

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 7
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年7月 第17卷 第7期(总第195期)

目次

综述

中国多媒体技术研究: 2011 史元春, 徐光祐, 高原(741)

图像处理和编码

图像引导滤波的局部多尺度 Retinex 算法 方帅, 杨静荣, 曹洋, 武鹏飞, 饶瑞中(748)

基于第一主成分方向稳定性的图像零水印 付剑晶, 王珂(756)

小波变换估计非线性扩散最优停止时间 蒋平, 张建州(770)

图像分析和识别

改进的 Beamlet 与 Canny 相结合提取复杂图像线特征 曾接贤, 周沥沥, 符祥(775)

动静态信息融合及动态贝叶斯网络的步态识别 杨旗, 薛定宇(783)

融合音频单词与视觉特征的成人视频检测 刘毅志, 唐胜, 王向东, 林守勋, 张勇东(791)

基于平面区域跟踪的目标位姿参数自动测量 回丙伟, 文贡坚, 赵竹新, 钟金荣(798)

3 维图像中边界曲面的分类追踪及抽取 丁德福, 程柳航, 王利生(806)

局部时空域模型的核密度估计目标检测方法 王兴宝, 刘纯平, 费兰英, 王朝晖, 季怡(813)

基于相位谱和调谐幅度谱的显著性检测方法 李崇飞, 高颖慧, 卢凯, 曲智国(821)

图像理解和计算机视觉

“目标-场景”语境关联的生成图模型分析 谢昭, 李姍琦, 高隼(828)

融合上下文信息的场景结构恢复 武晖, 于昕, 隋尧, 张利(839)

带有局部控制因子的图割光流估计 路子赟, 唐土生, 高隼, 沈琳, 刘伟(846)

改进的 Harris 亚像素角点快速定位 何海清, 黄声享(853)

计算机图形学

应用最小生成树实现点云分割 孙金虎, 周来水, 安鲁陵(858)

医学图像处理

病毒进化的离散差分进化超声图像特征选择 张巧荣, 朱长明, 倪军, 刘海波(866)

分水岭优化的 Snake 模型肝脏图像分割 兰红, 张璐(873)

遥感图像处理

Normalized Cut 与分水岭变换在高光谱影像混合像元端元提取中的应用 许菡, 李小娟(880)

改进非局部均值滤波的 SAR 图像降噪方法 郑永恒, 程建, 曹宗杰(886)

~~~~~  
第四届国际遥感考古会议 ..... (892)

**中国图象图形学报**

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 7 期

2012 年 7 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院  
**主 办** 中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所  
**主 编** 李小文  
**编辑出版** 《中国图象图形学报》编辑出版委员会  
北京 9718 信箱 邮编 100101  
电子信箱:jig@irsa.ac.cn  
电话:010-64807995 010-82614429  
网 址:www.cjig.cn  
**印刷装订** 北京北林印刷厂  
**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号  
**总 发 行** 北京报刊发行局  
**订 购** 全国各地邮局  
**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
(中国国际书店)  
(北京 399 信箱 邮编 100044)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences  
**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
CAS China Society of Image and Graphics  
Institute of Applied Physics and Computational  
Mathematics  
**Chief editor** LI Xiaowen  
**Editor, Publisher** Editorial and Publishing Board  
of Journal of Image and Graphics  
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)  
E-mail:jig@irsa.ac.cn  
**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
and Journals  
**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)  
**Printed by** Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 7 July 2012

## Contents

### Review

Researches on multimedia technology in China, 2011 ..... Shi Yuanchun, Xu Guangyou, Gao Yuan (741)

### Image Processing and Coding

Local multi-scale Retinex algorithm based on guided image filtering  
..... Fang Shuai, Yang Jingrong, Cao Yang, Wu Pengfei, Rao Ruizhong (748)

Image zero-watermark based on direction stability of first principal component vector ..... Fu Jianjing, Wang Ke (756)

Stopping-time estimation for anisotropic diffusion using discrete wavelet transform ..... Jiang Ping, Zhang Jianzhou (770)

### Image Analysis and Recognition

Complex image line feature extraction based on improved Beamlet transform and the Canny operator  
..... Zeng Jiexian, Zhou Lili, Fu Xiang (775)

Gait recognition based on dynamic & static information fusion and dynamic bayesian network ..... Yang Qi, Xue Dingyu (783)

Fusing audio-words with visual features for adult video detection  
..... Liu Yizhi, Tang Sheng, Wang Xiangdong, Lin Shouxun, Zhang Yongdong (791)

Automatic measurement for an object's position and attitude via tracking planar regions  
..... Hui Bingwei, Wen Gongjian, Zhao Zhuxin, Zhong Jinrong (798)

Detection and extraction of boundary surface patches within 3D images ..... Ding Defu, Cheng Liuhang, Wang Lisheng (806)

Foreground object detection method using kernel density estimation of a local spatio-temporal model  
..... Wang Xingbao, Liu Chunping, Fei Lanying, Wang Zhaohui, Ji Yi (813)

Saliency detection method based on phase spectrum and amplitude spectrum tuning  
..... Li Chongfei, Gao Yinghui, Lu Kai, Qu Zhiguo (821)

### Image Understanding and Computer Vision

"Object-Scene" contextual associated generative graph model analysis ..... Xie Zhao, Li Shanqi, Gao Jun (828)

Structure recovery algorithm using contextual information ..... Wu Hui, Yu Xin, Sui Yao, Zhang Li (839)

Graph cut optical flow estimation with a local control factor ..... Lu Ziyun, Tang Tusheng, Gao Jun, Shen Lin, Liu Wei (846)

Improved algorithm for Harris rapid sub-pixel corners detection ..... He Haiqing, Huang Shengxiang (853)

### Computer Graphics

Research on point cloud segmentation using a minimum spanning tree ..... Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling (858)

### Medical Image Processing

Virus-evolutionary discrete differential evolution algorithm for feature selection of cervical lymph nodes in ultrasound images  
..... Zhang Qiaorong, Zhu Changming, Ni Jun, Liu Haibo (866)

Liver image segmentation algorithm based on the Snake model And optimized by watershed transformation  
..... Lan Hong, Zhang Lu (873)

### Remote Sensing Image Processing

Endmember extraction for hyperspectral image based on normalized cut and watershed transformation  
..... Xu Han, Li Xiaojuan (880)

SAR image denoising via improved non-local means filter ..... Zheng Yongheng, Cheng Jian, Cao Zongjie (886)

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)07-0775-08

论文引用格式: 曾接贤,周沥沥,符祥. 改进的 Beamlet 与 Canny 相结合提取复杂图像线特征[J]. 中国图象图形学报,2012,17(7):775-782.

# 改进的 Beamlet 与 Canny 相结合提取复杂图像线特征

曾接贤<sup>1</sup>, 周沥沥<sup>2</sup>, 符祥<sup>1</sup>

1. 南昌航空大学软件学院, 南昌 330063; 2. 南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330063

**摘要:** 传统 Beamlet 无结构算法在提取图像线特征时不仅存在重叠模糊的缺陷, 而且在提取复杂图像线特征时不能有效地检测出目标信息, 细节特征更是难以刻画。针对这些问题, 提出将改进的 Beamlet 无结构算法与 Canny 算子相结合的方法提取复杂图像的线特征。首先, 对图像进行 Beamlet 变换, 通过改进 Beamlet 无结构算法, 采用新的能量统计和制定新的划线规则, 以保证每个二进方块最多有一条最优基; 然后, 对图像用 Canny 算子检测边缘, 通过选取较大的 Sigma, 只检测明显的大边缘; 最后, 两者结合得到图像的线特征。从检测的线特征的线型连接程度等方面对该算法的性能进行了评价, 并与现有的方法进行了比较, 实验结果表明, 该方法克服了两种方法单独提取线特征时存在的断裂、重叠、模糊和虚假边缘的缺点, 有效地提高了复杂图像线特征提取的准确性和连续性。

**关键词:** Beamlet 变换; Canny 算子; 复杂图像; 线特征提取

## Complex image line feature extraction based on improved Beamlet transform and the Canny operator

Zeng Jiexian<sup>1</sup>, Zhou Lili<sup>2</sup>, Fu Xiang<sup>1</sup>

1. School of Software, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 33006, China

**Abstract:** Traditional line feature detection methods based on structureless algorithms of the Beamlet transform not only suffer from overlapping and ambiguities, they also can not detect the target information effectively. Moreover, they can not describe the detail information when extracting the line features of a complex image. Therefore, we propose a new line feature extraction algorithm based on an improved Beamlet transform and the Canny operator. First, the Beamlet transform is performed. There is at most one optimal Beamlet in a dyadic square after improving the Beamlet structureless algorithm and using the new drawing rule and the new energy function. Second, the Canny operator for edge detection is used with a larger Sigma in order to detect only obvious edges. Finally, line feature are detected by a combination of both. The algorithm is evaluated under several aspects, such as the continuity of the line feature extraction, the false detection rate and the miss detection rate. Moreover, this method is compared to existing methods. The experimental results show that our proposed method not only overcomes their weakness such as fracturing, overlapping, ambiguities, false edges and so on, but also effectively improves the accuracy and continuity when extracting line feature of complex image.

**Key words:** Beamlet transform; Canny operator; complex image; line feature extraction

收稿日期: 2011-07-26; 修回日期: 2012-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61165011); 江西省自然科学基金项目(2008GZS0034); 航空科学基金项目(20085556017, 2010ZC56006); 江西省教育厅科技项目(GJJ10189)

第一作者简介: 曾接贤(1958—), 男, 教授, 1997年于西北工业大学获工程图学专业硕士学位, 主要研究方向为图像处理和计算机视觉。

E-mail: zengjx58@163.com

## 0 引言

线特征通常对应目标物体的轮廓线或边界线。线特征提取一直是图像处理与分析中的研究热点。目前线特征提取方法主要有边缘检测算子法、小波变换、Hough 变换和 Radon 变换等多种检测手段,但它们都不是一种具有绝对优势的方法。传统的边缘检测算子如 Robert、Prewitt、Sobel 和 LoG 等算子计算简单,速度较快,但是它们对噪声非常敏感。Canny 算子是一类最优边缘检测算子,具有较好的边缘定位能力和抗噪性能,但是在进行边缘检测时容易丢失边缘细节特征。小波变换在表示具有点奇异性目标函数时是最优基,即小波可以提取点模型<sup>[1]</sup>,而在表示图像边缘(线),也就是具有线奇异的地方时,小波基和 Fourier 基并非最优,即对线模型小波不能有效提取。虽然直线模型(曲线无限细分可看作直线)可用 Radon 变换和 Hough 变换来检测,但 Radon 变换<sup>[2]</sup>和 Hough<sup>[3]</sup>变换计算量太大,而且对曲线的检测,比较复杂。

为了有效表示和处理某些高维空间数据,近年来基于图像多尺度分析的线特征提取有了突飞猛进的发展。多尺度处理不仅可以获取图像信号的主要特征<sup>[4]</sup>,而且还能以不同的细节程度来构造图像,这在图像的视觉处理中具有重要的作用。Beamlet 变换<sup>[5]</sup>是一种新的多尺度几何分析工具,最初用于从含噪图像中提取直线和曲线<sup>[6]</sup>。但是 Beamlet 变换对于含有丰富的直线和曲线特征的灰度图像效果不好。在深入研究 Beamlet 变换的基础上,利用其抗噪性能强的优点,很多学者对算法进行了改进。文献[7-8]通过考虑线特征的方向信息,进而改进 Beamlet 算法,并应用于图像的边缘提取。文献[9]首先采用小波变换凸显边缘细节特征,然后使用 Beamlet 变换提取边缘,较好地解决了边缘复杂和线条丰富的图像线特征提取问题。

本文在基于 Beamlet 变换的线特征提取算法和各种改进算法的基础上,针对传统 Beamlet 无结构算法在提取图像线特征时存在重叠模糊的缺陷,提出了一种改进的 Beamlet 无结构算法,首先,确定分解尺度,对图像进行 Beamlet 变换得到 Beamlet 变换系数集合;然后利用文献[9]定义的能量统计计算每个二进方块的能量,并制定新的划线规则,以保证

每个二进方块最多有一条最优基;最后,将图像中的所有最优基作为线特征显示出来,实验结果表明,与传统方法相比,提取的线特征在细节刻画上更清晰准确。针对边缘信息丰富的图像,结合 Beamlet 变换线段提取能力较强和 Canny 算子边缘定位精确的优点,提出了一种改进的 Beamlet 无结构算法和 Canny 算子相结合的复杂图像线特征提取方法,首先,对图像分别用 Canny 算子检测明显的大边缘和改进的 Beamlet 无结构算法检测比较细微的边缘;然后,在 Canny 算子边缘检测的基础上,进一步处理 Beamlet 无结构算法得到的检测结果,以去除 Beamlet 无结构算法误检的线特征,从而得到图像中所有的线特征集合。

## 1 Beamlet 变换及其相关分析

### 1.1 Beamlet 变换

#### 1.1.1 离散 Beamlet 基

为了方便描述,首先给出二进方块的概念。将一幅  $n \times n$  的数字图像归一化为单位方块  $[0,1]^2$ ,各像素可以看做分布在  $[0,1]^2$  内的  $\frac{1}{n} \times \frac{1}{n}$  方块。然后把单位正方形划分为 4 个子正方形,每个子正方形的边长是单位正方形的  $1/2$ ,再把每个子正方形划分为 4 个更小的子正方形。以此类推,一个  $n \times n$  的图像最多可以分解到像素级。这样,每个正方形就是一个二进方块。

对一幅  $n \times n$  ( $n = 2^j$ ,  $j$  定义为二进方块尺度)的图像进行二进递归划分。在每个二进方块内,4 条边界上任意两个像素点之间的连线就构成了一条离散 Beamlet 基。基上的像素点可通过插值法确定,采用文献[10]中使用的 Bresenham 方法确定每条 Beamlet 基上的像素点。

任意一条离散 Beamlet 基在水平、竖直方向都有两个长度分量,分量大小可以使用 Beamlet 基在两个方向分别跨越的像素计算。数对  $\{u, w\}$  表示两个长度分量分别为  $u$  和  $w$  的 Beamlet 基,且  $u$  是其中的较大者。图 1 所示表示了在一个  $8 \times 8$  (尺度  $1 \leq j \leq J, J = 3$ ) 像素大小的图像中,不同尺度 ( $j = 1, 2, 3$ )、不同位置、不同方向的离散 Beamlet 基(黑色像素为基的两个端点,灰色像素为基上的其他点)。如图 1(a)所示,基  $b_1 \sim b_3$  可以分别表示为  $\{6, 4\}, \{3, 3\}, \{6, 1\}$ 。

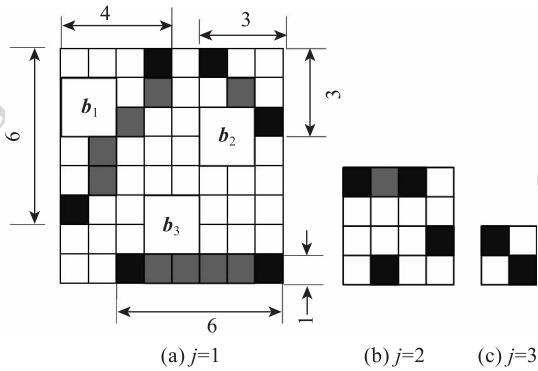


图1 不同尺度、方向、位置的离散 Beamlet 基  
Fig. 1 Discrete Beamlets at different scales, orientations, locations

1.1.2 离散 Beamlet 变换

Donoho 等人<sup>[5]</sup>提出了连续 Beamlet 变换及其在多尺度分析中的应用。为了减少计算量以及更适合于计算机处理,Huo 等人<sup>[11]</sup>提出了离散 Beamlet 变换。

一条 Beamlet 基的离散 Beamlet 变换就是这条 Beamlet 基上所有像素的灰度值加权。整幅图像的离散 Beamlet 变换定义为下式的集合,即

$$T(\mathbf{b}) = \sum_{(x,y) \in \mathbf{b}} Grey(x,y), \mathbf{b} \in \mathbf{B} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{B}$ 是图像中所有离散 Beamlet 基构成的集合, $\mathbf{b}$ 是 $\mathbf{B}$ 中的一条子基, $(x,y)$ 是基 $\mathbf{b}$ 上的一个像素点的坐标, $Grey(x,y)$ 是点 $(x,y)$ 的灰度值, $T(\mathbf{b})$ 是基 $\mathbf{b}$ 的离散 Beamlet 变换系数。

1.2 Beamlet 无结构算法的不足

Donoho 等人在文献[5]中详细地阐述了 Beamlet 变换中无结构、树结构等4个不同层次算法的基本原理。由于无结构算法计算量小,因此目前研究较多的是使用 Beamlet 变换中的无结构算法来提取图像中比较简单的直线段和曲线段<sup>[12-13]</sup>。Donoho 利用基于 Beamlet 变换的无结构算法来提取图像中的线特征,具体为以下3个步骤:

1) 确定尺度 对图像中的每个二进方块进行 Beamlet 变换,就可得到 Beamlet 变换系数。

2) 阈值化 首先计算每条基的能量统计,并设定阈值;然后将小于阈值的能量统计对应的 Beamlet 基置零,并作为背景。

在阈值化过程中,Donoho 算法定义的能量统计为  $Y^+$ ,即

$$Y^+ = \max \{ T(\mathbf{b}) / \sqrt{L(\mathbf{b})} : \mathbf{b} \in \mathbf{B} \} \quad (2)$$

式中, $L(\mathbf{b})$ 是基 $\mathbf{b}$ 的几何长度, $T(\mathbf{b})$ 是基 $\mathbf{b}$ 的离散 Beamlet 变换系数。

3) 可视化 将大于阈值的能量统计对应的基划线显示,作为检测到的线段。

无结构算法的优点是算法简单,计算量小,可以克服 Hough 变换的不足之处,能很好地确定线段的端点和长度信息。但是,由于该算法缺乏“空间抑制”的性质,将图像分解到较细尺度时会出现“过激励”的问题,从而造成线特征重叠变粗,因此对于线条丰富的图像线特征提取效果并不好。

以最简单的黑白图像为例,如图2所示为 $2 \times 2$ 方块(黑色代表背景,像素值为0;白色代表线特征,像素值为1),其中,二进方块中存在 $\mathbf{b}_{AB}$ 、 $\mathbf{b}_{AD}$ 、 $\mathbf{b}_{AC}$ 、 $\mathbf{b}_{BD}$ 、 $\mathbf{b}_{BC}$ 和 $\mathbf{b}_{CD}$ 6条基。可以得出,基 $\mathbf{b}_{AB}$ 和基 $\mathbf{b}_{AC}$ 的几何长度 $L(\mathbf{b})$ 相等,而且 Beamlet 变换系数相等,因此根据式(2),基 $\mathbf{b}_{AB}$ 和基 $\mathbf{b}_{AC}$ 能量统计大小相等。也就是说,基 $\mathbf{b}_{AB}$ 和基 $\mathbf{b}_{AC}$ 会被同时检测出来。即在这么小的二进方块中,就会有两条几乎是相同位置的基同时作为线特征,从而造成线重叠变粗,细节特征无法得到精确地刻画。因此需要定义新的能量统计和制定新的划线规则,以确保每个二进方块中最多只有一条最优基表示。

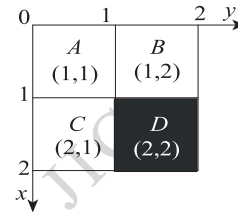


图2 某 $2 \times 2$ 方块中的6条基  
Fig. 2 Six Beamlets of one  $2 \times 2$  dyadic square

2 改进的 Beamlet 无结构算法

2.1 新的能量统计<sup>[9]</sup>和新的划线规则

针对 Donoho 无结构算法对于线条丰富的图像线特征提取效果不好的缺点,提出了一种改进算法,其基本思想是:对原始灰度图像进行 Beamlet 变换,利用文献[9]定义的能量统计计算每个二进方块的能量,并制定新的划线规则,以保证每个二进方块最多有一条最优基,从而检测出图像中的细节信息,克服了传统方法中的细节特征重叠变粗的缺点。

1) 定义能量统计<sup>[9]</sup>为

$$E_b = T(\mathbf{b})/l(\mathbf{b}) \quad (3)$$

式中,  $l(\mathbf{b})$  为数对  $\{u, w\}$  中的  $u$ 。

2) 制定新的划线规则

对  $n \times n$  大小的图像, 离散的 Beamlet 基的条数是  $D = 6n^2 - 16n + 14$ 。对于每条 Beamlet 基, 在二进方块中都有与其平行的 Beamlet 基。假设  $\mathbf{b}$  是二进方块中任意一条 Beamlet 基, 则在基  $\mathbf{b}$  的两侧(上下或左右)分别存在一条与其相邻且平行的 Beamlet 基(特殊情况下仅在一侧存在, 即只有一条平行基)。图3所示为离散 Beamlet 基及其相邻平行基, 其中灰色表示 Beamlet 基上的像素点, 黑色表示其相邻平行基上的像素点。 $\mathbf{b}_1$  左右两侧有两条与其相邻的平行基, 而与  $\mathbf{b}_2$  相邻的平行基则只有一条。

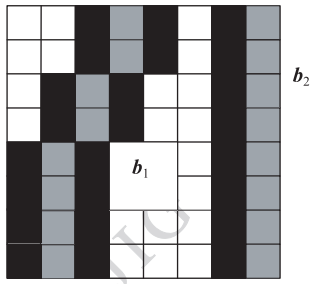


图3 离散 Beamlet 基的相邻平行基

Fig.3 Neighboring and parallel of discrete beamlets

为保证每个二进方块中最多只有一条最优基, 制定如下新的划线规则:

(1) 按照式(3)的能量统计, 分别计算二进方块中所有基的能量统计, 并将最大的能量统计值记为  $Max\_E$ 。如图2中, 二进方块中的6条 Beamlet 基的能量统计值分别记为  $E_1, \dots, E_6$ , 那么6条基的最大能量统计值  $Max\_E = \max(E_1, \dots, E_6)$ 。

(2) 若最大的能量统计值对应的是一条 Beamlet 基, 则直接进行步骤(4); 若最大的能量统计值对应的是多条 Beamlet 基(例如图2中同时存在  $\mathbf{b}_{AB}$ 、 $\mathbf{b}_{AC}$  和  $\mathbf{b}_{BC}$  3条基的能量统计相同), 则为了保证每个二进方块中只有一条最优基, 进入步骤(3)。

(3) 二进方块中多条 Beamlet 基的对应的最大能量统计值相同, 分别对每条 Beamlet 基进行分析: 计算当前 Beamlet 基的能量统计  $E_b$  与相邻的另外两条平行基(或一条)的能量统计  $E_{b_1}$ 、 $E_{b_2}$  差的绝对值之和, 即

$$\Delta E = |E_b - E_{b_1}| + |E_b - E_{b_2}| \quad (4)$$

比较每个  $\Delta E$ , 取最大的  $\Delta E$  对应的基为最优基。

以最简单的  $2 \times 2$  二进方块为例, 如图2所示,

二进方块中的6条基分别为  $\mathbf{b}_{AB}$ 、 $\mathbf{b}_{AD}$ 、 $\mathbf{b}_{AC}$ 、 $\mathbf{b}_{BD}$ 、 $\mathbf{b}_{BC}$  和  $\mathbf{b}_{CD}$ 。首先, 根据式(3), 得出基  $\mathbf{b}_{AB}$ 、 $\mathbf{b}_{AC}$  和  $\mathbf{b}_{BC}$  的能量统计最大且都为1; 然后, 分别计算每条基与相邻的平行基的差值  $\Delta E$ 。其中,  $\mathbf{b}_{AB}$  和  $\mathbf{b}_{AC}$  都只有一条平行基, 且  $\Delta E$  都为0.5, 而  $\mathbf{b}_{BC}$  的平行基  $\mathbf{b}_{BB}$  和  $\mathbf{b}_{CC}$  (此时已经退化成点  $B$  和  $C$ ),  $\Delta E$  为1。因此, 基  $\mathbf{b}_{BC}$  为该二进方块中的最优基。

如果二进方块中所有的像素值相等, 则意味着该二进方块中的所有基可能是方块中固有的线特征。

(4) 计算出整幅图像中所有  $Max\_E$  的最大值  $E_{max}$ , 对每个二进方块的最大能量统计值  $Max\_E$  进行归一化

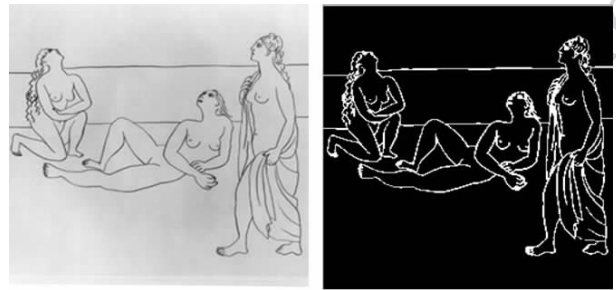
$$Max\_E = Max\_E/E_{max} \quad (5)$$

(5) 设定阈值  $Th$  ( $0 < Th \leq 1$ )<sup>[12]</sup>, 遍历所有子块。当二进方块中的最大能量统计大于  $Th$  时, 则保留该子块中的最优基, 即作为线特征显示出来, 反之将该 Beamlet 基置零作为背景。

由于图像的复杂程度不同, 阈值  $Th$  是根据经验选择的, 阈值一般取0.5左右。在实验过程中, 根据视觉效果以0.5作为基准点做适当调整。

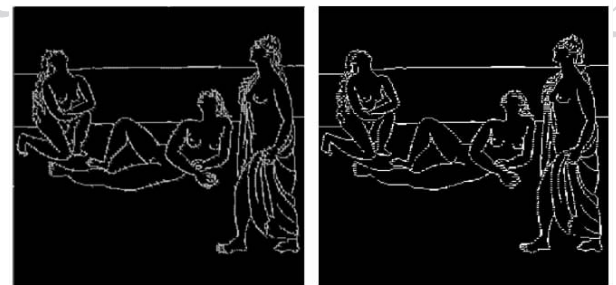
2.2 实验及结果分析

为了验证改进算法的有效性, 选取线条丰富的 picasso 图像进行测试。图4(a)是一幅  $256 \times 256$  大



(a) picasso 原图

(b) Donoho 算法



(c) 文献[9]算法

(d) 本文改进的Beamlet无结构算法

图4 各算法的线特征提取效果图

Fig.4 Linear feature extracted by three kinds of algorithms

小的 picasso 图像,分别采用 Donoho 算法、文献[9]算法和本文改进的 Beamlet 无结构算法对图像进行线特征检测。分解尺度都为 7,各算法的线特征提取效果如图 4 所示。可以看出,图 4(b)在手指和脚趾等线特征较丰富的区域线条重叠模糊,效果较差;而图 4(c)(d)提取的效果较好。对比图 4(c)(d),图 4(c)提取的线特征有“毛刺”,影响视觉效果。而图 4(d)提取效果较好,不仅提取的线较平滑,而且在细节刻画上(在手指脚趾等处)更清晰精确,视觉效果最好。

### 3 改进的 Beamlet 与 Canny 结合的复杂图像线特征提取方法

#### 3.1 基本思想

改进的 Beamlet 无结构算法克服了传统方法在提取线特征时重叠变粗的缺点,不仅保证了线特征的平滑完整性,而且在细节刻画上更清晰准确。但是,对于边缘信息丰富的图像,无论采用 Donoho 算法、文献[9]算法,还是采用本文改进的 Beamlet 无结构算法提取复杂图像线特征,都有可能出现误检。这是由于上述方法仅仅使用线的灰度信息来计算能量,然后通过能量统计确定最优基,最后根据最优基来提取线特征,并没有考虑边缘的方向信息,从而不能准确的定位边缘,无法对边缘信息丰富的图像进行边缘提取,因此得不到理想的线特征检测结果。

Canny 算子<sup>[14]</sup>具有较好的抗噪性能和较高的边缘定位精度,因此被广泛应用。但是,该算子也存在以下缺点:1)在利用高斯滤波器进行滤波时,参数  $\delta$  不容易选择, $\delta$  越小,频带越宽,可以保持细节信息,同时会造成过多的伪边缘,并且去噪能力变差,反之, $\delta$  越大,频带越窄,对较高频率噪声的抑制作用越大,避免了虚假信息的检出,但同时也抑制了一些图像细节信息;2)Canny 算子对整幅图像的梯度采用同一组高低阈值,导致少量在局部范围中相对明显的边缘容易被忽略,即图像中部分较弱的边界被漏检。

针对 Canny 算子的不足和改进的 Beamlet 无结构算法在提取复杂图像线特征存在的问题,结合 Beamlet 算法线段提取能力较强和 Canny 算子边缘定位精确的优点,本文提出将改进的 Beamlet 无结构算法和 Canny 算子相结合的复杂图像线特征提取方法(为简单起见,本文简称 B&C 算法),

其基本思路是:分别对输入的灰度图像进行改进的 Beamlet 无结构算法提取线特征和 Canny 算子检测边缘。其中,在使用 Canny 算子对原始图像检测边缘时,选择较大的  $\delta$ ,一方面增加了抗噪能力,另一方面达到了只检测明显的大边缘的效果,在对原始图像进行 Beamlet 变换时,将图像分解到较小的尺度,采用改进的 Beamlet 无结构算法,克服了传统方法在提取线特征时重叠变粗的缺点,进而可以检测出比较细微的边缘。最后,将两种方法检测的线特征结合,即在 Canny 算子边缘检测结果的基础上,进一步处理 Beamlet 无结构算法检测结果,以去除改进的 Beamlet 无结构算法没有考虑方向信息而误检的边缘,从而得到图像中所有的线特征集合。

#### 3.2 算法实现

改进的 Beamlet 与 Canny 相结合的复杂图像线特征提取算法具体实现步骤如下:

1)把灰度图像  $I$ (图像大小为  $n \times n$ ,且为 2 的幂次)分解到  $2 \times 2$  尺度,然后对每个二进方块进行 Beamlet 变换,得到所有二进方块内 Beamlet 变换系数的集合。

2)计算每个二进方块内的对应的能量函数,根据改进的 Beamlet 无结构算法,得出每个二进方块中的最优 Beamlet 基。

3)根据设定的阈值划线显示满足条件的 Beamlet 基。最终得到线的集合  $M$ 。

4)选择较大的 Sigma (Sigma 的取值范围是 1.8 ~ 2.5),对输入的灰度图像  $I$  进行 Canny 检测,得到检测出的边缘图像  $BW$ 。

5)将采用改进的 Beamlet 算法得到的图像和 Canny 算子检测到的边缘图像  $BW$  结合。

若  $T$  表示为一空集, $M$  中任一直线  $L$  的两个端点分别为  $p(x_1, y_1)$  和  $q(x_2, y_2)$ ,在  $BW$  中,寻找与直线  $L$  两端点坐标相同的点,记为  $p_1(x_1, y_1)$  和  $q_1(x_2, y_2)$ ,设任一直线  $L'$  的端点  $p'(x'_1, y'_1)$  和  $q'(x'_2, y'_2)$ 。为了去除改进的 Beamlet 无结构算法误检的线特征,可以分为以下两个步骤处理:

(1)处理 Canny 算子检测得到的短线或断线。遍历整个集合  $M$ ,对  $M$  中任一直线  $L$  的两个端点  $p$  和  $q$ ,如果在  $BW$  中的  $p_1$  或  $q_1$  处存在边缘点,即点  $p_1$  或  $q_1$  处的像素值为 1(假设目标的像素值为 1),则  $T = T \cup L$ 。

(2)补充图像中的细节特征。在图像  $BW$  中,

如果直线  $L'$  的两个端点  $p'$  和  $q'$  与直线  $L$  的两个端点  $p$  和  $q$  近邻且方向相同, 则  $T = T \cup L$ 。

由步骤(1)(2)即可得到图像的线特征, 即  $S = BW \cup T$ 。

### 4 实验及结果分析

为了验证本文算法的有效性, 选用边缘信息丰富的 Lena 图像和细节丰富的 Baboon 图像进行测试, 并与 Donoho 算法、文献[7-9]算法在提取效果和计算复杂度上进行对比分析。

#### 4.1 线特征提取效果对比分析

##### 1) 算例 1

如图 5(a) 所示, 以边缘信息丰富的 Lena 灰度图像作为检测图像, 图像大小是  $256 \times 256$ 。图 5(b) 所示是 Canny 算子边缘检测的结果, 其中取  $\delta = 2.0$ , 高低阈值均由 Matlab 根据处理对象自适应选择, 从检测的结果图中可以看出, Canny 算子只是检

测出了主要轮廓信息, 丢失了部分边缘细节信息。图 5(c) 所示是采用 Donoho 算法检测到的结果, 从图中可以看出, 检测出的线特征不准确, 而且细节特征更是难以刻画。图 5(d) 所示是采用文献[7]算法检测得到的结果, 虽然提取的线特征较准确, 但是在头发和帽缨等处丢失了一些线特征。图 5(e) 所示是采用文献[8]算法检测得到的结果, 从图中可以看出, 提取的线特征效果较好, 但是在帽子的顶部有断线的现象。图 5(f) 所示是采用文献[9]算法检测到的结果, 虽然提取的线特征较准确, 但是可以看出在镜子上方等处有断边, 并且杂线较多, 同时丢失了一些线特征。图 5(g) 所示是采用本文改进的 Beamlet 无结构算法检测到的结果, 其中分解尺度为 7, 从图中可以看出提取效果并不好。图 5(h) 所示是采用 B&C 算法检测到的结果, 其中 Beamlet 算法的分解尺度 7, Canny 算子检测时取  $\delta = 2.0$ , 从图中可以看出, 提取出的线条较完整, 细节部分准确, 从而体现了本文算法的优势。

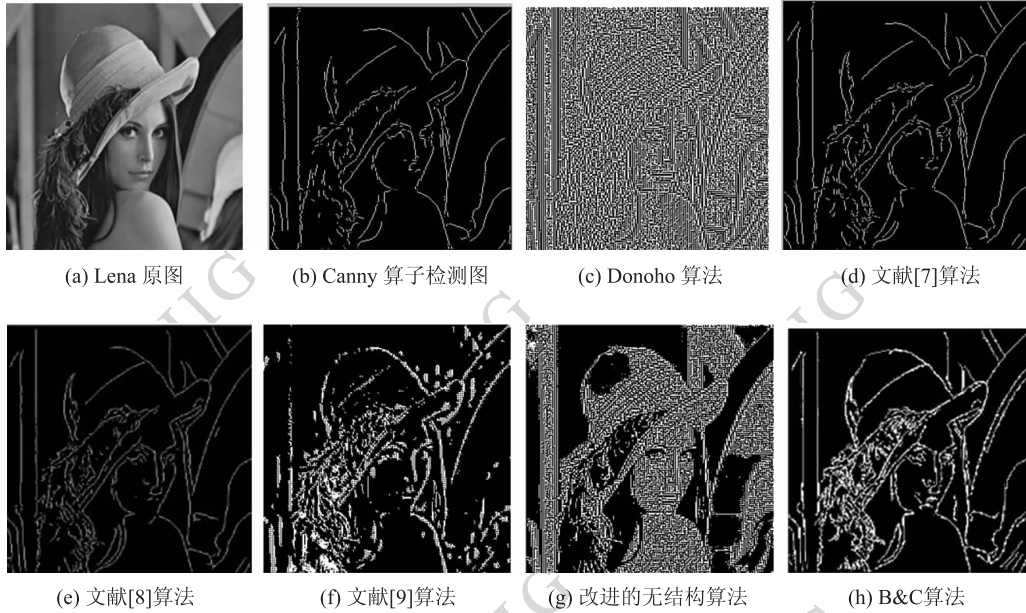


图 5 Lena 图像线特征提取结果

Fig. 5 Line feature extraction results of Lena

##### 2) 算例 2

如图 6(a) 所示, 以细节信息丰富的 Baboon 灰度图像作为检测图像, 图像大小是  $256 \times 256$ 。图 6(b) 所示是 Canny 算子边缘检测的结果, 其中  $\delta = 1.8$ , 高低阈值均由 Matlab 根据处理对象自适应选择。图 6(c) — (g) 分别是采用 Donoho 算法、文献[7-9]算法和本文改进的 Beamlet 无结构算法

检测到的结果。图 6(h) 所示是采用 B&C 算法检测到的结果, 其中 Beamlet 算法的分解尺度为 7, Canny 算子检测时  $\delta = 1.8$ 。从实验结果可以看出, 图 6(d) — (g) 的检测效果较好。在图 6(b) 中, Canny 算子只是检测出了整体轮廓信息, 丢失了部分细节信息, 而观察图 6(c), 可以看出, Donoho 算法由于 Beamlet 基之间缺乏“尺度抑制”已经难以

检测出线特征,细节特征更是难以刻画。从对比图 6(d)一(h)可以看出,图 6(d)(e)视觉效果较好,但是在毛发等处丢失了一部分细节特征。图 6(f)胡须和毛发存在重叠现象,并且丢失一部

分细节特征。图 6(g)虽然提取的胡须和毛发成线状,但是面部细节处出现了误检。图 6(h)中不仅提取的胡须和毛发成线状,并且获得更多的细节特征,因此视觉效果最好。

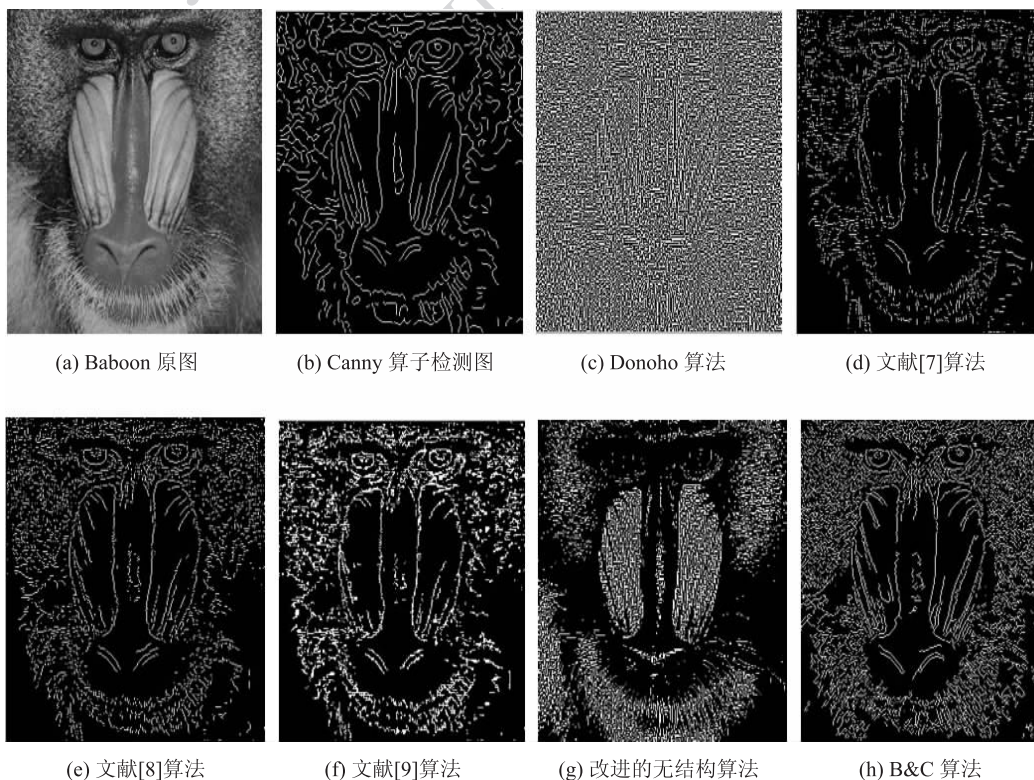


图 6 Baboon 图像线特征提取结果

Fig. 6 Line feature extraction results of Baboon

#### 4.2 计算复杂度对比分析

典型的图像处理算法复杂度是  $O(n^2)$  ( $n$  表示图像为  $n \times n$  的像素,下同),Donoho 算法的复杂度是  $O(n^2 \log_2 n)$ 。本文中 B&C 算法为了克服 Donoho 算法在线特征提取时存在的不足之处,只是增加了最优基的筛选和 Canny 算子检测过程,因此在复杂度上与 Donoho 算法完全相同,都是  $O(n^2 \log_2 n)$ 。用 Matlab7.8 在 CPU 为 2.66 Hz,内存为 4 GB 的计算机上分别实现了 Donoho 算法、文献[7-9]算法和 B&C 算法,5 种算法的计算机时间对比如表 1 所示。

表 1 计算时间对比表

Table 1 Comparison of computing time

|        | 算法     |       |       |       |       |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|        | Donoho | 文献[7] | 文献[8] | 文献[9] | B&C   |
| Lena   | 1.975  | 2.423 | 2.632 | 2.616 | 2.542 |
| Baboon | 1.974  | 2.419 | 2.628 | 2.614 | 2.540 |

从表 1 可以看出,Donoho 算法计算时间最短,本文算法和文献[7]算法的计算时间略长 Donoho 算法,但是没有显著增加。

#### 4.3 算法性能对比分析

为了验证本文算法的提取结果,分别从线型连接程度、错检率和漏检率 3 个方面对 Canny 算子、文献[7-9]和本文的 B&C 算法提取结果(效果图如图 5(b)(d)(e)(f)(h)所示)进行边缘评价<sup>[15]</sup>。设线型连接程度参数<sup>[15]</sup>为  $L_e$ ,错检率<sup>[15]</sup>为  $N$ ,漏检率<sup>[15]</sup>为  $F$ ,定义综合评价度量  $M_e$  为

$$M_e = \alpha L_e + \beta(1 - N) + \gamma(1 - F) \quad (6)$$

式中,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  为评价加权系数,表示该项评价指标对评价质量的影响程度, $M_e$  越接近于 1,算法性能越好。

选取图 5 中的 Lena 图像作为评价图像,分别对 Canny 算子、文献[7-9]和本文的 B&C 算法提取的线特征进行评价,评价系数分别取  $\alpha = 0.3$ ,  $\beta =$

0.4,  $\gamma = 0.3$ , 5 种方法的性能参数如表 2 所示。

表 2 算法性能参数表

Table 2 Parameters of algorithms' performance

| 算法       | $L_e$ | $1 - N$ | $1 - F$ | $M_e$ |
|----------|-------|---------|---------|-------|
| Canny 算子 | 0.962 | 0.987   | 0.876   | 0.941 |
| 文献[7]    | 0.979 | 1.000   | 0.988   | 0.990 |
| 文献[8]    | 0.980 | 1.000   | 0.992   | 0.992 |
| 文献[9]    | 0.964 | 0.993   | 0.983   | 0.982 |
| 本文       | 0.981 | 0.994   | 0.995   | 0.992 |

由表 2 可以看出,其他 4 种算法都比 Canny 算子的性能好。运用本文 B&C 算法提取的线特征连接程度较好,而运用文献[9]提取的线连接程度却很差,正如图 5(f) 所示有断线的现象;运用本文算法的错检率要稍高于文献[7-8];但是本文算法的漏检率却是最低的;从最后的综合评价度量来看,文献[8]算法和本文 B&C 算法相同。但是,由表 1 可以得出,文献[8]的计算时间长于 B&C 算法。

## 5 结 论

本文首先提出了一种基于改进的 Beamlet 无结构算法提取线特征的方法,与传统方法相比,在细节刻画上更清晰准确,对于线条特征较明显的图像采用改进的 Beamlet 无结构算法,可以得到较好的效果。然后,针对边缘信息丰富的图像,又提出了将改进的 Beamlet 无结构算法与 Canny 算子相结合的方法提取复杂图像线特征。实验结果表明,该方法克服了两种方法单独使用时在线特征提取方面遇到的问题,有效地提高了线特征提取的准确性和连续性。但是,由于在运用改进的 Beamlet 无结构算法时,阈值是人为设定的,如何合理地自适应选择阈值还有待研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Emmanuel J C, Donoho D L. Continuous curvelet transform: I. resolution of the wavefront set[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2005, 19(2): 162-197.
- [2] Averbuch A, Coifman R, Donoho D L. Fast slant stack: a notion of radon transform for data in a cartesian grid which is rapidly computible, algebraically exact, geometrically faithful and invertible[R]. California: Statistics Department, 2003.
- [3] Leavers V F. Shape Detection in Computer Vision Using the Hough Transform[M]. London UK: Springer-Verlag, 1993: 142-159.
- [4] Bao P, Zhang L, Wu X L. Canny edge detection enhancement by scale multiplication[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(9): 1485-1490.
- [5] Donoho D L, Huo X M. Beamlets and multiscale image analysis multiscale and multiresolution methods[C]//Computational Science and Engineering. New York: Springer, 2002: 149-196.
- [6] Donoho D L, Huo X M. Applications of beamlets to detection and extraction of lines, curves and objects in very noisy images[C]//Nonlinear Signal and Image Processing. Baltimore: MD, 2001: 1-5.
- [7] Wang M, Zhang Y N, Sun J Q, et al. A method of image transform based on linear elements[C]//Proceedings of The Fifth International Conference on Image and Graphics. Xi'an: IEEE Press, 2009: 124-128.
- [8] Chen Y, Fang B, Wang P. An edge detection algorithm based on beamlet transform[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(8): 1214-1219. [陈雨, 方滨, 王普. 一种 Beamlet 变换下的图像边缘检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(8): 1214-1219.]
- [9] Zeng J X, Zhu X C, Fu X. Image linear feature extraction based on improved structureless algorithms of beamlet transform[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(12): 1748-1754. [曾接贤, 祝小超, 符祥. 一种改进的复杂图像线特征提取方法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(12): 1748-1754.]
- [10] Shi Q F, Zhang Y N. Adaptive liner feature detection based on beamlet[C]// Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Shanghai: IEEE Press, 2004: 3981-3984.
- [11] Huo X M, Chen J H. JBEAM: multiscale curve coding via beamlets[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(11): 1665-1677.
- [12] Qu Q C, Peng Y H, Yang M Q. Line detection based on beamlet transform[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(3): 500-504. [屈庆春, 彭玉华, 杨明强. 基于 Beamlet 变换的线特征检测[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(3): 500-504.]
- [13] Yang L X, Li J X, Shui P L. Beamlet-based method of line feature extraction from images[J]. Computer Engineering, 2008, 34(9): 203-205. [杨玲香, 李军侠, 水鹏朗. 基于 Beamlet 的图像线特征提取方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(9): 203-205.]
- [14] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [15] Yang X, Liang D Q. A new edge evaluation using region homogeneous measure[J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4(3): 234-238. [杨焯, 梁德群. 一种基于区域一致性测度的边缘评价方法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(3): 234-238.]