

文章编号 1004-924X(2007)02-0289-05

# 基于非线性扩散滤波的边缘检测和图像测量

付树军<sup>1, 2</sup>, 阮秋琦<sup>2</sup>, 穆成坡<sup>3</sup>, 王文洽<sup>1</sup>

(1. 山东大学 数学与系统科学学院, 山东 济南 250100; 2. 北京交通大学  
信息科学研究所, 北京 100044; 3. 北京理工大学 宇航科学技术学院, 北京 100081)

**摘要:**提出了一种基于自适应非线性扩散方程滤波的边缘检测方法,以提高图像测量的精度。首先对原始图像实施一种非线性扩散处理,即沿着等照度线(边缘)的梯度方向实施反向扩散以锐化边缘,而相反地沿切线方向实施正向扩散以去除噪声和锯齿伪像;然后应用经典的微分算子来检测边缘。实验结果表明,相对于经典的边缘检测算子,本算法得到了尖锐而平滑的单像素宽的图像边缘,较好地定位了边缘,相对误差为 0.03。当图像边缘模糊和存在附加噪声时,测量结果将会受到很大影响。本方法较好地定位了边缘像素,对于微小尺寸测量显示出它的优越性。

**关键词:**图像测量;边缘检测;边缘锐化;双向扩散

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A

## Edge detection for image measurement based on nonlinear diffusion filtering

FU Shu-jun<sup>1, 2</sup>, RUAN Qiu-qi<sup>2</sup>, MU Cheng-po<sup>3</sup>, WANG Wen-qia<sup>1</sup>

(1. *School of Mathematics and System Sciences, Shandong University, Jinan 250100, China;*  
2. *Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;*  
3. *School of Aerospace Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** Image measurement technique is a new developing method in the non-contact measurement and instrument fields. In this paper, an adaptive nonlinear flow equation process is presented to improve the measurement precision. First, an inverse diffusion is performed to sharpen edges along the normal directions to the isophote lines (edges), while a normal diffusion is done to remove noise and artifacts ("jaggies") along the tangent directions. Then, classical differential operator is employed to detect image edges. With a better edge location, experimental results show that sharper and smoother edges with one pixel are obtained in a relative error of 0.03. The method also shows its advantages in the minuteness measurement for a better edge location. In the case of blurry edges and additional noise in the image, the measurement results would be worse.

**Key words:** image measurement; edge detection; edge sharpening; bidirectional diffusion

收稿日期:2006-09-30;修订日期:2006-12-14.

基金项目:山东省自然科学基金(No. Y2006G08);中国科学院自动化所模式识别国家重点实验室开放课题基金;北京交通大学专项研究(No. 48109);山东大学数学与系统科学学院面上科研基金(No. 306002)

## 1 引言

图像测量是一种基于现代光学的先进的非接触测量技术,它将自动化、光电子、数字图像处理、信号处理和计算机视觉等技术融为一体。当进行物体测量时,图像测量系统通过某种方式获取物体的图像,探测并转换其中的测量信息,然后利用有效的计算达到测量目的。图像测量主要包括照相测量,光学测量和图像传感器测量,它广泛应用于物体表面检测,工业监控和生物医学工程等领域<sup>[1-5]</sup>。

电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)由于具有自我扫描,高分辨率,高灵敏度,结构紧凑和精确的像素定位等特性,在很多工业非接触测量领域得到广泛应用。随着计算机技术的普及,采用 CCD 器件,计算机数据存储,光学成像和自动化机械的图像测量系统得到大力的发展,它将光学、机械、电子和计算机等多种技术结合为一体,能够有效地实施数据采集,存储和处理,并自动实现图像测量。一个典型的 CCD 图像测量系统是:计算机接收来自 CCD 照相机采集的工件图像信息,然后进行图像处理,最后经过测量和计算,通过计算机将测量结果显示和打印出来。

图像测量仪器是一种基于计算机视觉的系统,它由硬件和软件两部分组成。为了满足日益增长的工业和生产的需求,需要不断地提高图像测量系统的精确性。提高硬件部分的性能以改善图像测量系统的精确性,不但增加了设备的成本,而且有时并不可行。应用数值算法和软件方法提高图像测量系统的精确性,不但实现简单,而且花费很少。因此,图像数值处理是高精度图像测量系统中的一个重要组成部分。

边缘检测是保证测量系统具有高精度的关键<sup>[6]</sup>。传统的边缘检测方法多数基于经典的微分算子,例如“Sobel”,“Roberts”,“Prewitt”和“Zerocross”等等<sup>[7]</sup>。然而,通过成像设备获取的图像的边缘并不总是尖锐的。如果摄像机聚焦不准,或者在摄像机和被测工件之间存在相对运动,图像边缘就会模糊。同时,成像过程中的附加噪声是不可避免的。这些因素都会导致基于经典的微分算子的测量结果效果不好。

本文提出了一个自适应的非线性扩散方程滤波用于边缘检测:首先,利用非线性扩散方程处理图像,锐化图像边缘并平滑图像轮廓;然后,利用经典的微分算子检测边缘。在文章的第二部分,从对一些基于偏微分方程(PDEs)模型的图像增强方法的研究中,提出了一个统一的双向扩散(BiDirectional Flow, BDF)框架。这个框架沿着等照度线(边缘)的梯度方向实施反向扩散以锐化边缘;而相反地沿切线方向实施正向扩散以去除人工伪像(例如锯齿状图形等)和噪声。第三部分,将统一的双向扩散应用于图像增强。为了保持图像特征,利用图像的一阶和二阶方向导数来适当地设计非线性扩散系数。第四部分,实现提出的算法并用于测试实际图像。第五部分,给出最后的结论。

## 2 非线性双向扩散方程

在过去的十几年中,偏微分方程(PDEs)在图像处理中得到了很大的发展<sup>[8-11]</sup>。由 P. Perona 和 J. Malik 提出的非线性各向异性扩散滤波器<sup>[12]</sup>被广泛地应用于图像去噪,增强和边缘锐化。假设图像  $u(x, y, t): \Omega \times [0, +\infty) \rightarrow R$  按照以下方程扩散:

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}(g(|\nabla u(x, y, t)|) \nabla u(x, y, t)) \quad (1)$$

其中标量扩散系数  $g(|\nabla u|)$  被选择为一个非增函数,控制扩散方程的行为。

基于反向热扩散方程,何金国等<sup>[13]</sup>提出了一个反向各向异性扩散方程的锐化边缘,他们选取下面负值的扩散函数:

$$g(|\nabla u|) = -1/(1+(|\nabla u|/K)^2), \quad (2)$$

将这个模型解释为图像的“灰量”从低灰度区到高灰度区流动,这使得低灰度区灰度变得更低,高灰度区灰度变得更高,从而达到图像锐化的目的。

G. Gilboa 等<sup>[14]</sup>提出了另一个基于 PDE 的前向和后向(Forward-And-Backward, FAB)自适应扩散增强方法。他们按照图像梯度将扩散过程从前向扩散转变为后向(逆向)扩散,从而在局部平滑信号和图像平坦部分的同时,增强它们的重要特征。与式(2)不同,他们选取下列扩散

系数:

$$g(s) = 1 / (1 + (s/k_f)^n) - \alpha / (1 + ((s-k_b)/\omega)^{2m}), \quad (3)$$

这里选取参数 $(k_f, k_b, \omega)$ 和 $(n, m)$ 使得模型实施一个前向扩散( $g(s) > 0$ )以平滑低梯度部分,而实施一个后向扩散( $g(s) < 0$ )以增强高梯度部分。

基于前面的讨论,本文提出一个统一的双向扩散(BiDirectional Flow, BDF)方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha(-c_n(s)u_m) + \beta(c_t(s)u_n), \quad (4)$$

带有诺曼边界条件,这里 $\alpha, \beta$ 是反向和正向扩散控制系数, $c_n(s), c_t(s)$ 是带有参数的扩散系数,它们需要适当地设计以保持图像的特征,例如边缘、角点和细节。这个方程需要两个相反的扩散力同时作用于图像:一个力是反向力,沿着方向 $n$ 锐化边缘;另一个力是正向力,沿着切线方向 $t$ 抑制人工锯齿、振荡和噪声以平滑轮廓。

### 3 特征驱动的扩散系数

本文进一步扩展基于非线性 PDE 的扩散方法,并将其用于图像测量。这个方法分为两个步骤:首先,利用非线性扩散方程处理图像,锐化图像边缘并平滑图像轮廓;然后,利用经典的微分算子检测边缘。重要的是,本文详细讨论对于扩散系数和的设计,以适当地保持图像特征。

#### 3.1 后向扩散

在文献[14]中,FAB 方程按照图像的局部梯度选择性地实施前向和后向扩散。不同的是,BDF 方程沿着图像等值线的切线和法线方向分别实施前向和后向扩散,这可以更加清晰有效地控制扩散行为和锐化图像边缘。

在实验中,当将 FAB 方程应用于图像时,发现边缘上会出现过冲或振铃效应。因此,只利用梯度信息决定扩散速度 $c_n(s)$ 并不可行。因为反向扩散意味着“流动远离于局部均值”—这表现为随着迭代时间的增加,图像的灰度值在过冲点以越来越大的速度过冲,所以加入二阶法向导数信息以抑制这个灾难:

$$c_n(s) = 1 / (1 + l_1 u_m^2), \quad (5)$$

这里 $l_1$ 是个常数。

#### 3.2 前向扩散

图像边缘的定位时常受图像噪声和伪像的影响。本文利用沿着切线方向的前向扩散消除这种不利影响。因为前向扩散意味着“流动靠近于局部均值”,式(4)实施对于水平集曲线的切向平滑。由于沿着切线方向, $u_n$ 的值在角点处相比在边缘点处大很多,于是把二阶切向导数加入到 $c_t$ 以阻止对于角点的过度平滑:

$$c_t(s) = 1 / (1 + l_2 u_n^2), \quad (6)$$

这里 $l_2$ 是个常数。

## 4 实验结果

本文利用中心差分的显式欧拉方法实现数值计算。图1显示的是来自 CCD 照相机的一个简单工件图像。本文选取参数为: $[l_1, l_2] = [9 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}]$ , $[\alpha, \beta] = [2.5, 1.2]$ 。

原始图像的边缘是模糊的,同时图像被附加的噪声污染。首先利用非线性 BDF 扩散锐化边缘并平滑图像轮廓;然后,利用微分算子“Zero-cross”检测边缘。在图1中,(a)和(b)是原始图像和它的梯度幅值图;(c)和(d)是经过本文方法的处理结果和它的梯度幅值图。可以看出图像结果具有尖锐的边缘,噪声也被去除了。从梯度幅值图(b)和(d)也可看出,本文方法产生了更高的梯度幅值和更窄的梯度幅值曲线,这对于边缘检测和定位是非常有利的。图(e)、(f)、(g)和(h)分别是基于经典的微分算子“Sobel”,“Roberts”和“Prewitt”对于原始图像的边缘检测结果和本文方法的边缘检测结果。可以看出,基于算子“Sobel”和“Prewitt”检测的图像边缘不光滑,边缘定位不准确;基于算子“Roberts”检测的边缘虽然光滑,但是边缘太宽,大约2~3 pixel。而本文方法检测的边缘光滑,只有1 pixel,这非常适合于边缘定位和图像测量。

同时,本文对处理结果进行了定量分析。原始图像的边缘曲线包含了517个像素点,四种边缘检测结果包含的正确的像素点分别为:455个(Sobel),464个(Roberts),451个(Prewitt),503个(本文方法)。相应的相对误差分别为:0.12, 0.10, 0.13 和 0.03。

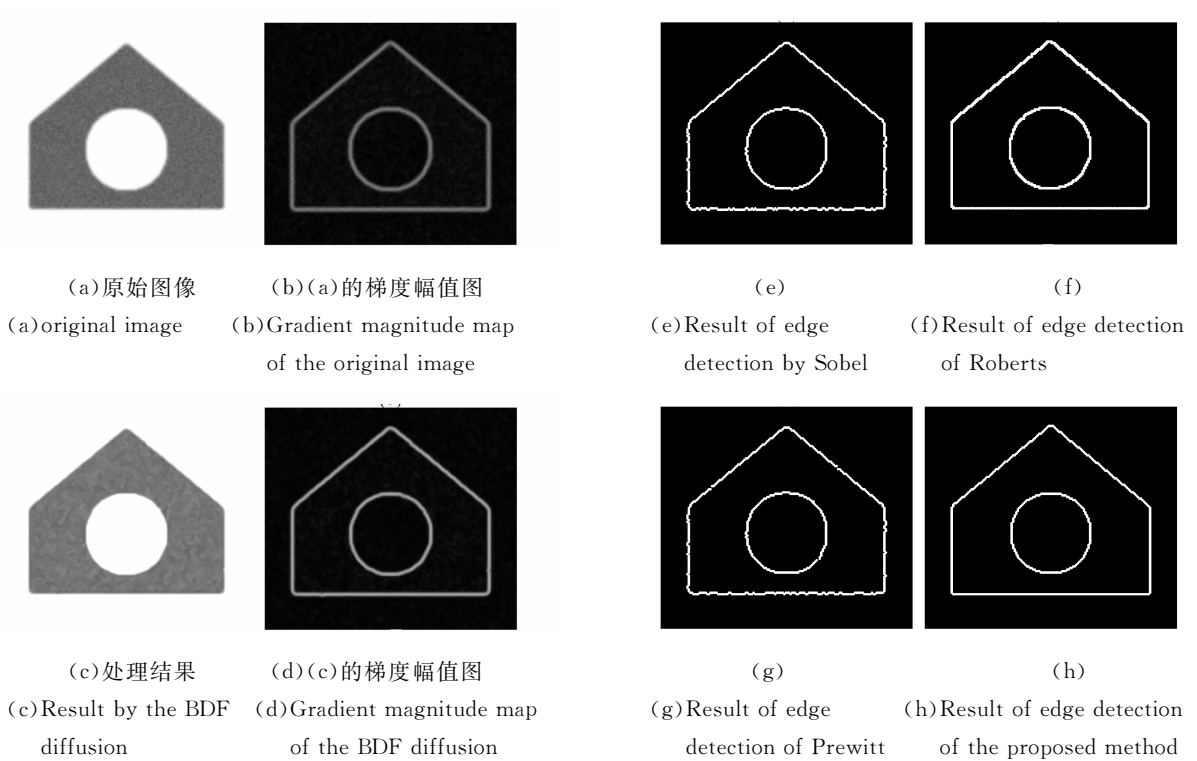


图 1 BDF 扩散方程处理原始图像和边缘检测比较

Fig. 1 Comparison between original image and edge detection of BDF diffusion process

## 5 结 论

本文提出了一个自适应地保持特征的非线性扩散方程滤波用于边缘检测和图像测量。这个方

法不但能够有效地锐化图像边缘,而且能够平滑图像轮廓。实验结果显示,该方法应用于边缘检测,获得了尖锐而平滑的单像素宽的边缘,能够较好地定位边缘,相对误差为 0.03,并且对于微小尺寸测量显示出它的优越性。

## 参考文献:

- [1] 吴晓波,杨永琴. 图像测量技术的新应用[J]. 光学精密工程, 1998, 6(3): 10-15.  
WU X B, YANG Y Q. New applications of image measurement technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(3): 10-15. (in Chinese)
- [2] HASHIMOTO T, MURAI S. Traffic flow measurement by video image processing[J]. *SPIE*, 1990, 1395: 802-808.
- [3] TANG S H, HUANG Y Y. Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1990, 29(20): 3012-3018.
- [4] 叶东,刘长英,车仁生,等. 基于遗传算法的像机虚拟立体校准技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 485-489.  
YE D, LIU C Y, CHE R S, et al.. Dummy solid camera calibration technology using genetic algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 485-489. (in Chinese)
- [5] 王建军,王颖. 光栅法在船体横扭角测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 371-375.  
WANG J J, WANG Y. Application of raster metering to hull transverse twist measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 371-375. (in Chinese)
- [6] 王德强,谢常青,叶甜春. 用于 X 射线光刻对准的图像边缘增强技术[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 426-431.

- WANG D Q, XIE C Q, YE T C. Image edge enhanced technique for X-ray lithography alignment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 426-431. (in Chinese)
- [7] CASTLEMAN K R. *Digital image processing*[M]. Prentice Hall, 1995.
- [8] AUBERT G, KORNPROBST P. *Mathematical problems in image processing: partial Differential equations and the calculus of variations*[M]. Springer-Verlag, Applied Mathematical Sciences, 2001.
- [9] OSHER S J, RUDIN L I. Feature-oriented image enhancement using shock filters[J]. *SIAM J. Numer. Anal.*, 1990, 27: 919-940.
- [10] ALVAREZ L, MAZORRA L. Signal and image restoration using shock filters and anisotropic diffusion[J]. *SIAM J. Numer. Anal.*, 1994, 31(2): 590-605.
- [11] 付树军, 阮秋琦, 王文洽. 基于特征驱动的双向耦合扩散方程的图像去噪和边缘锐化[J]. *光学精密工程*, 2006, 12(2): 315-319.  
FU S J, RUAN Q Q, WANG W Q. A feature-oriented coupled bidirectional flow equation for image denoising and edge sharpening[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 12(2): 315-319. (in Chinese)
- [12] PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1990, 12(7): 629-639.
- [13] 何金国, 石青云, 黄克勤. 一个基于各向异性的热传导方程导出的图像锐化算子[J]. *计算机研究与发展*, 2000, 37(6): 692-696.  
HE J G, SHI Q Y, HUANG K Q. An image enhancement method designed by a new anisotropy diffusion equation[J]. *J. Comput. Res. Dev.*, 2000, 37(6): 692-696. (in Chinese)
- [14] GILBOA G, SOCHEN N, ZEEVI Y Y. A forward and backward diffusion process for adaptive image enhancement and denoising[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2002, 11(7): 689-703.

**作者简介:**付树军(1968—),男,山东济南人,山东大学数学与系统科学学院讲师,北京交通大学信息科学研究所在读博士研究生,研究方向为图像处理,偏微分方程,小波分析;E-mail:shujunfu@163.com  
阮秋琦(1944—),男,北京交通大学信息科学研究所所长,教授,博士生导师,研究方向为图像处理,视频编码,计算机视觉,虚拟现实;  
穆成坡(1964—),男,北京理工大学宇航科学技术学院副研究员,硕士生导师,研究方向为智能化网络安全,后入侵检测技术;  
王文洽(1950—),男,山东大学数学与系统科学学院教授,博士生导师,研究方向为偏微分方程数值解。