

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201111012

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20120712.1042.006.html>

图像复原中的模糊参数估计

王伟¹, 郑津津¹, 刘星¹, 周洪军², 沈连娣¹

(1. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027; 2. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘要: 图像复原技术在航空拍摄和机器视觉中是提高图像质量的重要手段. 针对有相对运动情况的图像存在的降质模糊, 分析了运动模糊的数学原理, 针对不同运动模糊采取了不同去模糊方式. 即先判断图像存在的运动模糊方式, 针对直线运动通过 Hough 变换法和误差参数法相结合的方法估计降质参数, 而对于旋转运动则采用曲线拟合和极坐标转换相结合的方法来估计降质参数. 通过维纳滤波方法复原图像, 提高图像质量. 利用提出的自适应方法对直线运动模糊(参数为 $(30, 70^\circ)$)和旋转运动模糊(参数为 $(128, 128), 20^\circ$)分别作了实验计算. 对比实验表明, 这种由粗及精的方法能准确估计模糊参数, 与传统处理方法相比, 更加便捷有效.

关键词: 运动模糊; Hough 变换-参数曲线; 圆心拟合; 极坐标变换

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2012)04-0315-06

Estimation of blur parameters in image restoration

WANG Wei¹, ZHENG Jinjin¹, LIU Xing¹, ZHOU Hongjun², SHEN Lianguan¹

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract: The image restoration technique is an important way to improve the quality of images, especially in flight photography and machine vision. In this paper, the mathematic principle was analyzed first, and then different de-blurring methods were employed correspondingly for each motion condition; specifically, the type of motion blur was judged. For linear motion blur, both the Hough transform and error-parameter were taken to estimate parameters. Furthermore, for rotational motion blur, the curve-fitting and polar transform were combined to estimate degraded parameters. Both were followed by Wiener filtering to recover images and improve image vision quality. The proposed adaptive algorithm was used to calculate the linear motion blur parameter $(30, 70^\circ)$ and rotational motion blur parameter $((128, 128), 20^\circ)$. The results show that the algorithm can estimate blur parameters accurately. Compared with traditional handling, this proposed method has the advantages of high precision, robustness, and speed.

Keywords: motion blur; Hough transform-parameter curve; center fitting; polar transformation

运动模糊大多数情况下是由相机抖动造成的, 很多情况下没有足够的光照来避免使用长曝光时

间, 不可避免地得到拍摄结果不满意的模糊图像. 从单独一张运动模糊图像恢复出一张非模糊图像在数字图像处理领域一直是个基础性研究问题. 如果模糊核(或者叫点扩散函数)是线性移不变的话, 问题就简化成了图像去卷积. 图像去卷积又可以分成盲恢复和非盲恢复. 在非盲恢复的情况下, 运动模糊核认为是已知或者已经计算得到的, 剩下的任务就是

收稿日期: 2011-11-17. 网络出版日期: 2012-07-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10575097, 10775128, 61073109); 高校博士点基金资助项目(20060358050); 国家自然科学基金大科学装置联合基金资助项目(10979065); “111”工程资助项目(B07033).

通信作者: 王伟. E-mail: wwei009@mail.ustc.edu.cn.

估计出原始图像. 传统方法有维纳提出的维纳滤波^[1]、Richardson 和 Lucy 共同提出的 Lucy-Richardson 滤波^[2], 它们虽然年代久远, 但是由于简单实用, 仍然在图像恢复中广泛运用. 盲恢复情况下, 问题变得更加病态化, 因为模糊核和原始图像都是未知的. 自然图像的结构和模糊核形状的多样性使得先验分布很容易就过拟合或者欠拟合. 盲去卷积是个更具挑战性和病态的难题, 因为模糊核未知. 一些技术利用额外的输入能够使问题更易处理, 比如多幅图像. Rav-Acha 利用 2 幅运动模糊图像的信息^[3], Yuan 用一副含噪和一副模糊图像来优化低光照条件下的拍摄效果; 其他去模糊系统充分利用了额外特定的硬件设备^[4], Ben-Ezra 和 Nayar 通过一个低分辨率的相机和一个高分辨率的相机来估计模糊核^[5]; Rasker 拍动相机的快门, 使其在曝光时一会儿开一会儿关, 来使高空间和高频率的信息损失减少^[6]. 这些方法中, 目标的运动路径必须由用户指定.

在直线运动模糊图像参数确定上, 目前主要分为频域法和空域法两大类. 频域法中主要方法是由 Canon 提出的检测模糊图像频谱图中黑色条纹个数的方法^[7]; 空域法中较有影响力的是 Yitzhaky 提出的计算模糊图像的自相关函数法^[8]. 本文所做工作就是估计出运动模糊参数, 使盲恢复问题转化为非盲恢复来解决.

在旋转运动模糊参数的确定上, 国内外的研究并不多, 一般是事先默认已获得了退化参数, 然后利用 bresenham 画圆算法提取像素点并进行重排列^[9], 再运用直线运动模糊的参数估计方式进行处理.

本文在分析运动模糊特性的基础上, 针对不同运动模糊方式, 提出了由粗及精的自适应参数估计方法, 为后续图像复原工作提供模糊参数.

1 退化图像的数学原理

1.1 直线运动模糊退化原理

对于运动模糊图像来说, 它每一点的灰度值是在运动参数所确定的路径上各景物点灰度值的线性迭加. 根据运动模糊降值的特点, 通过一定算法构造出与退化原理相似的恢复模型, 使得模糊图像尽量清晰, 还原出那些被模糊掉的有用信息, 无论在航空航天、道路交通、医学图像、工业控制等领域都是有重要意义的. 首先要分析的是图像降值退化的过程, 图 1 为图像退化过程的示意图.

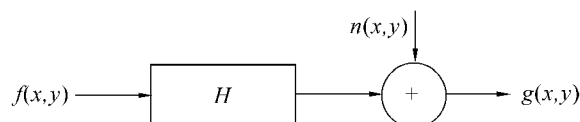


图 1 图像退化过程模型

Fig.1 Model of image degrading

假定成像是线性位移不变系统, 则获取的图像 $g(x, y)$ 表示为

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

式中: $f(x, y)$ 表示理想没有退化的图像, $g(x, y)$ 表示退化后的图像, $h(x, y)$ 表示系统退化核函数(点扩散函数), $*$ 表示卷积, $n(x, y)$ 表示加性噪声.

对式(1)两边进行傅里叶变换, 得

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v) + N(u, v).$$

式中: $H(u, v)$ 称为系统的传递函数, 从频率域角度看, 它使图像退化, 因而反映了成像系统的性能.

先讨论直线运动模糊状况: 设图像 $f(x, y)$ 在平面上相对运动, $x_0(t)$ 、 $y_0(t)$ 分别是物体在 x 、 y 方向上的运动分量, t 是运动时间, T 是曝光时间, 则退化图像 $g(x, y)$ 是 T 时间内的积分:

$$g(x) = \int_0^T f\left(x - \frac{a}{T}t\right) dt.$$

为方便讨论, 假设仅是 x 方向的运动, 且令曝光时间 T 内的总移动量为 a , 则

$$g(x) = \int_0^T f(x - t') \frac{T}{a} dt' = f(x) * h(x).$$

令 $t' = \frac{at}{T}$, 则

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

所以有

$$h(x) = \frac{T}{a}, 0 \leq x \leq a.$$

相应的系统退化函数为

$$H(u) = F[h(x)] = T \frac{\sin(\pi ua)}{\pi ua} e^{-j\pi ua}.$$

这表明, 系统退化函数在运动方向上为 sinc 函数, 具有带状调制的外观, $h(x)$ 和 $H(u)$ 的函数图像如图 2 所示.

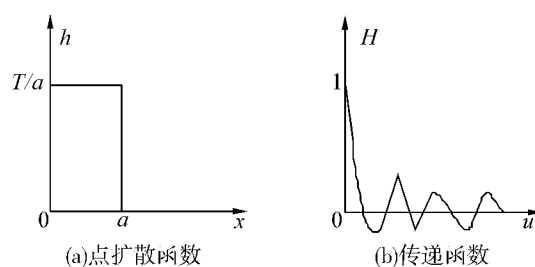


图 2 匀速直线运动模糊点扩散函数和传递函数

Fig.2 PSF and transfer function of line motion blur

由图2可以看出,运动模糊的传递函数 $H(u)$ 在 $u = n/a$ 处为零,其中 n 为整数.

1.2 旋转运动模糊退化原理

再来分析一下旋转运动模糊的退化机理.若只考虑某一条圆弧上的图像像素模糊退化模型,该圆弧即为一模糊路径,若该圆弧半径为 r ,曝光时间为 T ,旋转角速度为 ω ,则模糊角度 $\theta = \omega T$,则退化图像 $g(x, y)$ 是 T 时间内的积分:

$$g(x) = \frac{1}{T} \int_0^T f(x - x_0(t), y - y_0(t)) dt.$$

表示为极坐标形式为

$$g(r, \theta) = \frac{1}{T} \int_0^T f(r, \theta - \omega t) dt.$$

式中: $x_0(t) = r \cos(\omega t)$, $y_0(t) = r \sin(\omega t)$.

令 $l = r\theta$, $s = r\omega t$,并将 r 表示为下标形式,则有

$$g_r(l) = \frac{1}{N_r} \int_0^{N_r} f_r(l - s) ds.$$

整理得

$$g_r(l) = f_r(l) * h_r(l).$$

令 $a_r = 2\pi T$,则

$$h_r(l) = \begin{cases} 1/a_r, & 0 \leq l \leq a_r; \\ 0, & a_r \leq l \leq 2\pi r. \end{cases}$$

这就是旋转模糊运动的数学模型.

2 算法描述

运动模糊参数估计的关键是建立正确的模糊系统模型.

2.1 直线运动模糊参数估计算法

模糊方向和模糊尺度是直线运动模糊的2个重要参数.

由于传输函数零点的存在,可推知模糊图像的频谱上有一系列的平行暗条纹,并且条纹的位置一一对应于各零点.由图像的运动分析可知运动方向垂直于这些暗条纹. Paul Hough 于 1962 年提出的 Hough 变换属于特征提取技术,最初只是用于二值图像直线检测,后来扩展到圆等任意形状的检测. Hough 变换的基本原理在于利用点与线的对偶性,将原始图像空间中的给定曲线变为参数空间的一个点.这样就将原始图像中给定曲线的检测问题转化为寻找参数空间中的峰值问题^[10].

运用边缘检测算子可以检测出灰度或者二值图像的边界,在经过实验比较以后,发现 canny 算子能够很好地检测出运动模糊频谱的边缘,它检测的方法是使用2个阈值来寻找图像梯度的局部最大值^[11].

基于上述分析,对原图像进行傅里叶变换所得

的图像,取其模值的对数.由于傅里叶变换的叠加性,同样可见在垂直于 θ 的方向有2条亮线,对图像进行 canny 算子边缘提取,得到二值化的2条直线如图3所示.再利用 Hough 变换检测直线的方向即可得运动模糊图像的相对运动方向 θ ,两直线间的距离即为2倍的模糊尺度 s .求得的点扩散函数 $h(x, y)$ 如图4所示.

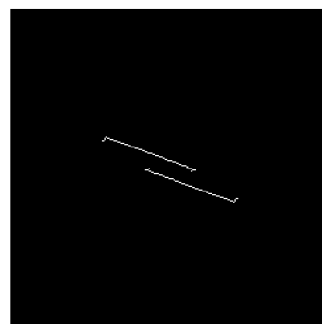


图3 Canny 算子边缘提取结果

Fig.3 Edge extracted by canny operator

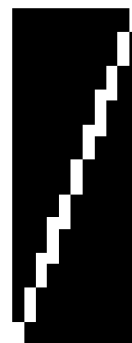


图4 直线运动模糊的点扩散函数

Fig.4 PSF path of linear motion blur parameter

邹谋炎在文献[12]中提出误差-参数分析法,当参数从大到小变化时,误差参数曲线在真正参数附近的变化率显著变小,据此可得参数的估计值.

根据上述2种思想,可以根据 Hough 变换的方法来确定退化参数的大概范围,然后再利用误差-参数法来进一步确定,根据图像恢复质量的优劣来确定最优解,以下是程序算法步骤:

1)首先对直线运动模糊图像进行对数傅里叶变换得到 G_1 ;

2)用 canny 算子提取 G_1 边缘得到 G_2 ,通过 Hough 变换检测 G_2 图中直线的方向,即为模糊方向 θ ;

3)对 G_2 进行 θ 角度旋转,然后将所有像素向水平轴上投影,得到曲线相邻极小值之间的距离即为条纹宽度 s ;

4)将 $s \pm 5$ 作为搜索范围,选定迭代步长.
for $i = 1:10$

$$\alpha = \alpha_0 + (i - 1) \Delta \alpha,$$

由参数 α 产生点扩散函数 h , 用维纳滤波复原算法, 由 h 和观测图像 y 确定图像 x ,

计算复原误差 $E = \|y - h * x\|^2$,

end;

5) 作出 $E-\alpha$ 曲线, 由此判定实际点扩散函数的参数值 α , 进而获得实际的点扩散函数.

2.2 旋转运动模糊参数估计算法

旋转运动模糊的 2 个参数为旋转运动中心和旋转运动角度. 同样地, 根据边缘提取的方法, 提取旋转运动模糊的模糊圆弧, 然后根据 3 种不同的方法^[13]来找圆弧, 估计出旋转运动的圆心, 并用聚类方法确定最后的估计结果, 最后根据 bresenham 画圆结合极坐标转换方法算出旋转运动角度, 从而确定退化模糊参数.

具体操作如下:

1) 首先对旋转运动模糊图像进行边缘提取.

2) 挑出规则的候选圆弧段, 用三点找圆心法、Hough 变换法和最小二乘拟合 3 种方法. 分别对每一段候选圆弧进行拟合并求出圆心参数, 最后对所有得到的参数进行聚类并用类心作为旋转中心的估计结果.

3) 将图像由极坐标系转换为直角坐标系, 利用 bresenham 画圆算法提取像素点, 对每行相对空间不变模糊的情况下进行直线运动模糊估计确定 $s, s/r$ 作为 θ 的初始值, 根据 θ 来确定退化的点扩散函数.

4) 将 $\theta \pm 5$ 作为搜索范围, 选定迭代步长 0.5° .
for $i = 1:10$

$$\theta = \theta_0 + (i-1) \Delta\theta,$$

由参数 θ 产生点扩散函数 h , 用维纳滤波复原算法, 由 h 和观测图像 y 确定图像 x ,

计算复原误差 $E = \|y - h * x\|^2$,

end.

5) 作出 $E-\alpha$ 曲线, 由此判定实际点扩散函数的参数值 α , 进而获得实际的点扩散函数.

3 实验结果与分析

3.1 直线运动模糊参数估计仿真实验

为了验证算法的效果, 选取一张 256×256 的 8 位灰度级的 lena 图像作为测试图像. 直线运动模糊选取的参数为模糊角度为 70° , 模糊尺度为 30 个像素. 图 5 显示的是实际模糊参数为 $(30, 70^\circ)$ 的直线运动模糊 Lena 图像及其频谱. 图 6 是不同直线运动模糊参数恢复出的图像的 PSNR 值曲面图.

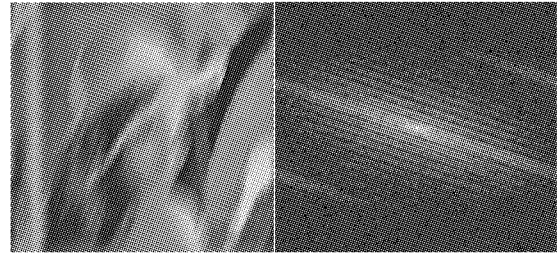


图 5 直线运动模糊图像及其对数频谱

Fig.5 Linear motion blur image with frequency spectrum

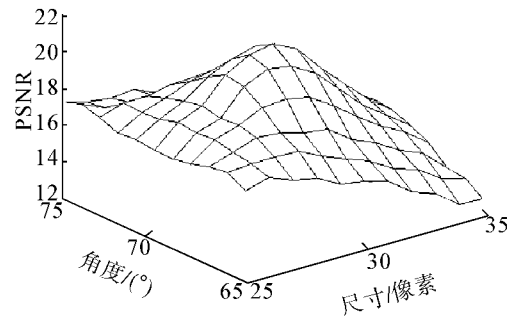


图 6 不同直线运动模糊参数恢复出的 PSNR 曲面

Fig.6 PSNR curved surface restored by different linear motion blur parameters

表 1 显示的是针对不同直线运动模糊参数, 本文算法和 Yizhaky 提出的传统频域方法识别得到的估计结果对比.

表 1 直线运动模糊参数随机抽测样本

Table 1 Results of parameter detection

实际参数	传统频域估计	本文算法
(10, -70)	(12, -69)	(10, -70)
(15, -60)	(16, -61)	(14, -60)
(20, -50)	(19, -50)	(20, -50)
(25, -40)	(24, -39)	(24, -40)
(30, -30)	(31, -31)	(30, -30)
(35, -20)	(33, -20)	(34, -20)
(40, -10)	(37, -10)	(39, -10)
(45, 10)	(43, 11)	(44, 10)
(40, 20)	(42, 20)	(40, 20)
(35, 30)	(34, 30)	(34, 30)
(30, 40)	(31, 40)	(30, 40)
(25, 50)	(24, 50)	(25, 50)
(20, 60)	(21, 59)	(20, 60)
(15, 70)	(15, 71)	(15, 70)
(10, 80)	(9, 82)	(9, 81)

图 7 为利用本算法检测出模糊参数后进行维纳滤波恢复后的图像.

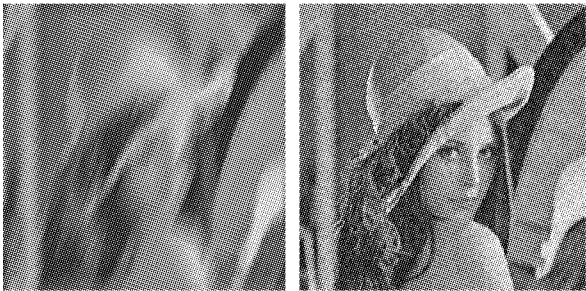


图 7 $s=30, q=70$ 运动模糊及其恢复图像
Fig.7 Linear motion blur image with $s=30, q=70$

3.2 旋转运动模糊参数估计仿真实验

旋转运动模糊选取的仿真实验参数为圆心在图片中心即(128,128),旋转角度为 20°.

图 8 是实际模糊参数为((128,128),20°)的旋转运动模糊图像及其频谱. 图 9 是 canny 算子进行边缘提取后的结果. 图 10 是不同旋转角度恢复出的图像的 PSNR 值曲线图(20°对应最高 PSNR,即为估计出的旋转运动角度). 表 2 给出的是不同拟合方法得到的旋转圆心坐标. 图 11 是利用表 2 估计出的旋转运动圆心坐标和图 10 估计出的旋转角度,最后按极坐标重新排列得到的恢复结果图.

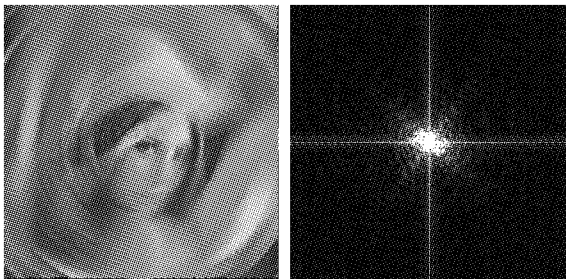


图 8 旋转运动模糊图像及其频谱
Fig.8 Rotation blur image and its frequency spectrum

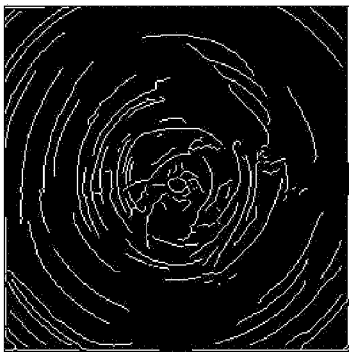


图 9 Canny 算子提取结果
Fig.9 Edge extracted by canny operator

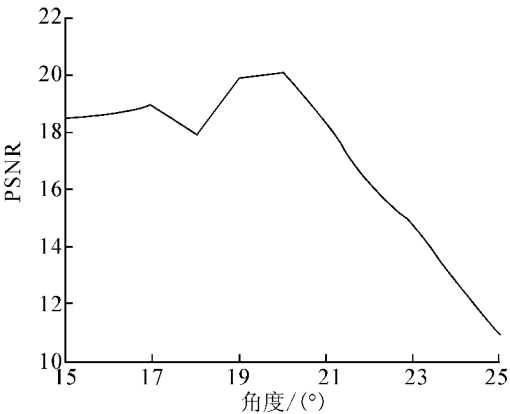


图 10 不同旋转运动模糊参数恢复出的 PSNR 曲线
Fig.10 PSNR curve corresponding to different rotate motion blur parameters

表 2 旋转运动模糊圆心随机抽测样本

Table 2 Results of parameter detection

实际圆心	几何平均值拟合	Hough 变换拟合	最小二乘拟合
(80,40)	(83,39)	(75,42)	(81,40)
(128,128)	(126,132)	(124,126)	(129,127)
(150,100)	(148,104)	(153,96)	(150,99)
(170,150)	(168,148)	(165,144)	(171,150)
(200,200)	(198,201)	(205,202)	(201,200)



图 11 ((128,128),20°)运动模糊及其恢复图像
Fig.11 Rotation blur image with ((128,128),20°)

以上 2 组测试数据表明,本文算法在大多数情形下都能准确估计出运动模糊参数,相比传统意义上的频域方法效果更好,而且步骤也并不复杂多少. 对于大模糊尺度下如何进行恢复是个病态问题,原因是大模糊尺度(如 45 个像素以上模糊)会使图像丢失很多信息,诸如边界像素等.

4 结束语

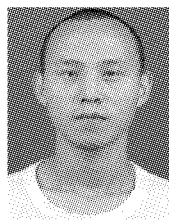
通过对不同运动形式的运动模糊图像的退化模型进行数学分析,根据不同运动模糊图像的特点,提出了自适应的模糊参数检测方法. 通过对多幅图像不同运动模糊参数测试的实验证明,该方法可以便捷有效地估计出中小尺度运动模糊图像的模糊参数,能真实反映实际运动模糊参数,并且恢复效果良

好. 要在大模糊尺度下进行参数估计, 只需改变参数变化范围. 但不可避免地, 由于大模糊尺度下的运动模糊, 导致信息的过多损失, 不仅计算量会增加, 而且估计出的模糊参数结果远远不如小模糊尺度准确, 有兴趣的读者可以利用本文算法一试, 这是以后作者要改进和解决的一个方向.

参考文献:

- [1] WIENER N. Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series[M]. New York: Wiley, 1949: 2-15.
- [2] WILLIAM H R. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(1): 55-59.
- [3] RAVACHA A, ANDPELEG S. Two motion blurred images are better than one[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26: 311-317.
- [4] YUAN L, SUN J, QUAN L, et al. Image deblurring with blurred noisy image pairs[J]. ACM Trans Graphics, 2007, 26(3): 1-10.
- [5] BENEZRA M, ANDNAYAR, S. K. Motion-based motion deblurring[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(6): 689-698.
- [6] RASKAR R, AGRAWAL A, ANDTUMBLIN J. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 95-804.
- [7] HUNT B R, CANNON T M. Nonstationary assumptions of Gaussian models of images[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybern, 1976, 2: 876-882.
- [8] YITZHAKY Y, KOPEIKA N S. Identification of blur parameters from motion blurred images[J]. Graphical Models and Image Processing, 1997, 59(5): 321-332.
- [9] JACK E. BRESENHAM. Algorithm for computer control of a digital plotter[J]. IBM Systems Journal, 1965, 4(1): 25-30.
- [10] DUDA R O, HART P E. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. Communications of the ACM, 1972, 15: 11-15.
- [11] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [12] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 200-202.
- [13] ALDRICH J. Doing least squares: perspectives from Gauss and Yule[J]. International Statistical Review, 1998, 66(1): 61-81.

作者简介:



王伟,男,1987年生,博士研究生,主要研究方向为图像处理与算法设计.



郑津津,男,1963年生,博士生导师,教授,主要研究方向为计算机辅助微加工误差仿真、细分曲面造型方法理论、基于图像的曲面重构、基于散乱数据的曲面重构、太阳光帆仿真理论、基于多边形曲面的曲面造型与纹理映射等.



刘星,男,1988年生,硕士研究生,主要研究方向为图像视频分析.