

《航空光电成像平台关键技术》专题文章导读

张 葆

中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空成像与测量技术研究部

近年来,随着现代军事技术发展的需要,侦察情报在战争中的地位愈显突出。由于固定站的侦察视野受光学系统视场角的限制,所以获得的侦察信息相对较少。为弥补固定站的不足,可以把侦察系统安放在移动站(地面车辆、舰船、飞机、卫星等动载体)上来扩大光学系统的动态视场并增加收容信息,但是,随之而来的是动载体振动、气流扰动和速度对光学系统成像质量的威胁和影响。

航空侦察具有机动、灵活、准确、实时、针对性强的特点,可弥补卫星侦察的不足,是获取战术情报的基本手段。其中,能否获得高质量的清晰图像决定了战术侦察效果,直接影响对敌情的准确判断和打击效果的有效评估。除 CCD 接收器和光学系统本身的品质外,制约航空侦察成像质量的主要因素是机体和气流振动引起物体像在靶面上的位移和温度变化等引起像质的劣化。因此,需要对载体的振动加以隔离、对物体在靶面的像移和温度变化进行补偿,从而提高动载体成像系统的清晰度与分辨能力,提高成像系统的图像质量和侦察效果。

本专题论文是长期从事航空光电侦察领域的技术人员结合工作需求及理论,总结的一些提高航空光电成像质量的一些关键技术:文一《航空光电成像电子稳像技术》介绍了一种电子稳像技术,解决了航空平台光电成像系统视频图像帧内运动模糊和帧间不稳定问题;文二《航空光电成像模糊的实时恢复》介绍了利用实数傅里叶的实时恢复技术大大提高运动模糊图像的恢复算法;文三《航空光电成像平台角位置陀螺和角速率陀螺的稳定效果分析》对比了两种陀螺的效果,仿真结果证明角位置陀螺工作方式稳定效果好;文四《航空光电成像消旋电视数字控制器》介绍了消旋电视摄像系统的工作原理及以 DSP 为核心的数字控制器的研制,提出了利用速率陀螺敏感载体的扰动速率作为前馈信号的速度数字控制系统,理论分析和实验结果都证明了该消旋摄像系统的可行性;文五《航空光电成像平台的目标自主定位》阐述了目标自主定位的优越性及其工作原理和实现的具体方法。上述文章分别从不同侧面阐述了提高航空光电成像质量的方法及其功能的拓展,而且大都在实际工作中得到应用和检验,并且取得了很好的效果。

希望上述文章能对从事航空光电侦察领域的技术人员有所帮助,并请读者提出宝贵意见。

文章编号 1004-924X(2007)08-1280-07

航空光电成像电子稳像技术

孙 辉¹,张 葆¹,刘晶红¹,李 仕^{1,2},李志强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. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:介绍了一种电子稳像技术,解决了航空平台光电成像系统视频图像帧内运动模糊和帧间不稳定问题。通过建立运动模糊的数学模型,构建二维运动模糊点扩散函数,采用维纳滤波方法,消除图像帧内运动模糊;通过灰度投影算法,检测序列图像当前帧和参考帧之间的运动矢量,采用图像补偿方法,实现序列图像稳定输出。实验结果表明,本文方法能提高信噪比,实现 1 pixel 的稳定精度,有效改善图像质量,输出清晰稳定的视频图像,具有精确、快速、实用的特点。

关键词:航空平台;光电成像;电子稳像;运动模糊;帧间稳定

中图分类号:V247.5; TN941.1 **文献标识码:**A

收稿日期:2007-05-20;修订日期:2007-07-25.

基金项目:国防科技预研基金资助项目(No. 1040603)

Electronic image stabilization for aerial E-O imaging system

SUN Hui¹, ZHANG Bao¹, LIU Jing-hong¹, LI Shi^{1,2}, LI Zhi-qiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: An approach of electronic image stabilization is presented for the E-O imaging system of airborne platform to restore the video image degraded by both intraframe motion-blurred and interframe vibration. The 2D motion-blurred point spread function (PSF) is set up by a motion-blurred mathematical model, then Wiener filter is used to restore the intraframe motion-blurred video images. A gray projection algorithm is presented to estimate the motion vector between the current frame and the reference frame in video image sequence, which is used to compensate video image sequence to make the video image sequence output stable. The experiment results show that the proposed approach has feasible, quick and accurate characteristics, which can improve the peak signal noise ratio (PSNR) effectively and reach the accuracy of 1 pixel, also can improve imaging quality and ensure video image sequence output clearly and stably.

Key words: airborne platform; E-O imaging system; electronic image stabilization; motion-blurred; interframe stabilization

1 引言

航空平台电视摄像设备在动基座上开展工作,由于使用环境因素影响,载体的姿态变化会导致输出图像质量下降,比较典型的是图像帧内模糊和帧间不稳定。为获取稳定清晰的视频图像,必须消除图像运动模糊,实现图像序列稳定输出。传统的稳像补偿手段如光学补偿、机械补偿及机电结合补偿等,虽然可以解决这个问题,但由于设备体积、重量等因素影响,在实际应用方面受到一定的限制。

近年来,采用电子学方法进行图像稳定清晰化的电子稳像技术已成为一门高技术的综合学科,与传统方法相比,它具有成本低廉、体积小、功耗低、安装方便等优点,在机载、车载、船载电视摄像系统中发挥了越来越重要的作用^[1-3]。其中加拿大 DREV (Defense Research Establishment Valcartier) 研究机构成功研制出安装在侦察车桅杆上的监视系统中的稳像装置,用来稳定风吹桅杆引起的图像晃动,稳像精度达到 1 pixel,处理速度 30 frame/s,满足实时处理要求。美国军事研究实验室 (Army Research Laboratory) 研制的

应用在无人驾驶越野车上的稳像系统的稳像精度优于 1 pixel^[4]。在理论研究方面,有关专家学者提出了许多行之有效的电子稳像方法^[5-9]。

本文结合航空平台光电成像系统特点,介绍一种电子稳像技术,通过采用图像复原方法和图像补偿方法,消除图像帧内模糊,稳定图像帧间跳动,输出稳定清晰的序列图像。

2 帧内电子稳像-消除运动模糊

2.1 运动模糊产生的机理

根据图像复理论,在目标和摄像机之间存在相对运动情况下,单个物点在若干图像像素上扩散时就会产生运动模糊,可以通过建立空间运动模糊模型进行处理^[10]。

对于线性平移不变运动模糊,模糊图像 $g(x, y)$ 为原始清晰图像 $f(x, y)$ 和点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) $h(x, y)$ 的卷积,即

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) h(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta + n(x, y), \quad (1)$$

式中, $n(x, y)$ 表示加性噪声。

对式(1)两边取傅里叶 (Fourier) 变换,有

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) + N(u, v), \quad (2)$$

其中 $F(u, v)$ 、 $G(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 和 $N(u, v)$ 分别表示 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 傅里叶变换, $H(u, v)$ 称为滤波函数。

2.2 运动模糊点扩散函数

根据式(2), 滤波函数 $H(u, v)$ 是解决问题的关键, 文献[11]介绍了一种通过实验方法获得 $H(u, v)$ 的方法。Lim 等人归纳了 5 种典型的一维点扩散函数^[12]。其中方波点扩散函数可以表示为

$$h(x) = \begin{cases} \frac{1}{M} & x \in (0, M-1) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 M 表示像移量, 可以通过飞行高度、飞行速度等运动数据计算^[13]。

设系统像移量为 M , 积分时间为 T , 运动方向与 CCD 靶面水平方向夹角为 θ , 则二维运动点扩散函数为

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{M} & y = x \tan \theta, x \in (0, M \cos \theta) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}, \quad (4)$$

式(4)的 $h(x, y)$ 进行 Fourier 变换, 得到的滤波函数 $H(u, v)$ 为:

$$H(u, v) = \frac{T \sin(\pi u M \cos \theta)}{\pi u M \cos \theta} \exp(-j \pi u M \cos \theta) + \frac{T \sin(\pi v M \sin \theta)}{\pi v M \sin \theta} \exp(-j \pi v M \sin \theta). \quad (5)$$

2.3 维纳滤波

在噪声未知情况下, 可近似取 $\hat{F}(u, v)$ 的逆 Fourier 变换作为恢复图像 $f(x, y)$, 即

$$\hat{F}(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)}$$

这就是逆滤波恢复方法。

在一般情况下, 滤波函数 $H(u, v)$ 随着 u, v 的增大而迅速衰减, 而 $N(u, v)$ 却接近常数。逆滤波计算误差为

$$E(u, v) = \hat{F}(u, v) - F(u, v) = \frac{N(u, v)}{H(u, v)}, \quad (6)$$

当 u, v 较大时, 式(6)表示的误差也很大。

为解决 $H(u, v)$ 在零点的误差问题, 通常采用维纳(Wiener)滤波方法计算 $F(u, v)$:

$$F(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{H(u, v)H^*(u, v) + \gamma} G(u, v), \quad (7)$$

式中 $H^*(u, v)$ 表示 $H(u, v)$ 的复共轭, γ 是噪声对信号的功率密度比, 取值范围一般在 0.000 1~0.01。

对式(7)的 $F(u, v)$ 进行 Fourier 逆变换, 得到清晰图像 $f(x, y)$ 为

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(u, v) \exp(j2\pi(ux + vy)) du dv. \quad (8)$$

3 帧间电子稳像

3.1 电子稳像原理

帧间电子稳像是一种对视频图像序列进行补偿的技术, 其目的是解决序列图像中帧间不稳定性问题, 从而保证经过补偿后的视频图像是平滑、稳定的。

电子稳像技术主要包括运动检测和运动补偿, 通过检测图像帧间运动矢量, 采取图像处理技术补偿图像。其基本结构如图 1 所示。

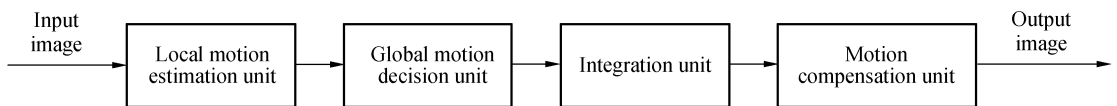


图 1 电子稳像系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of EIS system

3.2 运动检测

运动检测是实现电子稳像的关键环节, 目前检测帧间运动矢量的方法很多, 如代表点匹配法(Representative Point Matching, RPM)、灰度投影算法(Gray Projection Algorithm, GPA)、位平

面匹配法(Bit Plane Matching, BPM)、光流法、光度学图像分析法等^[8-9]。

GPA 是以图像灰度变化作为特征依据的, 可以比较准确地获取图像运动矢量。通过算法改进, 能够进一步提高运动矢量精度和计算速

度^[14-15]。

GPA 是将一幅 $M \times N$ 图像的二维灰度信息 $\{f(x, y)\}$ 映射成两个独立的一维投影序列。计算公式如下:

$$\begin{cases} X_k(x) = \sum_{y=1}^n f_k(x, y) / n \\ Y_k(y) = \sum_{x=1}^m f_k(x, y) / m \end{cases}, \quad (9)$$

$x=1, 2, \dots, M; y=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots$

式中, $X_k(x)$ 、 $Y_k(y)$ 分别表示第 k 帧图像 $\{f_k(x, y)\}$ 第 x 列和第 y 行的灰度投影值, m 和 n 分别表示行和列投影区间长度。

图 2、图 3 分别表示一幅 768×576 的图像在列、行方向上的投影曲线。

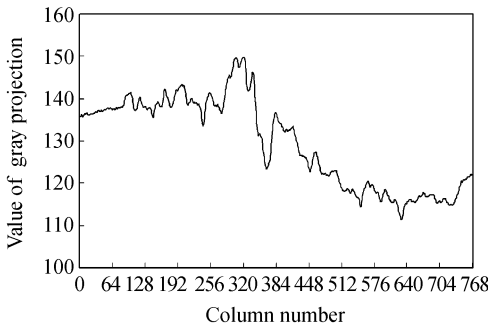


图 2 图像列方向投影数据曲线

Fig. 2 Column projection curve of a frame of image

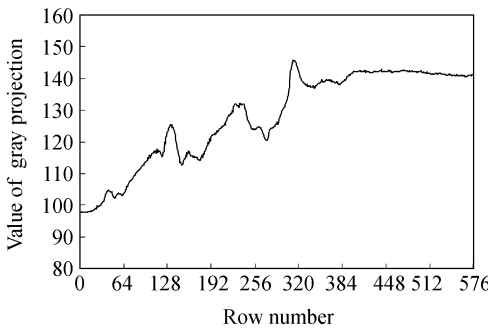


图 3 图像行方向投影数据曲线

Fig. 3 Row projection curve of a frame of image

对当前图像投影数据 $\{X_c(x)\}$ 、 $\{Y_c(y)\}$ 和参考图像投影数据 $\{X_r(x)\}$ 、 $\{Y_r(y)\}$ 做相关运算, 根据最小误差准则确定运动矢量。

本文采用最小均方误差 (MSE) 作为最小误差准则, 相关函数定义如下:

$$\begin{cases} C(p) = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{j=1}^m [X_r(j) - X_c(j+p)]^2} \\ m-M \leq p \leq M-m \\ C(q) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n [Y_r(i) - Y_c(i+q)]^2} \\ n-N \leq q \leq N-n \end{cases}, \quad (10)$$

于是, 运动矢量 $[dx, dy]^T$ 估计变成求 $C(p)$ 和 $C(q)$ 的最小值问题。即

$$\begin{cases} dx = \min_{m-M \leq p \leq M-m} C(p) \\ dy = \min_{n-N \leq q \leq N-n} C(q) \end{cases}, \quad (11)$$

3.3 运动补偿

图像序列运动补偿是根据运动检测算法求取图像运动矢量, 通过对图像像元位置进行重组实现的。

设图像中心为 (x_0, y_0) , 图像运动矢量为 $[dx, dy]^T$, 图像旋转角度为 θ , 则图像运动补偿公式为:

$$\begin{cases} x' = (x-x_0) \cos \theta - (y-y_0) \sin \theta + x_0 - dx \\ y' = (x-x_0) \sin \theta + (y-y_0) \cos \theta + y_0 - dy \end{cases}, \quad (12)$$

式中, (x', y') 、 (x, y) 分别表示补偿前、后坐标。

采用公式 (12) 进行图像补偿, 对于补偿图像的每一个像元坐标 (x, y) , 只要其对应原图像中的点坐标在图像范围内, 都可以保证在补偿前原始图像中有一个对应的像元点坐标 (x', y') 。

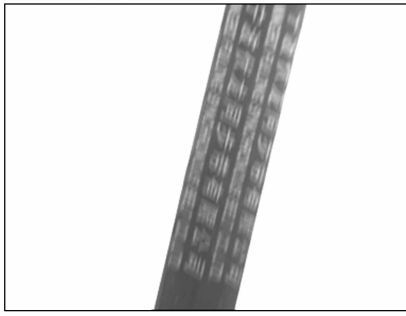
4 实验结果

4.1 二维运动模糊恢复实例

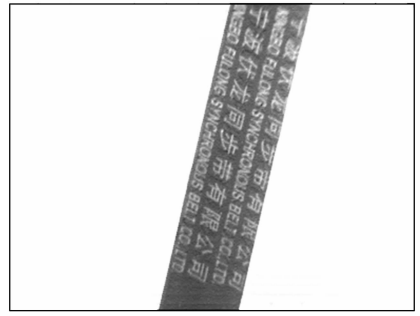
运动模糊恢复实验中选择实际运动产生的模糊图像, 原始图像分辨率为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel} \times 8 \text{ bit}$, 如图 4(a) 所示。选择式 (4) 的二维方波点扩散函数 $M=21, \theta=15^\circ$, 水平方向模糊分量 $dx=M \sin \theta \approx 5$, 垂直方向模糊分量 $dy=M \cos \theta \approx 20$, 参数 $\gamma=0.005$ 。恢复图像如图 4(b) 所示。

4.2 帧间电子稳像实例

帧间电子稳像实验的序列图像来自实验室摇摆台运动产生的运动视频, 经过图像编码处理后, 图像分辨率为 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel} \times 24 \text{ bit}$ 。



(a) 运动模糊图像
(a) Motion-blurred image



(b) 方波点扩散函数的复原图像
(b) Restored image by square-pulse PSF

图 4 二维运动模糊图像及恢复结果

Fig. 4 2D motion-blurred image and its restoration



(a) 第 k 帧图像(参考图像)
(a) The k th frame image(reference image)



(b) 第 $k+1$ 帧图像
(b) The $(k+1)$ th frame image



(c) 第 $k+2$ 帧图像
(c) The $(k+2)$ th frame image

图 5 原始图像序列

Fig. 5 Original image sequence



(a) 第 k 帧图像(参考图像)
(a) The k th frame image(reference image)



(b) 第 $k+1$ 帧图像
(b) The $(k+1)$ th frame image



(c) 第 $k+2$ 帧图像
(c) The $(k+2)$ th frame image

图 6 补偿后的图像序列

Fig. 6 Compensated image sequence

图 5 所示为相邻的三帧图像,采用本文方法检测运动矢量并进行图像补偿的稳像处理图像,如图 6。

用峰值信噪比 (Peak Signal Noise Ratio,

PSNR) 评定帧间稳像效果,结果见表 1。从表中可以看出,稳像后 PSNR 明显提高很多。

通过实验检测,本文方法可以实现 1 pixel 的稳像精度,处理时间 < 40 ms。

表 1 电子稳像处理结果

Tab.1 Processed results by EIS

No.	Motion vector	PSNR of original image	PSNR of compensated image
$k+1$	$dx = 8$	17.0	28.2
	$dy = -9$		
$k+2$	$dx = 17$	14.7	24.2
	$dy = -22$		

5 结 论

实验结果表明,本文介绍的电子稳像技术,可以有效地解决飞机在高空飞行时,由于电视摄像系统与地面目标景物的相对运动产生的视频图像帧内模糊和帧间不稳定问题,提高图像清晰度和作用距离,提高图像质量。

在本文算法基础上,通过并行处理技术及多 DSP 方案,采用优化算法,将帧内和帧间电子稳像算法通过 DSP 图像处理平台实现一体化处理,在机载航空平台光电成像系统中同时消除帧内运动模糊和帧间不稳定,实现了视频图像的实时、清晰、稳定输出。

本文方法结合帧内和帧间电子稳像技术,同时解决了视频图像帧内模糊和帧间不稳定问题,具有一定的理论意义和实际推广价值。通过帧内电子稳像算法改进,构造相应的点扩散函数,可以解决其它图像退化问题,如离焦模糊,实现电视摄像系统自动对焦设计;通过帧间电子稳像算法改进,还可以应用于电视跟踪系统,针对小目标图像进行电子稳像处理,计算目标脱靶量,进而实现目标捕获和跟踪。

参考文献:

- [1] 贾平,张葆,孙辉. 航空成像像移模糊恢复技术[J]. 光学精密工程,2006,14(4):697-703.
JIA P,ZHANG B,SUN H. Restoration of motion-blurred aerial image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 697-703. (in Chinese)
- [2] 罗诗途,王艳玲,张玘,等. 车载图像跟踪系统中电子稳像算法的研究[J]. 光学精密工程,2005,13(1):95-103.
LUO SH T,WANG Y L,ZHANG Q,et al.. Electronic image stabilizing algorithm for image tracking system on vehicle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):95-103. (in Chinese)
- [3] 刘明,匡海鹏. 像移补偿技术综述[J]. 电光与控制,2004,11(4):46-49.
LIU M,KUANG H P. Survey on the image motion compensation technology[J]. *Electronics Optics& Control*, 2004,11(4):46-49. (in Chinese)
- [4] MAHEUX J,CRUICKSHANK J,SEVIGNY L. Video-rate image stabilization system[J]. *SPIE*, 1998,3414:232-238.
- [5] SRINIVASAN S. Image stabilization and mosaicking using the overlapped basic optical flow field[J]. *IEEE*, 1997: 356-358.
- [6] TAN K C,LIM H,TAN B T G. Windowing techniques for image restoration[C]. *CVGIP*, 1991,53:491-500.
- [7] LIM H,TAN K C,TAN B T G. Edge errors in inverse and wiener filter restorations of motion-blurred images and their windowing treatment[C]. *CVGIP*, 1991,53:186-195.
- [8] VELLA F,CASTORINA A,MANCUSO M, et al.. Digital image stabilization by adaptive block motion vectors filtering[J]. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 2002, 48(3): 796-801.
- [9] KO S J,LEE S H,JEON S W, et al.. Fast digital image stabilizer based on gray-codes bit-plane matching[J]. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 1999, 45(3):598-603.
- [10] TEKALP A M. *Digital Video Processing*[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1998.
- [11] 容观澳. 计算机图象处理[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
RONG G A. *Computer Image Processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)
- [12] TAN K C,LIM H,TAN B T G. Restoration of real-world motion-blurred images[C]. *CVGIP*, 1991,53: 291-299.
- [13] 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.

- ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):490-494. (in Chinese)
- [14] 孙辉,张永祥,熊经武,等. 高分辨率灰度投影算法及其在电子稳像中的应用[J]. 光学技术,2006,32(3):378-380. SUN H, ZH Y X, XIONG J W,*et al.*. The application of high resolution gray projection algorithm in electronic image stabilization technology[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(3): 378-380. (in Chinese)
- [15] 李博,王效通,杨常青,等. 电子稳像的灰度投影三点局域自适应搜索算法[J]. 光电工程,2004,31(9):69-72. LI B, WANG X T, YANG CH Q,*et al.*. Three-point locally adaptive searching in gray scale projection algorithm for electronic image stabilization[J]. *Opto-electron. Eng.*, 2004, 31(9): 69-72. (in Chinese)

作者简介:孙 辉(1963—),男,吉林柳河人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,主要研究领域与方向为数字图像处理与分析、计算机仿真技术。E-mail: sunh@ciomp. ac. cn