

运动模糊图像恢复的算法研究与分析

孟 昕,张燕平

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室,安徽 合肥 230039)

摘 要:运动模糊图像恢复是图像处理中的重要部分。从运动模糊图像退化模型开始,介绍比较了几种恢复算法,并选取其中的维纳滤波法进行深入具体的实验,分析了图像恢复过程中存在的运动模糊仿真图片的正确生成、振铃效应及其与恢复算法参数的选取之间的关系等问题,最后简要分析了图像恢复中质量变差的原因。

关键词:运动模糊图像;振铃效应;维纳滤波

中图分类号:TP18;TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2007)08-0073-04

Study and Analysis of Motion - Blurred Image Restoration Algorithm

MENG Xin, ZHANG Yan-ping

(Ministry of Education Key Laboratory of Intelligence Computing and Signal Processing,
Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: Motion-blurred image restoration is an important part of digital image processing. In this paper, starting with motion-blurred image degradation function model, analyse and compare restoration algorithms of anti-filter, Wiener filter, maximum entropy, traveling wave equation and dimension rotation based on image restoration in theory. At the end, by concretely experimenting with Wiener filter algorithm, analyses several problems and causes to degradation of the restored image.

Key words: motion-blurred image; ringing effect; Wiener filter

0 引 言

运动模糊图像恢复所讨论的是对运动着的物体拍摄的模糊图像进行精确的恢复,它是图像恢复中的重要课题之一,可广泛用于天文、军事、道路交通、医学图像、工业控制及侦破领域,随着科学技术的不断进步和发展,运动模糊图像恢复在各个领域中的应用越来越多,要求也越来越高,从事运动模糊图像的恢复研究具有重要的现实意义。

在进行图像复原时,在数学方法上有许多其它选择。首先,问题既可以用连续数学,也可以用离散数学进行处理。其次,处理既可以在空间域,也可以在频率域进行。此外,当复原必须用数学方法进行时,处理既可通过空间域的卷积,也可以通过频域的相乘来实现。这样,我们就可以在明确所作假设的情况下,根据问题的要求和约束来选择最适合的方法。对运动模糊图像

恢复的研究是从20世纪60年代开始的,随着图像处理技术在众多领域中的应用,近年来对运动模糊图像的恢复,已成为一个重要的课题。这种模糊具有普遍性,故有不少人研究它,也发展了许多复原方法。

1 运动模糊图像退化模型

运动模糊图像的退化模型可以描述为一个退化函数和一个加性噪声项,处理一幅输入图像 $f(x, y)$ 产生一幅退化图像 $g(x, y)$,如图1所示。

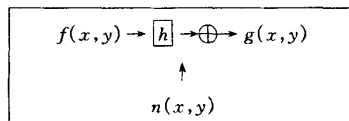


图1 图像退化的模型

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

公式(1)中 $h(x, y)$ 是点扩散函数的空间描述, $f(x, y)$ 为原始图像, $g(x, y)$ 是模糊图像, $n(x, y)$ 是混叠在信号中的加性噪声。其中“*”表示空间卷积。由于空间域的卷积等同于频率域的乘积,所以公式(1)的频率域描述为:

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

公式(2)中的大写字母项是公式(1)中相应项的

收稿日期:2006-11-01

基金项目:安徽省自然科学基金项目(0504200208);安徽省教育厅自然科学研究项目(2005kj053)

作者简介:孟 昕(1981-),男,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向为智能计算;张燕平,教授,硕导,研究方向为人工神经网络、机器学习、人工智能在金融工程中的应用。

傅里叶变换。所以图像复原过程就可以看成已知 $g(x, y)$ 和有关 $h(x, y)$ 、 $n(x, y)$ 的一些先验知识, 求出 $f(x, y)$ [1]。

2 几种常见运动模糊恢复方法

逆滤波复原法 [2] 是一个基于傅里叶变换的显而易见的方法, 其基本过程就是根据式 (2) 变换得到:

$$F(u, v) = G(u, v)H^{-1}(u, v) - N(u, v)H^{-1}(u, v) \quad (3)$$

由这个公式容易看出逆滤波对于信噪比很高的运动模糊图像的还原很有效, 特别适合大尺寸的二维图像, 速度较快。但是在实际中如果出现噪声, 通常 $H(u, v)$ 幅值衰减的比 $N(u, v)$ 快, 即当 u, v 较大时, $H(u, v)$ 通常很小, 而 $N(u, v)$ 却接近一个常数, 这样就相当于放大了噪声, 就会造成复原图像质量很差。而且利用逆滤波恢复方法进行复原处理时, 可能会发生下列情况, 当传输函数为零或很小时, 公式无意义, 呈现病态特性, 此时即使没有噪声, 也无法精确地恢复图像, 恢复的图像出现条纹, 即振铃现象。由于逆滤波恢复方法的普遍病态性, 所以需要模糊图像具有很高的信噪比 [3]。在有噪声的情况下, 这种恢复方法的效果很差, 对于运动模糊图像, 由于其传输函数存在零点, 所以用逆滤波恢复方法时, 无法精确复原图像。

维纳滤波法 [4] 也叫均方误差最小滤波法, 它是频率域最常用的一种恢复方法:

$$F(u, v) = G(u, v)H^*(u, v) / (|H(u, v)|^2 + \lambda) \quad (4)$$

其中 $H^*(u, v)$ 是 $H(u, v)$ 的复共轭, λ 是信号和噪声的功率之比, 但往往用一个常数代替。维纳滤波是一种综合考虑了退化函数和噪声统计特征两个方面进行恢复处理的方法, 它建立在认为图像和噪声是随机过程的基础上, 而目标是找一个未污染图像的估计值, 使它们的均方误差 $E\{[f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2\}$ 最小。维纳滤波复原法不存在极点, 即分母至少为 λ , 而且 $H(u, v)$ 的零点也转换成了维纳滤波器的零点, 抑制了噪声, 所以它在一定程度上克服了逆滤波复原方法的缺点。尽管维纳滤波的能力是没有问题的, 但也存在着几个实质性的局限 [2]。第一, 最优标准是基于最小均方误差的且对所有误差等权处理, 这个标准在数学上可以接受, 但却是个不适合人眼的方式, 原因在于人类对复原错误的感知在具有一致灰度和亮度的区域中更为严重, 而对于出现在暗的和高梯度区域的误差敏感性差得多。第二, 空间可变得退化不能用标准的维纳滤波方法复原, 而这样的退化是常见的。第三, 维纳滤波不能处理非平稳信号和噪声。

基于尺度旋转的图像恢复 [5], 将计算机图形学中的尺度旋转引入运动模糊图像恢复中。物理运动学中, 在一定条件下可以作为水平直线运动与竖直方向直线运动合成的结果, 与水平方向夹角为 θ 的运动, 可以作为先尺度旋转 θ , 后水平运动, 再尺度逆旋转 θ 的运动合成。图像恢复过程可以分为: 图像恢复前旋转过程、图像恢复过程和图像旋转还原过程。

任意角度运动模糊图像模型公式为:

$$g(x) = \int_0^T f\left[\left(x - \frac{a \cos \theta \cdot t}{T}\right), y + \frac{a \sin \theta \cdot t}{T}\right] dt$$

其图像恢复模型公式为:

$$f(x, y) \approx A - mg'[(x - m \frac{a \cos \theta \cdot t}{T}), y + \frac{a \sin \theta \cdot t}{T}] + \sum_{k=0}^m g'[(x - k \frac{a \cos \theta \cdot t}{T}), y + \frac{a \sin \theta \cdot t}{T}]$$

式中 a 为总位移量, θ 为运动水平夹角, T 为摄取图像所用时间, m 为 $x/(a \cos \theta)$ 的整数部分。基于尺度旋转的图像恢复并将最小均方误差函数

$$E = \min_{a, \theta} \|g(x, y) - f(\hat{x}, y)\|$$

作为标准进行参数的自动搜索, 在此基础上建立恢复模型, 通过不同位移参数 a 与运动角度参数 θ 组合的均方误差比较, 选取最小均方误差下的位移参数 a 与运动角度参数 θ 作为最佳参数估计, 实现最小均方误差准则下的图像恢复。这种方法可进行任意方向直线运动模糊图像的恢复, 但是对图像作尺度旋转时要进行插值处理, 使得这一步就引入了误差, 影响图像恢复的精度。而且每选定一个运动参数, 就要与所选的标准进行比较, 以决定取舍, 计算量较大, 是一种随机优化搜寻机制, 在速度上往往慢于参数确定的恢复方法, 需要进一步的改进算法设计。

传播波方程法 [6,7] 是一种基于数学物理方程的空间域方法, 它对匀速水平运动形成的模糊图像利用一维传播波方程来描述, 并对此方程反向求数值解, 从而实现对匀速直线运动模糊图像的有效恢复。这种恢复方法的优点是: 它的研究对象是退化过程的物理背景, 有物理学方面深入、成熟的研究基础可以利用, 严格且更具直观性。但是它也存在着恢复过程中的误差积累, 对运动方向敏感等缺陷。对于以相对于相机的速度 v 沿水平方向移动的物体 $f(x)$ 所成的模糊图像的模型

$$\text{可以表示为: } \bar{g}(x) = \int_0^T f(x - vt) dt, \text{ 其中 } T \text{ 为曝光时间。}$$

使用传播波方程可以表示为:

$$\begin{cases} (\frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x})w(x, t) = 0 \\ w(x, 0) = f(x) \end{cases}$$

其中, $w(x, t)$ 是运动物体在 t 时刻的瞬时曝光, 并在

$t = 0$ 时刻的瞬时曝光为 $f(x)$ 。通过对这个模型的分析得到图像恢复模型:

$$f(x) = v \frac{\partial}{\partial x} \tilde{g}(x) + f(x + vT)$$

此处, $\tilde{g}(x)$ 是给定的模糊图像。所以, 当运动位移 $D = vt$ 只有有限的宽度 $L > 0$, 即, $f(x) = 0, \forall x \in [0, L]$ 时, 解 $f(x)$ 可以通过递推求取。未知的运动速率 v 可以作为一个比例因子在计算中省略而不失一般性。作为一种空间域恢复法, 传播波方程法避免了频率域处理中或多或少出现的振铃效应和高代价的迭代计算。

最大熵恢复法^[8]是一种通过最大化某种反应图像平滑性的准则函数来作为约束条件以解决图像复原中的病态的方法。具体的公式推导过程较繁琐, 参考文献^[8]对它详细的推导。该算法收敛速度快, 并且由于仅对局部图像进行操作, 因而可实现并行处理达到实时恢复的速度, 不过计算机量也很大。对于非水平运动模糊的恢复, 对算法略作调整即可, 不过这同样会引入误差, 影响图像恢复的精度。

3 实验及结果分析

实验使用的运动模糊图像为仿真运动模糊图像, 在仿真图像生成中要注意对边沿部分的处理, 如图 2 所示。原图是图像处理中常用到的 lena 图像, 如图 2(a) 所示, 大小为 $256 * 256$ 。将这幅清晰图像与点扩散函数进行卷积, 可以得到人工模糊的图像, 如图 2(b)

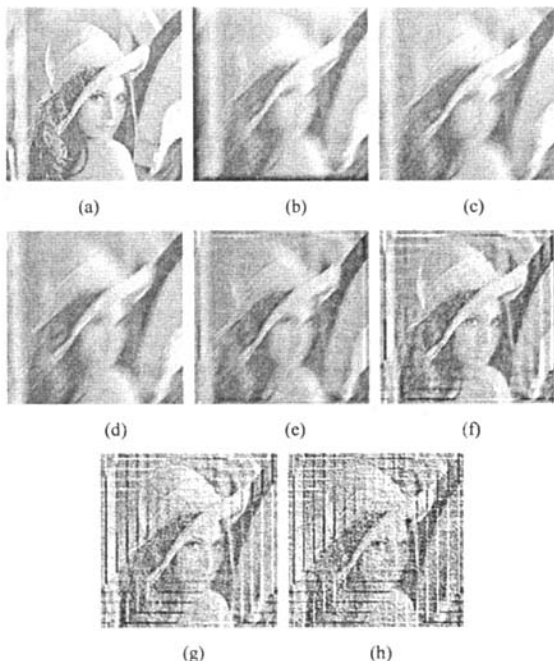


图 2 实验结果

所示, 模糊方向为 45 度, 模糊距离为 20 像素。由于与模糊方向相反的一侧图像信息的缺失, 左侧和下方均有黑色边沿, 这在实际采集的模糊图像中是不存在的。去掉人工模糊图片的边沿部分, 如图 2(c) 所示, 大小为 $241 * 241$, 这样才能可以将其与实际采集图片等看待。为了使仿真模糊图像更接近实际, 加入了均值为 0、方差为 0.0001 的高斯噪声, 如图 2(d) 所示。图 2(e)~(h) 为 $\lambda = 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001$ 的维纳滤波恢复结果。

在使用频率域恢复法恢复实际采集的模糊图片时, 并不是很理想, 存在着明暗相间的条纹, 在图片的边沿更加明显, 也就是所谓的振铃现象, 如图 2(e)~(h) 所示。在逆滤波恢复法中, 当传输函数 $H(u, v)$ 为零或很小时, 公式(3) 无意义, 呈现病态特性, 此时即使没有噪声, 也无法精确地恢复图像, 恢复的图像出现条纹, 在维纳滤波恢复法中, 公式(4) 虽然引入了 λ , 也只是部分克服了逆滤波恢复中的这种缺点, 即振铃效应。在空间域恢复时, 不存在这个缺点, 图 3 是传播波方程恢复的结果(没有添加噪声, 为达到实际采集的运动模糊效果, 对边沿的处理这里采用为图像添加黑色边框的方法)。



图 3 传播波方程恢复的结果

维纳滤波恢复中, 振铃效应与 λ 之间存在的关系可以从图 2(e)~(h) 中看出来。当 λ 取 0.1 时, 如图 2(e) 所示, 振铃效应抑制的很好, 人眼不容易觉察到, 但图像恢复的效果很差, 图像中物体存在虚影, 运动模糊仍然可以明显看到。当 λ 取 0.01 时, 振铃效应人眼可以很容易察觉得到, 但是虚影几乎没有了, 这幅图恢复效果较好。当 λ 取更小时, 如图 2(g) 和(h) 所示, λ 分别为 0.001 和 0.0001, 恢复结果没有虚影存在, 但振铃效应非常明显, 图像给人的颗粒感很强, 恢复效果反而变差。由以上分析可知, λ 值一般选取在 0.01 处图像恢复的较为理想。

频率域恢复算法中多存在着振铃效应, 影响图像恢复效果的原因还有一些是算法无法克服的:

(1) 在恢复模糊图像时, 每个像素都得需要其相邻像素的信息才能得以恢复, 而实际采集的运动模糊图像边沿点由于没有足够的相邻像素可以利用。

(2) 点扩散函数(PSF) 离散化对图像恢复也会产

生一定影响。如果 PSF 方向是一维的,即:只是 x 方向或者只是 y 方向则离散化的时候不会带来问题,如图 4 所示。如果是二维的,离散化的时候会带来一些问题,如图 5 所示,可以看到,由于离散化的原因 PSF 并非直线。而 PSF 带来的这种误差会对恢复结果产生一定影响。

(3)一些恢复算法都是以物体匀速运动为前提的,但现实中运动物体的速度不可能是完全匀速。

(4)很难具体确定模糊点数,如果差 1 个像素或者 0.5 个像素都将对恢复后的图像产生很大影响。

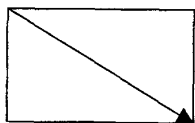


图 4 连续 PSF

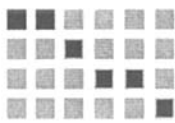


图 5 离散 PSF

4 总结

文中先从分析运动模糊图像退化模型入手,介绍比较了几种运动模糊恢复算法,通过对维纳算法具体的实验,分析仿真运动模糊图片生成中应注意的地方,频率域算法中常见的振铃效应产生的原因及其与维纳滤波算法中参数的关系。最后给出了运动模糊恢复过程中图像质量变差的几个原因。维纳滤波是一种综合

考虑了退化函数和噪声统计特征两个方面进行恢复处理的方法,是最常用的方法。

文中选用维纳滤波进行模糊图像恢复,所遇到的现象及对其产生的原因的分析也可以适用在别的恢复算法中。

参考文献:

- [1] 何斌,马天予,王运坚,等. Visual C++ 数字图像处理 [M]. 第 2 版. 北京:人民邮电出版社,2002:509-512.
- [2] Sonka M, Hlalac V, Boyle R. 图像处理、分析与机器视觉 [M]. 第 2 版. 北京:人民邮电出版社,2003:70-71.
- [3] Likhterov, Boris, Kopeika, et al. Motion-blurred image restoration using modified inverse all-pole filters [C]// Proceedings of SPIE. [s.l.]:[s.n.], 2002:56-62.
- [4] 刘政凯,瞿建雄. 数字图像恢复与重建 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1989:148-182.
- [5] 陆俊,舒志龙,阮秋琦. 基于尺度旋转的图像恢复研究 [J]. 通讯学报,2000,21(7):67-71.
- [6] 蔡利栋. 传播波方程与运动模糊图像恢复 [J]. 自动化学报,2003,29(3):465-471.
- [7] 潘琪. 运动模糊仿真图像的正确生成 [D]. 广州:暨南大学,2005.
- [8] 于红斌,李志能,陈抗生. 一种运动模糊图像的快速恢复算法 [J]. 浙江大学学报:工学版,1999,33(5):564-568.

(上接第 72 页)

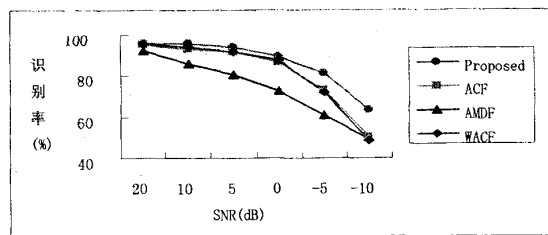


图 4 四种方法在 TEST1 上的实验结果

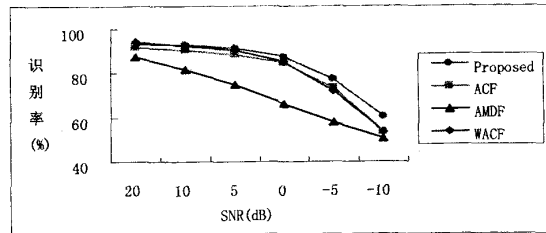


图 5 四种方法在 TEST2 上的实验结果

况下,该算法提取基音频率的准确性有提高作用,将其运用于基于支持矢量机的噪声环境下的声调识别中,实验表明相对于传统的基音提取算法,声调识别率有明显的提高。

参考文献:

- [1] Yang W, Lee J, Chang Y, et al. Hidden markov model for mandarin lexical tone recognition [J]. IEEE Trans on ASSP, 1988,36(7):988-992.
- [2] 关存太,陈永彬. 非特定人四声识别 [J]. 声学学报,1993,18(5):379-385.
- [3] Shimamura T, Kobayashi H. Weighted autocorrelation for pitch extraction of noisy speech [J]. IEEE Trans on SAP, 2001,9(7):727-730.
- [4] Oh K A, Un C K. A performance comparison of pitch extraction algorithms for noisy speech [C]//IEEE Trans on ASSP. US:IEEE, 1984:85-88.
- [5] S. Chen, Y. Wang, Tone recognition of continuous mandarin speech based on neural networks [J]. IEEE Trans on SAP, 1995,3(2):146-150.
- [6] 徐士林. 四声模糊识别方法 [J]. 电子学报,1996,24(1):119-121.
- [7] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York:Springer Verlag, 1995.
- [8] Burges C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition [J]. Knowledge Discovery Data Mining, 1998,2(2):121-167.