

文章编号 1004-924X(2005)06-0735-06

基于维纳滤波的运动模糊消除算法 及其在航空成像系统中的应用

孙 辉, 张 葆, 刘晶红

(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:分析了航空成像系统运动模糊产生的机理,通过建立运动模糊数学模型,进行了消除运动模糊仿真实验。研究表明,由于成像系统与地面目标景物的相对运动,在目标图像上产生运动模糊,图像复原技术可以消除图像模糊。在图像复原技术中,点扩散函数(PSF)是影响图像恢复结果的关键因素,文中给出了估计点扩散函数的一般方法。虽然维纳滤波可以解决在逆滤波中 $H(u, v)$ 零点噪声放大问题,但是在图像边缘附近误差较大。采用带最优窗的维纳滤波方法可有效抑制噪声和减小边缘误差。对实验平台获取的运动模糊图像进行实验,结果表明在图像边缘像素灰度平滑条件下,可以收到近乎完美的恢复效果。

关键词:航空成像;运动模糊;维纳滤波;点扩散函数(PSF)

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Restoration of motion-blurred image based on Wiener filter and its application in aerial imaging system

SUN Hui, ZHANG Bao, LIU Jing-hong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The mechanism of generation of motion-blurred image was given. A mathematics model of motion-blurred image was built up. In addition, A procedure for estimating Point Spread Function (PSF) of motion-blurred was provided. The aerial vehicle platform and related system were quickly moving relative to ground target during the image data collection. The image might become blurred. The motion-blurred images could be restored using restoration of image. In restoration methods, Wiener filter is less sensitive to noise than inverse filter for the restoration of motion-blurred images, however, there is a large edge-error. This paper presents the optimal window technique for the restoration of motion-blurred images. With these optimal windows, near-perfect restorations can be obtained if the images vary gradually in intensity near their edge.

Key words: aerial imaging; motion-blurr; Wiener filter; Point Spread Function (PSF)

1 引言

近十几年来,现代侦察监视已成为军事高技术的一个重要领域。为满足军事战术需要,各种电视成像设备被广泛应用于星载、机载等航空侦察系统上,它与光电稳定平台及其它系统相互配合,完成对地面目标的搜索、捕获、锁定、跟踪、瞄准、侦察与记录任务。最典型的如预警系统、情报侦察系统等高性能的侦察探测系统,可进行全时域、大空域的侦察与监视^[1]。航空侦察具有机动灵活、覆盖范围广、运行速度高、飞行速度快、数据准确和针对性强等特点,占有明显的空中优势,为获取战术情报提供了可靠手段。

由于电视成像设备在动机座上工作进行,受到气流扰动、载体振动、飞行速度、飞行高度等环境影响,实际得到的图像模糊,影响侦察效果。为获取清晰的视频图像,必须对模糊图像进行像移补偿,抑制或消除图像模糊。传统的补偿手段如光学补偿、机械补偿及机电结合补偿等,都可以有效地避免或减小像移。近年来,随着计算机技术、新型传感器技术的迅猛发展,电子图像稳定清晰化已成为一门高技术的综合学科,与传统的补偿方法相比,具有设备简单、成本低廉、体积小、功耗低、安装方便等优点,在图像稳定清晰化方面发挥了越来越重要的作用^[2-3]。

根据图像复原理论,包括线性运动在内的光学模糊会造成视频图像的退化,而图像复原就是对这些退化的图像进行消除模糊操作^[4]。在离散的时空区域中,图像复原问题可以描述成一种数学处理过程,根据图像模糊产生的机理,建立图像模糊模型,采用与模糊过程相反的手段进行处理,恢复原始。文献[5-6]分别介绍了一种在匀速直线运动条件下,在空间域上消除运动模糊的方法,文献[7]则在频域上采用 Wiener 滤波方法消除二维运动模糊,上述几种方法都可以收到明显消除运动模糊的效果。

本文从研究航空成像系统特点出发,通过建立运动图像模糊模型,采用最优窗 Wiener 滤波方法消除运动模糊,并通过实验平台获取运动模糊图像,进行算法实现。

2 航空成像像移分析

在航空侦察系统中,由于电视摄像机与地面景物之间的相对运动,在摄像机曝光过程中,在 CCD 靶面上会产生相应的像移,拍摄结果不是真实的原始理想图像 $f(x,y)$,而是有像移效果的模糊图像 $g(x,y)$ 。图像模糊是一种退化结果,通过相应的算法可以恢复原始图像。

模糊图像的质量取决于像移量的大小,而像移量与侦察飞机飞行速度、飞行高度、像机曝光时间及像机焦距等有关。在一般情况下,由于曝光时间很短,可以认为在曝光瞬间,速度、高度不变,这样产生的图像模糊主要是由匀速直线运动造成的,在一幅图像内模糊程度是相等的。

设速度为 V ,高度为 H ,积分时间为 T ,像机焦距为 f ,则像移量 δ_{shift} 可表示为:

$$\delta_{\text{shift}} = f \frac{V}{H} T, \quad (1)$$

从式(1)可以看出,在积分时间 T 和焦距 f 一定条件下,像移量 δ_{shift} 与速高比 $\frac{V}{H}$ 成正比。

在焦距 75 mm、高度 3 000 m、速度 600 km/h 条件下,不同积分时间产生的像移见表 1。

表 1 积分时间与像移量的关系

Tab. 1 Relationship between exposure and amount of motion blur

积分时间(s)	像移(μm)	最低照度条件(lx)
1/50	83.3	7.5
1/100	41.7	15
1/200	20.8	30
1/10000	0.4	1500

3 运动图像模糊消除算法

在图像复原技术中,根据理想图像的先验信息的数量和特征,人们提出了很多行之有效的处理方法,如逆滤波(Inverse Filtering)、维纳滤波(Wiener Filtering)、带约束的迭代法等。其中维纳滤波具有较好的去噪性能,使得模糊图像 $g(x,y)$ 及其恢复图像 $f(x,y)$ 之间的均方误差最小,在实际应用中被广泛采用。

3.1 逆滤波与维纳滤波

在线性平移空间不变运动模糊系统中,模糊图像 $g(x,y)$ 可以表示为原始图像 $f(x,y)$ 和点扩散函数(Point Spread Function, PSF) $h(x,y)$ 的二维卷积:

$$g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\alpha,\beta)h(x-\alpha,y-\beta)d\alpha d\beta + n(x,y), \quad (2)$$

式中 $n(x,y)$ 表示加性噪声。对上式两边进行傅里叶变换,有

$$G(u,v) = F(u,v)H(u,v) + N(u,v) \quad (3)$$

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 $n(x,y)$ 的傅里叶变换,其中 $H(u,v)$ 称为光学成像系统的调制传递函数(MTF)。

在式(3)中,如果忽略噪声影响,可以直接计算 $F(u,v)$ 的近似值 $\hat{F}(u,v)$:

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

这就是逆滤波(Inverse Filter)恢复方法。很明显,因为噪声影响,逆滤波计算误差为

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

在退化系统中,传递函数 $H(u,v)$ 在高频附近衰减为零,而噪声 $N(u,v)$ 却接近于常数,所以逆滤波计算误差 $E(u,v)$ 值在这些频率位置上被过度放大,影响图像恢复质量。

实际应用中,为解决 $H(u,v)$ 零点噪声放大问题,减小计算误差,通常对逆滤波公式进行修改如下:

$$\hat{F}(u,v) = \frac{H^*(u,v)}{H(u,v)H^*(u,v) + \gamma} G(u,v), \quad (4)$$

其中 $H^*(u,v)$ 表示 $H(u,v)$ 的复共轭, γ 是信噪比,取值范围一般在 0.0001 到 0.01 之间。

式(4)称为维纳(Wiener)滤波,它是一种基于统计特性的最小均方误差滤波器,在图像受到噪声影响时效果比逆滤波要好,而且噪声越强优势越明显。通过选择适当的 γ ,可以消除和抑制在图像中央区域出现幽灵(ghost)和振铃(ring)效应^[8]。

3.2 点扩散函数的确定

根据图像退化模型,图像复原的关键在于对光学成像系统点扩散函数 PSF 或 $H(u,v)$ 的基本

了解与正确估计。根据公式(4),如果知道了 $H(u,v)$,即可解出 $F(\hat{u},v)$,进而解出 $f(x,y)$ 。在一般情况下,PSF 或 $H(u,v)$ 都是根据先验知识或实验测定来获得,文献[6]提出一种通过实验得到 $H(u,v)$ 的方法,即在图像成像系统可测条件下,在原始图像 $f(x,y)$ 端用点冲击函数 δ 作为输入,则在频域均匀分布常数应为 $F(u,v)=1$,这样得到的就是 $H(u,v)$ 。文献[9]提出了一种更具有普遍意义和实用性的点扩散函数 PSF 估计方法,归纳出下列 5 种典型的点扩散函数:

(1) 反斜坡(Reverse Ramp): $RR_i = M - i$, $i=0, 1, \dots, M-1$

(2) 反梯形(Reverse Trapezoid): $RT_i = 2M - i$, $i=0, 1, \dots, M-1$

(3) 方波(Square Pulse): $SP_i = 1$, $i=0, 1, \dots, M-1$

(4) 正梯形(Forward Trapezoid): $FT_i = M + i$, $i=0, 1, \dots, M-1$

(5) 正斜坡(Forward Ramp): $FR_i = i + 1$, $i=0, 1, \dots, M-1$

其中, M 表示一维数据长度。

在实际应用过程中,可以根据成像系统特性及运动特点确定适当的点扩散函数。

图 1 显示了方波点扩散函数对应的传递函数 $H(u,v)$ 分布图像。

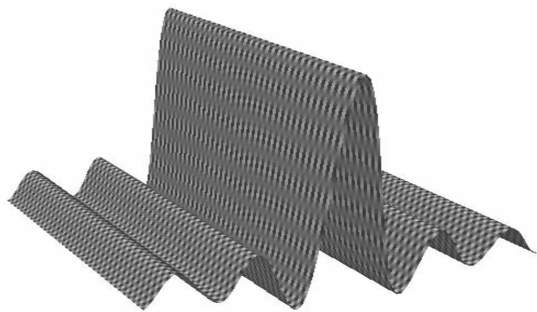


图 1 方波点扩散传递函数分布
Fig. 1 MTF of the square pulse

4 边缘误差与窗口函数

从统计意义上来说,维纳滤波是满足原始图像与恢复图像之间最小均方误差条件的滤波器,可解决传递函数 $H(u,v)$ 零点噪声放大问题,具有较高的恢复精度。但是除噪声干扰外,边缘误差也是影响图像恢复质量的主要因素。文献[10]

对此有详细的论述及边缘误差估计,认为边缘误差的主要原因是由于模糊图像信息的不完整性造成的,在进行离散 Fourier 变换(DFT)时,要求图像数据应具有周期特性,而实际上图像几乎都不能满足这个条件,如果直接使用维纳滤波公式,会带来较大的边缘误差。文献[10]对此进行了进一步研究,提出一种最优窗图像恢复方法,即根据运动量分割图像,计算图像各个区域的窗口函数 $\omega(x, y)$,在计算模糊图像 $g(x, y)$ 的离散 Fourier 变换时,用窗口函数 $\omega(x, y)$ 作为加权因子。经过最优窗处理,可以提高图像边缘恢复精度。实验结果表明,在图像边缘附近像素灰度值渐变条件下,可获得近乎完美的恢复效果。

设二维图像宽度为 W ,高度为 H , dx, dy 分别表示在积分时间内图像在水平和垂直方向上的运动分量,最优窗 $\omega_{p,q}$ 将图像平面分成 9 个区域,如图 2 所示。

7	6	5
8		4
1	2	3

图 2 最优窗分割

Fig. 2 Region of optimal window

其中,未标号区域在图像中央, $\omega_{p,q} = 1$ 。在水平方向上,区域 1、7 和 8 中 i 取值范围为 $[0, dx - 2]$,区域 2、6 和未标号的中央区域中 i 取值范围为 $[dx - 1, W - dx]$,区域 5、4 和 3 中 i 取值范围为 $[W - dx + 1, W - 1]$ 。在垂直方向上,区域 1、2 和 3 中 k 取值范围为 $[0, dy - 2]$,区域 4、8 和未标号的中央区域中 k 取值范围为 $[dy - 1, H - dy]$,区域 5、6 和 7 中 k 取值范围为 $[H - dy + 1, H - 1]$ 。

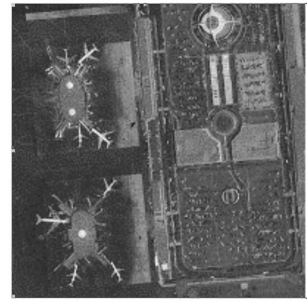
最优窗 $\omega_{p,q}$ 按式(5)取值:

$$\left(\begin{array}{ccc} \sum_{p=i+dy-H}^{dy-1} \sum_{q=0}^k h_{p,q} & \sum_{p=i+dy-H}^{dy-1} \sum_{q=0}^{dx-1} h_{p,q} & \sum_{p=i+dy-H}^{dy-1} \sum_{q=k+dx-W}^{W-1} h_{p,q} \\ \sum_{p=0}^{dy-1} \sum_{q=0}^k h_{p,q} & 1 & \sum_{p=0}^{dy-1} \sum_{q=k+dx-W}^{dx-1} h_{p,q} \\ \sum_{p=0}^i \sum_{q=0}^k h_{p,q} & \sum_{p=0}^i \sum_{q=0}^{dx-1} h_{p,q} & \sum_{p=0}^i \sum_{q=k+dx-W}^{dx-1} h_{p,q} \end{array} \right), \quad (5)$$

5 实验结果

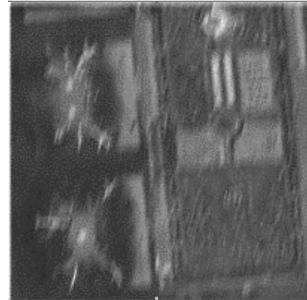
本文算法由 Microsoft Visual C++ 6.0 语言实现,在实验室条件下进行了算法测试和运动模糊图像恢复实验。

获取运动模糊图像有两种方式:一种是对一幅清晰图像采用人工方式产生的模糊图像,另一种是真实运动产生的模糊图像。通过对比实验发现,针对上述两种不同模糊过程产生的图像,恢复效果有显著差别。人工模糊的运动数据(包括运动量、运动方向及噪声干扰等)是理想化的,恢复质量比较高;实际模糊的运动数据是无法完全确



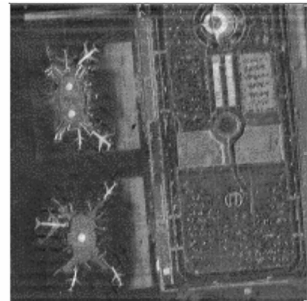
(a)原始图像

(a)Original image



(b)模糊图像

(b)Blurred-image



(c)恢复结果

(c)Restoration

图 3 人工模糊图像及恢复结果

Fig. 3 Facticitious motion-blurred image and its restoration

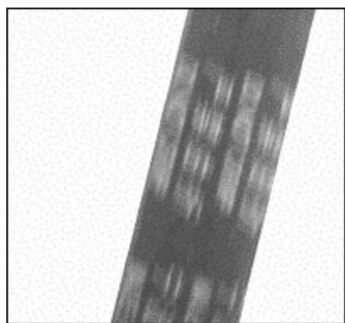
定的,恢复质量略差。

下面介绍两个最优窗维纳滤波算法恢复图像实例。

图 3(a)是一幅清晰的航拍图像,图 3(b)是其人工模糊图像,模糊量水平 5 像元,垂直 20 像元。恢复实验中选择方波点扩散函数, $\gamma=0.001$,图 3(c)显示恢复结果图像。

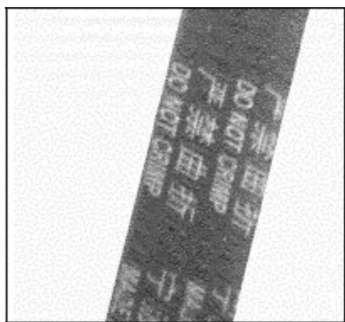
根据预研项目需求,为获取真实运动图像,设计制作了一台运动仿真装置。该装置包括传动、速度控制及成像 3 个单元,传动单元模拟地面目标景物,速度控制单元控制运动速度,成像单元完成图像采集工作。通过调整速度和相机与实验装置之间的距离来模拟飞行速高比。由于相机焦距、曝光时间都是已知的,根据公式(1)可以计算出图像像移量。这样获取的图像模糊是实际运动产生的,比较接近航空侦察视频图像运动模糊效果。

已知焦距 $f=125$ mm,目标距离 $H=825$ mm,运动速度 $V=175$ mm/s,积分时间 $T=1/125$ s,此时速高比 $=V/H=0.21$ 。根据公式(1),在 CCD 靶面上像移量 $\delta_{\text{shift}}=0.21$ mm,数字



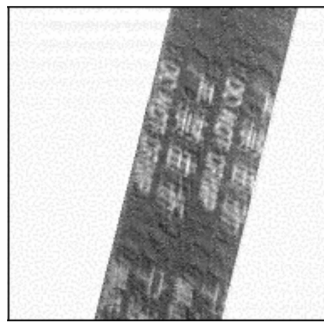
(a) 模糊图像

(a) Motion-blurred image



(b) 恢复结果($d_x=5, d_y=20$)

(b) Image restored with a square-pulse PSF of 20-pixel and 5-pixel



(c) 恢复结果($d_x=7, d_y=22$)

(c) Image restored with a square-pulse PSF of 22-pixel and 7-pixel

图 4 运动模糊图像及其恢复结果

Fig. 4 Motion-blurred image and its restoration

图像产生大约 5 个像元的水平像移和 20 个像元的垂直像移,实际运动模糊图像如图 4(a)所示。

恢复实验中选择方波点扩散函数 $\gamma=0.005$,图 4(b)、图 4(c)显示了使用不同运动量恢复的结果图像。对比两幅图像可知,如果对运动量估计不准,恢复效果较差。

6 结 论

实验结果表明,最优窗维纳滤波算法简单,使用灵活,恢复精度高,可以消除航空成像系统视频图像运动模糊,具有理论意义和实用价值。在性能方面有如下优点:

(1) 噪声处理。逆滤波方法对噪声比较敏感,维纳滤波可以解决光学系统传递函数在零点附近噪声放大问题。

(2) 幽灵和振铃效应。通过选择适当参数,可以消除或抑制在图像中央区域的幽灵和振铃效应。

(3) 边缘误差。通过最优窗技术,可以减小边缘误差,提高边缘恢复精度。

通过图像复原技术,采用电子学方法,可以有效地解决航空成像系统由于运动造成的视频图像模糊问题,较好地恢复原始图像,有效地提高图像质量,达到理想效果。另外,在此工作基础上,通过算法优化或硬件实现消除算法,可以满足实时要求。

参考文献:

- [1] 孙智信. 世界电子信息装备[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2001.
SUN ZH X. *World electronic information equipment*[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 贾平, 张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 82-88.
JIA P, ZHANG B. Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platforms [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 82-88. (in Chinese)
- [3] 颜昌翔, 王家骥. 航空相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 203-207.
YAN CH X, WANG J Q. Method of coordinate transformation for IM&IMC calculation in aerospace camera system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(3): 203-207. (in Chinese)
- [4] TEKALP A M, 崔之祐. 数字视频处理[M]. 北京:电子工业出版社, 1998.
TEKALP A M, CHUI ZH G. *Digital video processing*[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [5] 章毓晋. 图象工程: 图象处理和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.
ZHANG Y J. *Image engineering: Image processing and analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [6] 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, 1999. (in Chinese)
- [7] 王晓红, 赵蓉椿. 任意方向运动模糊的消除[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(6): 525-529.
WANG X H ZHAO R CH. Restoration of arbitrary direction motion-blurred images[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, 5(6): 525-529. (in Chinese)
- [8] LIM H, TAN K CH, TAN B T G. Edge errors in inverse and Wiener filter restorations of motion-blurred images and their windowing treatment[J]. *CVGIP*, 1991, 53: 186-195.
- [9] TAN K CH, LIM H, TAN B T G. Restoration of real-world motion-blurred images[J]. *CVGIP*, 1991, 53: 291-299.
- [10] TAN K CH, LIM H, TAN B T G. Windowing techniques for image restoration[J]. *CVGIP*, 1991, 53: 491-500.

作者简介: 孙 辉(1963—), 男, 吉林柳河人, 主要从事计算机软件设计与开发工作, 研究领域为数字图像处理与计算机仿真。