
- [7] WANG Jian-rong, WANG Ren-xiang, HU Xin, *et al.* The precision estimation in forward intersection of three-line array CCD imagery[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, **34**(4): 9-10.
王建荣, 王任享, 胡莘, 等. 三线阵 CCD 影像直接前方交会准确度估算[J]. *测绘科学*, 2009, **34**(4): 9-10.
- [8] HU Xin, CAO Xi-bin. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, **40**(5): 695-699.
胡莘, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘准确度分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, **40**(5): 695-699.
- [9] WANG Zhi, ZHANG Li-ping, LI Chao-hui. Imaging and error model of three-linear tridimensional mapping camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(1): 95-100.
王智, 张立平, 李朝辉. 三线阵立体测绘相机构像及误差模型的建立[J]. *光电工程*, 2010, **37**(1): 95-100.
- [10] ZHANG Xu-mao. Formulas of the precision estimating in space forward intersection and its application in space photogrammetry system engineering [J]. *Journal of the Chinese People's Liberation Army Mapping Institute*, 2009, **19**(3): 1-11.
张绪茂. 前方空间交会准确度估算公式及在航天摄影测量系统工程中的应用[J]. *解放军测绘研究所学报*, 2009, **19**(3): 1-11.
- [11] 王之卓. 摄影测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [12] 王任享. 三线阵 CCD 影像卫星摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
- [13] GONG Dan-chao, ZHANG Yong-sheng. The solving and application of rational function model [J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2003, **20**(1): 39-42.
巩丹超, 张永生. 有理函数模型的解算与应用[J]. *测绘学院学报*, 2003, **20**(1): 39-42.
- [14] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [15] LIGHT D. A basic for estimating digital camera parameters [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, **70**(3): 297-300.
- [16] YAO Gang, FU Dan-ying, HUANG Ying. Optical system design of an integrated dual-line array stereoscopic mapping camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2229-2233.
姚罡, 傅丹膺, 黄颖. 集成式双线阵立体测绘相机光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2229-2233.

Effects of Geometric Specification Difference on Stereoscopic Mapping for Dual-linear-array CCD Camera

ZHI Xi-yang, ZHANG Wei, HOU Qing-yu

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To reveal the error propagation rules of camera geometric specification in stereoscopic mapping more accurately, the relationship between the mapping accuracy and specification difference parameters of dual-linear-array CCD camera is studied. Aiming at the characteristic of dual-linear-array stereoscopic mapping, effects of the geometric specification difference parameters on mapping positioning are analyzed. Based on the space forward intersection formula, the positioning accuracy (PA) model is established, and then the variations of PA with the difference between calibration errors of interior orientation elements are presented. The results show that the effect of the difference between principal point x errors on PA is obvious, and the PA rapidly decreases by 60% when the difference change increases to $2.5 \mu\text{m}$ from $1 \mu\text{m}$. In addition, the effect of the difference between focus length f errors on PA can be almost neglected. The model and relevant conclusions have important guiding meaning for the optimization design and quantification of dual-linear-array CCD camera specification.

Key words: Dual-linear-array CCD camera; Stereoscopic mapping; Positioning accuracy model; Geometric specification difference