

TDI-CCD 全景航空相机的像移速度场计算模型研究

赵嘉鑫^{1,2} 张 涛¹ 杨永明¹ 李昕阳¹ 王德江¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 针对扫描反射镜和电荷耦合器件(CCD)时间延迟积分(TDI)无法完全补偿前向像移和摆扫像移的问题,提出了 TDI-CCD 全景航空相机像移速度场的计算模型。根据相机结构和像移补偿原理,用坐标变换和共线方程建立了成像几何模型,在此基础上利用微分法推导出像移速度场的解析式。数值分析表明,像点位置越接近 CCD 靶面的后边缘,扫描角和前向补偿角越大,像移速度越大。对于 TDI 级数为 100、CCD 像元数为 14000 的全景航空相机,当扫描角小于 -1.5° 、前向补偿角小于 4.16° 时,可满足最大像移补偿残差小于 1 pixel 的要求。实验结果验证了模型的有效性,该模型可作为定量分析 TDI-CCD 全景航空相机像移补偿误差的理论依据。

关键词 成像系统;像移速度;时间延迟积分电荷耦合器件;扫描角;前向补偿角

中图分类号 V245.6; TP247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0728003

Image Motion Velocity Filed of TDI-CCD Aerial Panoramic Camera

Zhao Jiaxin^{1,2} Zhang Tao¹ Yang Yongming¹ Li Xinyang¹ Wang Dejiang¹

(¹ Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Image motion compensation of aerial panoramic camera can be accomplished by employing scan head rotation and charge coupled device (CCD) time delay integration (TDI), whereas residual still remains. Therefore, based on the structure and the image motion compensation (IMC) mechanism of aerial panoramic camera, a rigor mathematical model of image motion velocity filed is derived from imaging geometry, which is built by coordinate transformation and collinear equation. Numerical analysis indicates that the closer image coordinate locates to the rear edge of CCD focal plane, the larger scan angle and forward motion compensation (FMC) angel are, and the faster the image motion velocity is. For an aerial panoramic camera with 14000 CCD pixel and 100 TDI stages, when scan angle and FMC angle is smaller than -1.5° and 4.16° , respectively, the maximum of image motion is less than 1 pixel pitch. Dynamic imaging experiments validate the rationality of the model which provides a theoretical basis for the quantitative analysis of image motion compensation residual.

Key words imaging systems; image motion velocity; time delay integration charge coupled device; scan angle; forward motion compensation angle

OCIS codes 280.4991; 110.4153; 040.1490

1 引 言

全景航空相机在远距离成像的条件下,可提供宽覆盖、高分辨率的图像。但载机的前向飞行和镜筒摆扫不可避免地引起像移,进而导致图像质量下降,因此必须进行像移补偿。在全景航空相机设计

中,通常将像移进行矢量分解,即对前向像移和摆扫像移分别补偿:前向像移补偿(FMC)由扫描反射镜的旋转运动完成,摆扫像移补偿利用探测器的时间延迟积分(TDI)完成^[1-6]。然而由于镜筒的摆扫运动和扫描反射镜的旋转运动不断改变像空间相对于

收稿日期: 2013-10-31; 收到修改稿日期: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61308099)

作者简介: 赵嘉鑫(1985—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事航空成像与测量技术等方面的研究。

E-mail: jxchao@126.com

导师简介: 张 涛(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感相机探测与成像技术方面的研究。

E-mail: zhangt@ciomp.ac.cn

物空间的姿态,使电荷耦合器件(CCD)靶面上各像点的成像比例尺和视轴方向不断变化,进而存在不同的像移速度矢量,因此这种基于矢量分解的补偿方法在理论上存在像移补偿残差。这个补偿残差是由全景航空相机补偿原理所决定的系统误差,即无论扫描反射镜的控制精度和 TDI 的行频精度多高,该残差仍然无法消除。

为定量分析像移补偿残差,需要建立一个严密的像移速度场模型。20 世纪 60 年代,国外率先开展了对航空相机像移速度的研究,如 Brown^[7]分析了航空相机在不同姿态下由 V/H 引起的像移速度矢量通用模型,但忽略了成像时相机的姿态变化速度;Kawachi^[8]分析了相机的旋转运动引起的像移速度,但未考虑前向像移的影响;Ghosh 等^[9]通过共线方程和差分法推导了像移速度的通用解析式,然而差分法的精度有限;国内方面,王家骥等^[10]通过多次线性变换推导出推扫式相机在星下点摄影时的像移速度矢量;翟林培等^[11]研究了航空相机在任意姿态下的相机靶面中心点的像移角速度;黄群东等^[12]在姿态对地指向不断变化成像情况下推导出了推扫式光学遥感器的动态像移速度。

上述研究中,尽管对遥感器的像移速度计算提出了不同方法,但分析的对象多为固定姿态的框幅式相机或推扫式线阵相机,而未针对动态成像的全景航空相机像移速度矢量进行研究。全景航空相机相比框幅式相机和推扫式相机,运动部件更多、补偿方式更复杂,与其他类型相机有较大差异,因此需要专门进行建模研究。针对于此,本文基于坐标变换和共线方程,在考虑扫描反射镜补偿和 TDI 补偿的情况下建立了成像几何模型,推导出了全景航空相机像移速度场的计算模型,为定量分析全景航空相机的像移补偿误差提供了理论依据。

2 相机结构及像移补偿原理

2.1 全景航空相机结构

全景航空相机的结构如图 1 所示,相机机身安装在飞机上,其偏航轴与飞机相同。相机机身主要定义了两个轴系:俯仰轴和滚转轴^[3]。滚转轴上的电机驱动镜筒旋转、从而带动透镜组和 CCD 组件对地面连续扫描成像。在成像过程中,由扫描反射镜绕俯仰轴运动以补偿飞行引起的前向像移,而镜筒摆扫引起的摆扫像移由 CCD 的 TDI 功能进行补偿。

2.2 前向像移补偿原理

图 2 给出了扫描反射镜补偿前向像移的几何原

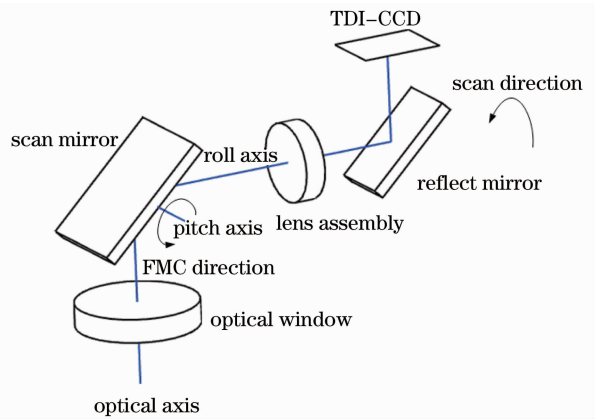


图 1 全景航空相机结构图

Fig. 1 Diagram of aerial panoramic camera structure

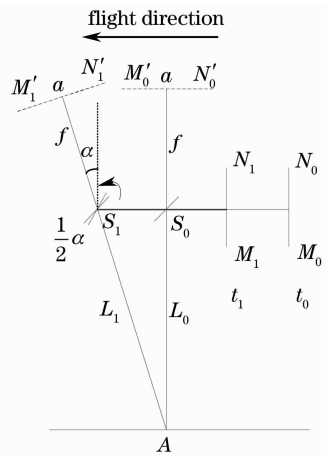


图 2 前向像移补偿原理示意图

Fig. 2 Diagram of forward image motion compensation

理。CCD 在 t_0 时刻开始曝光,其空间位置为 M_0N_0 ($M'_0N'_0$ 为共轭位置),物点 A 成像在像点 a 。 t_1 时刻曝光结束,为使 A 点的像 a 在 CCD 靶面上的位置不变,反射镜旋转了 $1/2\alpha$ 角度,CCD 靶面运动到 M_1N_1 。由反射原理可知,CCD 关于透镜的共轭位置变化到 $M'_1N'_1$,相当于绕 S_1 点旋转 α 角度。严格来说, S_0 点和 S_1 点并不是透镜投影中心,而是反射镜的旋转轴心,但由于成像距离远大于反射镜旋转轴心和透镜投影中心之间的距离,在计算时可认为二者重合。此时反射镜的补偿运动可以理解为相机坐标系与物方坐标系之间欧拉角的变化。

由图 2 可知,在 t_1 时刻,探测器靶面与物方表面平行,探测器上各像点的比例尺相同。前向像移速度 v_{align} 可由成像距离 L 、飞行速度 V 、主距 f 确定

$$v_{align} = V/L \times f, \quad (1)$$

反射镜补偿前向像移的角速度为^[1]

$$\omega_{mirror} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{align}}{f} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{V}{L} \right). \quad (2)$$

上述原理在 t_0 时刻可以补偿主点处的像移,但在其他时刻,探测器靶面与地面不平行,导致靶面上除主点外的其余像点的比例尺并不等于 V/L ,因此存在分布不同的前向像移补偿残差。

2.3 摆扫像移补偿原理

相机的摆扫使曝光期间的景物和探测器发生相对运动,因此产生摆扫方向的像移。图 3(a) 示出了扫描反射镜固定、无前向补偿角的情况下用 TDI 方式补偿该像移的原理。容易看出,由于摆扫像移与

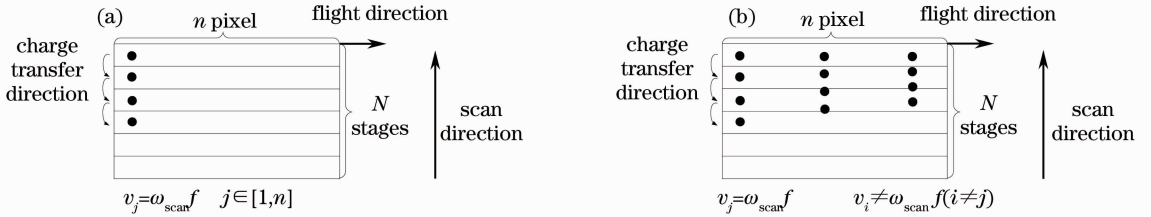


图 3 摆扫像移补偿示意图。(a) TDI 完全补偿横滚像移; (b) TDI 方向存在分布不同的补偿残差

Fig. 3 Diagram of scan image motion compensation. (a) No scan smear; (b) different scan smears

2.4 严密成像几何关系

由摄影测量学可知,在摆扫过程中的任意时刻,被摄物点、投影中心和像点保持共线。因此可以建立用共线方程表示的严密几何模型。在地学中,从物空间的物点坐标到像空间的像点需要经过若干次的坐标变换^[11,14-15]。由于像移速度只关心像点坐标的变化量,而不关心地学中的绝对坐标值,因此在计算时只考虑地面辅助坐标系、相机坐标系和单幅影像坐标系:

1) 地面辅助坐标系:也称中心地平坐标系,其原点 O 可以任意选择。 Z 轴方向指向天顶, X 轴为正东方向, Y 轴指向正北^[10];

2) 相机坐标系:原点为相机的投影中心 S , x 轴为滚转轴, y 轴为俯仰轴。平飞时 x 轴指向飞行方向(航向), z 轴沿光轴方向向上, y 轴指向左舷、与 x 轴、 z 轴构成右手坐标系;

3) 单幅影像坐标系:即单个扫描周期所成影像构成的坐标系 (t, x_{img}) 。其中 t 表示每扫描行对应的时间, x_{img} 表示每扫描行的像元列数,其正方向和相机坐标系中的 x 一致。 x_{img} 与 x 关系为 $x_{img} = x/p$,式中 p 为像元尺寸。

图 4 为一般情况下的全景相机成像等效示意图, A 为物点, a 为像点。物点 A 和投影中心 S 在地面辅助坐标系中的坐标分别为 (X, Y, Z) 、 (X_s, Y_s, Z_s) , a 在相机坐标系中的坐标为 $(x, y, -f)$ 。设 TDI-CCD 的级数为 N ,为方便分析,假设相机的主点落在 TDI-CCD 第一级的几何中心。同时假设飞机

前向像移完全解耦,若忽略 TDI 级数和 TDI 时钟的相位影响,当电荷转移速度和摆扫速度相同时,TDI 可以完全补偿摆扫方向的像移^[13],即为

$$v_{scan} = \omega_{scan} f. \quad (3)$$

但扫描反射镜的运动使探测器与地面景物产生前向补偿角 α ,导致 CCD 靶面上各点的摆扫像移速度为 $v_{scan} = \omega_{scan} k, k \neq f$ 。此外,由 V/H 、扫描反射镜运动引起的像移将会在摆扫方向存在分量,导致存在分布不同的摆扫像移补偿残差,如图 3(b) 所示。

平飞,即在扫描开始时 $O-XYZ$ 与 $S-xyz$ 平行。在扫描过程中,相机绕 x 轴以 ω_{scan} 摆扫成像、绕新的 y 轴以 ω_{fmc} 补偿前向像移。

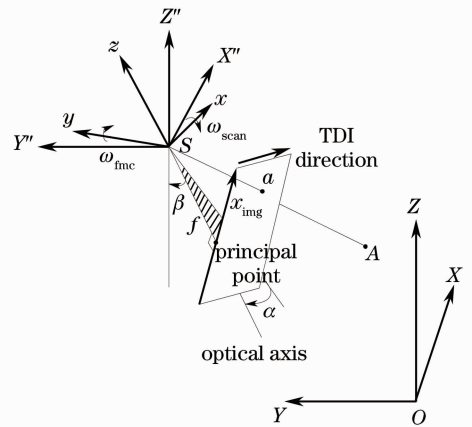


图 4 全景相机成像示意图

Fig. 4 Diagram of panoramic camera imaging

设 β_{int} 为相机摆扫的起始扫描角,则 t 时刻的扫描角为

$$\beta = \beta_{int} + \omega_{scan} t, \quad (4)$$

由(2)式得到扫描反射镜补偿的角速度为

$$\omega_{mirror} = \frac{1}{2} \left(\frac{V}{H} \right) \cos \beta, \quad (5)$$

由于光线的转角两倍于反射镜的转角,因此前向补偿角的变化速率为

$$\omega_{fmc} = \frac{V}{H} \cos \beta, \quad (6)$$

t 时刻相机绕 y 轴(俯仰轴)转动的前向补偿角为

$$\alpha = \int_0^t \omega_{fmc} dt = \frac{V[\sin(\beta_{int} + \omega_{scan}t) - \sin \beta_{int}]}{\omega_{scan}H}, \quad (7)$$

由 α 和 β 可确定相机在任意时刻的光轴指向, 据此可以写出飞机平飞时成像的共线方程为

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} X - X_S(t) \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 λ 为比例系数, $\mathbf{R} = \mathbf{R}_\alpha \mathbf{R}_\beta = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}$, $X_S(t) = X_S + Vt$ 。

3 像移速度场模型及分析

3.1 像移速度场的表示方法

对(8)式直接求微分可以得到像移速度的解析式, 其形式为

$$\mathbf{v} = v_x(X, Y, Z, X_S, Y_S, Z_S)\mathbf{i} + v_y(X, Y, Z, X_S, Y_S, Z_S)\mathbf{j}, \quad (9)$$

此时像移速度是以不同物点、不同摄站位置为参数的速度场, 这种表示方法在运动学中称为拉格朗日法^[16]。文献[10-14]都采用该法表示速度场, 其优点是可描述某一个特定的物点(如星下点)在 CCD 靶面上的像移速度, 其缺点是不能表示成像在靶面其他位置的物点的像移速度。(9)式可变换为

$$\mathbf{v} = v_x(x, y)\mathbf{i} + v_y(x, y)\mathbf{j}. \quad (10)$$

该描述方法称为欧拉法, 其求解过程比拉格朗日法复杂, 但可以描述探测器靶面上不同位置的像移速度, 本文主要采用该方法描述速度场^[7,16]。

3.2 像移速度场计算模型

设 $\mathbf{X} = [X - X_S(t), Y - Y_S, Z - Z_S]^T$, $\mathbf{x}_S = (x_S, y_S, z_S)^T = \mathbf{R}\mathbf{X}$, 则根据(8)式有 $\lambda = -f/z_S$ 。将(8)式写成 x 和 y 的表达式并对 t 求导, 整理后可得

$$\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}\right)^T = (v_x, v_y)^T = \mathbf{M} \frac{d\mathbf{x}_S}{dt}, \quad (11)$$

式中 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -f/z_S & 0 & -x/z_S \\ 0 & -f/z_S & -x/z_S \end{bmatrix}$, $z_S = \frac{Hf}{-x \sin \alpha \cos \beta + y \sin \beta - f \cos \alpha \cos \beta}$ 。对(11)式求解有

$$\mathbf{M} \frac{d\mathbf{x}_S}{dt} = \mathbf{M} \frac{d\mathbf{R}_\alpha}{dt} \mathbf{R}_\alpha^T \frac{z_S}{-f} \mathbf{x} + \mathbf{M} \mathbf{R}_\alpha \frac{d\mathbf{R}_\beta}{dt} \mathbf{R}_\beta^T \mathbf{R}_\alpha^T \frac{z_S}{-f} \mathbf{x} + \mathbf{M} \mathbf{R}_\alpha \mathbf{R}_\beta \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{v}_{fmc} + \mathbf{v}_{scan} + \mathbf{v}_{vh}, \quad (12)$$

式中 $\mathbf{v}_{fmc} = (v_{xfmc}, v_{yfmc})^T$ 表示由反射镜旋转引起的像移, $\mathbf{v}_{scan} = (v_{xscan}, v_{yscan})^T$ 表示由于摆扫引起的像移, $\mathbf{v}_{vh} = (v_{xvh}, v_{yvh})^T$ 表示由于载体前向飞行引起的像移。将 $\mathbf{R}_\alpha, \mathbf{R}_\beta, z_S$ 代入(12)式, 整理得到

$$\begin{cases} v_{xfmc} = \frac{x^2 + f^2}{f} \omega_{fmc} \\ v_{yfmc} = \frac{xy}{f} \omega_{fmc} \end{cases}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} v_{xscan} = -\frac{\omega_{scan} \cos \alpha}{f} xy + \omega_{scan} y \sin \alpha \\ v_{yscan} = -\omega_{scan} f \cos \alpha - \omega_{scan} x \sin \alpha - \frac{\omega_{scan} \cos \alpha}{f} y^2 \end{cases}, \quad (14)$$

$$\begin{cases} v_{xvh} = \frac{V}{Hf} (-f^2 \cos^2 \alpha \cos \beta - fx 2 \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta + fy \cos \alpha \sin \beta + xy \sin \alpha \sin \beta - x^2 \sin^2 \alpha \cos \beta) \\ v_{yvh} = \frac{V}{Hf} (-fy \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta - xy \sin^2 \alpha \cos \beta + y^2 \sin \alpha \sin \beta) \end{cases}, \quad (15)$$

在相机坐标系的 y 方向有 TDI 形成的电荷转移速度 $v_{ytdi} = \omega_{scan} f$, 结合(13)~(15)式, 得到探测器靶面上像移速度场的欧拉法模型为

$$v_x = \left(\frac{V}{H} \cos \beta \sin^2 \alpha\right) f - \left(\frac{V}{H} 2 \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta\right) x + \left(\omega_{scan} \sin \alpha + \frac{fV}{H} \cos \alpha \sin \beta\right) y + \left(\frac{V}{Hf} \cos^2 \alpha \cos \beta\right) x^2 + \left(-\frac{\omega_{scan} \cos \alpha}{f} + \frac{V}{Hf} \sin \alpha \sin \beta\right) xy,$$

$$\begin{aligned}
v_y &= (\omega_{\text{scan}} - \omega_{\text{scan}} \cos \alpha) f - (\omega_{\text{scan}} \sin \alpha) x - \left(\frac{V}{H} \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta \right) y + \\
&\quad \left(-\frac{\omega_{\text{scan}} \cos \alpha}{f} + \frac{V}{Hf} \sin \alpha \sin \beta \right) y^2 + \left(\frac{V}{Hf} \cos^2 \alpha \cos \beta \right) xy, \\
v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2}.
\end{aligned} \tag{16}$$

3.3 关键参数仿真分析

从(16)式可以看出,像移速度场可以表示为相机坐标系中像点坐标 (x, y) 的二维函数。其主要参数包括:主距 f 、速高比 V/H 、摆扫角速度 ω_{scan} 、扫描角 β 和前向补偿角 α 。通常, f 由总体技术要求中的分辨率指标确定、 V/H 由飞行任务确定、 ω_{scan} 由 f 和TDI行转移频率确定。在成像过程中,上述参数都是固定值,因此,像点位置 (x, y) 、扫描角 β 和前向补偿角 α 成为影响像移速度场分布的关键参数。本节对全景航空相机的像移速度场进行 Matlab 仿真分析,相机参数如表 1 所示。

3.3.1 像点坐标 y 的影响

从表 1 可知,TDI 级数小于 CCD 像元数两个数量级,因此 y 对像移速度场的影响有限。将 $y=0$

代入(16)式得到像移速度场的估计式,使其由二维矢量降为一维矢量。

表 1 相机参数

Table 1 Panoramic camera parameter	
Parameter	Value
CCD pixel size / μm	9
Focal length /mm	890
Number of pixel	14000
V/H /(rad/s)	0.06
Scan initial angle /($^\circ$)	-15
Scan angular velocity /($^\circ$ /s)	11
TDI stages	100
TDI exposure time /ms	5.3
Scan period /s	2.73

$$\begin{cases}
\hat{v}_x = \left(\frac{V}{H} \cos \beta \sin^2 \alpha \right) f - \left(\frac{V}{H} 2 \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta \right) x + \left(\frac{V}{Hf} \cos^2 \alpha \cos \beta \right) x^2 \\
\hat{v}_y = (\omega_{\text{scan}} - \omega_{\text{scan}} \cos \alpha) f - (\omega_{\text{scan}} \sin \alpha) x \\
\hat{v} = \sqrt{\hat{v}_x^2 + \hat{v}_y^2}
\end{cases} \tag{17}$$

为反映(17)式的估计偏差,图 5 给出了一次摆扫中像移速度均方根误差直方图。从图 5 中可以看出最大均方根值(RMS)误差仅为 0.3 mm/s。因此当 TDI 级数远小于 CCD 像元数时,可认为 y 坐标的影响较小,可以用(17)式作为像移速度场的估计式。

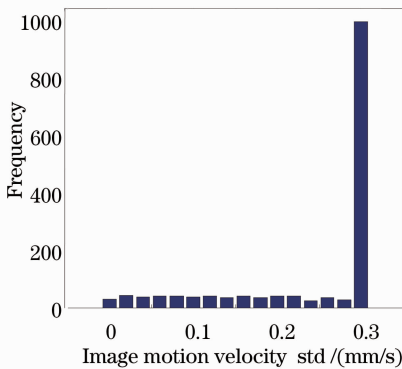


图 5 像移速度场估计式($y=0$)的 RMS 直方图

Fig. 5 RMS histogram of image velocity estimator ($y=0$)

同时根据(17)式,可推导出曝光时间 t_e 内的像移量为

$$\begin{cases}
s_x = \int_0^{t_e} v_x d\tau \approx \hat{v}_x \cdot t_e \\
s_y = \int_0^{t_e} v_y d\tau \approx \hat{v}_y \cdot t_e \\
\hat{s} = \hat{v} \cdot t_e
\end{cases} \tag{18}$$

3.3.2 像点坐标 x 的影响

图 6(a)是根据(1)式和(3)式得到的无像移补偿时影像中不同像点位置的像移速度场,其中 (t, x_{img}) 平面为单幅影像坐标系, z 轴表示像移速度的模值。从图 5 可以看出,由于扫描反射镜姿态固定,前向补偿角 α 始终为 0,故每个扫描行中不同 x 坐标像点的成像比例尺一致,此时像移速度场与 x 无关。

图 6(b)是根据(17)式得到的用扫描反射镜补偿前向像移和用 TDI 补偿摆扫像移时一次摆扫影

像的像移速度场。对比图 6(a),图 6(b)中像移速度显著减小,最大值为 5.01 mm/s,补偿的效果明显。但由于(17)式中存在 x 的奇数项,导致在除首行外, $\alpha \neq 0$ 的其余扫描行上,像移速度并不关于主点对称:在探测器靶面后边缘位置($x_{img} = -7000$)存在像移速度最大值,在其他位置则较小。

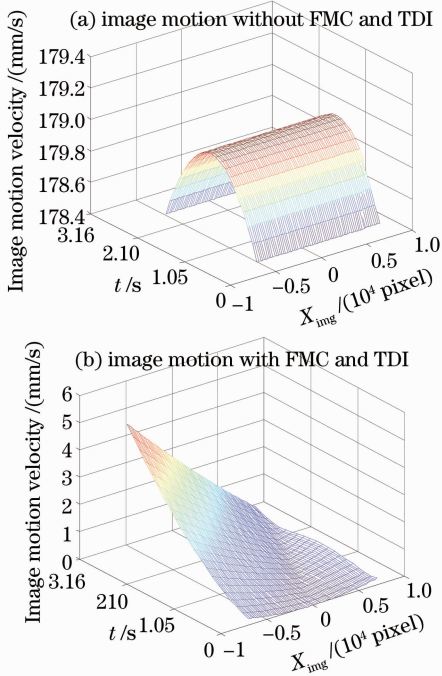


图 6 像点位置 x 对像移速度场的影响。

(a)无 FMC 和 TDI; (b)有 FMC 和 TDI

Fig. 6 Image motion velocity field with x factor. (a) Without FMC and TDI; (b) with FMC and TDI

3.3.3 扫描角和前向补偿角的影响

从图 6(b)可以看出,不同 t 对应的扫描行上的像移速度曲线不同,同时随着 t 的增大,影像中的最大像移速度也增大,这是由(17)式中变化的扫描角 β 和前向补偿角 α 引起的。图 7 给出了一次摆扫过程中 α, β 与最大像移速度的变化曲线。可以看出随着摆扫的进行,最大像移速度随着 β 和 α 的增大呈非线性增大,在扫描结束时,最大像移速度达到 5.01 mm/s。因此可根据(4)式和(7)式,通过限制扫描时间以减小扫描角和前向补偿角,进而降低影像中的像移。

像点位置、扫描角和前向补偿角是影响像移速度场分布的重要参数。像点越靠近 CCD 靶面后边缘,扫描角和前向补偿角越大,像移速度越大。从图 7 中可看出,当扫描角小于 -1.5° 且前向补偿角小于 4.16° 时,扫描行中最大像移速度小于 1.71 mm/s;对于 5.3 ms 的曝光时间,由(18)式可得到对应的最大像移量小于 1 pixel,可以满足航空图像指标要求。

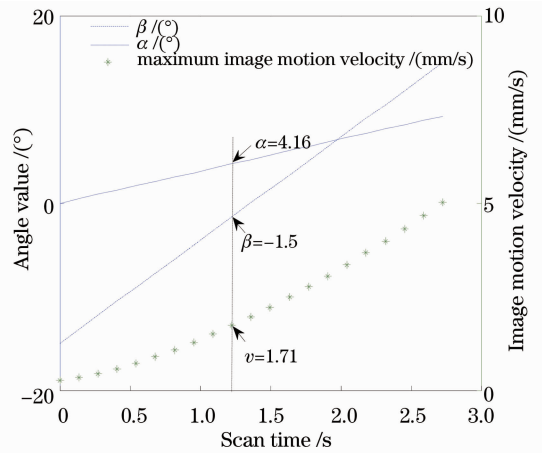


图 7 最大像移速度与扫描角、前向补偿角关系示意图

Fig. 7 Maximum image motion velocity with different scan angle and FMC angle

4 实验验证

为验证上述分析,以某全景航空相机为例在成像实验室搭建平台进行动态实验。实验平台如图 8 所示,实验装置主要包括实验箱、平行光管、动态目标发生器、地面检测仪。航空相机参数同表 1。动态目标发生器安装了多组线对的分辨率靶标,通过光管产生无穷远像。相机放置于实验箱中,通过实验箱下方的反射镜折射光路对光管后的动态靶标成像。成像时,地面检测仪向相机输入典型飞行条件下的速度和高度,使速高比为 0.06。同时,根据该速高比和扫描角 β 调整动态靶标的转速 $V \cos \beta / H$,该转速用以表示模拟飞机前行飞行时的靶标相对于投影中心的角速度。通过地面检测仪调整相机的位角轴伺服机构,根据位角轴系的编码器反馈值可以获得靶标对应的前向补偿角 α 值。



图 8 动态成像实验平台

Fig. 8 Dynamic imaging experiment setup

调整成像区域靠近 CCD 靶面后方向边缘($x_{img} = -7000$)。选择一次摆扫过程中的四组扫描角和前向补偿角参数进行实验,前两组和后两组分别满足和满足 3.3.2 节中扫描角小于 -1.5° 以及前向补偿

角小于 4.16° 的要求。根据像移速度场模型中的理论值,结果如表 2 所示。
(17)式和(18)式分别计算得到像移速度和像移量的

表 2 像移速度与像移量计算数值

Table 2 Theoretical value of image motion

Test group	$\alpha /(^{\circ})$	$\beta /(^{\circ})$	Image motion velocity / (mm/s)	Smear /pixel
1	0	-15	0.002	0.001
2	3.23	-4.5	1.28	0.75
3	4.16	-1.5	1.71	1.01
4	9.27	15	5.01	2.93

靶标中刻划多组宽度不同的线对用以考核相机的分辨率指标,其中 Nyquist 频率处的线对 (0.5 lp/pixel) 表征了该相机所能达到的极限分辨率。以表 2 中的四组参数作为实验条件输入,得到的实验靶标图像和 Nyquist 频率线对放大图像如

图 9 所示。在图 9(a)和图 9(b)中,Nyquist 频率处的线对可分辨,但图 9(b)的对比度下降;在图 9(c)和图 9(d)中则存在明显的像移,Nyquist 频率处的线对已无法全部分辨,符合表 2 的理论结果。

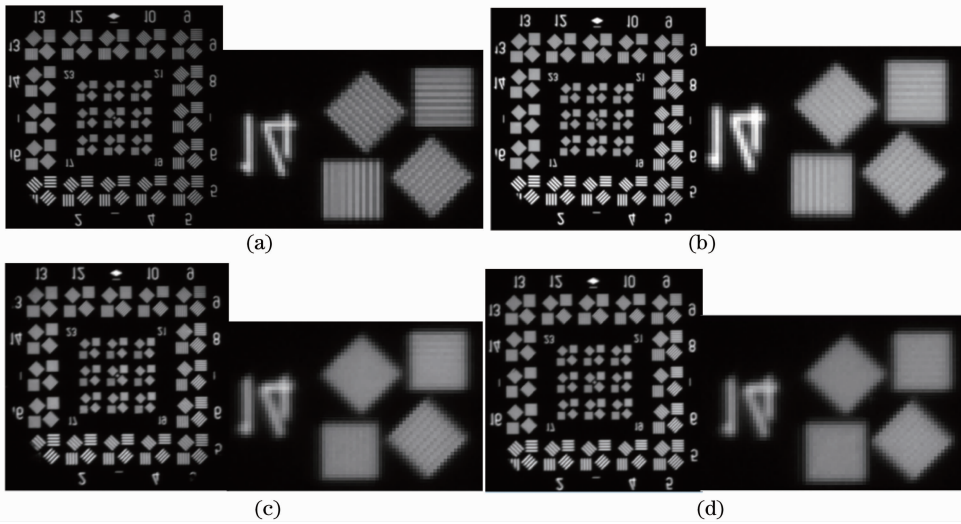


图 9 四组参数下的靶标图像。(a) $\alpha=0^\circ$, $\beta=-15^\circ$; (b) $\alpha=3.23^\circ$, $\beta=-4.5^\circ$; (c) $\alpha=4.16^\circ$, $\beta=-1.5^\circ$;
(d) $\alpha=9.27^\circ$, $\beta=15^\circ$

Fig. 9 Target images with different parameters. (a) $\alpha=0^\circ$, $\beta=-15^\circ$; (b) $\alpha=3.23^\circ$, $\beta=-4.5^\circ$; (c) $\alpha=4.16^\circ$,
 $\beta=-1.5^\circ$; (d) $\alpha=9.27^\circ$, $\beta=15^\circ$

5 结 论

根据全景航空相机的结构和像移补偿原理,通过坐标变换和共线方程推导出 TDI-CCD 全景航空相机的像移速度场模型。通过模型分析可以看出,尽管全景航空相机通过旋转扫描反射镜补偿前向像移以及时间延迟积分补偿摆扫像移,仍然会存在分布不同的像移补偿残差。分析和实验结果表明,像点位置、扫描角和前向补偿角是影响像移速度的重要因素。像点位置越接近 CCD 靶面的后边缘,扫描角和前向补偿角越大,像移速度越大。在实际工程应用中,可根据像移速度场模型设定扫描角和前向补偿角的范围,以减少像移对遥感图像分辨率的影

响。并为定量分析 TDI-CCD 全景航空相机的像移补偿提供了理论依据,对全景航空相机设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Dejiang, Kuang Haipeng, Cai Xichang, *et al.*. Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2465-2472.
王德江, 匡海鹏, 蔡希昌, 等. TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2465-2472.
- 2 M Iyenqar, D Lange. The goodrich 3rd generation DB-110 system: operational on tactical and unmanned aircraft [C]. *SPIE*, 2006, 6209: 620909.
- 3 S R Beran, S Wyatt. Method of Forward Motion Compensation

- in an Aerial Reconnaissance Camera United States, US6366734B1 [P]. 2002-04-02.
- 4 Wu Hongsheng, Pan Ning, Zhai Linpei. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(6): 545-549. 吴宏圣, 潘 凝, 翟林培. TDI-CCD 全景式航空相机的像移补偿误差分析[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(6): 545-549.
- 5 Wang Dejiang, Li Wenming, Yao Yuan, *et al.*. A fine image motion compensation method for the panoramic TDI CCD Camera in remote sensing applications [J]. Opt Commun, 2013, 298: 79-82.
- 6 Liu Zhiming, Zhu Ming, Chen Li, *et al.*. Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0711001. 刘志明, 朱 明, 陈 黎, 等. 长焦距全景式航空遥感器像拖影分析及补偿抑制方法[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711001.
- 7 E B Brown. V/H image motion in aerial cameras [J]. Photogrammetric Engineering, 1965, 31: 308-323.
- 8 D A Kawachi. Image motion due to camera rotation [J]. Photogrammetric Engineering, 1965, 31(5): 861-867.
- 9 S K Ghosh. Image motion compensation through augmented collinearity equations [J]. Optical Engineering, 1985, 24(6): 241014.
- 10 Wang Jiaqi, Yu Ping, Yan Changxiang, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1585-1589. 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.
- 11 Zhai Linpei, Liu Ming, Xiu Jihong. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3): 490-494. 翟林培, 刘 明, 修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3): 490-494.
- 12 Huang Qundong, Yang Fang, Zhao Jiang. Calculation of image motion velocity for agile satellite dynamic imaging to changed continuously attitude point [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 20(12): 2812-2820. 黄群东, 杨 芳, 赵 键. 姿态对地指向不断变化成像时的像移速度计算[J]. 光学 精密工程, 2013, 20(12): 2812-2820.
- 13 Wang Dejiang, Zhang Tao, Kuang Haipeng. Clocking smear analysis and reduction for multi phase TDI CCD in remote sensing system [J]. Opt Express, 2011, 19(6): 4868-4880.
- 14 Wang Jiaqi, Jin Guang, Yan Changxiang. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(2): 105-116. 王家骥, 金 光, 颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(2): 105-116.
- 15 Sun Hui, Zhang Shumei. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2492-2499. 孙 辉, 张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(11): 2492-2499.
- 16 Bruce R Munson, Donald F Young, Theodore H Okiishi, *et al.*. Fundamentals of Fluid Mechanics [M]. Morgantown: John Wiley & Sons, Inc. 2009.

栏目编辑: 张浩佳