

文章编号 1004-924X(2007)05-0767-06

运动模糊图像的实时恢复算法

李仕^{1,2}, 孙辉¹, 张葆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:提出了一种新的处理运动模糊图像的方法,以一维维纳滤波(1DWF)来快速恢复二维的模糊图像。给出了1DWF算法可行性的理论论证,并给出了1DWF算法及其它常用图像恢复算法的实验结果和对比评价。运算量分析表明:1DWF算法的运算量只有二维维纳滤波运算量的1/3;实验结果显示:在P4 3.0G主频的PC机上,1DWF算法可以使得512×512的8位灰度测试图像在36ms内完成图像恢复。对图像恢复质量的评价结果显示:1DWF算法的图像恢复质量与原维纳滤波的恢复效果相同,验证了在单处理器上实时、高质恢复模糊图像的可行性。

关键词:运动模糊; 维纳滤波; 图像恢复; 实时恢复; 快速算法

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Restoration of motion-blurred images

LI Shi^{1,2}, SUN Hui¹, ZHANG Bao¹

(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: A new algorithm based on one-dimensional Wiener Filter (1DWF) is proposed to restore the image degraded in a deterministic way by motion-blurred and in a stochastic way by additive white noise. From the theoretical derivation of the new algorithm, this paper shows that it is possible to restore the two-dimensional images with 1 DWF, and the computational requirements of the 1DWF method are just one third of the old Wiener filter's. The experiment result of the 1DWF method shows that 1DWF can restore test images, 512×512 size and quantized in 8 bits, in 36 ms with Intel Pentium 4 3.0 GHz CPU. It means that the 1DWF method can reach speeds of restoration in 25 frames per second just with one CPU. And the experiment result also reveals that the quality of the images restored is no noticeable difference between the 1DWF method and the old Wiener filter.

Key words: motion-blurred; Wiener filter; image restoration; real-time restoration; fast algorithm

1 引言

当摄像系统与拍摄对象之间存在相对运动

时,在摄像机曝光过程中,感光媒介(胶片或 CCD)的靶面上会产生相应的像移,使得成像结果模糊,不能准确地反映被摄对象的信息,导致所得图像的价值降低。该问题在航空摄影及公路车牌

识别等高速运动摄影领域尤其突出。文献[1]从卫星摄像角度对像移的产生及像移对图像模糊的影响给出了详细说明。

消除这种由于相对运动所造成模糊的方法很多^[2],大致可以分为:机械式像移补偿法、光学式像移补偿法、电子式像移补偿法、图像式像移补偿法。随着设备器材轻便化的发展需求、更多的制造成本的考虑及图像式像移补偿技术的成熟,图像式像移补偿法越来越受人们的关注。

随着大规模电路集成水平的提高和图像恢复算法的发展,人们在确保图像恢复质量的基础上,对图像式像移补偿法提出“大信息量”及“快速”两项要求。当前这两项指标主要落实在对“512×512”的视频模糊图像进行“25 帧/s”的实时恢复处理的要求上,而目前能达到该要求的,更多的是使用多处理器的方案^[13],即以增加并行的硬件设备为前提来提升图像的恢复速度。本文则是从恢复算法着手,谋求算法运算量的精简来实现大图像的实时处理。本文给出了信号处理领域常见的一维维纳滤波算法能有效地对二维模糊图像进行恢复处理的理论论证,并为了区别图像处理领域所常见的二维维纳滤波图像复原算法,将用一维维纳滤波实现图像实时复原的算法称为 1DWF (1-Dimensional Wiener Filter) 算法。文中同时给出 1DWF 算法在单处理器 PC 机上对 512×512 的模糊图像的恢复结果,以说明 1DWF 算法实时恢复图像的可行性。

2 1DWF 算法

常见的用于运动模糊图像恢复的算法有:去除由匀速直线运动引起模糊的差分求导恢复算法^[3](以下简称差分算法)、维纳滤波(逆滤波)算法^[4,11],卡尔曼滤波算法^[5],Richardson-Lucy 迭代恢复算法^[6]。

以上算法中图像恢复质量能满足应用要求的有维纳滤波和 RL 迭代算法,它们的运算量庞大,很难达到 512×512 灰度图像 25 帧/s 的实时处理要求;而恢复速度快的算法当属差分算法,但该算法的图像恢复质量又无法满足应用。为此,作者将二维图像构建成一系列的一维数学模型,并在此基础上提出 1DWF 模糊图像恢复算法,实验结果证明该算法能很好地满足 512×512 灰度图

像的实时、高质恢复。

2.1 1DWF 数学模型的构建

1DWF 模糊图像恢复算法的主要思想是把一幅二维 $M \times N$ 的模糊图像 $g(x, y)$ 当作 M 条含有 N 个像素点的一维模糊图像的像素条 $g(x) = [g(x, 1), g(x, 2) \cdots g(x, N)] (x = 1, 2, \cdots, M)$ 处理,即将全幅图像看作由 M 个水平(或竖直,这里仅作水平的假设)一维像素条组成,把每像素条各自单独恢复处理后再合成全幅图像。图 1 为该算法模型的示意图。

$$g(x,y) = \begin{bmatrix} g(1) \\ g(2) \\ \bullet \\ \bullet \\ g(M) \end{bmatrix} = \begin{matrix} \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \bullet & \text{处理} & \bullet \\ \bullet & \Rightarrow & \bullet \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{matrix} = \begin{bmatrix} f(1) \\ f(2) \\ \bullet \\ \bullet \\ f(M) \end{bmatrix} = f(x,y)$$

图 1 1DWF 算法示意图

Fig. 1 Illustration of 1DWF

在上面的假设基础上,图像水平运动模糊的物理模型就变成各水平像素条自身独立的一维运动模糊,如图 2 所示。

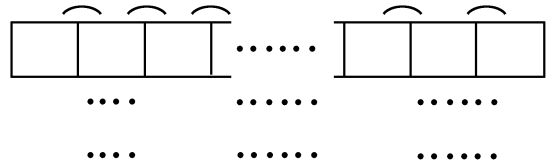


图 2 水平运动模糊模型

Fig. 2 Illustration of horizontal motion-blurred

由信息光学中的光学传递函数^[7]知识,对一维运动模糊物理模型建立数学模型:

$$g(x) = f(x) \times h(x) + n(x), \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 表示原始一维图像, $g(x)$ 表示模糊的一维图像, $h(x)$ 表示系统的水平一维点扩散函数, $n(x)$ 表示加性噪声。式(1)中的 $f(x) = [f(x, 1), f(x, 2) \cdots f(x, N)]$ 即为所要求取的恢复图像。

对(1)式中 $f(x)$ 的求解方法很多,简单的可以采用逆滤波的方法进行求解,考虑到图像噪声的存在,故采用一维维纳滤波的方法求取 $f(x)$ 。

2.2 1DWF 算法的理论论证

在信号处理领域中 Wiener 滤波器^[8]经常被

用于信号噪声的抑制。这里, 只要将一维模糊图像 $g(x)=[g(x,1),g(x,2)\cdots g(x,N)]$ 当作一维的时间序列信号, 不同位置的灰度值看作时间序列信号不同时刻的值, 可以很方便地将一维信号的 Wiener 滤波器应用在式(1)中, 并解出想要的图像 $f(x)$ 。

下面进行 1DWF 算法的论证及推导:

式(1)经整理得到噪声项:

$$n(x) = g(x) - f(x) \times h(x), \quad (2)$$

当对 $n(x)$ 一无所知时, 可按某种准则函数寻找一个 $\hat{f}(x)$, 使得 $\hat{f}(x) \times h(x)$ 在最小二乘意义上近似于 $g(x)$ 。也就是使

$$\|n(x)\|^2 = \|g(x) - \hat{f}(x) \times h(x)\|^2$$

为最小。设均方误差 $V(x) = \|n(x)\|^2$ 则有:

$$V(x) = E[n^2(x)], \quad (3)$$

为了得到最小均方误差, 令 $V(f)$ 的梯度 $\partial V(x)/\partial f(i) = 0$, 则有:

$$\frac{\partial V(x)}{\partial f(i)} = 2E\left[n(x) \frac{\partial n(x)}{\partial f(i)}\right] = -2E[n(x)h(x-i)] = 0 \text{ 即:}$$

$$E[n(x)h(x-i)] = 0, \quad (4)$$

将式(2)代入式(4), 得到:

$$E[g(x)h(x-i)] = \hat{f}(x) \times E[h(x)h(x-i)], \quad (5)$$

令:

$$R_{hg}(x) = E[g(x)h(x-i)],$$

$$R_{hh}(m-i) = E[h(x-i)h(x-m)]. \quad (6)$$

则式(5)最终化为

$$R_{gh}(x) = R_{hh}(x) \times \hat{f}(x), \quad (7)$$

方程(7)就是著名的维纳-霍夫方程^[9] (Wiener-Hopf equation)。至此 1DWF 算法的推导, 可归结为从维纳-霍夫方程(7)中求解未知函数 $\hat{f}(x)$, 所求的 $\hat{f}(x)$ 就是在最小均方误差下的最佳 $f(x)$ 。维纳-霍夫方程的求解在此已经超出本文讨论范围, 详情可以参考文献[9]。

2.3 1DWF 算法的公式表达

本文仅给出方程(7)的一个简单、不严密的解法:

由式(6)知道 R_{gh} 为 $g(x)$ 和 $h(x)$ 的互相关函数, $R_{hh}(x)$ 为 $h(x)$ 的自相关函数。即:

$$\begin{aligned} R_{hg}(x) &\approx h(x) \otimes g(x) \\ R_{hh}(x) &\approx h(x) \otimes h(x), \end{aligned} \quad (8)$$

式中, 符号 \otimes 为相关运算符。由于函数间相关运

算后再作快速傅里叶变换时, 有下面式子成立: $\text{FFT}(h(x) \otimes g(x)) = H^*(u)G(u)$, 式中 $H^*(u)$ 表示 $H(u)$ 的复共轭, 将式(8)代入式(7), 并对结果两边分别做傅里叶变换, 经整理, 可得:

$$F(u) = \frac{H(u)^* G(u)}{H(u)H(u)^*}, \quad (9)$$

因为上述推导在式(8)中进行了近似, 使得推导式(9)在 $H(u) = 0$ 时会出现病态解, 结合参考文献[9]对维纳-霍夫方程求解的结果, 将上式修正如式(10)所示:

$$F(u) = \frac{H(u)^* G(u)}{H(u)H(u)^* + k} \quad (10)$$

实验结果表明式(10)能取得预期效果, 进步验证式(10)这个结论至少在图像处理领域是正确的。

1DWF 算法的具体滤波过程如图 3 所示:

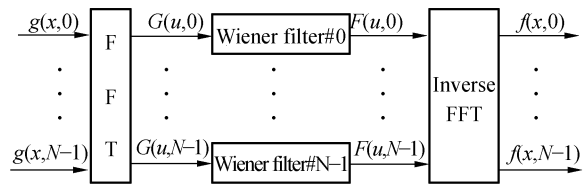


图 3 1DWF 恢复算法图解

Fig. 3 1DWF algorithm scheme

3 算法运算量的对比分析

假设各算法要处理的模糊图像大小是 $M \times N$ 8 位 256 色灰度图像 (其中 M, N 均为 2 的指数), 这里为下面分析方便, 特令 $M = N$ 。该图像水平像移量为 a , 无竖直像移量, 即该图只存在水平运动模糊。

3.1 1DWF 算法的运算量

由式(10)知道, 1DWF 算法是一种图像的频域处理算法, 它的运算量主要来自一维快速傅里叶变换。主要表现为对 $g(x)$ 和 $h(x)$ 的傅里叶正变换 (FFT) 及对 $F(u)$ 的傅里叶逆变换 (IFFT)。由于同维同点的 FFT 和 IFFT 运算的运算量相同, 故下面同称为 FFT 运算, 而不再做区别。

完成 $g(x)$ 及 $F(u)$ 的傅里叶变换均需 M 次 N 点的 FFT 运算, $h(x)$ 的傅里叶变换只需要 1 次 N 点的 FFT 运算, 故整个 1DWF 算法共需要 $2M+1$ 次 N 点的 FFT 运算。

3.2 维纳滤波的运算量

维纳滤波复原运动模糊图像的方法可以参考文献[4][11]。完整的维纳滤波需要对图像进行正逆共两次的二维傅里叶变换及一次点扩散函数(PSF)的二维傅里叶变换。这样完成一次维纳滤波需要做三次 $M \times N$ 的二维 FFT 运算。

因为一次 $M \times N$ 矩阵的二维 FFT 运算量,在 $M=N$ 时可以认为与 $2M$ 次 N 点 FFT 运算的运算量相同^[10],所以一次完整维纳滤波共需要 $6M$ 次 N 点 FFT 运算。当 M (或 N)取值较大(如 512)时,维纳滤波的运算量可近似为 1DWF 算法的 3 倍。

4 实验结果

选择 512×512 的 8 位灰度标准图像 Lake (如图 4)作测试图像。实验过程中,以水平 20 个像素移($\Delta x=20, \Delta y=0$)为模板做卷积,得到人工模糊图像(如图 5)。然后分别对该模糊图像进行差分算法恢复、维纳滤波恢复和 1DWF 算法恢复,得到的恢复图像分别如图 6、图 7、图 8 所示。



图 4 Lake 原图(512×512)

Fig. 4 Original image of lake(512×512)

4.1 图像恢复效果评价

由上面图像可以看出,用差分算法恢复的图像画面不够干净,而 1DWF 算法及维纳滤波算法所恢复的图像,能大致恢复原来的细节。

图像恢复质量的评价标准很多^[12],这里采用常用的平均均方误差(Mean Square Error, MSE)和峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)来对各算法所恢复的图像进行评价,评价结果如表 1 所示。



图 5 模糊图像(512×512)

Fig. 5 Blurred-image(512×512)

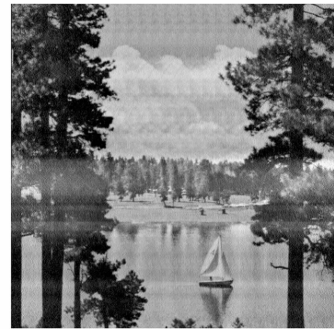


图 6 用差分算法还原的图像(512×512)

Fig. 6 Restored by difference method(512×512)

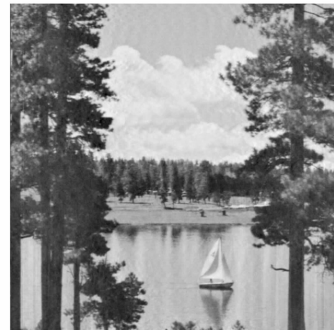


图 7 用维纳滤波还原的图像(512×512)

Fig. 7 Restored by Wiener filter(512×512)

表 1 各算法 MSE、PSNR 值对比

Tab. 1 MSE and PSNR of restorations

	1DWF 算法	维纳滤波	差分算法
MSE	56.34	56.34	1533.74
PSNR	70.51	70.51	37.47

4.2 算法速度测量

在前面的实验基础上,用 1DWF 算法做了 20 次模糊图像恢复的计时测试。测试结果为:15 次



图8 用1DWF算法恢复的图像(512×512)

Fig. 8 Restored by 1DWF(512×512)

每次耗时 36 ms,5 次每次耗时 35 ms。20 次测试平均每次耗时为 35.75 ms,小于实时所需的每帧 40 ms 的处理时间,表明 1DWF 算法可以在单处理器 PC 机上实现 512×512 8bit 图像 25 帧/秒的实时处理。具体计时测试数据如表 2 所示:

表2 计时测试结果

Tab. 2 Results of time test

图像大小	算法	实验次数	平均耗时
512×512	1DWF	20	35.75
	差分算法		26.45
	维纳滤波		112.40

关于时间测试的简要说明:

(1)每次实验测试所得的时间均包括对测试图像的读取和存储所耗用的时间。

(2)1DWF 和维纳滤波算法的统计时间均包括对系统点扩散函数的响应处理时间。

实验中所使用的软硬件平台及编译环境参见表 3:

表3 实验的测试环境

Tab. 3 Experiment environment

CPU	Intel P4 531 主频 3.0 GHz 1MB L2 cache
系统平台	Windows XP sp2 操作系统。
程序编译环境	VC 6.0 SP6 Intel C++ compiler 8.1

5 结 论

实验结果表明,一维的 1DWF 算法可以快速精确地恢复二维运动模糊图像,具有一定的理论意义和实用价值。在性能方面 1DWF 算法有如下优点:

(1)图像恢复精度高。图像恢复质量评价表明 1DWF 算法的图像恢复质量和维纳滤波的恢复质量一样,均能精确地恢复模糊图像。

(2)运算量少。1DWF 算法的运算量只有原维纳滤波的 1/3,使得在单处理器上实现 25 帧/秒的图像恢复速度成为可能。使工程应用时能在除文献[13]中的多 DSP 方案外,又多一选择方案。

(3)算法灵活简单。1DWF 算法对系统点扩散函数的响应比维纳滤波更为简单、快捷;另外 1DWF 算法只需在图像的一个方向做 FFT 运算,所以对图像的行数没限制,显得更为灵活。

(4)并行运算的可行性。与像移方向平行的各行像素在运算处理时互不相关,各行可以分开独立恢复。在可以对图像数据进行并行读取的硬件平台(如多 DSP 平台)上,可以很方便地实现图像数据的并行处理,使得进一步提高图像恢复速度成为可能。

参考文献:

- [1] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(4): 31-34. (in Chinese)
- [2] 刘明, 匡海鹏, 吴宏圣, 等. 像移补偿技术综述 [J]. 电光与控制, 2004, 11(4): 46-49.
LIU M, KUANG H P, WU H SH, *et al.*. Survey on the image motion compensation technology [J]. *Electron. Opt. Contr.*, 2004, 11(4): 46-49. (in Chinese)
- [3] SONDHI M M. Image restoration: the removal of spatially invariant degradations [J]. *IEEE*, 1972, 60(7): 842-853.
- [4] 孙辉, 张葆, 刘晶红. 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 [J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 735-740.

- SUN H, ZHANG B, LIU J H. Restoration of motion-blurred image based on Wiener filter and its application in aerial imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 735-740. (in Chinese)
- [5] BIENOND J, RIESKE J, GERBRANDS J J. A fast Kalman filter for images degraded by both blur and noise [C]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1983, 31(5): 1248-1256.
- [6] WHITE R L. Image restoration using the damped Richardson-Lucy method [J]. *SPIE*, 1994, 2198: 1342-1348.
- [7] 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用 [M]. 长春: 长春出版社, 1989.
HAN CH Y. *Fundamental Theory and Application of Information Optics* [M]. Changchun: Changchun Press, 1989. (in Chinese)
- [8] WIENER N. *Extrapolation Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series with Engineering Application* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1949.
- [9] 吴兆熊, 黄振兴, 黄顺吉. 数学信号处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
WU ZH X, HUANG ZH X, HUANG SH J. *Digital Signal Processing* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985. (in Chinese)
- [10] 程佩青. 数字信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
CHENG P Q. *Digital Signal Processing Course* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)
- [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] OLSSON S, STROPPIANA M, BAINA J. Objective methods for assessment of video quality : state of the art [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 1997, 43(4): 487-495.
- [13] 刘微, 朱明, 李向荣, 等. 运动模糊图像实时恢复的多 DSP 方案 [J]. 电子器件, 2005, 28(4): 722-725.
LIU W, ZHU M, LI X R, *et al.*. Real-time restoration research of motion blurred image based on DSPs [J]. *Chin. J. Electron Dev.*, 2005, 28(4), 722-725. (in Chinese)

作者简介: 李仕 (1984—), 男, 浙江苍南人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生, 主要从事光学系统成像的补偿算法方面的研究。E-mail: brightlishi@gmail.com