

全景式 TDICCD 摆扫航空相机像面旋转的高精度补偿

李昕阳^{1,2} 张 涛¹ 刘志明¹ 李清军¹ 李文明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 摆扫式相机在扫描成像过程中, 必须保证扫描机构与像面探测器之间摆扫运动的同步性, 如果二者之间出现角度偏差或速度偏差, 就会引起像旋转现象, 使图像模糊, 造成图像质量的下降。以全景式时间延迟积分(TDI) CCD摆扫航空相机为例, 利用坐标变换方法建立了像旋分析的数学模型, 分析了位置同步误差与速度同步误差对成像质量的影响, 提出了基于干扰观测器的同步补偿方法, 保证了两个机构之间位置及速度的同步性, 实现了调速控制器与同步控制器的独立设计, 有利于实际应用。通过实验室静态分辨率成像实验及对外成像实验, 对理论分析结果进行验证。实验结果表明基于本方法的位置及速度同步误差分别小于 0.0043° 、 $0.0695^\circ/\text{s}$, 均满足补偿精度要求, 在成像过程中图像的旋转及失真现象得到了明显的抑制, 图像质量获得了大幅提高。

关键词 图像处理; 航空相机; 像面旋转; 同步控制; 干扰观测器; 补偿精度

中图分类号 TN942.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0611001

High Accuracy Compensation for Image Surface Rotation of Panoramic TDICCD Scanning Aerial Camera

Li Xinyang^{1,2} Zhang Tao¹ Liu Zhiming¹ Li Qingjun¹ Li Wenming¹

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

Abstract In the imaging process of scanning camera, measures must be taken to guarantee the synchronous scanning movement between scanning mechanism and the detector of image plane. If there exists angular deviation or speed deviation between the two mechanisms, it gives rise to the image rotation phenomenon. The image is blurred, causing the decline of image quality. The paper takes the panoramic time delay and integration (TDI) CCD scanning aerial camera as an example, establishes the mathematical model of image surface rotation analysis using coordinate transformation method, analyzes the influences of position and speed synchronization error on imaging quality. The synchronous compensation method based on disturbance observer is presented, which ensures the position and speed synchronization between the two mechanisms, realizes the independent design of speed controller and synchronous controller and facilitates the practical application. Through the laboratory static resolution imaging and external imaging experiments, theoretical analysis results are verified. The experimental results show that the position and speed synchronous errors based on the method are less than 0.0043° , $0.0695^\circ/\text{s}$, respectively, which meet the requirements of compensation accuracy, in the imaging process the image rotation and distortion have been significantly inhibited and the image quality is greatly improved.

Key words image processing; aerial camera; image surface rotation; synchronous control; disturbance observer; compensation accuracy

OCIS codes 110.2990; 040.1490; 280.4788; 350.4600

收稿日期: 2013-10-31; 收到修改稿日期: 2013-12-26

基金项目: 国家 863 计划(2009AA7010102)

作者简介: 李昕阳(1984—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事航空成像与测量技术方面的研究。

E-mail: lixynx@126.com

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

E-mail: zhangt@ciomp.ac.cn

1 引 言

为了扩大航空相机的横向视场角,相机采用全景摆扫方式进行拍照^[1]。美国的 KA-122A、CA-990 及 CA-295 均为全景摆扫相机。在摆扫过程中,它们的扫描机构与像面机构为同轴刚性连接,相机的扫描机构、光学系统及探测器作为一整体转动,不存在像旋情况^[2-3],但是这种结构导致其外形长度均大于 1.5 m。为了减小载机平台的空间,将扫描机构的轴系与像面探测器的轴系分离,采用创新式折叠机构大大减小了相机的外形长度。相机的伺服系统只驱动扫描机构与探测器机构转动,而相机的光学系统不转动,扫描机构与探测器机构之间的同步精度是产生像旋的重要原因。

目前,实现两机构同步转动方式有两种:1)机械联动的方法;2)伺服电机驱动方法。机械联动方法采用齿轮、齿条传动或柔性钢丝绳传动^[4-5],但这种方法导致相机的轴系尺寸较大,在实际应用上有很大的局限性,并且联动机构还存在空回、打滑、钢丝绳松弛等问题,传动精度难以得到保障,并且需要经常进行维护。对于电机驱动系统,系统本身的非线性及负载的不平衡性、机械结构的摩擦力矩、飞机姿态变化、振动等外界因素都会以扰动的形式施加在系统上,目前存在的双电机驱动同步控制技术包括并行控制,主从控制,交叉耦合控制以及虚拟总轴控制^[6-7],但当某一电机受到扰动时,这些方法的同步性能都比较差,为了保证扫描机构与消旋机构的同步转动,必须应用合理可靠的控制策略,克服系统中

的各类不确定干扰。

针对上述问题,本文利用坐标变换法对全景式时间延迟积分(TDI)CCD摆扫相机的像旋问题进行了分析,提出了消除相机像旋的同步补偿方法,即一种基于干扰观测器的高精度调速同步补偿方法,该方法在对等效扰动抑制的基础上实现调速控制器及同步控制器的独立设计,取得相机稳速成像与同步补偿的统一,实现扫描机构与探测器机构的高精度同步转动。实验结果表明基于该方法的位置及速度同步控制误差分别小于 0.0043° 、 $0.0695^\circ/\text{s}$,有效地抑制了相机的像旋及失真,图像质量得到了提高。

2 像旋模型建立及分析

2.1 像旋转特性分析

图 1 为全景式 TDI CCD 摆扫相机的组成框图,相机的光学系统由三部分组成,分别为扫描机构、机身机构以及探测器机构,其中扫描机构主要组成部分为扫描反射镜、机身结构由光学镜头、折叠反射镜 1、折叠反射镜 2 组成。由于景物距传感器的距离远远大于其焦距,则其景深很大,故将地物坐标系 OXY 设为二维空间坐标^[8]。建立如图 1 所示的笛卡尔坐标系 $O_0X_0Y_0Z_0$ 作为参考坐标系, Y_0 平行于光轴, Z_0 垂直地面指向车顶, X_0 根据右手定则确定,并建立了与笛卡尔坐标系指向相同的像面坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 。规定沿 Y_0 轴正向看去,逆时针转角为正,顺时针为负。全景式 TDI CCD 摆扫相机成像过

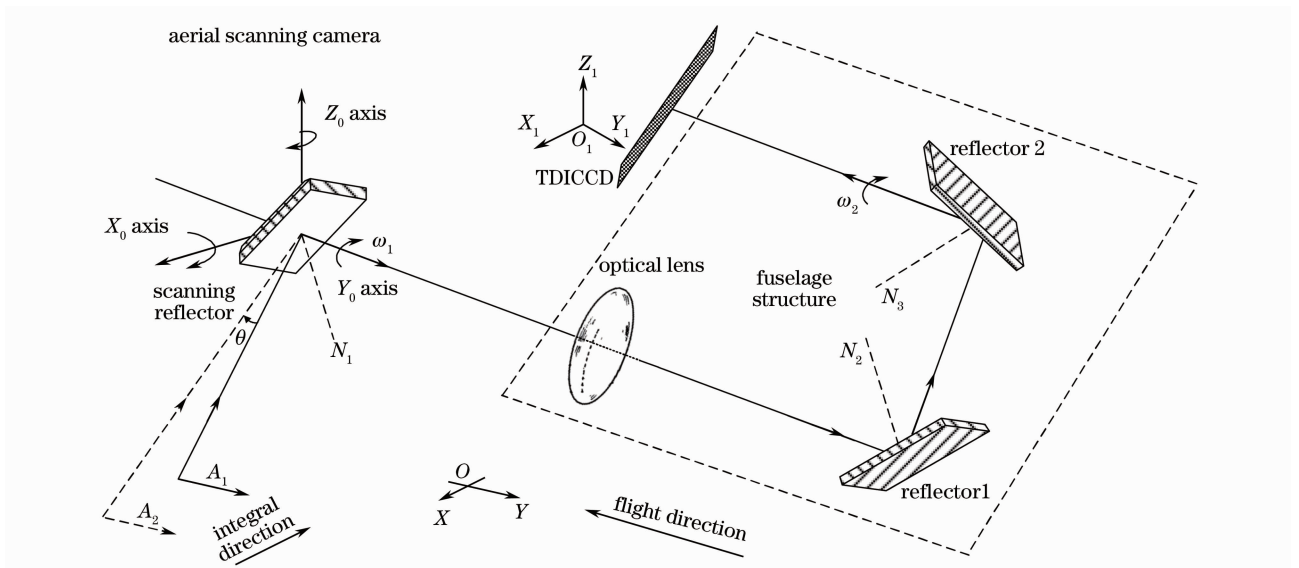


图 1 全景式 TDI CCD 摆扫相机组成框图

Fig. 1 Block diagram of panoramic time delay and integration (TDI) CCD scanning camera

程可以看成由扫描机构绕 Y_0 轴以速度 ω_1 旋转和探测器机构绕 Y_1 轴以速度 ω_2 旋转组成,设相机成像时扫描机构绕 Y_0 轴逆时针旋转的角度分别为 θ_1 ,目标像矢量绕 Y_1 轴逆时针旋转的角度分别为 θ_2 ,则有 $\omega_1 = d\theta_1/dt, \omega_2 = d\theta_2/dt$ 。扫描反射镜绕 X_0 轴旋转补偿前向像移,对像旋没有影响。

在初始时刻扫描反射镜的法线向量 $N_0 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}^T$, 折叠镜 1 的法线向量 $N_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{bmatrix}^T$, 折叠镜 2 的法线向量 $N_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{bmatrix}^T$, 光学镜头坐标变换矩阵 $T = \rho \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$, ρ 为光学组件缩放倍比。取如图

所示的目标中线向量 A_0 作为被分析对象,设目标向量在反射镜坐标系的坐标为 $A_0 = (0 \ v \ k)^T$, v 为正值, k 为负值,其在地物坐标系 OXY 的坐标为 $(0, v)^T$, A_0 经过三块反射镜后的目标像矢量 A'_0 为

$$A'_0 = (E - 2N_2N_2^T)(E - 2N_1N_1^T) \times T(E - 2N_0N_0^T)A_0 = \rho(0 \ k \ -v)^T. \quad (1)$$

A'_0 在像面上的投影为 $(0, -\rho v)$ 。当扫描机构绕 Y_0 轴逆时针旋转 θ_1 角, A_0 经过三块反射镜后的目标像矢量为 A''_0 , N_0 绕 Y_0 轴逆时针旋转 θ_1 角后

变为 $N'_0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} N_0$, 目标向量为 $A_0 = (x_0 \ v \ k)^T$, x_0 为正值,因为光学镜头、折叠反射镜 1 和折叠反射镜 2 均不动,所以 T, N_1 和 N_2 都不变,计算得:

$$A''_0 = (E - 2N_2N_2^T)(E - 2N_1N_1^T)T(E - 2N'_0N_0^T)A_0 = \rho \begin{bmatrix} -x_0 \cos^2 \theta_1 + v \sin \theta_1 - k \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ k \cos \theta_1 - x_0 \sin \theta_1 \\ -k \sin^2 \theta_1 - v \cos \theta_1 - x_0 \sin \theta_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

假设 θ_1 为锐角,由于 k 为负值,有

$$\tan \theta_1 = -\frac{x_0}{k}, \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式中,得

$$A''_0 = \begin{bmatrix} A''_{x_0} \\ A''_{y_0} \\ A''_{z_0} \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} v \sin \theta_1 \\ k \cos \theta_1 - x_0 \sin \theta_1 \\ -v \cos \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

A''_0 在像面上的投影为 $\rho(v \sin \theta_1, -v \cos \theta_1)$, 通过

(1)式可知当目标像矢量绕 Y_1 轴逆时针旋转角度 θ_2 后在像面上的投影为 $\rho(v \sin \theta_2, -v \cos \theta_2)$, 通过对比可以得出

$$\theta_2 = \theta_1. \quad (5)$$

将(5)式两边对 t 求微分,得到(6)式的表达形式,

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \frac{d\theta_1}{dt}. \quad (6)$$

即 $\omega_2 = \omega_1$ 。由此可知,在相机成像过程中,当扫描机构与探测器机构按照相同的角度以及相同的角速度进行转动时才能完全消除像旋。

2.2 同步误差对成像的影响

由于航空相机成像时受到飞行扰动、控制误差等因素的影响,扫描机构与探测器机构之间不可避免地存在着同步误差,令位置同步误差 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$, 速度同步误差 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 。图 2 为位置同步误差 $\Delta\theta \neq 0$ 时 TDICCD 摆扫相机的成像示意图,为了方便分析,假设飞行速度为 0。图中实线区域 1 为位置同步误差 $\Delta\theta = 0$ 时相机的地面成像区域,区域 1 的形状为矩形,可以看出,相机图像对应地在摆扫方向上与在飞行方向上的地面覆盖宽度均相等。图 2(a)、(b)为同步误差为固定值时相机的地面成像示意图,虚线区域 2、3 为相机的地面成像区域,它们的形状为平行四边形,当同步误差存在时,探测器的实际位置与理想位置发生偏差,区域 2、区域 3 中的虚线可以看作是成像期间的不同时刻探测器的实际位置对应的地面景物。可以看出,图像对应地在摆扫方向上的地面覆盖宽度不变,而在飞行方向上的地面覆盖宽度变小。图 2(c)、图 2(d)为同步误差的绝对值由 0 不断增大时相机的成像示意图,区域 4、区域 5 为相机的地面成像区域,它们的形状为不规则的图形。可以看出,在相同大小尺寸的图像中,地面景物之间的相对关系发生了变化,产生了扭曲失真,图像对应的地面信息及覆盖宽度也随之发生了改变。

通过上述分析可知同步误差会对相机成像带来非常严重的后果,为了减小同步误差的影响,需要确定同步误差的控制精度。如图 3 所示,实线为探测器所在的实际位置,虚线为无像旋时探测器所在的位置,二者的角度差为 $\Delta\theta$ 。探测器像元方向上有 l ($l=15168$) 个像元,像元尺寸 $b=8 \mu\text{m}$ 。由于扫描机构在作扫描运动时 TDICCD 处于多级曝光状态,为了将相邻两次曝光中 $\Delta\theta$ 对图像质量的影响减小,像旋最大误差量 d [$d=b(l/2) \sin(\Delta\theta)$] 不大于 1 pixel,即 $d \leq b$,可以得到

$$\Delta\theta \leq \arcsin[(d/b)/(l/2)], \quad (7)$$

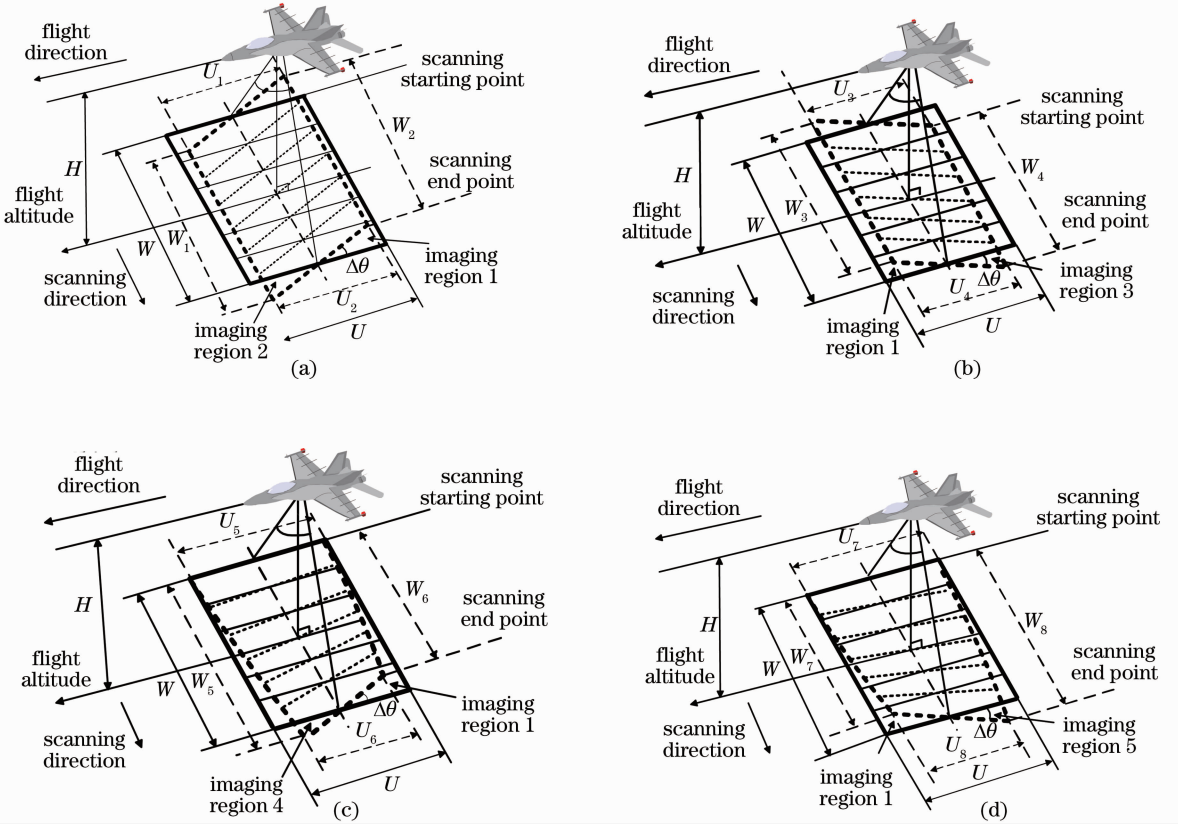


图 2 (a) $\Delta\theta < 0$ 且为恒量时成像示意图; (b) $\Delta\theta > 0$ 且为恒量时成像示意图; (c) $\Delta\theta < 0$ 且 $|\Delta\theta|$ 不断增加时成像示意图; (d) $\Delta\theta > 0$ 且 $|\Delta\theta|$ 不断增加时成像示意图

Fig. 2 (a) Imaging schematic diagram when $\Delta\theta < 0$ and its value is constant; (b) imaging schematic diagram when $\Delta\theta > 0$ and its value is constant; (c) imaging schematic diagram when $\Delta\theta < 0$ and $|\Delta\theta|$ increases with time; (d) imaging schematic diagram when $\Delta\theta > 0$ and $|\Delta\theta|$ increases with time

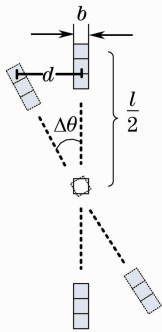


图 3 像面旋转与同步误差关系图

Fig. 3 Relationship between image surface rotation and synchronization error

由上式计算可得 $\Delta\theta \leq 0.0076^\circ$ 。

由像移补偿理论^[9-10]可知,像旋像移最大值应小于 $b/3$ 。通过分析可知,探测器上最大像移速度为 $\Delta v_{\max} = \Delta\omega_{\max} \times l \times b$,最大像移量为 $\Delta d_{\max} = \Delta v_{\max} \times T_{\text{exp}}$, T_{exp} 为图像的曝光时间,TDICCD 每个像元的曝光时间为 0.05 ms,TDI 级数为 200 级时,图像的曝光时间 $T_{\text{exp}} = 10$ ms。可以得到

$$\Delta\omega_{\max} < (b/3)/(T_{\text{exp}} \times l \times b), \quad (8)$$

由(8)式计算得出 $\Delta\omega_{\max} < 4.4$ mrad/s,即 $\Delta\omega_{\max} < 0.253^\circ/\text{s}$ 。

通过上述分析可以看出,为满足抑制像旋及扭曲失真的要求,相机的位置同步精度要优于 0.0076° ,速度同步精度要优于 $0.253^\circ/\text{s}$ 。

3 基于干扰观测器的高精度调速同步补偿方法

通过上述分析可知,位置、速度同步误差是产生像旋及扭曲失真的主要原因,因此要尽可能地减小位置、速度同步误差。为了减小机械传动误差对同步精度的影响,利用伺服系统对同步误差进行补偿,采用两个独立的直流力矩电机分别驱动扫描机构和像面探测器机构进行转动。每个电机控制系统配均有一套编码器及高精度陀螺(传感器)进行位置、速度反馈。两个控制对象的时域数学模型为

$$\begin{cases} M_1\ddot{\theta}_1 + B_1\dot{\theta}_1 = u_1 + \tau_1 + \tau_{1\text{dis}} \\ M_2\ddot{\theta}_2 + B_2\dot{\theta}_2 = u_2 + \tau_2 + \tau_{2\text{dis}} \end{cases}, \quad (9)$$

式中 M_1 和 M_2 分别为扫描机构和探测器机构的转动惯量, B_1 和 B_2 分别为扫描机构和探测器机构的阻尼系数, u_1 和 u_2 分别为两个机构同步控制输出量, τ_1 和 τ_2 分别为扫描机构和像面探测器机构调速系统的控制输出量, $\tau_{1\text{dis}}$ 和 $\tau_{2\text{dis}}$ 分别为扫描机构和探测器机构受到的如飞行扰动等因素带来的外界干扰。这里两个电机选择为同一型号的电机并将外界干扰和模型不确定性视为统一的等效干扰, 即 $\tau_D = \Delta M\ddot{\theta} + \Delta B\dot{\theta} + \tau_{\text{dis}}$, 可以令两个控制对象的名义数学模型相等, (9)式可以写成(10)式的形式

$$\begin{cases} M_n\ddot{\theta}_1 + B_n\dot{\theta}_1 = u_1 + \tau_1 + \tau_{1D} \\ M_n\ddot{\theta}_2 + B_n\dot{\theta}_2 = u_2 + \tau_2 + \tau_{2D} \end{cases}. \quad (10)$$

由于飞机扰动及其它干扰的影响, 干扰对控制系统的调速精度影响很大, 因此应该对等效干扰进行抑制与补偿。干扰观测器是对外部扰动和模型不确定性进行估计并在内环对其补偿, 能有效抑制负载转矩扰动, 如图 4 所示^[11-14], 采用低通滤波器对估计的干扰输出进行滤波, g_{dis} 为低通滤波器的截止频率, u_r 为外环控制器的输入, $\hat{\tau}_D$ 为估计的干扰。假设此时等效干扰 τ_D 在内回路通过 $\hat{\tau}_D$ 前馈完全补偿, 于是(10)式可以写为(11)式的形式。

$$\begin{cases} M_n\dot{\theta}_1 + B_n\theta_1 = u_1 + \tau_1 \\ M_n\dot{\theta}_2 + B_n\theta_2 = u_2 + \tau_2 \end{cases}. \quad (11)$$

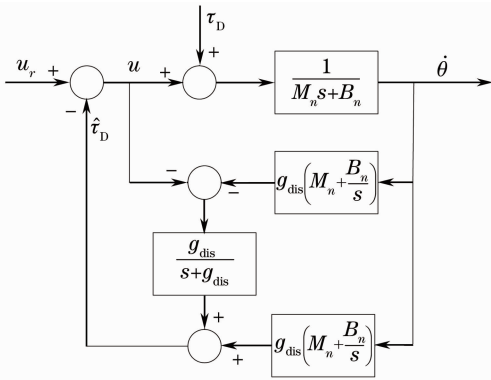


图 4 干扰观测器的结构框图

Fig. 4 Block diagram of the disturbance observer

将(11)式中的两式分别相加、相减, 可以写成(12)式、(13)式的表达形式

$$M_n(\ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_2) + B_n(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = u_1 - u_2 + (\tau_1 - \tau_2), \quad (12)$$

$$M_n(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + B_n(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) = u_1 + u_2 + (\tau_1 + \tau_2). \quad (13)$$

为了实现同步控制器 u_1, u_2 与调速控制器 τ_1 和

τ_2 的完全解耦, 在控制器设计时令 $u_1 = -u_2, \tau_1 = \tau_2$, 将(12)式、(13)式改写为

$$M_n(\ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_2) + B_n(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = u_1 - u_2, \quad (14)$$

$$M_n(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + B_n(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) = \tau_1 + \tau_2. \quad (15)$$

同步控制器采用超前校正(PD校正), 则有 $u_1 = K_p(\theta_2 - \theta_1) + K_v(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1), u_2 = K_p(\theta_1 - \theta_2) + K_v(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2), K_p, K_v$ 分别为比例、微分控制系数。令 $e_{12} = \theta_1 - \theta_2$, 则 $\dot{e}_{12} = \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2, \ddot{e}_{12} = \ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_2$, 将同步控制器 u_1, u_2 的表达形式代入(14)式, 可以写成(16)式的形式

$$M_n\ddot{e}_{12} + (2K_v + B_n)\dot{e}_{12} + 2K_p e_{12} = 0, \quad (16)$$

由(14)式可见, 在 u_1, u_2 的作用下, 能够保证 $e_{12} \rightarrow 0$, 即 $\theta_1 = \theta_2$ 。

当同步控制进入稳态时, 可以认为扫描机构和探测器机构在位置响应上完全相同, 即 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_{12}$ 则 $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_{12}, \ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_2 = \ddot{\theta}_{12}$ 。令 $\tau_1 = \tau_2 = \tau_{12} = C_v(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_{12})$ 为扫描机构和探测器机构的调速控制量, 其中 C_v 为调速控制器的校正函数, 这里速度控制器可以采用滞后超前校正方法进行设计, $\dot{\theta}_r$ 为速度给定, (15)式可以写成(17)式的形式

$$2M_n\ddot{\theta}_{12} + 2B_n\dot{\theta}_{12} = 2\tau_{12}, \quad (17)$$

(17)式可以看作是扫描机构和探测器机构在调速控制器的作用下按速度给定 $\dot{\theta}_r$ 作匀速转动。当调速控制器的校正函数 C_v 及同步控制器参数 K_p, K_v 确定后即可实现扫描机构和探测器机构的匀速同步转动, 该系统的总体结构如图 5 所示。

4 实验结果与分析

4.1 同步补偿精度实验

相机在实际成像期间, 扫描机构与消旋机构以 $11^\circ/\text{s}$ 匀速转动, 因此, 速度给定 $\dot{\theta}_r = 11^\circ/\text{s}$, 调速控制器采用滞后超前控制, 两套机构各配有一个 20 位的绝对式编码器。为了验证高精度同步补偿方法的有效性, 系统分别采用并行工作及高精度同步补偿的工作方式, 比较两种工作方式下的同步误差。在相机的扫描机构上施加扰动, 采用编程的方式进行模拟, 即在扫描机构调速控制器的输出信号中叠加方波扰动信号。当采用并行工作方式^[6]时, 速度阶跃响应及同步误差波形如图 6 所示, 图 6(a)中实线为扫描机构的速度响应曲线, 虚线为探测器机构的速度响应曲线。通过图 6(b)、(c)可以看出当施加较大的扰动后, 速度及位置同步误差明显增大, 速度同步误差的最大值为 $2.2227^\circ/\text{s}$ (远大于 $0.253^\circ/\text{s}$), 位置同步控制误差最大值为 0.3736° (远大于 0.0152°), 不

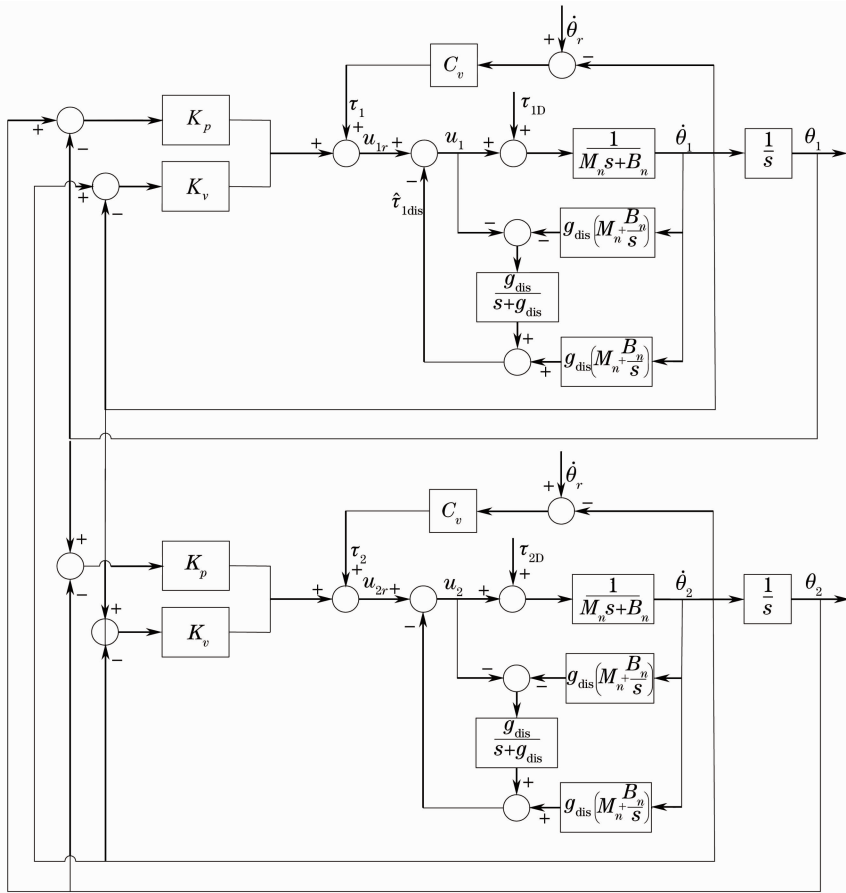


图 5 同步控制系统的结构框图

Fig. 5 Block diagram of synchronous control system

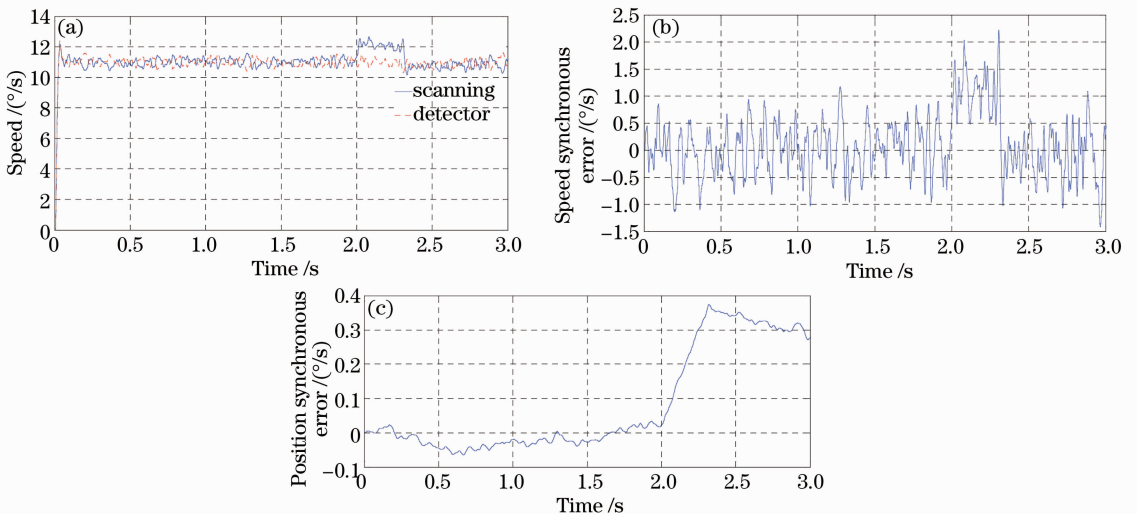


图 6 (a) 并行控制下速度的阶跃响应; (b) 并行控制下的速度同步误差; (c) 并行控制下的位置同步误差

Fig. 6 (a) Speed step response under parallel control; (b) speed synchronous error under parallel control; (c) position synchronous error under parallel control

满足同步补偿精度的精度要求。当采用高精度同步工作方式时,选取同步控制器的参数 K_p 、 K_v 分别为 200, 80, 速度阶跃响应及同步误差波形如图 7 所示, 图 7(a) 中实线为扫描机构的速度响应曲线, 虚线为探

测器机构的速度响应曲线, 通过图 7(b)、(c) 可以看出速度同步控制误差的最大值为 $0.0695^\circ/\text{s}$, 位置同步控制误差的最大值为 0.0043° , 可以看出本方法对扰动的抑制能力明显增强, 满足设计补偿精度。

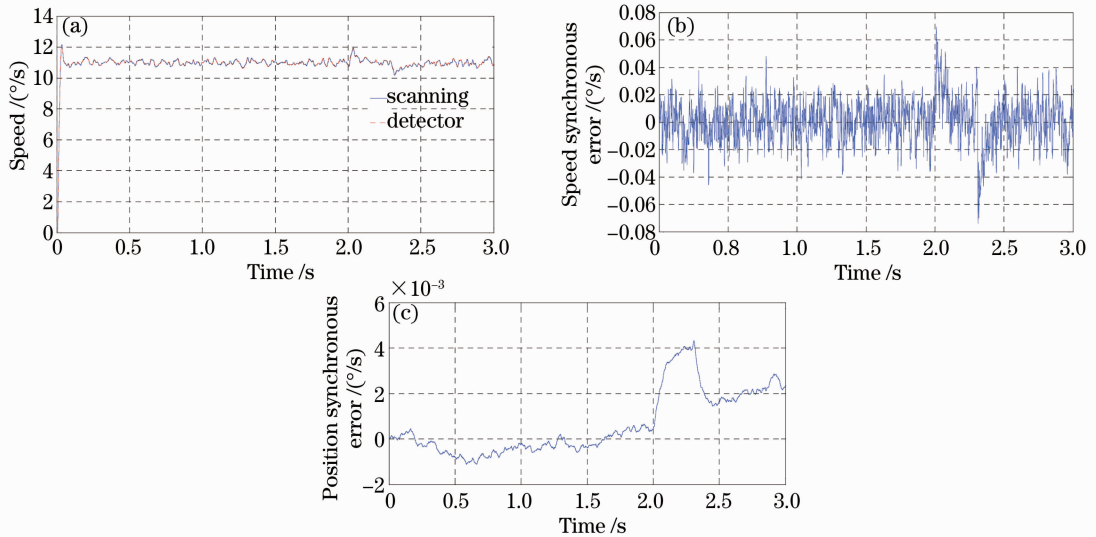


图 7 (a)高精度同步控制下的阶跃响应;(b)高精度同步控制下的速度同步误差;(c)高精度同步控制下的位置同步误差

Fig. 7 (a) Step response under high accuracy synchronous control; (b) speed synchronous error under high accuracy synchronous control; (c) position synchronous error under accuracy synchronous control

4.2 实验室成像实验

通过实验室静态分辨率成像实验与外景成像实验比较^[15],观察采用高精度同步控制器前后图像像质的变化。用专用检测仪模拟飞机载荷中央指令系统,用专用图像采集软件采集图像。相机的焦距为 900 mm,采用 3.5 m 平行光管,鉴别率板采用标准 4#板。图 8 为在扰动条件下静态分辨率图像对比图。图 8(a)为扰动条件下采用并行工作方式时的静态分辨率图像,有较明显的扭曲现象,图像可分辨

到第 10 组约为 40 lp/mm。图 8(b)为采用高精度同步工作方式时的静态分辨率图像,与并行工作方式的图像相比,其图像的扭曲现象基本消除,图像可分辨到第 15 组约为 55 lp/mm。图 9 为扰动条件下的外景图像对比图。图 9(a)为扰动条件下采用并行工作方式时的外景图像,图像部分区域有明显的扭曲失真。图 9(b)为扰动条件下采用高精度同步方式的外景图像,其图像基本无扭曲失真,图像效果明显改善。

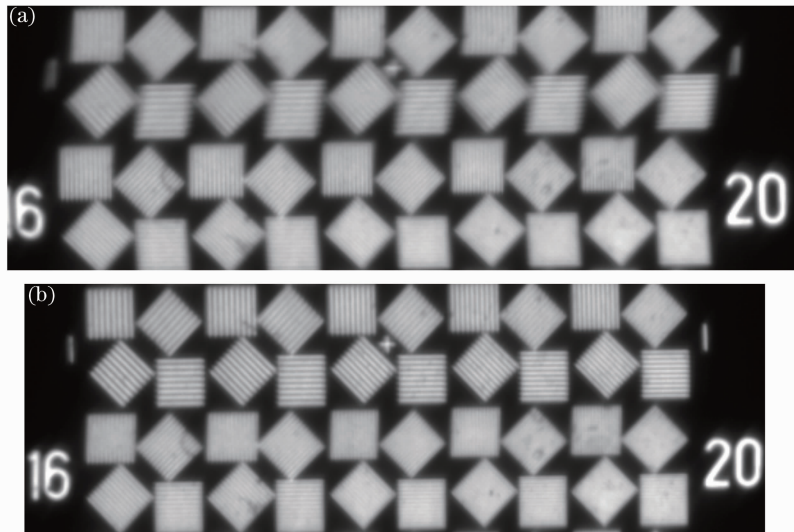


图 8 (a)并行控制下的静态分辨率图像;(b)高精度补偿控制下的静态分辨率图像

Fig. 8 (a) Static resolving power image under parallel control; (b) static resolving power image under high accuracy synchronous control



图 9 (a)并行控制下的外景图像;(b)高精度同步控制下的外景图像

Fig. 9 (a) Outside image under parallel control; (b) outside image under high accuracy synchronous control

5 结 论

为了分析全景式摆扫相机像旋对图像质量的影响,通过坐标变换方法分析了相机在成像过程中扫描机构与探测器机构之间的位置及速度关系。通过分析影响控制精度的因素,提出了基于干扰观测器调速系统的高精度同步补偿方法,该方法不但对控制系统中影响控制精度的扰动进行了有效抑制,还实现了调速控制器与同步控制器在设计上的解耦,有利于系统的实际实现,提高了系统稳定性及补偿精度。根据实验室静态分辨率成像和对外成像所获得的图片,结果表明,采用像旋补偿工作方式的位置及速度同步控制误差分别小于 0.0043° 、 $0.0695^\circ/\text{s}$,满足补偿精度的要求,极大程度地抑制了成像过程中像旋失真,从而保证了航空成像的图像质量。

参 考 文 献

- 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.
- A G Lareau, A Partynski. Dual-band framing cameras: technology and status [C]. *SPIE*, 2000, 4127: 148-156.
- Xu Yongsan, Tian Haiying, Hui Shouwen, *et al.*. Trend and development actuality of the real-time transmission airborne reconnaissance camera[J]. *OME Information*, 2010, 27(12): 38-43.
许永森,田海英,惠守文,等.国外传输型航空相机的发展现状与展望[J].*光机电信息*, 2010, 27(12): 38-43.
- Y P Cheng, T C Lim. Dynamics of hypoid gear transmission with nonlinear time varying mesh characteristics [J]. *Journal of*

mechanical design, 2003, 125(2): 373-382.

- Zhang Hongwen, Cao Guohua, Li Yanwei, *et al.*. Application of wire rope gearing in aerial optical remote sensor[J]. *Laser and Infrared*, 2013, 43(4): 418-422.
张洪文,曹国华,李延伟,等.钢丝绳传动在航空光学遥感器上的应用[J].*激光与红外*, 2013, 43(4): 418-422.
- Liu Yan. Research on Control Strategy of Multi-Motor Synchronous Control System [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
刘艳.多电机同步控制系统控制策略研究[D].沈阳:沈阳工业大学, 2013.
- F J Perez-Pinal, G Calderon, I Araujo-Vargas. Relative coupling strategy [J]. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2003, 2(6): 1162-1166.
- Yu Chunfeng, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.*. Analysis of image rotation for aerial remote sensor with three-mirror reflective optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0823002.
于春风,丁亚林,惠守文,等.三反射系统航空遥感器像旋转移分析[J].*光学学报*, 2011, 31(8): 0823002.
- Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.*. Analysis of forward image displacement compensation and error correction for area scan color CCD airborne mapping camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0128001.
远国勤,丁亚林,惠守文,等.彩色大面阵航空测绘相机前向像移补偿分析及误差纠正[J].*光学学报*, 2013, 33(1): 0128001.
- Yuan Guoqin, Ding Yalin, Hui Shouwen, *et al.*. A method for distortion of airborne mapping camera with forward image displacement compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1111001.
远国勤,丁亚林,惠守文,等.前向像移补偿下航空测绘相机畸变的纠正方法[J].*光学学报*, 2012, 32(11): 1111001.
- Huang Pu, Xiu Jihong, Li Jun, *et al.*. Disturbance estimation and compensation of position control of lensbarrels in aerial cameras [J]. *Optics Precision Engineering*, 2012, 20(4): 803-810.
黄浦,修吉宏,李军,等.航空相机镜筒位置控制的扰动估计与补偿[J].*光学精密工程*, 2012, 20(4): 803-810.
- M Demirci, M Gokasan. MIMO disturbance observer for input—

- output decoupling with application to 4WAS vehicles [C]. IEEE Int Conf on Mechatronics, 2011, 90–95.
- 13 Chowarit Mitsantisuk, Seiichiro Katsure, Kiyoshi Ohishi. Force control of human-robot interaction using twin direct-drive motor system based on modal space design [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2010, 57(4): 1383–1392.
- 14 A C Lee, Y R Pan, M T Hsieh. Output disturbance observer structure applied to run-to-run control for semiconductor Manufacturing [J]. IEEE Trans Semiconductor Manufacturing, 2011, 24(1): 27–43.
- 15 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.
- 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

栏目编辑: 张浩佳