

结合高维几何空间理论的 COSM 图像复原算法*

孟 雷, 何小海, 陶青川

(四川大学电子信息学院 图像信息研究所, 成都 610064)

摘要: 为了在不精确知道图像的点扩展函数的情况下, 去除图像的离焦模糊, 提出了基于高维空间几何理论的图像复原算法。依据同源连续性原理, 通过分析高维空间中向量的方向和点的位置关系来研究模糊图像与原图像的空间关系, 并且结合最近邻算法, 将该算法应用于去除最近邻算法所得图像的本层模糊。实验表明该算法能够有效地去除离焦模糊。本算法不同于传统的图像复原算法, 可广泛应用于模糊图像的复原中。

关键词: 高维空间; 同源连续性; 最近邻算法; 本层模糊

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2009)01-0375-03

COSM image restoration based on high-dimensional space geometry theory

MENG Lei, HE Xiao-hai, TAO Qing-chuan

(Image Information Institute, College of Electronics & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: To recover blurred image but the PSF of the image was not known, using the method which according to homeomorphisms and the principle of homology continuity (PHC) in high-dimensional space geometry. The relation of vector and point in space could show the relation of the fuzzy image and the original image, contacting nearest-neighbor algorithm to use the method in computational optical section microscopy (COSM). The results show that the method is efficient and correct. The method is not the same as traditional method, it can be used in the restoration of blurred image broadly.

Key words: high-dimensional space geometry; PHC; nearest-neighbor algorithm; layer blur

计算光学切片显微成像技术^[1-3] (computational optical sectioning microscopy, COSM) 是三维显微成像技术的主要方法之一。COSM 具有信噪比高、不产生样本漂白、价格便宜等优势。随着计算机技术、信号处理等技术迅速发展, 它将在生物医学、空间物理学、石油地质、化学、机械工程、无损探伤等领域得到广泛的应用。COSM 中的常用方法有 EM、PBD、维纳滤波^[4]、最近邻等。其中最近邻算法相对于其他算法具有计算量小、复原速度快的优势, 广泛应用于商业软件中。但由于其采用图像相邻层相减的方法会使图像的一些低频信息丢失, 而且最近邻算法只能去除其他层图像对当前层的干扰(层间模糊), 又由于没有精确的点扩展函数, 对聚焦层的由透镜系统和其他一些原因所产生的模糊不能去除, 复原的效果不如其他算法好。本文将高维几何空间理论应用于最近邻方法处理后得到的图像, 用于去除图像的本层模糊。该方法速度快与最近邻方法结合使用不会影响最近邻算法的处理速度, 具有良好的效果。

1 算法实现

将高维空间几何理论应用于图像复原由王守觉院士提出^[5], 其核心思想是将每一幅图像看成是高维空间中的一个点, 因此原图像和模糊图像均可以看成是高维几何空间中的一个点, 并且这两个点是同源的^[5,8]。由于在高维几何空间中同源的点具有连续性^[8], 即模糊图像到原图像不是突变的, 在它们之间必然还有其他高维几何空间中的点, 这些高维空间中的点所对应的图像与模糊图像所对应的点相比更接近原图像, 即

比模糊的图像要清晰。那么应用高维空间理论, 如何找到这些比模糊图像更清晰的图像在高维几何空间中映射的点就是本算法要完成的任务。

1.1 算法原理

在图像生成和传输过程中, 一些不利因素如照相系统不精良、相机的相对运动、离焦、大气湍流以及噪声等, 均可能使获得的图像质量退化。退化过程的二维线性模型可描述如下:

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

其中: $g(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 分别表示退化图像、真实图像、点扩展函数 (PSF) 和加性噪声。注意在本算法中应用式(1)时, 由于本文研究的不是去噪算法, 忽略噪声, 只考虑点扩展函数对图像的影响, 式(1)可以简化为

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (2)$$

定义 1 点 $A(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为图像在高维几何空间映射的点。其中 x_1, x_2, \dots, x_n 为图像各个点的像素值所组成的矩阵按行优先排列成的数组。

定义 2 点 A 为原图像 $f(x, y)$ 在高维空间中映射的点, 点 B 为原图像通过式(2)退化的图像在高维空间中映射的点, 点 C 为点 B 所对应的图像通过式(2)在高维空间中映射的点。

定义 3 高维空间中的点沿某一方向平移。平移就是将 m 维的图形 α 中所有的点在 n 维空间中 ($n > m$) 向同一个方向移动相同的一段距离, 即

$$\theta = \{ Y | Y = X + H, X \in \alpha \subset R^n \} \quad (3)$$

记做 $\theta \parallel \alpha$ 。其中 H 为 n 维空间中的某一个向量。

图像的模糊过程如图 1 所示。其中点 A 表示未经过退化

收稿日期: 2008-04-02; 修回日期: 2008-06-04 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60372079)

作者简介: 孟雷(1982-), 男, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理(mengleiscu@163.com); 何小海(1964-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为图像处理、数字通信等; 陶青川(1976-), 男, 副教授, 主要研究方向为图像处理、模式识别等。

的图像映射在高维几何空间中的点;点 A 表示通过光学系统观察到的图像映射在高维几何空间中的点;点 B 表示对点 A 所对应的图像再经过一次模糊所得到的图像在高维几何空间映射的点;点 C 表示对点 B 所对应的图像再模糊一次的图像在高维几何空间映射的点。

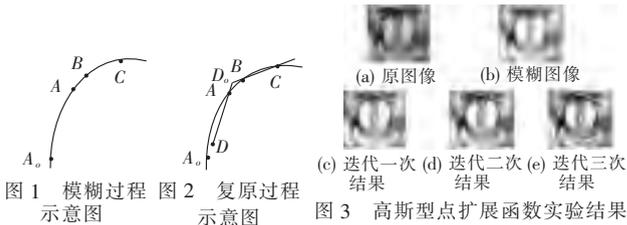
用高斯点扩展函数来近似导致图像退化的真实点扩展函数。其表达式如下所示:

$$h(x, y) = 1 / (\sqrt{2\pi}\sigma) e^{-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)} \quad (4)$$

其中 σ 为高斯函数的方差,又叫平滑因子。该点扩展函数的结构简单,又有较好的精度。由于图像复原过程中无法预知该点扩展函数中的 σ ,实验中先采用基于小波变换的高斯点扩展函数估计算法^[8]得到其估计值。

图像由 $A \sim C$ 逐渐模糊并且 A, B, C 同源^[8],由于同源的点具有连续性^[5,8],即 $B \sim A$ 是连续变化的,在点 $B \sim A$ 必然存在一些点,这些点要比点 B 更接近点 A 。又因点 C 所对应的图像比点 B 所对应的图像模糊,可以认为沿 BC 方向图像变模糊,所以沿 CB 方向,即 BC 的反方向,图像有变清晰的趋势^[6]。在点 B 的基础上沿矢量 CB 方向移动一段距离得到一点 D_0 ,该点比 B 更接近 A 对应的图像;同理在点 A 的基础上沿 D_0A 方向移动一段距离得到点 D ,点 D 会比 A 所对应的图像更接近 A_0 (原图像)。这样通过用线段来拟合曲线的方法来获得更接近于原图像的点。上述过程如图 2 所示。可以证明点 A_0 不在由 A, B, C 所组成的超平面上^[7],而点 D 显然可以表示成 A, B, C 的线性组合,所以点 D 在 A, B, C 组成的超平面上^[7],可对点 D 再进行上面的复原过程,从空间上趋近原图像,迭代直到得到满意的图像。

关于算法中的参数选取问题:算法中移动距离的选取,由于图像的模糊程度和采用基于小波变换的高斯点扩展函数估计算法中所估计出的 σ 相关, σ 越大图像的模糊程度越大,而图像的模糊程度越大,在几何空间的直观显示就是图像在高维几何空间上映射的点,与由这幅图像为源进行模糊所得到的图像在高维空间映射的点的距离越大,因此移动的距离是一个与高斯函数方差有关的函数。在本文中选取移动的距离为 $0.2 \times \sigma$,移动距离如式(3)所示。关于迭代次数的选择,一般迭代次数在一到三次之间时图像将达到最佳效果,因为在高维空间中迭代次数过多,会使本来已经在空间上接近原图像的点由于迭代而产生的移动而更加远离原图像,影响复原的效果。



1.2 算法流程

- a) 读入退化图像 A ;
- b) 采用文献[9]的方法估计点扩展函数参数;
- c) 用式(2)对点 A 进行模糊得到点 B ;
- d) 用式(2)对点 B 进行模糊得到点 C ;
- e) 以 B 为起点沿 $C \rightarrow B$ 方向移动一段距离得到点 D_0 ;
- f) 以 A 为起点沿 $D_0 \rightarrow A$ 方向移动一段距离得到点 D ;
- g) 判断点 D 是否达到可以接受的视觉效果,否则返回 b)。

1.3 算法的有效性实验

为了证明算法的有效性,对只有离焦模糊而没有层间模糊的单幅图像进行复原,用于证明基于高维空间几何理论的图像复原算法对去除离焦模糊是有效的。

有效性实验 1 首先对原图像采用高斯型点扩展函数进行模糊,然后对模糊图像采用本算法进行复原,分别迭代 1~3 次所得到的结果如图 3 所示。

有效性实验 2 对模糊图像采用本算法进行复原,分别迭代 1~3 次所得到的结果如图 4 所示。

从上面的实验结果可以看出,选取合适的参数进行逐次迭代,随着迭代次数的增加图像逐渐变清晰。

2 算法在 COSM 中应用

在三维显微成像分析中,每个聚焦层面的图像,不仅包含本层面的信息,还包含其他层面的离焦模糊信息。最近邻法是用当前层面图像与相邻层面模糊后图像的差值作为当前层面的复原结果^[10]。其算法原理如下所示:

$$f_j \times h_0 = g_j - \sum_{i=1}^{j-1} f_{i+j} \times h_i - \sum_{i=1}^{N-j} f_{i+j} \times h_i \quad (5)$$

其中: g_j 为观察到的退化图像; h_i 表示图像非聚焦平面点扩展函数; f_{i+j} 表示各个非聚焦样本平面; f_i 表示聚焦样本平面; h_0 是显微镜焦平面上的点扩展函数。 $f_j \times h_0$ 是本文得到的最近邻算法的复原结果,这个结果没有考虑聚焦层图像通过透镜成像系统的模糊,即由于 h_0 所产生的模糊。传统方法如维纳滤波等去除本层模糊需要精确的点扩展函数。盲解卷积算法速度慢,难以满足应用的要求。基于高维空间几何的图像复原算法能够去除聚焦层本身的模糊,它在对点扩展函数要求不是很精确的情况下可以取得满意的复原效果,而且速度也很快。

2.1 序列图实验结果

首先对模糊序列采用最近邻算法进行复原,然后应用本算法对最近邻处理后的序列图像依次进行处理去除本层模糊。

2.1.1 模拟样本实验

在图 5 所示的模拟样本实验中序列图一共有 32 幅图像。其中只有第 16 幅(在图 5 中表示为 16^b)有图像,图像如图 5 的原图像所示,其余均为黑色。通过这个模拟实验可以看出即使没有层间模糊的影响,第 16 幅图像由于点扩展函数的影响也会模糊,并且由式(5)可知采用最近邻法只能去掉其他层对聚焦层的影响而不能去掉这个模糊。通过本算法可以去除聚焦层图像的模糊。

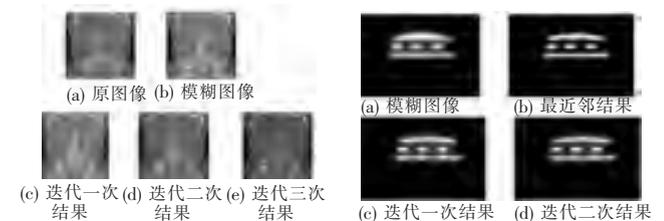


图 4 本算法的实验结果 图 5 序列图像实验结果

图 6 为模糊序列,从模糊序列图中可以看出,每一幅聚焦图像中不仅有其他层对本层的影响,而且聚焦层本身也是模糊的;图 7 是经过最近邻算法复原的序列,基本去除了非聚焦层的模糊;图 8 是采用本算法对图 7 序列的每一幅图像迭代一次,去除本层模糊的结果,与图 7 的序列图像相比可以看出,每一幅对应的图像都变清晰了也就是去除了本层模糊。

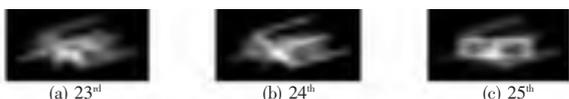


图 6 模糊图像

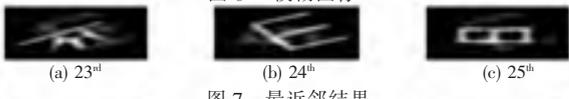


图 7 最近邻结果

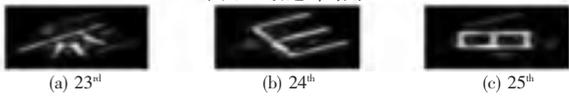


图 8 本算法迭代一次结果

2.1.2 真实样本实验

已知样本序列的成像参数为:透镜媒质折射率 $r = 1$, 数值孔径 $NA = 0.8$; 系统两个通道的波长分别为 $0.52 \mu\text{m}$, $0.52 \mu\text{m}$; 像素的尺寸为 $\Delta X = 0.07 \mu\text{m}$, $\Delta Y = 0.07 \mu\text{m}$, $\Delta Z = 0.15 \mu\text{m}$ 。序列图像尺寸为 $64 \times 64 \times 64$ 。

图 9 为真实样本模糊图像; 图 10 为最近邻算法实验结果; 图 11 为采用本算法对图 10 的序列去模糊的结果。从真实样本实验中可以看出使用本方法的图像与最近邻复原的结果相比更加清晰。

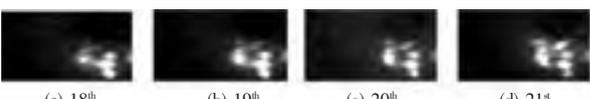


图 9 真实样本模糊图像

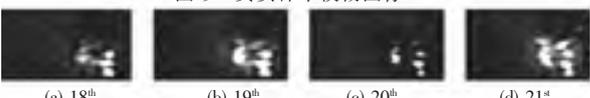


图 10 最近邻复原结果

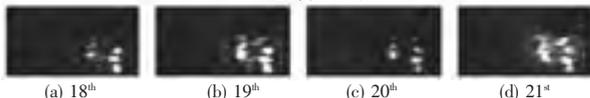


图 11 本算法迭代一次去模糊结果

3 结束语

将高维几何空间的图像复原理论应用于 COSM 中的最近邻

算法,具有以下优点:速度快,结合最近邻算法既取得了优于最近邻算法的实验效果又不会影响复原算法的速度,具有应用价值。对点扩展函数的精度要求不是很严格,用高斯点扩展函数对真实的点扩展函数进行模拟,不会对算法的处理结果产生较大的影响,可广泛应用于模糊图像的复原中。本文对如何去除三维图像的本层模糊提供了一种方法,如何利用高维空间几何理论去除图像的层间模糊,还有待于发展和研究。

参考文献:

- [1] McNALLY J G. Computational optical-sectioning microscopy for 3D quantitation of cell motion; results and challenges[J]. SPIE, 1994, 2302:342-351.
- [2] FANO M, POLAK M. The 3D object reconstruction from 2D slices-image preprocessing[J]. The Central European Seminar on Computer Graphics, 2000, 5:14-15.
- [3] SARDER P, NEHORAI A. Deconvolution methods for 3-D fluorescence microscopy images[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(3):32-45.
- [4] 孟庆浩,周荣彪. 复合帧运动模糊图像复原方法研究[J]. 计算机工程, 2006, 32(13):187-189.
- [5] 王守觉,谢美芬,曹文明. 图像恢复的一种新方法[C]//2006年中国控制与决策年会论文集. 天津:[出版者不详], 2006:241-246.
- [6] 沈永增,叶鸿敏,张敏捷. 基于高维空间几何分析理论的图像增强实现[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6):191-193.
- [7] 王守觉,王柏楠. 神经网络的多维空间几何分析及其理论[J]. 电子学报, 2002, 30(1):1-4.
- [8] 王守觉. 仿生模式识别(拓扑模式识别)——一种模式识别新模型的理论及应用[J]. 电子学报, 2002, 30(10):1-4.
- [9] 陶青川,邓宏彬. 基于小波变换的高斯点扩展函数估计[J]. 光学技术, 2004, 30(3):284-289.
- [10] 李蕊,陶青川,何小海,等. 基于高斯型点扩展函数的改进最近邻算法[J]. 光电工程, 2007, 34(6):97-101.

(上接第 374 页)的嵌入方案将消息嵌入到置乱的图像中,这为消息的嵌入提供了抵抗隐写分析攻击和防止第三方提取这两个层次上的安全保障。从实验效果可以看出,置乱变换可作为消息载体的一种有效的预处理手段,但由于置乱变换的运算量一般都比较小,算法的运算量要高于传统的 LSB 嵌入算法。这也是在下一步研究中需要继续改进和努力的地方。

参考文献:

- [1] STEFAN K, FABIEN A, PETITCOLAS P. 信息隐藏技术——隐写术与数字水印[M]. 吴秋新,钮心忻,杨义先,等译. 北京:人民邮电出版社, 2001.
- [2] FRIDRICH J, GOLJAN M, DU R. Detecting LSB steganography in color and gray-scale images[J]. IEEE Multimedia, 2001, 8(4):22-28.
- [3] FRIDRICH J, GOLJAN M. Practical steganalysis of digital images—state of the art[C]//Proc of SPIE: Security and Water-marking of Multimedia Contents IV. 2002:1-13.
- [4] FRIDRICH J, GOLJAN M, DU R. Reliable detection of LSB steganography in color and grayscale images[C]//Proc of the ACM Workshop Multimedia Security. Ottawa: [s. n.], 2001:27-30.
- [5] DUMIT R S, WU Xiao-lin, WANG Zhe. Detection of LSB steganography via sample pair analysis[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 51(7):1995-2007.

- [6] 柏森,胡中豫,吴乐华,等. 通信信息隐写技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [7] QI Dong-xu, ZOU Jian-cheng, HAN Xiao-you. A new class of scrambling transformation and its application in the image information covering[J]. Science in China (Series E), 2000, 43(3):304-312.
- [8] 丁玮,齐东旭. 数字图像变换及信息隐藏与伪装技术[J]. 计算机学报, 1998, 21(9):839-843.
- [9] 丁玮,闫伟齐,齐东旭. 基于 Arnold 变换的数字图像置乱技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(4):339-341.
- [10] 吴升,王介生,刘慎权. 图像的排列变换[J]. 计算机学报, 1998, 21(6):514-519.
- [11] 柏森,曹长修,曹龙汉. 基于骑士巡游变换的图像细节隐藏技术[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(11):1096-1100.
- [12] 柏森,曹长修. 一种新的数字图像置乱隐藏算法[J]. 计算机工程, 2001, 27(11):18-19.
- [13] BAI Sen, CAO Chang-xiu. Property of sub-affine transformation and its application[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(2):205-214.
- [14] CRANDALL R. Some notes on steganography[EB/OL]. (1998). http://os.inf.tu-dresden.de/~westfeld/crandall.pdf.
- [15] ZHANG Tao, PING Xi-jian. Steganalysis of spatial LSB based steganographic algorithms and countermeasures[J]. Journal of China Institute of Communications, 2003, 24(12):156-163.