

摆扫式面阵 CCD 航空相机的像旋转分析

郑 飞^{1,2}, 丁亚林¹, 吴雪峰^{1,2}, 许永森^{1,2}, 李 娜^{1,2}

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 辽宁 长春 130033;

2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 航空相机在进行拍照时, 通常采用 45° 扫描反射镜绕光轴摆扫或步进, 进行多行迹摆扫式拍照, 以增大对地面景物的观测范围, 但当扫描镜绕光轴旋转对物体进行观测时, 物体反射像也将绕轴进行旋转, 目标相对探测器(CCD)产生了像旋转。通过运用光线矢量与光轴旋转变换的方法, 建立了相机的数学模型。根据该模型, 针对扫描反射镜旋转所产生的像旋转, 利用光学矩阵建立了扫描镜转角与像旋转角之间的关系, 对比各种消除像旋方法的优缺点, 提出了采用扫描镜与像面旋转机构同步旋转结合的方法实现消除像旋, 为工程设计提供了必要参考。

关键词: 45° 扫描反射镜; 像旋; 航空相机

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2009)05-0897-04

Analysis of image rotation for sweeping aerial camera with CCD area array

ZHENG Fei^{1,2}, DING Ya-lin¹, WU Xue-feng^{1,2}, XU Yong-sen^{1,2}, LI Na^{1,2}

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

2.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: When taking pictures with an aerial camera, in order to enlarge its observation area on ground, an usual method is to sweep or step a 45° scanning mirror around the optical axis of camera, which is called sweeping manner. However, while the scanning mirror rotates around optical axis and object is observed, its reflected image rotates around the axis and the target image rotation relative to detector (CCD) occurs. Through ray vector and rotation transform of optical axis, the mathematical model of the camera was established. Based on the model, the relationship between the scanning mirror rotation angle and image rotation angle was found with optical matrix for the image rotation due to scanning mirror rotation. Compared the advantages and disadvantages of various methods for eliminating image rotation, the method with synchronous rotation mechanism of scanning mirror and image plane was proposed. It can provide engineering design with a necessary reference.

Key words: 45° scanning mirror; Image rotation; Aerial camera

收稿日期: 2008-12-11; 修订日期: 2009-02-02

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目 (ZJ99130B)

作者简介: 郑飞 (1983-), 男, 辽宁鞍山人, 硕士生, 从事航空相机消像旋结构方面的研究。Email: zhengfei20032062@sina.com

导师简介: 丁亚林 (1964-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空遥感器稳像技术的研究。Email: dingyl1964@163.com

0 引言

由于 CCD 便于远距离传输和实施图像处理,其实时性优于胶片,因此,被国内外航空遥感器广泛采用^[1]。航空遥感器镜头前增设 45°扫描反射镜绕光轴旋转的作用是:增加相机横向视场^[2]、提高地面收容宽度、用于像移补偿^[3]、便于相机安装,使相机光轴折转 90°,充分利用载机空间。但随着 45°扫描反射镜绕光轴转动进行多行迹拍照时,就会在焦平面上产生像旋转,导致地面信息丢失,除此之外由于像旋转的存在,会产生像移补偿残差,影响相机成像质量。文中从光反射矢量理论出发,分析像旋产生原因及像旋角的计算方法,为消除像旋提供理论依据。

1 像旋产生的原因

如图 1 所示, X 、 Y 、 Z 构成的坐标系为参考坐标系,遵守右手定则,顺 Y 正向看,逆时针转角为正^[4],相机的光轴方向为 Y 方向,45°扫描反射镜绕 Y 轴旋转实现垂直飞行方向的扫描。当扫描反射镜视轴指向 $a b c d$ 中心时, $a b c d$ 在像面所成的像为 $a' b' c' d'$,当扫描反射镜绕 Y 轴旋转后其视轴指向 $ABCD$ 中心时, $ABCD$ 在像面成的像 $A' B' C' D'$ 也绕光轴同步随之旋转,所以,地面景物经光学系统所成的像相对探测器产生了旋转。如果不进行消除像旋转处理,会使地面信息丢失,还会产生像移补偿残差,影响相机成像质量。如图 2 所示, S_2 中的箭头方向为渐变像移^[5]的速度,如果扫描反射镜旋转了 α 角,而探测器和曝光装置还处于前一幅成像位置,实际拍照所得到的信息为

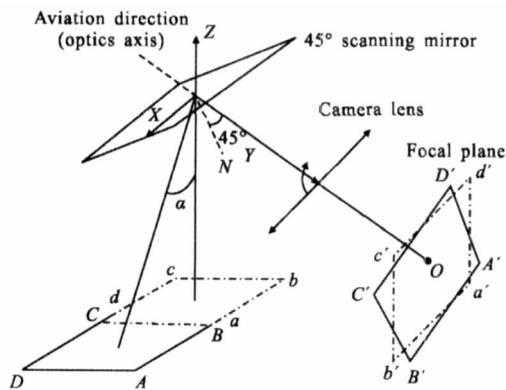


图 1 45°扫描反射镜旋转成像示意图

Fig.1 Sketch map of imaging of 45° mirror

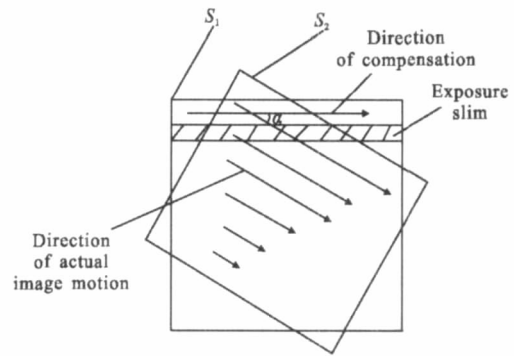


图 2 像面旋转与像移补偿示意图

Fig.2 Sketch map of image plane rotation and motion compensation

S_1 与 S_2 的交集,而且像移的补偿方向与像移的实际方向存在夹角 α ,产生像移补偿残差。

2 反射镜反射矢量的计算

如图 3 所示, N 代表镜面法线矢量, A_0 代表入射矢量, A_0' 代表反射矢量。

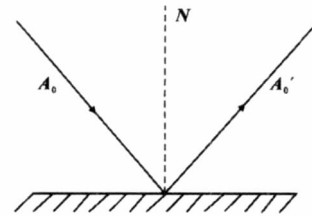


图 3 镜面反射矢量示意图

Fig.3 Sketch map of mirror reflection vectors

根据反射镜物像共轭原理以及反射镜转动定理,扫描反射镜转动时像矢量 A_0' 与物矢量 A_0 之间的关系在所选的基准坐标系中表示为^[6]:

$$A_0' = GRG^{-1}A_0 \quad (1)$$

式中: R 为平面镜反射矩阵^[3]:

$$\begin{bmatrix} 1-2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1-2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1-2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: N_x, N_y, N_z 为平面镜法线矢量在基准坐标系内的投影。

矩阵 G 为矢量 A_0 绕单位矢量 P 转动一角度 θ 而成为矢量 A_0' 的转动矩阵 $S_{P,\theta}$ ^[3]。

$$R = E - 2NN^T = S_{p,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta + 2P_x^2 \sin^2 \theta/2 & -P_z \sin\theta + 2P_x P_y \sin^2 \theta/2 & P_y \sin\theta + 2P_x P_z \sin^2 \theta/2 \\ P_z \sin\theta + 2P_x P_y \sin^2 \theta/2 & \cos\theta + 2P_y^2 \sin^2 \theta/2 & -P_x \sin\theta + 2P_y P_z \sin^2 \theta/2 \\ -P_y \sin\theta + 2P_x P_z \sin^2 \theta/2 & P_x \sin\theta + 2P_y P_z \sin^2 \theta/2 & \cos\theta + 2P_z^2 \sin^2 \theta/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

若 P 为 y 轴, 则 $P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 代入得到:

$$S_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

则由公式(1)可得出扫描镜转动时像矢量与物矢量之间的关系。

2.1 相机进行单航迹拍照时的物像关系

如图4所示, 图中:

$$N_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos 45^\circ \\ -\sin 45^\circ \end{bmatrix} \quad N_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\cos 45^\circ \\ \sin 45^\circ \end{bmatrix}$$

$$N_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\cos 45^\circ \\ -\sin 45^\circ \end{bmatrix} \quad T = \rho \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

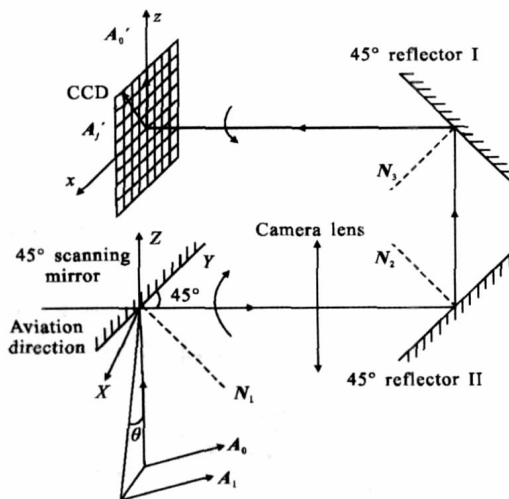


图4 面阵 CCD 航空相机数学模型

Fig.4 Mathematic model of aerial camera of CCD area array

式中: T 为光学透射矩阵; ρ 为垂轴放大率, 则由 $A_0' = R_3 R_2 T R_1 A_0 A_0'$ 得:

$$A_0' = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho z \\ -\rho y \end{bmatrix}$$

A_0 与 A_0' 是平行关系无像面旋转。则当相机进行单航迹拍照时无像旋转, 不需要消除像旋。

2.2 相机进行多航迹拍照时的物像关系

扫描反射镜绕光轴转过 θ 后, N_1 也转过 θ 角, 而

N_2 、 N_3 无变化, 入射光线由 A_0 变为 A_1 , $A_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$, 由图

4 可见:

$$\tan\theta = x/z$$

$$A_1' = R_3 R_2 T G R_1 G^{-1} A_1$$

式中: $G = S_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$

$$A_1' = \rho \begin{bmatrix} -\cos^2 \theta & -\sin\theta & -\sin\theta \cos\theta \\ -\sin\theta & 0 & -\cos\theta \\ -\sin\theta \cos\theta & \cos\theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix} A_1 = \rho \begin{bmatrix} -x \cos^2 \theta - y \sin\theta + z \sin\theta \cos\theta \\ -x \sin\theta - z \cos\theta \\ -x \sin\theta \cos\theta + y \cos\theta + z \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

将 $\tan\theta = x/z$ 代入得:

$$\begin{bmatrix} -\rho y \sin\theta \\ z(-\tan\theta \sin\theta) - \cos\theta \\ \rho y \cos\theta \end{bmatrix}$$

从上式不难看出: 在 xoz 平面内 $A_0' \sim A_1'$ 转过的角度的正切值为:

$$\tan\alpha = A_{1x}' / A_{1z}' = -\tan\theta$$

即 $\alpha = -\theta$ 。根据上式, 反射镜转过 θ 后, 在不加任何消像

旋光学元件的情况下,像与反射镜旋转角度的大小相等,方向相反。在相同的时间内, $d\alpha/dt=d\theta/dt$,即 $\omega_1=\omega_2$,二者的角速度大小也相等。扫描反射镜和探测器以大小相同、方向相反的角速度同步旋转就可以消除像旋转。

2.3 消像旋方法

目前,常用的消像旋方法有:在光学系统前增设光学元件消像旋和电子图像消像旋。在光学系统前增设光学元件没有时间滞后^[7-8],但要在光学系统中加入相应的像旋转器,如 K 镜、道威棱镜,这使整个系统的质量和体积增加,对加工的精度要求增加。电子图像消像旋的特点是有时间延迟,但不依赖硬件设备。

提出了一种扫描镜与 CCD 探测器同步旋转,方向相反的方法。由上述的分析过程可知:在相同的时间内,扫描镜绕光轴转过的角度和像旋转的角度大小相同、方向相反并且二者以相同的角速度旋转。如图 5 所示。具体做法为:当扫描镜旋转的同时,探测器通

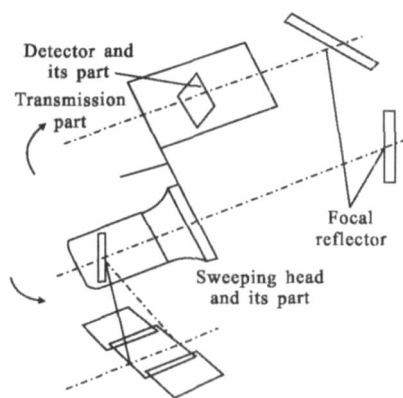


图 5 相机消像旋工作原理示意图

Fig.5 Sketch map of eliminating image rotation

过传动机构也同步反向旋转同样的角度,这样即消除了扫描反射镜旋转所引起的像旋转,此种方法既有光学图像消像旋没有时间滞后的优点,又有电子图像消像旋仪器结构相对简单的优点。

3 结 论

在光反射矢量理论和平面镜转动理论的基础上,

对地面景物经光学系统成像在探测器上的景物由 45° 扫描反射镜所引起的像旋进行了分析,航空相机探测器上的像旋主要是由 45° 扫描反射镜绕光轴(飞行方向)转动引起。通过实际计算,分析出反射镜旋转与像旋转的实际关系,为实际校正像旋提供了理论依据,并提出了一种新的消像旋方法。

参考文献:

- [1] XU Zheng-ping, ZHAI Lin-pei, GE Wen-qi, et al. CCD geometric super resolution method based on sub-pixel [J]. *Opt Precision Eng* (徐正平, 翟林培, 葛文奇, 等. 亚像元的 CCD 几何超分辨率方法. *光学精密工程*), 2008, **16**(12): 2447-2453.
- [2] WANG Jun-shan, ZHAI Lin-pei, DING Ya-lin, et al. Characteristic analysis and correction technique about the image rotation of aerial camera [J]. *Infrared and Laser Engineering* (王俊善, 翟林培, 丁亚林, 等. 航空相机像旋转特性分析及其补偿方法. *红外与激光工程*), 2008, **37**(5): 493-496.
- [3] XU Yong-sen, DING Ya-lin, TIAN Hai-ying, et al. Analysis of image motion compensation accuracy for aerial push-broom sensor [J]. *Opt Precision Eng* (许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 推扫式航空遥感器像移补偿精度分析. *光学精密工程*), 2009, **17**(2): 453-459.
- [4] JIANG Da-wei. *Space Analytic Geometry and its Applications* [M]. Beijing: Science Press (蒋大为. 空间解析几何及其应用. 北京: 科学出版社) 2004.
- [5] ZHANG Shu-qing, DING Ya-lin, YU Chun-feng, et al. Image motion vector computation based on a long range oblique photography frame camera [J]. *Opt Precision Eng* (张树青, 丁亚林, 于春风, 等. 凝视模式下的画幅相机两轴像移补偿. *光学精密工程*), 2007, **15**(11): 1790-1795.
- [6] LIAN Tong-shu. *The Theory of Mirror Conjugation* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (连铜淑. 反射镜共轭理论. 北京: 北京理工大学出版社), 1988.
- [7] ZHAO Yue-jin. Line of 2 sight stabilization mirror assembly [C]// *Proceedings of SPIE, Acquisition, Tracking, and Pointing VI*, 1992, **1697**: 499-503.
- [8] ZHAO Yue-jin. Discal image rotator [C]// *Proceedings of SPIE, Hybrid Image and Signal Processing IV*, 1994, **2238**: 184-188.