

文章编号 1004-924X(2003)06-0545-05

TDI CCD 全景式航空相机的像移补偿误差分析

吴宏圣¹, 潘 凝², 翟林培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. 上海交通大学, 上海 200030)

摘要:基于 TDI CCD 的航空相机通常工作于推扫方式,介绍了一种新型 TDI CCD 全景式航空相机。与相同 CCD 片数的推扫式相机相比,其优点是扩大了摄影视场,但同时带来摆动方向上的像移。针对这一问题,提出了一种真角度像移补偿方法,并通过实验验证了真角度像移补偿的正确性。以型号为 CT-F3 的 TDI CCD 相机为例,对前向像移补偿误差进行了分析,提出系统的性能指标:TDI CCD 积分时间精度应大于 5%,扫描反射镜补偿精度应大于 1%。

关键词:航空摄影机; CCD 摄像机; 摆扫; 真角度; 像移补偿; 误差分析

中图分类号: V447.3 文献标识码: A

Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera

WU Hong-sheng¹, PAN Ning², ZHAI Lin-pei¹

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

2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In comparison with a pushbroom aerial camera, a TDI CCD pendular aerial camera has a larger angle of view, but it has the problem of image motion in the direction of pendulum swing. A real angle IMC (image motion compensation) is therefore proposed to solve this problem. Experiments proved the correctness of real angle IMC. The error of FMC (forward image motion compensation) is analyzed taking a CT-F3 camera as an example, and the system performance suggested are as follows: the precision of TDI CCD integral time should be more than 5%, and the compensation precision of scanning mirror should be over 1%.

Key words: aerial camera; CCD camera; pendular; pure angle; image motion compensation; error analysis

1 引言

线阵 CCD 具有在运动中成像的特点,能够实

现 CCD 推扫方向上的像移补偿。与线阵 CCD 相比,TDI CCD 是一种特殊的线阵 CCD 器件,它利用时间延迟积分(TDI)技术,可在低照度的条件下,获得高灵敏度、高输出速率、高空间分辨率和

大的动态范围。目前,TDI CCD 航空相机通常采用推扫工作方式,推扫方式的主要缺点是视场受 CCD 像元数的限制,为了扩大视场必须进行 CCD 的拼接,特别是长焦距相机,往往需要许多片 CCD 拼接,相应的图像处理设备也随之增多。采用摆扫方式可以克服上述推扫方式的缺点,但是相机摆扫必然引入摆扫方向上的像移。本文介绍了一种新型摆扫相机的真角度像移补偿方法,并分析了前向像移补偿误差要求。

2 TDI CCD 全景式相机像移补偿原理

TDI CCD 全景式相机又称摇头相机或摆扫相机,其成像原理见图 1。相机机身方向与飞机飞行方向平行,摆扫方向以及 TDI CCD 积分方向与飞行方向垂直。相机摆扫成像时,来自地物的光线射到与水平光轴成 45° 的扫描反射镜上,光线被扫描反射镜折转 90° 后射入照相物镜,再经过照相物镜后以会聚光束的形式射到与水平光轴成 45° 的焦面反射镜上,焦面反射镜再把会聚光折转 90° 后,反射到 TDI CCD 焦平面上,从而实现扫描成像。相机扫描成像的同时,旋转扫描反射镜来补偿飞机飞行、俯仰及偏航引起的像移。与相机摆扫轴共轴安装一光学编码器,编码器的输出作为 TDI CCD 的行同步信号,利用 TDI CCD 在运动中成像的特点,实现相机摆扫方向的像移补偿。

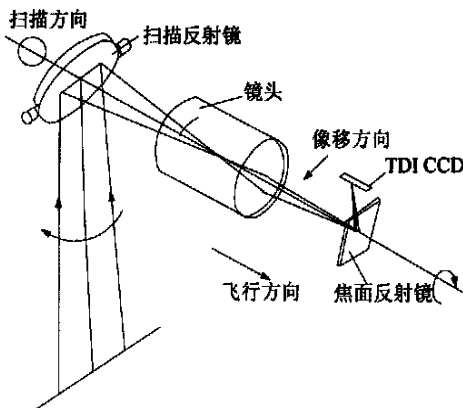


图 1 TDI CCD 全景式相机成像原理图

Fig. 1 Schematic diagram of pendular aerial camera with TDI CCD

3 摆扫像移补偿误差分析

首先介绍摆扫像移补偿原理:TDI CCD 是在机身摆扫运动中实现扫描成像的,因此要求 TDI 方向电荷转移速度与像速度相同即同步,才能实现摆扫方向上的像移补偿。图 2 为摆扫像移补偿原理图。从图中可知,只要编码器每输出一位对应 CCD 的一个像元输出,就能满足摆扫方向上的真角度像移补偿。设相机的焦距为 f , TDI CCD 像元尺寸为 b , TDI CCD 的一个像元所对应的角度:

$$= \frac{b}{f}, \tag{1}$$

设编码器每位对应的角度为 θ , 则摆扫像移的真角度补偿条件为:

$$\begin{aligned} \theta &= k \frac{b}{f} \\ \text{或 } b &= \frac{f}{k} \end{aligned} \tag{2}$$

其中 k 为修正系数。

由上述公式可知,真角度像移补偿由编码器每位对应的角度 θ 、焦距 f 和修正系数 k 决定,与摆扫速度无关。由式 (1) 导出摆扫像移误差模型^[5-6]:

$$db = \frac{f}{k} d + \frac{f}{k} df - \frac{f}{k^2} dk, \tag{3}$$

其中: d —编码器刻划误差;

df —相机焦距误差;

dk —修正系数误差。

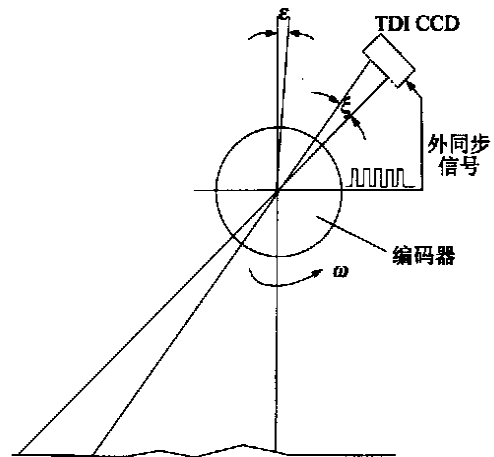


图 2 摆扫像移补偿原理图

Fig. 2 Schematic diagram of IMC in the direction of pendulum

由式(3)得出精度估计模型:

$$b = \pm \frac{1}{k} \sqrt{f^2 d^2 + V^2 d^2 f + \frac{2 f^2}{k^2} d^2 k}, \quad (4)$$

DALSA 公司的一份研究报告证明^[7], TDI CCD 的调制传递函数: $MTF = M \frac{V}{V}$ 2 时对像质无影响。以 CT-F3 型相机为例,其像元尺寸 b 为 13 μm ,行转移频率为 20 kHz, CCD 级数 M 为 32, 48, 64 和 96 级,可选择。采用 96 级积分时,同步误差应控制在 $\pm 1\%$ 以内。

设对相机参数的要求为: $f = 1\,500\text{ mm}$, $f = 1.3\text{ mm}$, $\gamma = 0.000\,027\,93\text{ rad}$, $\rho = 0.000\,000\,01\text{ rad}$, $k = 3.221$, $k = 0.003$ 。将参数代入式(4)得:

$$b = 1.719 \times 10^{-5}\text{ mm} = 1.719 \times 10^{-2}\text{ }\mu\text{m}$$

所以摆扫像移的同步误差为:

$$\frac{V}{V} = \frac{b}{b} = \frac{1.719 \times 10^{-2}}{13} = \frac{1.3}{1\,000} < 1\%$$

满足摆扫补偿同步误差要求。

4 前向像移补偿的误差分析

在研制 CCD 相机时,一般以像移补偿后剩余像移值的误差不超过 1/3 像元作为最起码的要求。仍然以 CT-F3 相机为例,像移补偿后的剩余误差应小于 4.3 μm 。

TDI CCD 焦平面上的前向像移为^[3,8]:

$$D_F = f t V = f t \left(\frac{V}{H} \sin \gamma_s + \gamma \cos \gamma_s + \rho \sin \gamma_s \right), \quad (5)$$

其中: f —相机焦距;

t —TDI CCD 的积分时间;

V —飞机飞行速度;

H —飞机飞行高度;

γ_s —相机水平位置与扫描方向的夹角;

γ —飞机俯仰角速度;

ρ —飞机偏航角速度。

由式(5)可看出,前向像移的精度取决于系统提供的航速、航高、TDI CCD 的积分时间、焦距、相机俯角以及俯仰/偏航陀螺的输出精度。TDI CCD 的积分时间精度由镜筒摆扫精度决定。由此得出前向像移的误差模型:

$$\begin{aligned} dD_F = & t df \left(\frac{V}{H} \sin \gamma_s + \gamma \cos \gamma_s + \rho \sin \gamma_s \right) + \\ & f dt \left(\frac{V}{H} \sin \gamma_s + \gamma \cos \gamma_s + \rho \sin \gamma_s \right) + \\ & f t \left[\frac{\sin \gamma_s}{H} dV - \frac{V}{H^2} \sin \gamma_s dH + \right. \\ & \left. d \gamma_s \left(\frac{V}{H} \cos \gamma_s - \gamma \sin \gamma_s + \rho \cos \gamma_s \right) + \right. \\ & \left. \cos \gamma_s d \gamma + \sin \gamma_s d \rho \right], \quad (6) \end{aligned}$$

由(6)式得出精度估计模型:

$$\begin{aligned} D_F = & \pm t^2 d^2 f \left(\frac{V}{H} \sin \gamma_s + \gamma \cos \gamma_s + \rho \sin \gamma_s \right)^2 + \\ & f^2 d^2 t \left(\frac{V}{H} \sin \gamma_s + \gamma \cos \gamma_s + \rho \sin \gamma_s \right)^2 + \\ & f^2 t^2 \left[\frac{\sin^2 \gamma_s}{H^2} d^2 V + \frac{V^2}{H^4} \sin^2 \gamma_s d^2 H + \right. \\ & \left. d^2 \gamma_s \left(\frac{V}{H} \cos \gamma_s - \gamma \sin \gamma_s + \rho \cos \gamma_s \right)^2 + \right. \\ & \left. \cos^2 \gamma_s d^2 \gamma + \sin^2 \gamma_s d^2 \rho \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7) \end{aligned}$$

TDI CCD 相机实例,见表 1。

表 1 系统参数值及误差

参数名	数值	精度(%)
f (mm)	1 500	1.3
V (m/s)	见表 2	2
H (m)	10 000	20
t (s)	0.005	见表 2
γ (°/s)	3	0.003
ρ (°/s)	3	0.003
γ_s (°)	45	0.004 5

结合式(7)与表 1,计算出 TDI CCD 相机在不同的航速、相同积分时间对应的不同精度下前向像移误差估计值,见表 2。从表 2 可知,TDI CCD 积分时间精度取 1%和 2%时,像移量大于 4.3 μm ,不满足补偿要求。积分时间精度取 0.5%时,最大像移量为 3.7 μm ,满足补偿要求。但表 2 的计算不包括反射镜补偿后的残差,在积分时间精度取 0.4%的条件下,反射镜补偿后的残差应为:

$$F = (4.3 - 3.0)\text{ }\mu\text{m} = 1.3\text{ }\mu\text{m}, \quad (8)$$

无反射镜补偿时的像移量为:

$$D_F = f t \frac{V}{H} \sin \gamma_s = 132.6\text{ }\mu\text{m}, \quad (9)$$

将式(8)与式(9)相比较,扫描反射镜补偿精度为:

$$F/D_F = 1\%$$

从以上的推导可知,提高 TDI CCD 积分时间的精度,可以降低对扫描反射镜补偿精度的要求。

表 2 前向像移误差估计值(μm)

Tab. 2 Error estimation of FMC value of image motion (μm)

V (m/s)	积分时间精度(s)				
	0.000 1 (2%)	0.000 05 (1%)	0.000 02 5 (0.5%)	0.000 012 5 (0.4%)	0.000 0125 (0.25%)
250	13.8	6.9	3.7	3.0	2.1
222	13.5	6.8	3.6	3.0	2.1
194	13.2	6.6	3.5	2.9	2.0
166	12.9	6.5	3.4	2.8	2.0

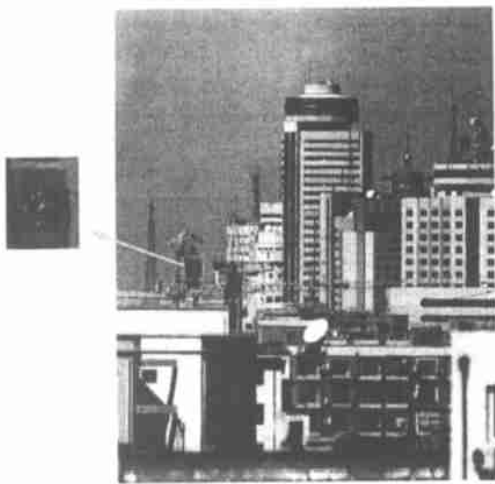


图 3 TDI CCD 相机成像图片

Fig. 3 Photo of TDI CCD camera

5 成像实验

为验证摆扫方向像移完全补偿的正确性以及误差要求,用一台 TDI CCD 全景式相机进行了室

外成像实验。相机满足第 3 节提出的参数要求。TDI CCD 型号为 CT-F3,焦距为 1 500 mm,相对孔径为 1:5.6,视场角为 $4^\circ \times 35^\circ$ 。TDI CCD 相机的理想像元分辨率为 38 pl/mm 。成像效果图见图 3。图 3 中,火车站的钟表指针清晰可辨,钟表指针宽度为 10 cm,摄像距离为 7 km。经粗略计算,图片的像元分辨率达到 24 pl/mm ,与理想像元分辨率相差 14 pl/mm 。这是因为照相时镜头像差、大气抖动及能见度等因素对成像质量也会造成一定的影响。

6 结 论

通过对 TDI CCD 全景式航空相机进行分析和实验,得出以下结论:

(1) 相机在摆扫方向上实现了真角度像移补偿,补偿精度与摆扫速度无关。

(2) 在其他参数一定的条件下,提高 TDI CCD 积分时间的精度,可降低对扫描反射镜补偿精度的要求。

参考文献:

- [1] 杨秉新. TDI CCD 在航天遥感器中的应用[J]. 航天返回与遥感,1997,18(3):15-18.
YANG B X. Application of TDI CCD in space image sensor[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1997,18(3):15-18. (in Chinese)
- [2] SEMENTELLI R G. EO/IR dual-band reconnaissance system[J]. *SPIE*, 1995, 2555:222-231.
- [3] 耿立中,安文化,朱涛,等. KA-112A 全景式航空相机[M]. 空军司令部情报部,1988.
GENGL ZH,AN W H,ZHU T. *The panoramic aerial camera including KA-112A* [R]. Intelligence Department of Air Command,1988. (in Chinese)
- [4] LAREAU A G. Electro-optical imaging array with motion compensation[J]. *SPIE*, 1993,2023:66-78.
- [5] 常本义. 关于数字航测相机像移补偿问题[J]. 解放军测绘学院学报,1998,15(2):105-108.
CHANG B Y. Forward motion compensation for digital aerial photogrammetric camera[J]. *Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping*, 1998,15(2):105-108. (in Chinese)

- [6] 史光辉. 像移对卫星摄影成像质量的影响[J]. 光学 精密工程, 1997, 5(4): 31-34.
SHI G H. The effect of image motion on the quality of the images formed for the satellite photography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(4): 31-34 (in Chinese)
- [7] DALSA. How TDI Works[M]. *Dalsa 1996-1997 Databook*, 1997.
- [8] 龙夫年, 张旺, 刘剑峰. 卫星姿态精度对 TDI CCD 相机的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3): 382-384.
LONG F N, ZHANG W, LIU J F. Effect of satellite attitude control accuracy on TDI CCD cameras[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(3): 382-384. (in Chinese)

作者简介: 吴宏圣(1974 -), 男, 山西天镇人, 1997 年毕业于吉林工业大学电子工程系工业电气自动化专业, 获学士学位, 2000 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在职攻读硕士研究生, 主要研究方向为航空相机控制技术。

向您推荐《液晶与显示》期刊

《液晶与显示》是中国最早的液晶学科期刊, 也是中国惟一的液晶学科和显示领域中综合性学术期刊。它由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶分会主办, 科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述、信息与动态和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示领域中最新理论研究、科研成果和创新技术, 及时反映国内外本学科领域及产业信息动态。本刊是英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(P)、美国《剑桥科学文摘》(CSA) 和“中国科学引文数据库”、“中国科技论文统计源期刊”等国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色, 其内容丰富, 信息量大, 涵盖面广, 可读性强。既是启迪科技人员开拓创新思路的参考期刊, 又是从事液晶和显示技术研究的广大科技人员、大专院校师生及相关领域的科技工作者进行学术交流的良好园地, 也是图书、情报等部门必不可少的信息来源。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿, 将您们的科技创新、产品信息、企业风貌通过这一窗口展示出来。同时, 竭诚欢迎社会各界洽谈广告业务、合作组织技术交流与信息发布活动。

《液晶与显示》为双月刊, A4 开本, 80 页, 国内定价 10.00 元, 国内外公开发行。国际标准刊号: ISSN 1007 - 2780, 国内统一刊号: CN 22 - 1259/O4, 国际刊名代码(CODEN): YYXIFY。广告经营许可证号: 200004100137。国内邮发代号: 12 - 203; 国外发行代号: 4868Q。同时, 《液晶与显示》编辑部将竭诚为广大读者服务, 随时办理订阅。

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登产品信息

地 址: 吉林省长春市东南湖大路 16 号 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
《液晶与显示》编辑部 邮 编: 130033
电 话: (0431) 6176862 传 真: (0431) 5682346
E-mail: yjxs@ciomp.ac.cn 网 址: www.ciom.ac.cn