全景式航空相机摄影起始角误差抑制方法

徐正平,张雪菲,李清军,李友一,许永森

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

摘 要: 覆盖宽度是全景式航空相机的重要指标,深入分析了摄影起始角误差对全景式航空相机所得图像锯齿效应的影响。在介绍全景式航空相机工作方式及工作时序的基础上,分析了所得图像边缘差异占覆盖宽度的比值 γ 与目标倾斜角、横向扫描角及摄影起始角误差之间的关系。全景式航空相机工作时,通常对摄影起始角设定预留恒定角度值,该方法会造成较大的摄影起始角误差。为了减小该误差,提出了改进迭代算法:在每帧成像时记录摄影起始角误差,并利用该误差对下一帧图像进行修正。最后给出了实验结果。结果表明:采用传统算法和改进迭代算法时,摄影起始角误差均方根值分别为 0.045°和 0.005°,γ 值范围分别为[0.009 1,0.014 8]、[0.001 0,0.001 7]。改进迭代算法将摄影起始角误差降低为传统算法的 1/9,对应 γ 最大值为 0.001 7,满足工程需求。

关键词: 全景式航空相机; 摄影起始角; 覆盖宽度

中图分类号: TP183 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2055-05

Restraining method of imaging starting angle error for panoramic aerial camera

Xu Zhengping, Zhang Xuefei, Li Qingjun, Li Youyi, Xu Yongsen

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Covering width is an important index of the panoramic aerial camera, so the effect of imaging starting angle error on the sawtooth result of panoramic aerial camera imaging was analyzed in detail. Based on introducing the operating mode and scheduling of panoramic aerial camera, the relationship between the ratio, which was defined as γ, of image margin difference to covering width, target slope angle, transverse scanning angle and imaging starting angle error was given. When panoramic aerial camera was on operating, one special constant angle was reserved for the imaging starting angle. The imaging starting angle error would be appreciably high when this method was used. So improved iterative arithmetic was imported. In the improved method, the imaging starting angle error of every frame was recorded and was used to correct that of next frame. At last, experimental result was given. Result shows that the root-mean-square of imaging starting angle errors are respectively 0.045° and 0.005° when general and improved methods are used. And the corresponding ranges of γ are [0.009 1,0.014 8] and [0.001 0,0.001 7]. Compared with general method, the imaging starting angle error is reduced to be 1/9

收稿日期: 2012-12-11; **修订日期:** 2013-01-09

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项资助(201204515);中科院长春光机所领域前沿创新项目(Y2CX1SS123)

作者简介: 徐正平(1983-),男,助理研究员,博士,主要从事航空遥感器电子学设计方面的研究。Email:xuzp090@163.com

when induced iterative arithmetic is used, and the corresponding maximum of γ is 0.001 7, which could comply with engineering requirement.

Key words: panoramic aerial camera; imaging starting angle; covering width

0 引 言

航空侦察相机按照其成像方式可分为推扫式、画幅式及全景式。推扫式航空相机随载机飞行时对地面推扫成像。画幅式相机在载机飞行的垂直方向上,沿载机正下方左右分幅成像,国外典型画幅式航空相机有 CA-260、CA-261、CA-265、CA-270、CA-295 及 KS-146[1]等。全景式航空相机在载机飞行过程中,探测器摆扫成像,以获取大的地面覆盖宽度。同时考虑载机速高比, 设置合理的摆扫速度及横向扫描角, 使所得图像在载机飞行方向上保证一定重叠率,防止出现图像漏洞。国外典型的全景式航空相机有 KA-112A[2]、DB-110[3]等。

作为一种精密光电仪器, 航空相机涉及多项关键技术[4-7]。地面覆盖宽度是全景式航空相机的重要指标之一。为了获得大的覆盖宽度,要求相机摄影效率尽量高。考虑 KA-112A 为胶片型相机,在成像之前须将压片轮压下。因此,KA-112A 在接收到系统拍照指令后驱动镜筒电机加速, 当镜筒电机加速到成像扫描速度时有短暂的恒速稳定,之后进行成像,相关文献并没有给出其极限覆盖宽度。文中所述全景式航空相机探测器选用 TDI CCD, 免去了压片轮,为了获得极限覆盖宽度,需确保系统接到拍照指令至摄影起始时刻之间的时间间隔最短。考虑其工作模式,需为摄影起始角预留一定角度,预留角度值将影响摄影起始角精度,从而影响图像覆盖宽度。全景式航空相机的摄影起始角与目标倾斜角、横向扫描角相关,而横向扫描角与载机速高比、目标倾斜角等因素相关。因此,在目标倾斜角及载机速高比不同时,需改变摄影起始角预留角度,减小摄影起始角度误差,以保证相邻帧图像边缘对齐。

文中在分析全景式航空相机工作模式和工作时序的基础上, 给出图像两边缘差异占总覆盖宽度的比值与目标倾斜角、横向扫描角及摄影起始角误差之间的关系, 利用改进迭代算法减小摄影起始角误差,并通过实验验证算法的有效性。

1 全景式航空相机工作方式

全景式航空相机工作方式示意图[8]如图 1 所示。

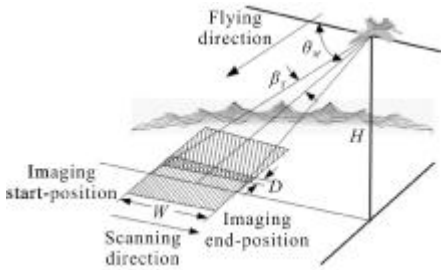

图 1 全景式航空相机工作方式示意图

Fig.1 Sketch map of panoramic aerial camera operation

图 1 中,**H** 为载机飞行高度;θ_M 为目标倾斜角;$2\beta_S$ 为横向扫描角;**W** 为覆盖宽度;**D** 为近景点相邻帧重迭宽度。

全景式航空相机工作时, 沿垂直于载机飞行方向,自右至左摆扫成像,相机摆扫过程中对地面上一条带状区域成像。在载机飞行过程中,相机通过多次摆扫,实现对地面不同带状区域成像,各带状区域保持一定的重叠率, 通过图像拼接得到地面大面积图像信息。可见,全景式航空相机通过摆扫方式扩大覆盖宽度。在横向扫描角速度固定时,为在不同速高比条件下, 保证载机飞行方向上相邻带状区域之间保持一定的重叠率,相机横向扫描角将受到一定限制。相机工作时,相机控制器会给出目标倾斜角,相机在目标倾斜角左右对称摆扫,保证目标在图像中间。

覆盖宽度 **W** 与载机飞行高度 **H**、目标倾斜角 θ_M、横向扫描角 $2\beta_S$ 的关系式如下:

$$\mathbf{W}=\mathbf{H}\cdot[\cot(\theta_M-\beta_S)-\cot(\theta_M+\beta_S)]$$

近景点相邻带状区域重叠宽度 **D** 由下式给出:

$$\mathbf{D}=\frac{\mathbf{n}\cdot\mathbf{b}\cdot(1-\rho)}{\mathrm{f}}\frac{\mathbf{H}}{\sin(\theta_M+\beta_S)}$$

式中:**n** 为线阵 CCD 像元数;**b** 为 CCD 像元在线阵方向上的尺寸;ρ 为重叠率;f 为光学系统焦距。

摄影周期 **T** 由下式给出:

$$\mathbf{T}=\frac{\mathbf{D}}{\mathbf{v}}=\frac{\mathbf{n}\cdot\mathbf{b}\cdot(1-\rho)}{\eta\mathrm{f}\cdot\sin(\theta_M+\beta_S)}$$

式中:$\mathbf{v}$ 为载机飞行速度;η 为载机速高比。

2 全景式航空相机覆盖宽度分析

全景式航空相机工作时序图[9]如图 2 所示。

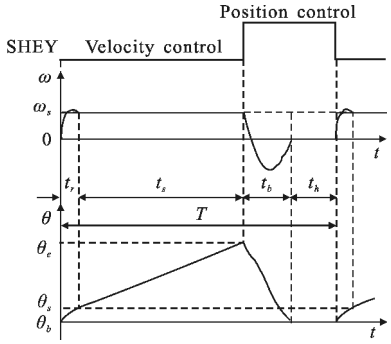

图 2 全景式航空相机工作时序图

Fig.2 Scheduling of panoramic aerial camera operation

图 2 中,$\mathbf{T}$ 为摄影周期;t_r 为正向加速时间;t_s 为正向扫描段;t_b 为回程时间段;t_h 为驻留时间;SHEY 为摄影脉冲信号;ω 为俯角系统瞬时角速度;θ 为俯角瞬时角;ω_s 为横向扫描角速度;θ_s 为摄影起始角;θ_e 为摄影结束角;θ_b 为拍照起始角。

相机工作时,由相机控制器发送 SHEY 信号。SHEY 信号低电平和高电平分别表示速度模式和位置模式。当俯角控制系统检测到 SHEY 信号变低时,进入速度工作模式,从拍照起始位置起加速到横向扫描角速度 ω_s。在到达摄影脉冲起始位置 θ_s 之前,俯角转速必须达到稳速精度要求,以使所得图像曝光均匀。为保证飞行方向重叠率,需满足以下关系:

$$t_r+t_s+t_b+t_h=\frac{\mathbf{n}\cdot\mathbf{b}\cdot(1-\rho)}{\eta f\cdot\sin(\theta_M+\beta_S)}$$

正向扫描时间 t_s 由横向扫描角速度 ω_s 及横向扫描角 $2\beta_S$ 决定,关系式为:

$$t_s=\frac{2\beta_S}{\omega_s}$$

正向加速时间 t_r 及回程时间 t_b 与伺服响应能力有关,同时两者也是横向扫描角的函数。在系统设计时,为了达到最大覆盖宽度,通常要求正向加速时间 t_r 最小,即俯角转速达到横向扫描速度时即开始拍照。为了满足该要求,常规做法是:在摄影起始角 θ_s 之前预留一定角度作为拍照起始角 θ_b。预留角度大小与伺服系统响应能力有关,可通过实验测量确定。但由于在不同速高比条件下,摄影起始位置不同,因而拍照起始位置也不同,同时由于外界环境的影响,会造成摄影起始角 θ_s 存在一定误差,最终得到的图像会存在锯齿效应。当摄影起始角 θ_s 误差为 $\Delta\theta_s$ 时,造成地面图像在远景点和近景点边缘差异分别为 $\Delta\mathbf{W}_1$、$\Delta\mathbf{W}_2$,可由以下两式求出:

$$\Delta\mathbf{W}_1=\mathbf{H}\cdot[\cot(\theta_M-\beta_S)-\cot(\theta_M-\beta_S+\theta_s)]$$

$$\Delta\mathbf{W}_2=\mathbf{H}\cdot[\cot(\theta_M+\beta_S)-\cot(\theta_M+\beta_S+\theta_s)]$$

图像两边缘差异占总覆盖宽度的比值 γ 为:

$$\gamma=\frac{\cot(\theta_M-\beta_S)-\cot(\theta_M-\beta_S+\Delta\theta_s)}{\cot(\theta_M-\beta_S)-\cot(\theta_M+\beta_S)}+\frac{\cot(\theta_M+\beta_S)-\cot(\theta_M+\beta_S+\Delta\theta_s)}{\cot(\theta_M-\beta_S)-\cot(\theta_M+\beta_S)}$$

取目标倾斜角 θ_M 范围为[10°,60°],横向扫描角 $2\beta_S$ 为 10°,起始位置误差 $\Delta\theta_s$ 范围为[0°,1°],覆盖宽度差异量占总覆盖宽度的比值与目标倾斜角、摄影起始角误差的关系曲线如图 3 所示。

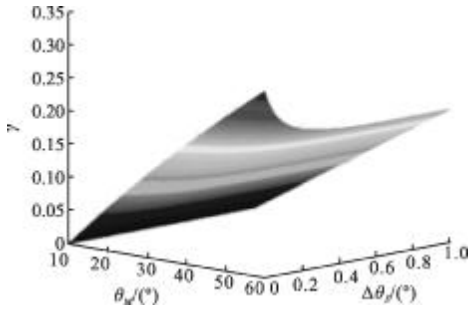

图 3 γ 与目标倾斜角、摄影起始角误差关系曲线

Fig.3 Relationship between γ, target slant angle and imaging start-angle error

当 $\Delta\theta_s$ 分别取为0.045°、0.005°时,γ 与目标倾斜角关系曲线如图 4 所示。当 θ_M 为 45°时,γ 与摄影起始角误差关系曲线如图 5 所示。

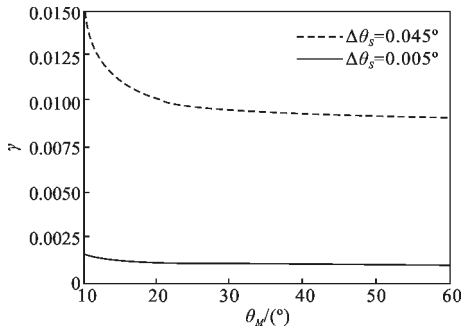

图 4 $\Delta\theta_s$ 为 0.045°和 0.005°时,γ 与目标倾斜角关系曲线

Fig.4 Relationship between γ and target slant angle when $\Delta\theta_s$ is 0.045° and 0.005°

从图 3~图 5 中可以看出:目标倾斜角越小、摄影起始角误差越大,γ 越大。在上述参数范围内,当

目标倾斜角为 10°，摄影起始角误差为 0.1°时，γ 值最大，为 0.2806。为了减小所得图像的锯齿效应，应尽量减小摄影起始角误差。

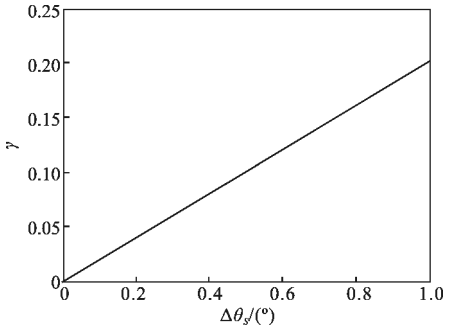

图 5 θ_M 为 45°时，γ 与摄影起始角误差关系曲线

Fig.5 Relationship between γ and imaging start-angle error when θ_M is 45°

3 算法分析

算法流程图如图 6 所示。

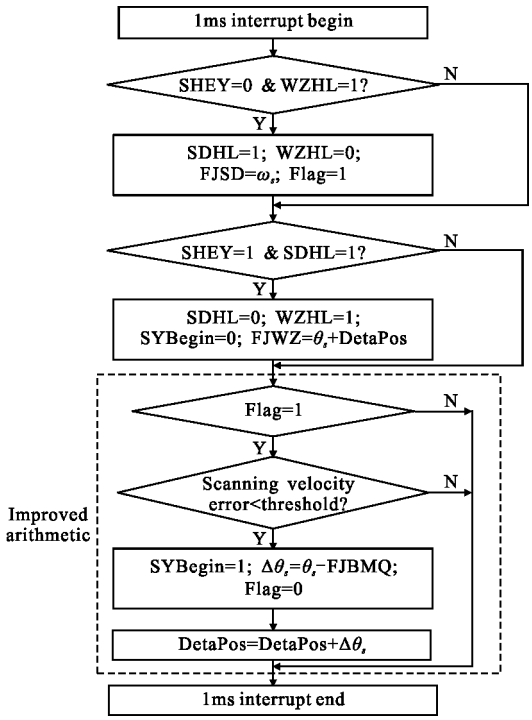

图 6 算法流程图

Fig.6 Flow chart of arithmetic

图 6 中各变量含义如下：SHEY 为摄影信号；SDHL 为速度模式标志，当 SDHL=1 时，俯角伺服系统为速度环；WZHL 为位置模式标志，当 WZHL=1 时，俯角伺服系统为位置环；FJSD 为当俯角伺服系统工作在速度环时的速度给定；FJWZ 为当俯角伺服系统工作在位置环时的位置给定；DetaPos 为摄影起始角度预留值，理论值等于摄影起始角与拍照起始角之差；SYBegin 为摄影标志位，当 SYBegin=1 时相机拍照；FJBMQ 为俯角编码器给出的俯角角度值；Flag 为一标志位，用于记录俯角速度到达横向扫描角速度时的位置信息。

在算法设计时，内部定时器产生 1 ms 中断，每 1ms 进行一次算法运算。当 SHEY=0 且 WZHL=1 时，表明上一采样时刻 SHEY 信号为 1，SHEY 信号发生了翻转，俯角伺服控制系统需由位置回路切换到速度回路，设置 SDHL=1、WZHL=0，将速度回路给定 FJSD 设置为横向扫描速度 ω_s，同时将 Flag=1 准备记录俯角转速到达扫描速度时的位置信息。同理，当 SHEY=1 且 SDHL=1 时，表明上一采样时刻 SHEY 信号为 0，SHEY 信号发生了翻转，俯角伺服控制系统需由速度回路切换到位置回路，设置 SDHL=0、WZHL=1，将位置回路给定 FJWZ 设置为摄影起始角 θ_s 加上预留值 DetaPos。在位置回路模式下，俯角返回至拍照起始位置。该过程不拍照，需设置 SYBegin=0。

如上所述，在速度模式下记录俯角达到横向扫描速度时俯角角度值。在俯角速度误差到达设定误差范围内时，相机开始拍照，设置 SYBegin=1，此时读取俯角编码器值 FJBMQ，该值即为摄影起始角实测值。将该值与摄影起始角理论值 θ_s 相比，得到摄影起始角误差。

在常规算法中，预留值 DetaPos 依据实验确定，在整个相机工作过程中保持一定值。由于速高比及目标倾斜角发生变化时，摄影起始位置将不同，此时，若保持 DetaPos 为恒值，实际得到的摄影起始位置将存在较大误差。为了减小该误差，系统在每次摄影时，记录摄影起始位置偏差 $\Delta\theta_s$，并利用该偏差更新预留值 DetaPos，即：

$$\mathrm{DetaPos}=\mathrm{DetaPos}+\Delta\theta_s$$

如图 6 虚线框标注所示。即在相机成像过程中，利用本次摄影起始位置偏差更新下次拍照起始位置。由于在一段时间范围内，目标倾斜角及载机速高比变化不大，此时，摄影起始位置不会发生太大变化，利用该算法可以有效减小摄影起始位置误差。当目标倾斜角或载机速高比变化时，拍摄第一帧图像时将有较大的摄影起始角误差，但通过该算法修正，该误差在后续帧中会立即减小。

关于算法实时性的讨论如下:相比于原算法,改进算法只增添了 6 条语句。在任一时刻,整个改进算法执行 11 条语句。系统硬件控制器采用 TMS320F2812,主频可达 150 MHz,单周期指令执行时间为 6.67 ns,尽管改进算法中包含浮点比较和加法指令, 其执行耗时也在微秒级,远低于系统 1 ms 采样周期,即算法的实时性能够得到满足。

4 实 验

为了对比两种算法的效果, 在实际系统中进行了实验验证。俯角分系统轴上安装有 16 位绝对式光电编码器,其分辨率为 0.005°,分别选取目标倾斜角为 10°、20°、30°,在常规算法中,摄影起始角预留角度为 1.53°,测试结果如表 1 所示。

表 1 摄影起始角测试结果

Tab.1 Test result of imaging starting angle

Normal arithmetic			Improved arithmetic		
Academic value of the imaging start-angle/(°)					
10	20	30	10	20	30
Measured value of the imaging start-angle/(°)					
9.942	19.951	29.987	9.998	20.001	29.999
9.954	19.940	29.943	10.009	19.996	29.994
9.958	19.951	29.938	10.004	20.007	30.010
9.947	19.951	29.927	10.005	19.994	30.005
10.013	19.945	30.036	10.000	20.005	30.002
9.958	19.940	29.982	9.994	19.999	29.997
10.013	19.962	29.993	9.996	19.997	29.996
9.953	19.967	29.982	10.007	19.994	30.006
10.024	19.951	29.965	9.997	20.006	30.005
9.953	19.989	29.954	10.001	20.003	29.995
RMS error of the imaging start-angle/(°)					
0.041	0.047	0.042	0.005	0.004	0.005

从测试结果可以看出:采用常规算法时,摄影起始角误差均方根值在 0.045°左右;采用改进算法后,摄影起始角误差均方根值减小到 0.005°, 达到编码器分辨率,误差均方根值减小为常规算法的 1/9。当摄影起始角误差为 0.005°,目标倾斜角在[10°,60°]范围内时, γ 值小于 0.001 7,足以满足工程要求。

5 结 论

全景式航空相机所得图像边缘差异占总覆盖宽度的比值 γ 与目标倾斜角、横向扫描角及摄影起始角误差相关。在横向扫描角固定时, 目标倾斜角越小、摄影起始角误差越大,γ 越大。在目标倾斜角为[10°,60°],横向扫描角 $2\beta_s$ 为 10°,摄影起始角误差 $\Delta\theta_s$ 范围为 [0°,+1°],γ 的最大值为 0.280 6, 所得图像锯齿效应比较严重。全景式航空相机工作时,通常为摄影起始角设定预留恒定角度值, 在俯角分系统达到横向扫描速度时即开始成像, 采用该方法造成的摄影起始角误差均方根值在 0.045°左右, 对应 γ 的取值范围为[0.009 1,0.014 8]。为了减小摄影起始角误差,提出了改进迭代算法:在每幅成像时,记录该幅成像时的摄影起始角误差, 并利用该差值对下一幅图像进行修正。实验结果表明: 采用改进算法后,摄影起始角误差均方根值在 0.005°左右,为常规算法的 1/9,对应 γ 取值范围为[0.001 0,0.001 7],足以满足工程需求。

参考文献:

[1] Wang Guang. Aerial Camera: KS-146 [M]. Beijing: The Information Ministry of PLA Air Command, 1989. (in Chinese)

[2] Geng Lizhong, An Wenhua, Che Nianceng. Panoramic Aerial Camera: KA-112A [M]. Beijing: The Information Ministry of PLA Air Command, 1988. (in Chinese)

[3] Mrinal Iyengar, Davis Lange. The Goolrich 3rd generation DB-110 system: operational on tactical and unmanned aircraft[C]//SPIE, 2006, 6209: 620901-620909.

[4] Zhang Jichao, Zhou Jiufei, Zhang Lei. Image span compensation on scanning frame remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2396-2400. (in Chinese)

[5] Liu Zexun, Quan Xianrong, Ren Jianwei, et al. Calibration of CCD camera's output non-uniformity linear corrected coefficient[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2211-2215. (in Chinese)

[6] Wang Dejiang, Kuang Haipeng, Cai Xichang, et al. Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera [J]. Opt Precision Eng, 2008, 16(12): 2465-2472. (in Chinese)

[7] Wang Dejiang, Dong Bin, Li Wenming, et al. Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system[J]. Opt Precision Eng, 2011, 19(10): 2500-2506. (in Chinese)

[8] Zhou Gang, Zhai Linpei, Wang Dejiang, et al. Research of scanning angle of panoramic aerial camera[J]. Opt Precision Eng, 2008, 16(12): 2473-2478. (in Chinese)

[9] Zhang Xuefei. Application research of state observer in angle of depression control system of aerial camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)