

文章编号 1004-924X(2019)10-2071-09

航空摆扫成像像移计算与误差分配

徐力智^{1,2}, 颜昌翔^{1,3*}, 李 颀^{1,2}, 顾志远¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 10049)

摘要: 航空摆扫成像时, 曝光时间内像点的移动是影响成像质量的重要因素。为了研究三面镜各项误差对像移量的影响, 利用齐次坐标变换法建立了像点位移计算模型, 准确地引入了摆扫镜轴系误差等常见误差项。在此基础上, 分析了三面镜加工装调误差对像点位移量的影响, 并比较了像点位移量对各误差项变化的灵敏度。接着, 根据系统调制传递函数的指标对像点位移量的范围进行了限定, 确定了高图像质量允许的像点位移量。最后, 对分配后的三面镜误差进行了蒙特卡罗法仿真。仿真结果表明, 像点位移量在 10^{-5} m 量级, 像移的 MTF 因子为 0.97, 满足指标要求。该结论对摆扫相机的结构设计与加工装调有重要的参考价值。

关键词: 航空遥感; 像点位移; 三面摆镜; 误差分配; 调制传递函数; 蒙特卡罗仿真

中图分类号: V245.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192710.2071

Image motion calculation and error distribution for aerial whisk-broom imaging

XU Li-zhi^{1,2}, YAN Chang-xiang^{1,3*}, LI Yi^{1,2}, GU Zhi-yuan¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Center of Materials Science and Optoelectrics Engineering,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

Abstract: Image motion in the exposure time is a critical factor that affects image quality in aerial whisk-broom imaging. To study the influence of error factors in swing imaging of a three-mirror reflector on image displacement, a calculation model of image motion was first established using homogeneous coordinate transformation. Common error terms such as the precision of the rotation axis of the sweeping mirror were then introduced to the model. On this basis, the effects of machining and assembling errors of the three-mirror reflector on the displacement of the image points were analyzed, and the sensitivities of errors to image motion were compared. Then, based on the Modulation Transfer Function (MTF) of the system, the error limits of image point displacement

收稿日期: 2019-01-14; 修订日期: 2019-02-16.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFF0103603)

were set, and the allowable displacement of the image point with high image quality was determined. Finally, the error distribution of the three-mirror reflector was simulated using the Monte Carlo method. The simulation results show that the image displacement is 10^{-5} m magnitude and the MTF is 0.97, which meet the requirements of the target. These findings have significant reference value for the structural design and machining adjustment of swing cameras.

Key words: airborne remote sensing; image motion; swing mirror with three reflectors; error distribution; Modulation Transfer Function (MTF); Monte Carlo simulation

1 引言

随着航空遥感成像在国民经济和社会发展中的广泛应用,它对图像质量的要求也越来越高。在成像过程中,由于系统误差和随机误差的存在,CCD 像面在曝光时间内与地面景物存在相对位移,由此产生的像移是影响最终成像质量的关键因素^[1]。

常见的航空成像方式有推扫式成像和摆扫式成像^[2]。在地质勘探方面,通常采用摆扫式成像的方式来获取较大的视场,例如澳大利亚 HyVista 公司研制的商业勘探机载成像光谱仪 Hymap^[3],即采用两面镜摆扫的方式得到穿轨视场。在此基础上,为了降低摆扫镜的转速以及提高扫描角度利用率,本文设计了三反射面的摆镜完成摆扫^[4]。三面镜相比两面镜,镜面之间的夹角较小,角度利用率较高。因此在扫描频率相同的情况下,三面镜的转速要低于两面镜,降低转速能有效地提高系统稳定性。而当摆扫镜面数增至四面时,摆镜的质量与体积会大幅度上升,因此,考虑到摆镜质量、所占空间等限制,摆扫镜设计为三面摆镜。为了提高遥感成像质量,需要综合分析三面镜的加工装调误差等误差因素对成像质量的影响,建立由地面物点到像面像点的像移计算模型。

目前,国内对于推扫成像的像移研究较多^[5-8],但摆扫成像方向相关研究较少,并且缺少摆镜误差对像移量影响的分析。苗壮等^[9]提出一种研究摆扫成像中误差建模的方法,但仅考虑了星下点成像这一特殊情况,不适用于实际成像中地面物点坐标变化的复杂情况。王家骥^[5]等提出基于齐次坐标变换法,通过坐标系间的相互变化,建立由地面物点到像面像点的坐标关系。该方法对国内后续开展像移补偿研究具有重要的指导意

义。袁孝康等^[6-7]利用速度矢量分解法分别求解沿轨速度分量与穿轨速度分量的变化,从而求出相机的偏流角以及像点位移模型,但是此方法没有考虑到姿态角变化等误差因素引起的像点位移。仲惟超等^[8]利用矢量转化法得到目标位置矢量,其推导过程较为复杂并且结果形式不够直观。

本文针对上述模型的不足,结合三面镜的结构设计分析了三面镜的各项加工装调误差,并基于齐次坐标变换法,计算了三面摆镜对光线矢量偏折作用对应的坐标变换矩阵,建立了适用于大视场三面镜快速摆扫相机的像移模型。并在此基础上,仿真分析了三面镜加工装调误差对像点位移量的影响,比较了像点位移量对各误差因素变化的灵敏度。结合系统调制传递函数的评价标准提出了像点位移量的限定范围,在此范围内,对各误差因素进行了误差分配。最后,采用蒙特卡罗法对分配后的误差因素进行了综合仿真,仿真结果表明在现有的仪器精度下,三面镜摆扫成像方式可以满足高成像质量的要求。本研究可为航空摆扫式相机的设计提供参考。

2 航空摆扫成像像点位移模型建立

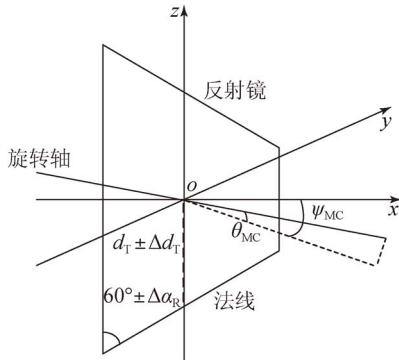
按照由地面物点到像面像点的变换流程顺序建立坐标系,其中涉及到的物理量包括:光学系统焦距 f ,时间参数 t ,飞机高程 h_s ,三面摆扫镜摆扫速度 ω ,中心点到反射面中心点距离 d_T ,反射镜面到中心轴夹角 α_R ,三面反射镜间夹角 α_T ,中心轴方位轴轴系误差 ϕ_{MC} 和俯仰轴轴系误差 θ_{MC} 。在进行具体坐标系变换前需要先分析三面镜的各项误差。

2.1 三面镜加工及装调误差分析

本文采取三面镜作为摆扫镜,根据光学设计结果,摆镜采用旋转轴水平、反射面与旋转轴成 30° 夹角的方式布置于望远镜的出瞳位置处。在

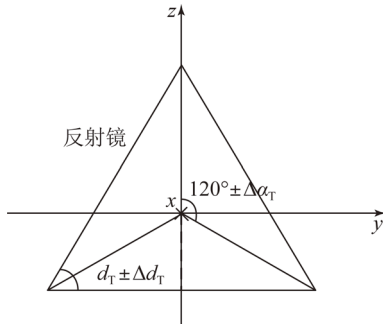
建立模型之前,需要全面地分析三面摆镜的误差因素。

图 1 为三面镜中存在的各项误差。为便于后续分析,将三面摆镜的误差对系统的影响都映射到摆镜反射面的法线坐标 N 以及三面镜中心点沿 z 轴负方向到反射面的距离 d_T 的变化上,如图 1(a)所示。



(a)摆镜侧视图

(a)Side view of swing mirror



(b)摆镜俯视图

(b)Top view of swing mirror

图 1 三面摆镜简化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of swing mirror with three reflectors

在考虑摆扫镜绕 x 轴旋转以及不考虑误差的情况下,法线坐标为:

$$\mathbf{N} = \left[\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \omega t, -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t, 0 \right]^T;$$

距离为 $d_T = \frac{d_{T0}}{\cos \omega t}$ (d_{T0} 为理想状态下的距离值)。

2.1.1 中心轴的轴系误差

三面镜安装时,由于装调误差导致三面镜旋转轴与中心轴不重合。如图 1(a)所示, x 轴为三面镜的中心轴,实际旋转轴存在轴系误差,中心轴绕 z 轴旋转 ψ_{MC} ,再绕 y 轴旋转 θ_{MC} 即得到实际旋转轴。其旋转矩阵分别为^[10] $\mathbf{TM}_1$ 和 $\mathbf{TM}_2$,法线坐

标 N 随之改变。考虑沿 x 轴方向的入射光线,由于轴系误差的存在, d_T 表达式同样发生改变,由几何变换可以得到 d_T 表达式的改变量。

2.1.2 反射镜面与中心轴夹角误差

三面镜加工时,由于反射镜面与中心轴夹角误差的存在,实际反射镜面与中心轴夹角为 $30^\circ \pm \Delta\alpha_R$,如图 1(a)所示。反射镜面与中心轴夹角误差导致法线坐标 N 发生变化。

2.1.3 三面摆镜的夹角误差

理想情况下三面摆镜三个棱在底面上的投影夹角均为 120° ,实际上由于加工工艺的限制,反射面之间夹角存在误差,如图 1(b)所示。三面摆镜的夹角误差引起 N 以及 d_T 的改变。

2.1.4 摆镜三个反射镜面中心到中心轴的距离误差

摆镜三个反射镜面中心到中心轴的距离在理想情况下为 d_{T0} ,实际加工过程中,误差使其距离发生变化,如图 1(b)所示。

综合考虑以上三面镜的加工、装调误差,可以得到法线坐标和入射点到中心轴的距离分别为:

$$\mathbf{N}_{\text{real}} = \mathbf{TM}_2 \cdot \mathbf{TM}_1 \cdot [\sin(30^\circ \pm \Delta\alpha_R), \\ -\cos(30^\circ \pm \Delta\alpha_R) \sin(\omega t \pm 2\Delta\alpha_T), \\ -\cos(30^\circ \pm \Delta\alpha_R) \cos(\omega t \pm 2\Delta\alpha_T), 0]^T,$$

$$d_T = \frac{\sqrt{3} d_{T0}}{\cos(\omega t \pm 2\Delta\alpha_T) (\sqrt{3} \cos \theta_{MC} - \sin \theta_{MC})} + \Delta d_T.$$

2.2 坐标系定义

坐标系定义如图 2 所示。地面景物坐标系 G ,原点为飞机下方景物点, G_1 指向飞机飞行方向, G_3 是坐标系原点与地心连线的延长线指向天顶, G_2 与 G_1 , G_3 构成右手坐标系。

载机航迹地平坐标系 S ,原点即为某时刻载机在航迹上所处的位置, S_1 为航向, S_3 是坐标系原点与地心连线的延长线指向天顶, S_2 与 S_1 和 S_3 形成右手坐标系。

载机坐标系 A ,该坐标系原点与航迹坐标系原点重合,当无三轴姿态角误差时,载机中心坐标系 A 和载机航迹坐标系 S 重合。

三轴稳定平台坐标系 T ,三轴稳定平台中心点为该坐标系的原点,当无三轴姿态角误差时,三轴稳定平台坐标系 T 与载机坐标系 A 重合。

遥感器坐标系 C ,遥感器的中心点为该坐标系的原点,当遥感器在载机内无安装误差或安装误差很小时,遥感器坐标系 C 与三轴稳定平台坐

标系 T 重合。

摆扫镜中心坐标系 M , 三面摆扫镜旋转轴中心点为该坐标系的原点, 当摆扫镜在遥感器内无安装误差或安装误差很小时, 摆扫镜坐标系 M 与遥感器坐标系 C 重合。

反射面坐标系 R , 为便于后续坐标变换的计算, 定义反射面坐标系 R 。由飞机正下方入射光线在反射面上的入射点为该坐标系原点, R_1 轴为载机飞行方向, R_3 轴指向天顶, R_2 轴与 R_1, R_3 轴组成右手坐标系。

像面坐标系 P , 该坐标系原点在像面中心上。为便于后续计算, 将 M 系沿 M_1 轴平移 f (遥感器的光学焦距) 得到 P 系。但在坐标系变换时, P 系与 M 系的变换关系并非简单的平移变换。由于反射镜对光线的偏折作用, 由摆扫镜坐标系 M 变换到像面坐标系的过程中, 光线矢量的坐标发生变化。变换后地面景物坐标系中 G_1 轴的正方向应对应像面坐标系中 P_3 轴的负, G_2 轴的正方向应对应 P_2 轴的负方向, G_3 的正方向应对应 P_1 轴的负方向。因此, 像面坐标系中 P_2, P_3 构成像面。

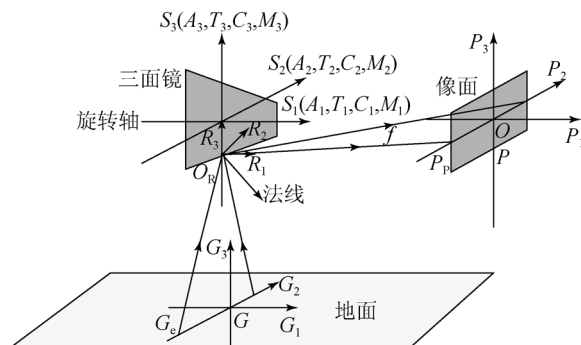


图 2 航空摆扫成像坐标系变换关系图

Fig. 2 Coordinate transformation in aerial whisk-broom imaging

2.3 像点位移量解析式计算

为了计算航空摆扫式相机的像移量, 需要计算相互共轭的地面物点坐标与像面像点坐标的变换关系。图 3 为具体的坐标变换过程。根据 2.2 节中坐标系的定义, 可以得到图 3 中坐标系间的线性变换关系。从地面景物在地面坐标系中的位置到像面坐标系中的像, 可通过图 3 中的 9 次线性变换过程建立坐标关系。

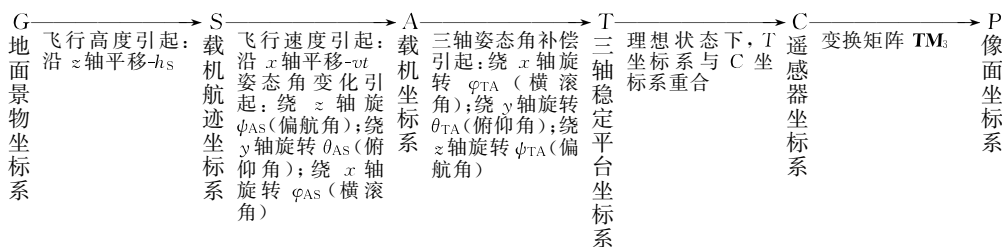


图 3 从景物到像面的坐标变换链路图

Fig. 3 Coordinate transformation chain from ground to image plane

图 3 中变换矩阵 $\mathbf{TM}_3$ 是由遥感器坐标系到像面坐标系的变换矩阵。不同于单平面镜摆扫, 三面镜反射镜面上的入射点不在旋转轴上, 入射点在遥感器坐标系下的坐标会随着摆扫镜的旋转发生改变, 因此需要对其反射情况进行详细分析才能得到 $\mathbf{TM}_3$ 的具体表达式。

为了将摆扫镜的各项误差代入坐标变换模型中, 建立反射面坐标系 R , 其相对位置如图 2 所示, 由遥感器坐标系 C 到反射面坐标系 R 的变换为沿 z 轴平移 d_T 。

如图 2 所示, 假定飞机正下方的地面物点 G 在遥感器坐标系 C 下的齐次坐标为 $G_C = [C_1, C_2, C_3, 1]^T$, 像点 P 在像面坐标系 P 下的齐

次坐标为 $P_P = [P_1, P_2, P_3, 1]^T$, 镜面上反射点 O 点在反射面坐标系 R 下的齐次坐标为 $O_R = [0, 0, 0, 1]^T$ 。通过坐标变换得到地面物点 G 在反射面坐标系下的坐标: $G_R = [C_1, C_2, C_3 + d_T, 1]^T$, 像点 P 在反射面坐标系下的坐标: $P_R = [P_1 + f, P_2, P_3 + d_T, 1]^T$ 。

地面点入射到反射镜面上的光线矢量: $\mathbf{V}_{GM} = O_R - G_R = -[C_1, C_2, C_3 + d_T, 0]^T$ 。反射面出射到像面上的出射光矢量: $\mathbf{V}_{MP} = P_R - O_R = [P_1 + f, P_2, P_3 + d_T, 0]^T$ 。

由几何关系可得^[11], 入射、出射光线矢量满足:

$$\mathbf{V}_{MP} = \mathbf{V}_{GM} - 2(\mathbf{V}_{GM} \times \mathbf{N}_{\text{real}}) \times \mathbf{N}_{\text{real}}. \quad (1)$$

由相似三角形可得到入射光线与反射光线的长度对应关系为:

$$\frac{|P_P O|}{|G_C O|} = \frac{2f}{\sqrt{3}(h_s - d_T)}. \quad (2)$$

结合式(1)和式(2),并将 2.1 节中 N_{real} 和 d_T 的表达式代入可得遥感器坐标系到像面坐标系的变换矩阵 $\mathbf{TM}_3$ 。

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{TM}_3 \times \begin{bmatrix} \cos \varphi_{TA} & \sin \varphi_{TA} & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_{TA} & \cos \varphi_{TA} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{TA} & 0 & -\sin \theta_{TA} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_{TA} & 0 & \cos \theta_{TA} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{AS} & \sin \varphi_{AS} & 0 \\ 0 & -\sin \varphi_{AS} & \cos \varphi_{AS} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{AS} & \sin \varphi_{AS} & 0 \\ 0 & -\sin \varphi_{AS} & \cos \varphi_{AS} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{AS} & 0 & -\sin \theta_{AS} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_{AS} & 0 & \cos \theta_{AS} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \psi_{AS} & \sin \psi_{AS} & 0 & 0 \\ -\sin \psi_{AS} & \cos \psi_{AS} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -vt \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -h_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在上述像点坐标表达式中,令式中所有误差项为 0 时,可得到理想状态下像点的齐次坐标为:

$$P_0 = [P_4, P_5, P_6, 1]^T.$$

由于像面坐标系中, y, z 轴构成像面,因此像面上像点的位移量表达式如下:

$$y \text{ 方向上像点位移量 } s_1 = |P_5 - P_2|;$$

$$z \text{ 方向上像点位移量 } s_2 = |P_6 - P_3|;$$

$$\text{像点总位移量 } s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}.$$

3 三面镜加工装调误差对像移量的影响

在仪器的生产与装配过程中,由于受到当前工艺水平的限制,不可避免地会产生加工装调误差。在光学系统中,固定透镜的加工装调误差可以通过后期调试来补偿。三面镜作为快速旋转的摆扫镜,其加工装调误差无法进行后期补偿,对成像质量有较大的影响。本节基于上节中推导的模型,分析了三面镜的加工装调误差对像点位移量的影响,为三面镜的误差分配提供了理论依据。

将 2.1 节中提到的四项加工装调分成三面镜的加工误差和装调误差两类。其中,反射镜面与中心轴夹角误差、三面摆镜夹角误差以及距离误差为加工误差;三面镜的轴系误差为装调误差。

2.4 计算像点位移

根据上述坐标变换关系,可以通过齐次坐标变换法建立从地物在地理坐标系中的位置到像面坐标系中像点的位置关系,其变换过程与图 3 对应。物点的齐次坐标为 $[G_1, G_2, G_3, 1]^T$,则实际像点的齐次坐标为:

根据 2.4 节中推导的像点位移量的表达式,分别分析加工误差和装调误差对 y, z 方向上的像点位移量的影响。图 4 为加工误差对像点位移量的影响,图 5 为装调误差对像点位移量的影响。

由图 4 可以看出,三项加工误差均对像点在某一个轴上的位移量影响较大,对像点在另一个轴上的位移量影响较小;反射面与中心轴夹角误差对 z 轴上的像点位移量影响较大;三面摆镜夹角误差对 y 轴上像点位移量影响较大;反射镜面中心到中心轴距离误差对 z 轴上像点位移量影响较大。当反射面中心轴夹角误差、三面摆镜夹角误差在 $[-30'', 30'']$ 内变化时,像点位移量在 $[-4 \times 10^{-5} \text{ m}, 4 \times 10^{-5} \text{ m}]$ 和 $[-6 \times 10^{-5} \text{ m}, 6 \times 10^{-5} \text{ m}]$ 内变化。反射镜面中心到中心轴距离误差在 $[-0.3 \text{ mm}, 0.3 \text{ mm}]$ 内变化时,像点位移量在 $[-3 \times 10^{-4} \text{ m}, 3 \times 10^{-4} \text{ m}]$ 内变化。由图 5 可以看出,方位轴系误差对像点在 y 轴上的像移量无影响。在方位角轴系误差与俯仰角轴系误差在 $[-40'', 40'']$ 内变化时, y, z 轴上的像移量分别在 $[-2 \times 10^{-5} \text{ m}, 2 \times 10^{-5} \text{ m}]$ 和 $[-3 \times 10^{-5} \text{ m}, 3 \times 10^{-5} \text{ m}]$ 内变化。从图中可以看出,各误差项对 y, z 轴上像移量的影响在一些情况下可以相互抵消,这对后续三面镜的误差标定以及误差补偿有着十分重要的意义。

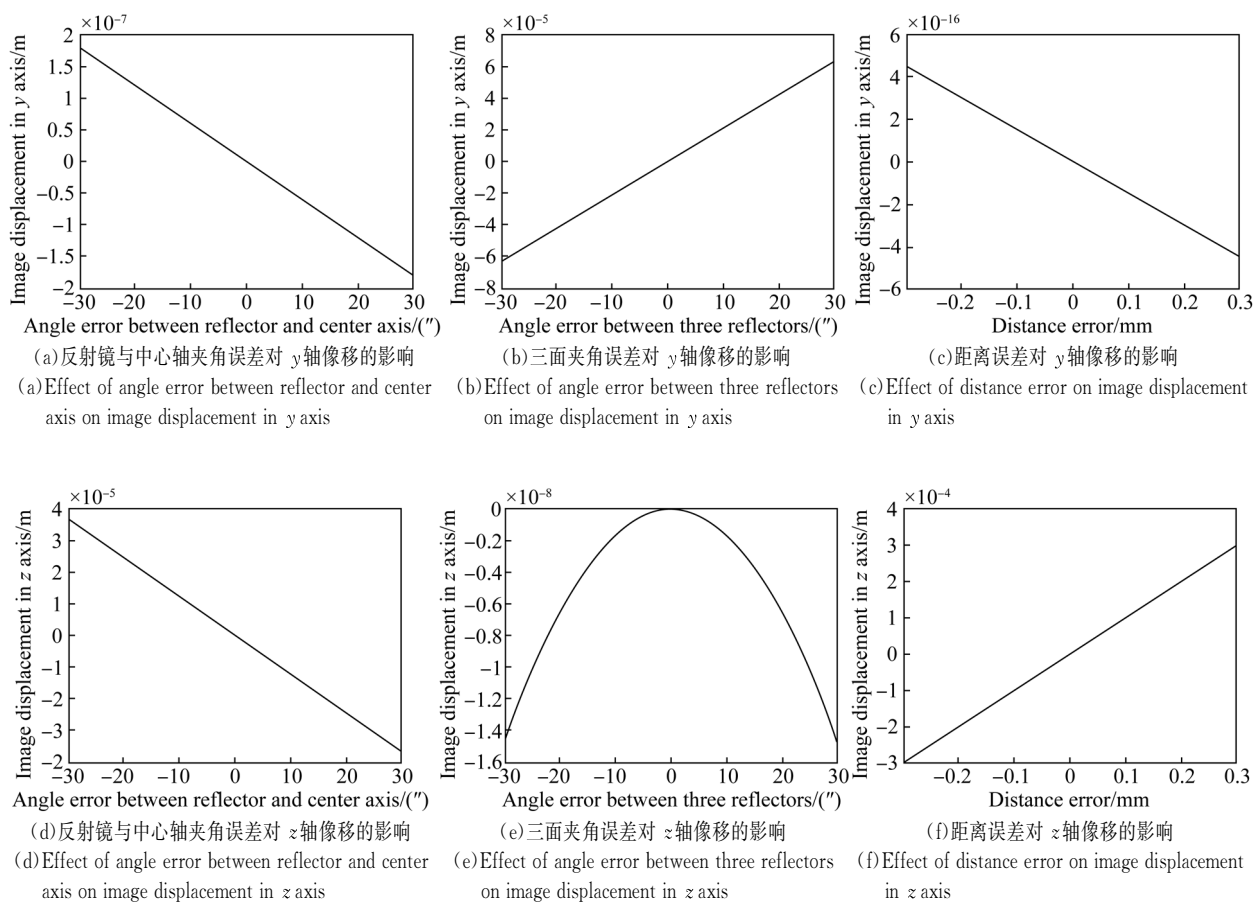


图 4 加工误差对像点位移量的影响

Fig. 4 Effect of machining errors on image motion

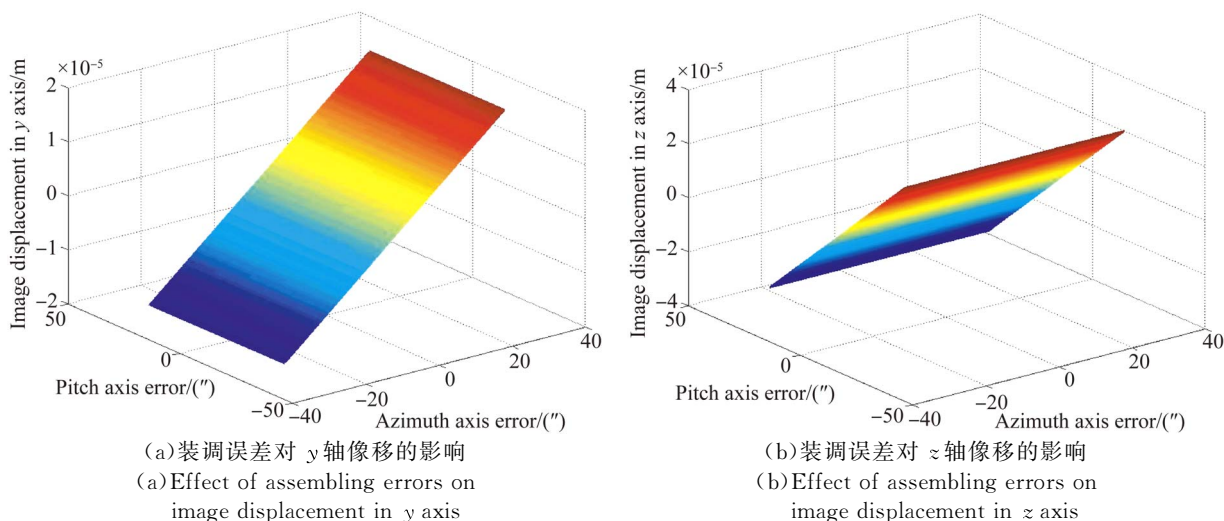


图 5 装调误差对像点位移量的影响

Fig. 5 Effect of assembling error on displacement of image points

由当前加工装调工艺水平^[12]得到,角度误差 5"和距离误差 0.01 mm 具有同等的实现难度。从图 4 和图 5 可以得出,像点位移量对各误差项

变化的灵敏程度由大到小依次为:三面摆镜夹角误差、反射面中心到中心轴距离误差、反射面与中心轴夹角误差、轴系误差。三面镜加工装调的误

差分配将依据此关系进行。下面将基于调制传递函数(Modulation Transfer Function,MTF)指标完成误差分配,并使用蒙特卡罗法对分配好的误差进行仿真验证。

4 蒙特卡罗法仿真

4.1 计算系统 MTF

空间相机成像质量的优劣一般用整个系统链路的 MTF 来评价^[13]。仪器采用的线阵 CCD 探测器的积分时间为: $t_{\text{int}}=0.159\text{ ms}$ 。为计算较低曝光时间内的动态 MTF,Rudoler 等^[14-15]认为在很短的曝光时间内像移速度变化不大,可用匀速运动近似,MTF 可表示为:

$$\text{MTF}=\left|\frac{\sin(\pi f d)}{\pi f d}\right|,$$
 (4)

其中 f 为 CCD 的 Nyquist 频率。在本仪器中,线阵 CCD 单个像元的尺寸 $a=0.25\text{ mm}$,采用大像元的 CCD 探测器能有限地提高系统的信噪比。

系统的 Nyquist 频率 $f=\frac{1}{2a}=2\,000\text{ Hz}$, d 为像点的位移量。为使航空相机具有较高的调制传递函数,必须使像面上像点位移量控制在一定的范围内。根据总体指标分配要求确定三面镜部分的 $\text{MTF}\geq 0.96$,代入公式(4)可得到,像点位移量需要满足: $d\leq 0.08\text{ mm}$ 。

4.2 软件仿真

基于三面镜各项误差的灵敏度、当前的工艺水平以及加工装调的经济成本,对三面镜各项误差进行分配^[12]。为了综合分析三面镜各项误差综合影响下像点位移量的准确值,在 Matlab 编程环境下,使用蒙特卡罗法对误差进行仿真。各随机误差的概率分布以及分配的误差值列于表 1。

表 1 三面镜的误差分布

Tab.1 Error distribution of three-mirror reflectors

变量名称	误差分布	误差量
轴系误差(方位轴)	正态分布	$\sigma_{\varphi_{\text{MC}}}=5''$
轴系误差(俯仰轴)	正态分布	$\sigma_{\theta_{\text{MC}}}=5''$
三面镜各面夹角误差	正态分布	$\sigma_{\alpha_{\text{T}}}=30''$
三面镜反射面与中心轴夹角误差	正态分布	$\sigma_{\alpha_{\text{R}}}=30''$
三面摆镜反射镜面中心到旋转轴的距离误差	正态分布	$\sigma_{u_{\text{T}}}=0.05\text{ mm}$

将表 1 中各误差因素以正态分布的矩阵形式加入 2.4 节的公式(3)中,对像点位移量进行蒙特卡罗法仿真,仿真结果如图 6 所示。从图中可知,统计数量近似服从正态分布。在 10 000 个结果中,像点位移量小于 0.08 mm 的概率 $p=99.9\%$,由大数定理可以得到,在此随机误差量下,像点位移量小于 0.08 mm。设置置信概率为 99.7%(3 σ),得到的置信区间为[0,0.071 mm],由 3 σ 原则可以得到,在各误差分布以及误差值符合表 1 的情况下,像点的位移量应小于 0.071 mm。根据公式(4)可以计算此时像移产生的 MTF 值为 0.97。一般成像系统的 MTF 在 0.2 左右,根据本项目中各部分的指标分配,三面镜的加工装调误差部分的 MTF 指标为 0.96。通过本文所建立的模型进行误差分析和误差分配后得到三面镜的 MTF 值为 0.97,超过了指标要求。由此说明,本文的工作使得图像的成像质量达到了指标要求,得到了高质量的图像。

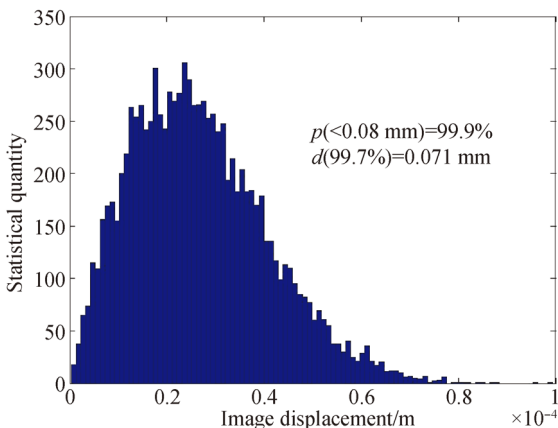


图 6 像点位移量的统计直方图

Fig.6 Histogram of displacement of image points

5 结 论

航空相机采用摆扫成像的方式来获取大视场,而三面镜加工装调误差等因素导致曝光时间内像点发生位移。针对这一问题,本文分析了三面摆镜的各项加工装调误差,计算了三面摆镜对光线矢量的偏折作用对应的坐标变换矩阵,利用齐次坐标变换法建立了系统像点位移量的计算模型;分析了三面镜各项加工装调误差对曝光时间内像点位移量的影响,各项误差在常见的加工装调精度下引起的

像点位移量普遍在 10^{-5} m 量级;在此基础上,比较了像点位移量对各误差项变化的灵敏度,根据此关系进行了误差分配;通过限定调制传递函数值大于 0.96 确定允许的像点位移量小于 0.08 mm;并结合蒙特卡罗法对分配后的三面镜误差进行了仿真。

参考文献:

- [1] 李永昌,金龙旭,李国宁,等.宽视场遥感相机像移速度模型及补偿策略[J].武汉大学学报:信息科学版,2018,43(8):1278-1286.
LI Y C, JIN L X, LI G N, *et al.*. Image motion velocity model and compensation strategy of wide-field remote sensing camera [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43 (8):1278-1286. (in Chinese)
- [2] FOWLER J E. Compressive pushbroom and whisk-broom sensing for hyperspectral remote-sensing imaging [C]. 2014 *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Paris, France. New York: IEEE, 2014:684-688.
- [3] T C, R J. The hymapTM airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance [C]. 1st *Earsel Workshop on Imaging Spectroscopy*, 1998:37-42.
- [4] 李颀,刘伟,谭亚雄,等.机载摆扫式光谱仪高转速三面摆镜设计与优化[J].光学精密工程,2018,26(11):2675-2683.
LI Y, LIU W, TAN Y X, *et al.*. Design and optimization of high-speed swing mirror with three reflectors on airborne whiskbroom scanning spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11):2675-2683. (in Chinese)
- [5] 王家骥,于平,颜昌翔,等.航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型[J].光学学报,2004,24(12):1585-1589.
WANG J Q, YU P, YAN CH X, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12):1585-1589. (in Chinese)
- [6] 袁孝康.星载 TDI-CCD 推扫相机的偏流角计算与补偿[J].上海航天,2006,23(6):10-13.
YUAN X K. Calculation and compensation for the deviant angle of satellite borne TDI-CCD push scan camera [J]. *Aerospace Shanghai*, 2006, 23(6):10-13. (in Chinese)
- [7] ZHANG L, LI S J, JIN G, *et al.*. Modeling of satellite borne TDI CCD pitching imaging image motion velocity vector [C]. *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Changchun, China. New York: IEEE, 2009:1587-1591.
- [8] ZHONG W C, DENG H, SUN Z W, *et al.*. Computation model of image motion velocity for space optical remote cameras [C]. *IEEE international Conference on Mechatronics and Automation*, 2009:588-592.
- [9] 苗壮,何斌.基于摆扫反射镜的大视场成像像移模型[J].计算机测量与控制,2016,24(2):242-246.
MIAO ZH, HE B. Image motion model of large field of view imaging based on swing mirror [J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(2):242-246. (in Chinese)
- [10] 贺和好,周兴义,关澈.轴系晃动与动态靶标精度检测[J].光学仪器,2007,29(5):1-7.
HE H H, ZHOU X Y, GUAN CH. Axis sloshing and dynamic target precision testing [J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(5):1-7. (in Chinese)
- [11] 魏炳鑫.用矩阵求解反射光线的运动轨迹[J].火控技术,1978,3(4):53-67.
WEI B X. Solve the trail of reflected light by using matrix [J]. *Fire Control Technology*, 1978, 3(4):53-67. (in Chinese)
- [12] 胡春晖.航天高光谱仪光学元件位置误差影响研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2013.
HU CH H. *Study on Effects of Spaceborne Hyperspectral Imager's Optical Component Positional Error* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [13] 姚园,许永森,丁亚林,等.大视场三线阵航空测绘相机光学系统设计[J].光学精密工程,2018,26(9):2334-2343.
YAN Y, XU Y S, DING Y L, *et al.*. Optical-system design for large field-of-view three-line array airborne mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(9):2334-2343. (in Chinese)
- [14] S R, O H, M F, *et al.*. Image resulting from me-

chanical vibrations, Part II: Experiment [J]. *Opt. Eng.*, 1991, 30(5): 581-589.

- [15] 王运, 颜昌翔. 基于差分法的空间相机像移速度矢量计算 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1054-1060.

作者简介:



徐力智(1993—),男,湖北随州人,博士研究生,2015年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事遥感仪器成像质量等方面的研究。E-mail: xulizhi416@163.com

WANG Y, YAN CH X. Computation of image motion velocity vector for space camera based on difference method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1054-1060. (in Chinese)

导师简介:



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士,研究员,1995年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1998年于浙江大学获得硕士学位,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感仪器的光机电一体化技术,多光谱、超光谱空间遥感成像技术,偏振探测技术等方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn