

基于OpenCV的匀速模糊图像复原与算法分析

程凡永, 罗海波

(闽江学院 计算机科学系, 福建 福州 350108)

摘要: 对水平匀速直线运动造成的模糊图像进行频谱分析, 估计出模糊距离, 进而求得图像的点扩散函数。采用维纳滤波法和投影复原法复原图像, 分析这2种算法对模糊距离的鲁棒性。采用OpenCV与MFC函数库作为软件设计基础, 实现的软件系统对匀速模糊图像的复原效果比较理想。

关键词: OpenCV; 点扩散函数估计; 维纳滤波法; 投影复原法; 鲁棒性

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)03-0059-05

Restoration and Algorithm Analysis of Uniform Motion-Blurred Image Based on OpenCV

Cheng Fanyong, Luo Haibo

(Computer Science Department, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Through analyzing the spectrum of blurred image caused by horizontal uniform linear motion, the blurred distance can be estimated, and furthermore the point spread function of the image could be obtained. The wiener filtering method and projection restoration method are applied to restore the image and the robustness of these two approaches is analyzed. Adopting OpenCV and MFC function library as the basis for software design, the implemented software system achieves ideal image restoration of motion-blurred image.

Keywords : OpenCV; estimation of the point spread function; wiener filtering method; projection restoration method; robustness

0 前言

图像复原技术也称图像恢复技术, 是当今图像处理研究领域的重要分支。图像在形成、传输和记录过程中, 受多种因素的影响, 图像质量有所下降, 进而引起图像的退化。王彪等提出的遥感图像运动模糊及其评价标准研究, 能够较好地恢复运动模糊的遥感图像, 并用客观标准作了验证^[1]。在较多情况

下, 图像模糊是由于相对运动造成的, 而非匀速直线运动在某些条件下可近似视为匀速直线运动, 或者可以分解为多个匀速直线运动, 因此匀速直线运动所造成的模糊图像的恢复问题具有一般性。本文通过对退化模型点扩散函数的研究, 实现了对水平匀速直线运动造成的模糊进行复原(简称: 匀速模糊图像复原)。整个复原过程主要包括点扩散函数(point spread function)的估计和图像复原2部分。对

收稿日期: 2011-02-14

基金项目: 闽江学院育苗基金资助项目(YKY1004), 福建省教育厅教学改革基金资助项目(闽教高[2007]4号)

作者简介: 程凡永(1982-), 男, 山东沂水人, 闽江学院教师, 硕士, 主要研究方向为图像处理与模式识别,

E-mail: chengfanyong@gmail.com

通信作者: 罗海波(1984-), 男, 湖南永州人, 闽江学院教师, 硕士, 主要研究方向为移动计算与无线网络,

E-mail: 178573944@qq.com

于获取点扩散函数,通过频域幅度谱的纵向叠加,得到条纹的宽度;通过总长度与条纹宽度相除估计出模糊距离,进而获得点扩散函数。对于图像复原,则采用维纳滤波法和投影法,并进行2种算法的效果分析和对模糊距离的鲁棒性分析。

1 点扩散函数的估计

1.1 匀速运动模糊图像的退化原理

假设目标图像 $f(x,y)$ 在一个二维平面运动,令 $x_0(t)$, $y_0(t)$ 分别为在 x , y 轴方向上运动的变化分量, T 表示图像运动的时间。记录图像的总曝光量是在快门打开后到关闭这段时间的积分,则模糊后的退化图像 $g(x,y)$ 相当于产生了延迟,可表示为^[2]:

$$g(x,y) = \int_0^T f[x-x_0(t), y-y_0(t)] dt, \quad (1)$$

这就是目标与相机相对运动造成图像模糊的连续函数模型。

当目标仅在水平方向(即 x 方向)上作匀速直线运动时, y 保持不变,则模糊后图像任意点的值为:

$$g(x,y) = \int_0^T f(x-x_0(t), y) dt.$$

若总的相对位移为 s , 总时间为 T , 则图像在水平方向上的位移为 $x_0(t) = st/T$, 上式变为:

$$g(x,y) = \int_0^T f(x-st/T, y) dt. \quad (2)$$

对于离散图像来说,对式(2)进行离散化,得:

$$g(x,y) = \sum_{i=0}^{D-1} f\left(x-s\frac{i\Delta t}{T}, y\right) \Delta t, \quad (3)$$

式中: D 为图像位移量 s 对应移动的像素个数,定义 D 为模糊距离;

Δt 是每个像素等效的时间因子 T/D 。

从物理现象上看,匀速模糊图像实际上就是一景物图像经过一系列的距离延迟后再相加,最终形成的图像。当总时间 T 和像素距离归一化为 1 时, $s=D$, $T=1$, 则模糊后的图像 $g(x,y)$ 为:

$$g(x,y) = \frac{1}{D} \sum_{i=0}^{D-1} f(x-i, y). \quad (4)$$

由式(4)得出运动模糊与模糊距离 D 有关。在这种条件下,使研究得到简化。把式(4)用卷积表示,得图像的退化过程为:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y), \quad (5)$$

式中: $h(x,y)$ 为模糊算子或点扩散函数,且

$$h(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{D}, & 0 \leq x \leq D-1, y=0; \\ 0, & \text{其它}。 \end{cases} \quad (6)$$

1.2 获取点扩散函数的算法原理

匀速模糊图像复原,首先要根据模糊图像求出模糊算子 $h(x,y)$, 即点扩散函数。点扩散函数估计的好坏是影响图像复原效果的关键因素。由文献[3]可知,将模糊图像进行 DFT 变换(离散时间傅里叶变换)并中心化后,所得频谱上白色条纹的宽度与图像的模糊距离 D 成反比。

假设有一副原始目标图像为 $f(x,y)$, $0 \leq x \leq M-1$, $0 \leq y \leq N-1$, M, N 分别是 x 和 y 轴方向上的像素点数。因水平匀速运动造成的模糊图像是 $g(x,y)$, 对其进行 DFT 变换后,得到频域表达式为

$$G(u,v) = F(u,v)H(u,v), \quad (7)$$

式中: $H(u,v)$ 为点扩散函数 $h(x,y)$ 在 $0 \leq x \leq M-1$, $0 \leq y \leq N-1$ 时的 DFT 变换,且

$$H(u,v) = \sum_{x=0}^{D-1} h(x,y) e^{-i\frac{2\pi}{M}ux} = \frac{1}{D} \sum_{x=0}^{D-1} e^{-i\frac{2\pi}{M}ux} =$$

$$\frac{\sin(\pi u D / M)}{D \sin(\pi u / M)} e^{-i\pi u (D-1) / M} = H_1(u) e^{-i\pi u (D-1) / M}, \quad (8)$$

式中: $H_1(u) = \frac{\sin(\pi u D / M)}{D \sin(\pi u / M)}$, $0 \leq u \leq M-1$ 。

通常 $D \ll M$, 把 $H(u,v)$ 代入式(7)得:

$$|G(u,v)| = |H(u,v)| \times |F(u,v)| = |H_1(u)| \times |F(u,v)|, \quad (9)$$

当 $D=32$, $M=461$, $|H_1(u)|$ 的图形如图 1 所示。

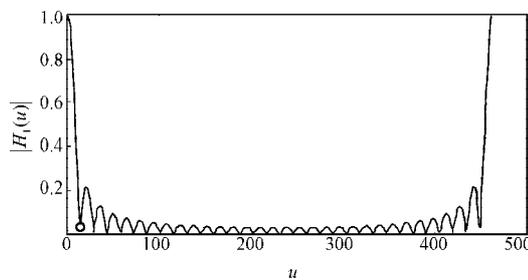


图 1 $|H_1(u)|$ 函数图形

Fig. 1 The amplitude graph of the function $|H_1(u)|$

由式(9)和图 1 知,当 uD/M 为整数时, $H_1(u)=0$, $|G(u,v)|=0$, 在图像中显示为图 3 列上的黑带。当 $u \rightarrow 0$

时, $|G(u,v)| = \frac{1}{D} \left| \frac{\sin(\pi u D / M)}{\sin(\pi u / M)} \right| \times |F(u,v)| \rightarrow \frac{1}{D} |F(u,v)|$, $\frac{1}{D} |F(u,v)|$ 为 $|G(u,v)|$ 的最大值,所以 $G(u,v)$ 的图像应该是有黑色间隔的条纹。

因为 $|\sin(\pi u D / M)|$ 是周期为 M/D 的函数,其零点距离可近似看作等间距且间距为 M/D 。也就是相邻 2 条黑带间(即白色条纹)的距离与模糊距离 D 的乘积近似等于图像的长度 M , D 就是匀速模糊图像频

谱上白色条带的个数。

由以上分析, 可得出估算模糊距离 D 的算法。

1) 对模糊图像进行二维傅里叶变换, 求取模糊图像 $g(x, y)$ 的频谱 $|G(u, v)|$ 。为了防止数值太大, 通过取对数 $\lg|G(u, v)|$ 进行压缩, 使低频率移到中心位置。

2) 对步骤 1) 得到的结果进行垂直方向的列投影, 变成一维的向量, 投影函数公式为:

$$S(u) = \sum_{v=0}^{N-1} \lg|G(u, v)|. \quad (10)$$

3) 找到投影函数 $S(u)$ 中心两边的第 1 个极小点 u_1 (图 1 中小圆圈所示), 其到中心点的距离为 d 。

4) 由于在理想情况下, 每个白色条纹的宽度相同, 因此图像模糊距离 D 可以表示为:

$$D = M/d.$$

5) 由式 (6) 估算出匀速模糊图像的点扩散函数。

1.3 图像维纳滤波恢复算法

维纳滤波是假设目标图像信号 $f(x, y)$ 可近似看成平稳随机过程的前提下, 依 $f(x, y)$ 和估计值 $\hat{f}(x, y)$ 的均方误差最小为准则, 来实现图像复原。即

$$e^2 = \min E \left\{ [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2 \right\}$$

最小。

满足上式的频率域维纳滤波为:

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{H(u, v)} \times \frac{|H(u, v)|^2}{|H(u, v) + k|} \right] G(u, v), \quad (11)$$

式中: k 是修正因子, 表示噪声与信号的功率比。

通常情况下, k 值无法准确获得, 在实际应用中常用一固定的数值来代替。当没有噪声时, k 值为 0, 此时维纳滤波退化为逆滤波。由此可知, 与逆滤波相比维纳滤波对噪声有一定抑制作用。

对 $\hat{F}(u, v)$ 进行傅里叶逆变换即可得到恢复出来的图像。

1.4 图像投影恢复算法

投影复原法是一种反复迭代运算的恢复方法^[4]。在估计模糊距离 D 准确的情况下, 随着迭代次数的增加复原的效果会明显变好, 其过程如下:

1) 选取一个初始估计值 $f^{(0)}(x, y)$, 最好的初始估计值为退化图像 $g(x, y)$ 。

2) 由估计到的点扩散函数 $h(x, y)$ 进行迭代运算, 用投影法将目标图像 $f(x, y)$, 退化图像 $g(x, y)$ 由二维矩阵按行表示成列向量的形式, 则式 (5) 可写成:

$$\mathbf{g} = \mathbf{H}\mathbf{f}, \quad (12)$$

式中: \mathbf{g}, \mathbf{f} 为 $(M \times N) \times 1$ 维列向量,

$$\mathbf{f} = [f(0, 0), f(0, 1), \dots, f(0, N-1),$$

$$f(1, 0), f(1, 1), \dots, f(1, N-1), \dots,$$

$$f(M-1, 0), f(M-1, 1), \dots, f(M-1, N-1)]^T;$$

\mathbf{H} 是分块循环矩阵, 由 $M \times M$ 个大小为 $N \times N$ 的子矩阵 \mathbf{H}_i 组成, 即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0 & \mathbf{H}_{M-1} & \mathbf{H}_{M-2} & \cdots & \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_1 & \mathbf{H}_0 & \mathbf{H}_{M-1} & \cdots & \mathbf{H}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{M-1} & \mathbf{H}_{M-2} & \mathbf{H}_{M-3} & \cdots & \mathbf{H}_0 \end{bmatrix},$$

式中:

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} h(i, 0) & h(i, N-1) & h(i, N-2) & \cdots & h(i, 1) \\ h(i, 1) & h(i, 0) & h(i, N-1) & \cdots & h(i, 2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h(i, N-1) & h(i, N-2) & h(i, N-3) & \cdots & h(i, 0) \end{bmatrix}.$$

式 (12) 展开得:

$$\begin{cases} h_{11}f_1 + h_{12}f_2 + \cdots + h_{1(M \times N)}f_{M \times N} = g_1, \\ h_{21}f_1 + h_{22}f_2 + \cdots + h_{2(M \times N)}f_{M \times N} = g_2, \\ \vdots \\ h_{(M \times N)1}f_1 + h_{(M \times N)2}f_2 + \cdots + h_{(M \times N)(M \times N)}f_{M \times N} = g_{M \times N}, \end{cases} \quad (13)$$

式中: h_{ij} 是矩阵 \mathbf{H} 的第 i 行 j 列的元素; f_i 是向量 \mathbf{f} 的第 i 个分量; g_i 是向量 \mathbf{g} 的第 i 个分量; $i, j = 1, 2, \dots, M \times N$ 。

通常取 $\mathbf{f}^{(0)} = [g_1, \dots, g_{M \times N}]$, 下一个迭代值 $\mathbf{f}^{(1)}$ 取 $\mathbf{f}^{(0)}$ 在式 (13) 中第一个方程上的投影, 即

$$\mathbf{f}^{(1)} = \mathbf{f}^{(0)} - \frac{\mathbf{f}^{(0)} \cdot \mathbf{h}_1 - g_1}{\mathbf{h}_1 \cdot \mathbf{h}_1} \mathbf{h}_1,$$

式中: \mathbf{h}_1 表示点扩散函数矩阵 \mathbf{H} 的第一行。

用同样的方法依次向下迭代投影, 直到求出 $\mathbf{f}^{(M)}$ 。

3) 将 $\mathbf{f}^{(M)}$ 作为初始值再次在式 (13) 中的第一个方程上投影得到 $\mathbf{f}^{(M+1)}$; 依次向下迭代, 最后得到第二次循环的估计值 $\mathbf{f}^{(2M)}$ 。依次采用上述方法不断地迭代, 循环 λ 次, 得到的结果为 $\mathbf{f}^{(\lambda M)}$, 这就是得到的复原图像, 它收敛于 \mathbf{f} 。

4) 为减少计算量, \mathbf{f}, \mathbf{g} 可取 $f(x, y), g(x, y)$ 的采样。

2 MFC 与 OpenCV1.0 简介

OpenCV (open source computer vision library) 是 Intel® 开源计算机视觉库。它由一系列 C 函数和少量 C++ 函数构成, 可以作为图像处理 and 计算机视觉方面很多算法实现的基础。它是一个基于 C/C++ 语言的开源图像处理函数库, 其代码都经过优化, 可用于实时处理图像; 具有良好的可移植性, 可进行图像/视频载入、保存和采集的常规操作; 具有低级和

高级的应用程序接口 (API); 针对 Intel CPU 优化代码, 提供了面向 Intel IPP 的高效多媒体函数库的接口, 可提高程序性能。

根据 OpenCV 的上述特点, 本文选择 OpenCV 作为软件设计基础。首先在 VC 6.0 下安装与配置 OpenCV1.0, 利用 OpenCV 中的 IplImage 图像结构、图像读取函数、矩阵操作函数以及 MFC (microsoft foundation classes) 提供的友好可视化开发界面^[5], 能较方便地开发具有可视化界面的软件系统。

3 实验结果和结论

3.1 实验结果图

1) 使用 OpenCV 中的 cvloadImage 读取匀速模糊图像, 如图 2。



图2 匀速模糊图像

Fig. 2 The image blurred by the uniform motion

2) 模糊图像的离散傅里叶变换, 如图 3。



图3 匀速模糊图像的傅里叶频谱

Fig. 3 The DFT of uniform motion blurred image

3) 匀速模糊图像模糊距离 D 的估计值记为 \hat{D} , 如图 4。

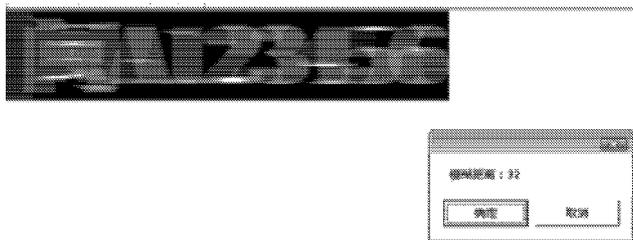


图4 模糊距离估计

Fig. 4 The estimation of fuzzy distance

4) 在模糊距离估计准确 $\hat{D}=32$ 的情况下, 维纳滤波复原图像, 如图 5。



图5 维纳滤波复原

Fig. 5 Restoration of wiener filtering

5) 在模糊距离 D 为 33, 估计值 \hat{D} 为 32, 估计误

差 $e=|D-\hat{D}|=1$ 时, 维纳滤波复原图像, 如图 6。

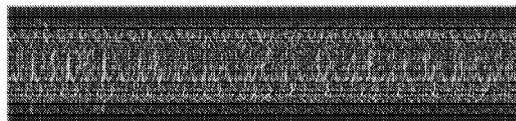


图6 当 $e=1$ 时的维纳滤波复原

Fig. 6 Restoration of wiener filtering when e is 1

6) 在模糊距离 D 为 33, 估计值 \hat{D} 为 32, $e=1$, 迭代循环次数 λ 不同时的投影复原图像, 如图 7。



a) $\lambda=50$



b) $\lambda=100$



c) $\lambda=150$

图7 当 $e=1, \lambda$ 不同时的投影复原图像

Fig. 7 Projection restoration when e is 1 and λ is different

7) 在模糊距离 D 为 33, 估计值 \hat{D} 为 30, $e=3$, 迭代循环次数 λ 不同时的投影复原图像, 如图 8。



a) $\lambda=50$



b) $\lambda=100$



c) $\lambda=150$

图8 当 $e=3, \lambda$ 不同时的投影复原图像

Fig. 8 Projection restoration when e is 1 and λ is different

3.2 实验结论

1) 如图 3 所示, 模糊距离等于傅里叶频谱图中条纹的个数。

2) 如图 5 所示, 在模糊距离估计准确的情况下, 维纳滤波具有较好的效果, 但维纳滤波受噪声影响

较大,复原图像出现较多噪点;与逆滤波相比,维纳滤波考虑了信噪比,具有一定的抑制噪声的作用。

3)如图6所示,在模糊距离估计有误差的情况下,维纳滤波的鲁棒性不好。很小的误差,导致了复原图像完全偏离原图像,出现了很多振铃,导致图像无法辨识。

4)如图7所示,在模糊距离估计误差相同的情况下,投影复原法对误差敏感性差,鲁棒性好于维纳滤波,迭代次数越多,复原效果越好,当迭代到100次时已经收敛,结果接近原图像,继续迭代对图像复原效果影响不大。

5)如图8所示,在模糊距离估计误差较大的情况下,投影复原法效果变差;迭代次数增加复原效果不会变好,反而有所下降。所以在模糊距离估计误差较大的情况下,不能通过迭代次数的增加来取得更好的复原效果。

6)由实验过程可知,与维纳滤波法相比,投影复原法程序运行时间较长,随着迭代次数的增加,运行时间会显著增加。所以维纳滤波的实时性强于投影复原法。

4 结语

1)本文对水平匀速模糊图像进行了复原算法的研究与实现。在匀速非水平运动情况下,还需要估算图像的运动方向,将运动方向转化为水平运动才能进行复原,因此需在运动方向估算方面进行研究。

2)模糊距离估计误差 e 和迭代次数 λ 对图像投影复原都有较大影响,根据模糊距离估计误差 e 来确定最优迭代次数 λ 还缺少定量分析。

参考文献:

- [1] 王 彪,姜志国,赵丹培.遥感图像运动模糊恢复方法及评价标准研究[J].航天返回与遥感,2009,30(2): 18-25.
Wang Biao, Jiang Zhiguo, Zhao Danpei. Research on Technologies and Quality Evaluation for Restoring Remote Sensing Motion-Blurred Image[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2009, 30(2): 18-25.
- [2] 拉斐尔,冈萨雷斯 C,理查德,等.数字图像处理[M].2版.阮秋琦,阮宇智,译.北京:电子工业出版社,2004: 175-220.
Rafael, Gonzalez C, Richard, et al. Digital Image Processing[M]. 2nd ed. Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi, Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 175-220.
- [3] 王晓红,赵荣椿.匀速直线运动模糊的PSF之估计[J].计算机应用,2001,21(9): 40-41.
Wang Xiaohong, Zhao Rongchun. Estimating the PSF of Motion-Blurred Images[J]. Computer Applications, 2001, 21(9): 40-41.
- [4] 龚声蓉,刘纯平,王 强,等.数字图像处理与分析[M].北京:清华大学出版社,2006: 139-140.
Gong Shengrong, Liu Chunping, Wang Qiang, et al. Digital Image Processing and Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 139-140.
- [5] 侯俊杰.深入浅出MFC[M].2版.武汉:华中科技大学出版社,2008: 25-40.
Hou Junjie. Dissecting MFC[M]. 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2008: 25-40.

(责任编辑:邓光辉)