

文章编号: 0258-7025(2002)12-1101-04

频域迭代盲解卷积图像恢复方法 及其算法实现

于大勇, 袁祥岩, 高万荣, 陶纯堪

(南京理工大学电光学院 432 教研室, 江苏 南京 210094)

摘要 详细讨论了一种新的模糊图像复原法, 使用这种方法, 不需知道图像模糊过程的模糊因子, 就可以实现图像的恢复。该算法易于编程, 且具有较强的通用性。分析了计算机算法, 并给出了处理的结果。

关键词 盲解卷积, 点扩展函数, 图像复原, 图像处理

中图分类号 TN 911.73 文献标识码 A

A Method for Image Restoration with Iterative Blind Deconvolution in Frequency Domain

YU Da-yong, YUAN Xiang-yan, GAO Wan-rong, TAO Chun-kan

(Electronic and Optical School, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094)

Abstract This paper discusses a new method for blurring images restoration. The blurring factor is not necessary to be known in advanced to restore these images. This algorithm is easy to be programmed and has a popular capability. The computer algorithm is analyzed in this paper and the result is given at the end.

Key words blind deconvolution, point spread function (PSF), image restoration, image processing

1 引 言

近几年, 由于共焦扫描显微术、多光子显微术等先进的显微成像技术的提出, 使得可以对生物组织等实现光学断层图解, 并进而合成三维形貌, 为生物科学的研究等提供了强有力的工具。然而, 由于生物医学显微成像信号十分微弱, 因而图解对比度等较低, 因此为了尽可能利用所采集的图解信息, 就需要对所采集的图解进行图像处理。

目前, 图像复原的方法很多, 如逆滤波, 维纳滤波法等^[1]。逆滤波法有其局限性, 很可能出现因为奇点而使解丢失和噪声被可观地放大, 而且这两种方法都需要明确知道图像的模糊原因(也即点扩展函数), 但在实际过程中, 点扩展函数不可能被精确地知道, 因此就需要对图像进行盲解卷积。所谓盲解卷积图像恢复就是在未知点扩展函数的前提下,

从模糊图像中最大程度地恢复出原图像的过程。通常使用如下的卷积模型来模拟模糊过程

$$g = h * f + n \quad (1)$$

其中, g 为模糊图像; h 为点扩展函数; f 为原图像; n 为随机噪声(通常被假设为具有均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯分布); $*$ 表示卷积运算。本文以此为模型, 对模糊图像进行盲解卷积恢复。

2 理论分析

由方程(1)可以看出, 要解出 f , 必须进行解卷积。对于这种问题, 通常采用最小二乘约束的方法。定义一个惩罚函数 r , 用它来衡量图像的质量。规定让 $r(f)$ 越小, 恢复出来的 f 越“好”。本文中要同时对 f 和 h 进行约束, 因此选择 $r(f) + r(h)$ 作为惩罚函数, 由方程(1)可得 $n = g - h * f$, 并且有

收稿日期: 2001-09-12; 收到修改稿日期: 2001-12-26

作者简介: 于大勇(1978.3—), 男, 山东威海人, 现为南京理工大学硕士研究生, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。E-mail: courager@163.com

$E(\int n^2 dx) = \sigma^2$, $E(x)$ 为随机变量 x 的期望, 所以,
 $\|h^* f - g\|^2 = E[\int (h^* f - g)^2 dx] \approx$
 $E(\int n^2 dx) = \sigma^2$. 则图像复原问题可归结为下面的
 最小约束问题

$$\min[\alpha_1 r(f) + \alpha_2 r(h)]$$

$$\text{当 } \|h^* f - g\|^2 = \|n\|^2 \approx \sigma^2 \quad (2)$$

α_1 和 α_2 为大于 0 的加权系数。与(2) 式对应的拉格朗日形式为

$$\min L(f, h) = \min[\|h^* f - g\|^2 + \alpha_1 r(f) + \alpha_2 r(h)] \quad (3)$$

这里的 α_1 和 α_2 为综合了拉格朗日乘子之后的系数。这样, 复原问题的关键在于 $r(f)$ 及 $r(h)$ 的选取, 分别有 H_1 规则和 TV (Total Variation) 规则^[2,3]

$$H_1(u) = \int |\nabla u|^2 dx dy$$

$$TV(u) = \int |\nabla u| dx dy \quad (4)$$

其中, ∇ 为梯度算子。在此, 选取 H_1 规则, 则方程(3) 可写成

$$\begin{aligned} \min L(f, h) = & \min[\|h^* f - g\|^2 + \\ & \alpha_1 \int |\nabla f|^2 dx dy + \alpha_2 \int |\nabla h|^2 dx dy] = \\ & \min[\int (h^* f - g)^2 dx dy + \\ & \alpha_1 \int |\nabla f|^2 dx dy + \alpha_2 \int |\nabla h|^2 dx dy] = \\ & \int \min[(h^* f - g)^2 + \\ & \alpha_1 |\nabla f|^2 + \alpha_2 |\nabla h|^2] dx dy \quad (5) \end{aligned}$$

对于多元函数的极值问题, 我们采用求偏导的方法。对式(5) 中积分号以内的部分求偏导(分别对 f 和 h) 可得

$$0 = h(-x, -y)^* (h^* f - g) - 2\alpha_1 \Delta f \quad (6)$$

$$0 = f(-x, -y)^* (h^* f - g) - 2\alpha_2 \Delta h \quad (7)$$

Δ 为拉普拉斯算子。由于计算机中的图像都是二维离散的序列, 因此需要将上述理论扩展到二维离散的情况。

令 $f = f(m, n)$, $h = h(m, n)$, $g = g(m, n)$, $r = r(m, n)$, 其中 $m = 1, 2, \dots, M-1$, $n = 1, 2, \dots, N-1$; 那么, (1) 式可写成

$$g = Hf + n \quad (8)$$

这里, H 是由 h 决定的分块循环矩阵

$$H = \begin{bmatrix} H_0 & H_{M-1} & \dots & H_1 \\ H_1 & H_0 & \dots & H_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{M-1} & H_{M-2} & \dots & H_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中的每一子块 H_i 都是一个循环矩阵

$$H_i = \begin{bmatrix} h(i, 0) & h(i, N-1) & \dots & h(i, 1) \\ h(i, 1) & h(i, 0) & \dots & h(i, 2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h(i, N-1) & h(i, N-2) & \dots & h(i, 0) \end{bmatrix} \quad (10)$$

则(6) 式可重写为

$$H^* (Hf - g) - \alpha_1 \Delta f = 0 \quad (11)$$

其中 H^* 为 H 的共轭。由于卷积具有交换性, 即 $h^* f = f^* h$, 则(8) 式也可写为

$$g = Fh + n \quad (12)$$

这里的 F 是类似于 H , 具有(9), (10) 两式的形式。这样, 由(7), (12) 两式, 并参考(11) 式, 可得

$$F^* (Fh - g) - \alpha_2 \Delta h = 0 \quad (13)$$

整理(11), (13) 两式, 可得

$$[H^* H + \alpha_1 (-\Delta)] f = H^* g \quad (14)$$

$$[F^* F + \alpha_2 (-\Delta)] h = F^* g \quad (15)$$

为了求得(14), (15) 两式在频域的表达形式, 令 $F(\xi, \xi)$ 为 $f(m, n)$ 的傅里叶变换, $H(\xi, \xi)$ 为 $h(m, n)$ 的傅里叶变换, $G(\xi, \xi)$ 为 $g(m, n)$ 的傅里叶变换, $R(\xi, \xi)$ 为 $(-\Delta)$ 的傅里叶变换。则(14), (15) 两式可写成频域形式, 整理可得

$$F(\xi, \xi) = \frac{H^*(\xi, \xi) G(\xi, \xi)}{|H(\xi, \xi)|^2 + \alpha_1 R(\xi, \xi)} \quad (16)$$

$$H(\xi, \xi) = \frac{F^*(\xi, \xi) G(\xi, \xi)}{|F(\xi, \xi)|^2 + \alpha_2 R(\xi, \xi)} \quad (17)$$

这里, 给出一个 R 的经验公式^[4,5]

$$R(\xi, \xi) = 4 - 2\cos(2\pi\xi/M) - 2\cos(2\pi\xi/N) \quad (18)$$

3 算法分析及实验结果

为提高精确程度, 采用迭代的方法: 也即先固定 $h^{(k)}$, 解出 $f^{(k+1)}$; 再根据 $f^{(k+1)}$ 解出 $h^{(k+1)}$, 如此迭代。迭代公式如下

$$F^{(k+1)}(\xi, \xi) = \frac{H^{(k)*}(\xi, \xi) G(\xi, \xi)}{|H^{(k)}(\xi, \xi)|^2 + \alpha_1 R(\xi, \xi)} \quad (19)$$

$$H^{(k+1)}(\xi, \xi) = \frac{F^{(k+1)*}(\xi, \xi) G(\xi, \xi)}{|F^{(k+1)}(\xi, \xi)|^2 + \alpha_2 R(\xi, \xi)} \quad (20)$$

算法整理如下:

1) 取初值: $f^{(0)}(m, n) = g(m, n)$, $h^{(0)}(m,$

$n) = 0$, 及迭代次数 k ;

2) 进行傅里叶变换, 分别记为 F, H, R, G , 其中 $R(\xi, \xi)$ 由(18) 式确定;

3) 利用(19), (20) 两式进行迭代;

4) 判断 k 是否为 0, 若不为 0 则转 3) 继续; 否则转 5);

5) 对结果 F 进行反傅里叶变换, 变回时域的 f , 输出显示。

计算机模拟程序^[6] 使用 VC6 编制, 运行在 win98 下。试验图像为 128×128 像素的灰度图像, 为增加对比性, 将逆滤波及维纳滤波复原效果列出,

同时给出了本方法在已知和未知点扩展函数情况下的复原结果, 如图 1 所示。图 1(a) 为原图像; 图 1(b) 为已知点扩展函数的模糊图像, 点扩展函数采用 5×5 平滑因子, 在傅里叶变换之前要进行行列扩展(补 0), 使之与图像大小相同, 即扩展至 128×128 ; 图 1(c) 为采用逆滤波方法进行复原(根据已知的点扩展函数计算); 图 1(d) 是采用维纳滤波的方法进行复原(采用已知的点扩展函数进行计算); 图 1(e) 是用本法根据已知的点扩展函数进行复原的效果, 参数为: $\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 0.01$, 迭代次数为 50 次; 图 1(f) 是本方法进行盲解卷积的复原结果, 参数同上。

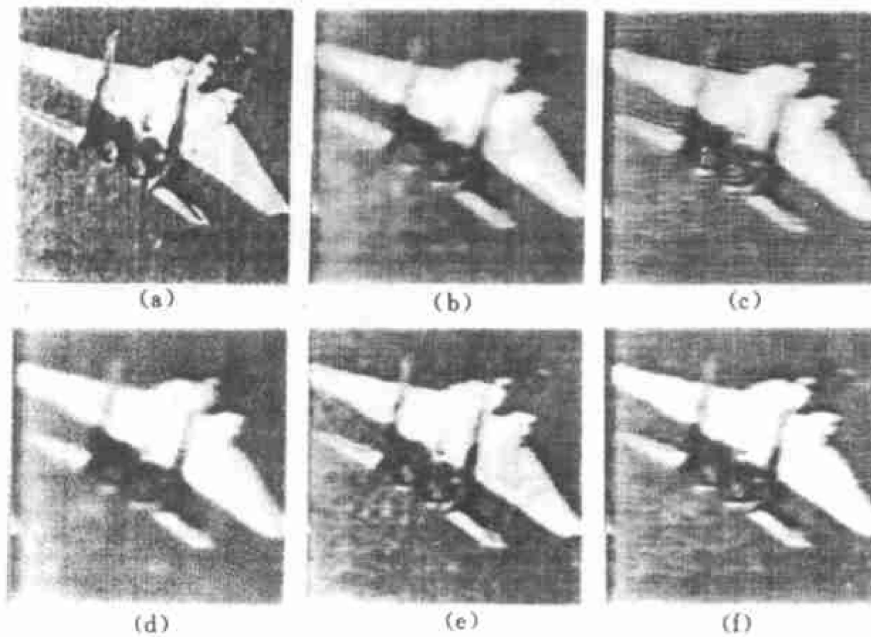


图 1 采用各种复原方法进行对比

(a) 原图像; (b) 已知点扩展函数的模糊图像; (c) 采用逆滤波复原;
(d) 维纳滤波复原效果; (e) 采用本方法根据已知的点扩展函数复原的效果; (f) 本方法盲解卷积复原

Fig. 1 Contrast of image with several restoration methods

(a) the original image; (b) the blurring image; (c) inverse filter with known PSF;
(d) the Wiener filter with known PSF; (e) the local method with known PSF; (f) the local method with unknown PSF

从以上分析可以看出, 对于人为的卷积噪声, 在知道点扩展函数的情况下, 使用逆滤波及维纳滤波方法都会引入新的噪声, 使图像损失一些信息, 本文所述方法要明显好于逆滤波及维纳滤波复原方法; 在未知点扩展函数的情况下, 必须提供一个假设的点扩展函数, 否则根本无法使用逆滤波或维纳滤波方法。由上面结果可见, 用本文方法进行复原取得的效果令人满意。

将该方法用于图像处理系统。用显微镜观察螺旋藻, 并通过步进电机控制扫描仪对生物组织进行光学切片^[7], 对采集的图像进行复原, 并与维纳滤波

及逆滤波复原方法进行对比, 对比结果如图 2 所示。由于使用逆滤波方法和维纳滤波方法都需知道点扩展函数, 而试验过程中点扩展函数是未知的, 这里采用了与上述相同的 5×5 平滑算子来充当点扩展函数。图 2(a) 为采集的图像; 图 2(b) 为用逆滤波方法复原; 图 2(c) 为采用维纳滤波方法复原; 图 2(d) 为采用本方法进行复原, 参数为 $\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 0.01$, 迭代次数为 30 次; 图 2(e) 为用本方法复原, 参数为 $\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 0.01$, 迭代次数为 50 次。

对实际采集的图像进行分析, 基本可以得到与试验图像类似的结果: 逆滤波及维纳滤波方法将引

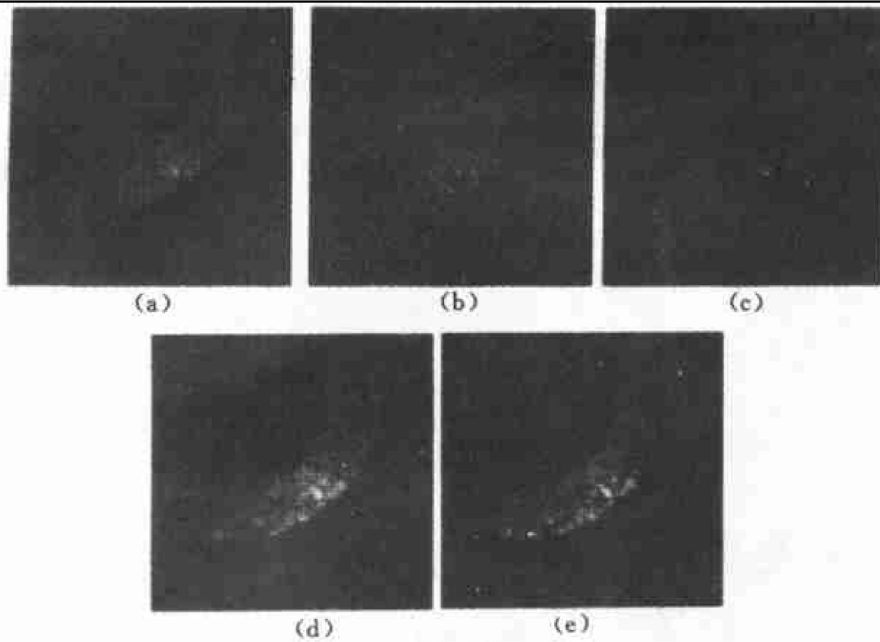


图 2 实际采集图像的复原对比

(a) 实际采集的图像; (b) 逆滤波复原; (c) 维纳滤波复原;
 (d) 本方法复原, $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.01$, 30 次迭代; (e) 本方法复原, $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.01$, 50 次迭代

Fig. 2 Contrast of several restoration methods used in actual images

(a) the actual image; (b) inverse filter; (c) Weiner filter;

(d) the local method with $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.01$, 30 times iterations; (e) the local method with $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.01$, 50 times iterations

入新的噪声, 恢复效果很差; 采用本文的方法则效果明显要好得多, 而且具有收敛性。

4 结 论

本文的算法利用傅里叶正变换和反变换, 使空域中的卷积运算转化为频域的乘法运算, 提高了运算速度, 可适用于一般的 PC 机, 而且该算法具有与模糊原因无关的优点, 可应用于多种模糊图像的复原, 另外, 通过迭代, 图像复原效果令人满意。

参 考 文 献

- 1 Her Bin, Ma Tiar yu, Wang Yurjian *et al.*. Visual C++ Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of People's Post and Telecommunication, 2001 (in Chinese)
- 2 K. R. Castleman. Digital Image Processing [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000 (in Chinese)
- 3 Tony F. Chan, C. K. Wong. Convergent of the alternating minimization algorithm for blind deconvolution [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1999, **8**(4): 412~ 405
- 4 Y. You, M. Kaveh. A regularization approach to joint blur identification and image restoration [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1996, **5**(3): 416~ 428
- 5 T. Chan, C. Wong. Total variation blind deconvolution [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1998, **7**(3): 370~ 375
- 6 C. R. Vogel, M. E. Oman. Iterative method for total variation denosing [J]. *SIAM J. Sci. Statist. Comput.*, 1996, **17**: 227~ 238
- 7 Hu Mao-hai, Tao Chur kan, Bian Song-ling *et al.*. The imaging realization of confocal scanning optical microscope in VC++ [J]. *J. Appl. Opt.*, 2001, **22**(1): 27~ 29