

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)12-1748-07

论文索引信息: 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

# 一种改进的复杂图像线特征提取方法

曾接贤<sup>1),2)</sup>, 祝小超<sup>2)</sup>, 符祥<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (南昌航空大学软件学院, 南昌 330063) <sup>2)</sup> (无损检测技术教育部重点实验室(南昌航空大学), 南昌 330063)

**摘要:** 针对传统 Beamlet 变换无结构算法在提取图像线特征时存在的线断裂、重叠、模糊等问题, 提出了一种提取复杂图像线特征的改进方法。该方法首先利用小波变换对图像进行预处理, 以突显细节特征; 接着对预处理后的图像进行 Beamlet 变换, 得到变换系数集合; 然后在阈值化时, 定义了新的能量统计, 在可视化时, 制定了新的划线规则, 并使两者结合, 以确保每个二进方块最多只用一条最优基表征; 最后将所有方块中的最优基作为线特征提取出来。实验结果表明, 与传统算法相比, 在没有明显增加计算量的前提下, 该改进方法对线条丰富和边缘复杂的图像的线特征提取, 表现出明显的优势。

**关键词:** 小波变换; Beamlet 变换; 线特征

## Image linear feature extraction based on improved structureless algorithms of beamlet transform

ZENG Jiexian<sup>1),2)</sup>, ZHU Xiaochao<sup>2)</sup>, FU Xiang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Software, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

<sup>2)</sup> (Key Laboratory of Nondestructive Testing (Nanchang Hangkong University), Ministry of Education, Nanchang 330063)

**Abstract:** Traditional linear feature detection methods based on structureless algorithms of Beamlet transform are mostly used to detect simple line segments and curves, while fail to detect complicated edges in natural images. Wavelet transform has great advantages in point feature detection, meaning that it is good at detecting edge and details. In this paper we improve traditional methods with the help of wavelet. Meanwhile, energy function in traditional algorithm is improved and a new drawing linear feature rule is proposed in order to represent a dyadic square with at most one optimal Beamlet. First, image is decomposed into low frequency and high frequencies with wavelet to highlight edge detail feature; second, the edge image's transform coefficients are obtained by Beamlet transform. Finally the coefficients are dealt with using the improved energy function and linear features are extracted following the new drawing rule. Experimental results show that without costing obvious extra computing time, our proposed method can extract complete and clear linear features in natural images.

**Keywords:** wavelet transform; Beamlet transform; linear feature

## 0 引言

线特征提取在图像处理、模式识别和计算机视觉等领域起着非常重要的作用, 一直是这些领域的

研究热点。传统的边缘检测算子均存在一些问题, 如 Canny 提出的线特征提取方法, 其不仅受噪声影响比较大, 且提取的线特征具有明显的双边边缘; Hough 变换<sup>[1]</sup>虽能够提取图像中的直线和曲线特征, 但是无法确定直线的端点和长度信息, 而且对于

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(60675022); 江西省自然科学基金项目(2008GZS0034); 航空科学基金项目(20085556017)。

**收稿日期:** 2009-04-10; **改回日期:** 2009-09-24

**第一作者简介:** 曾接贤(1958—), 男, 教授。1997 年获西北工业大学工程图学专业硕士学位。主要研究方向为工程图学、图像处理和计算机视觉。主持完成国家自然科学基金项目(60275037)和江西省自然科学基金项目(0311019)各一项。E-mail: zengjx58@163.com。

任意形状曲线, Hough 变换显得力不从心。Beamlet 变换是一种具有局部性、方向性和多尺度性特点的图像几何分析工具, 由于它能够提供更正确的数据结构和某种意义上对光滑曲线的最稀疏逼近, 因此其在提取图像高维特征, 如线、边缘等方面优势明显<sup>[2]</sup>。在 Beamlet 变换的 4 个算法中, 目前研究得比较多的是使用 Beamlet 变换无结构算法来提取图像中比较简单的直线段或曲线段<sup>[3-5]</sup>, 虽然该算法克服了 Hough 变换的不足, 能够确定线段的端点和长度信息, 然而由于 Beamlet 变换无结构算法需要事先确定分割尺度, 若尺度过大, 则难以获得更多的细节信息; 而且由于 Beamlet 变换缺乏“空间抑制”性质, 因此在将无结构算法用于线条丰富或是边缘复杂的图像时, 需要分割到较细尺度, 若尺度过小, 则提取的线条往往重叠模糊, 以至无法检测出真正的线特征。小波变换是一种有效的数学工具, 对含点奇异(细节特征)的分段光滑函数的表示是最优的<sup>[6]</sup>。因此, 为了解决上述 Beamlet 变换无结构算法遇到的问题, 本文提出了一种改进算法, 即先利用小波变换在刻画细节特征方面的优势, 对图像进行预处理, 以突显图像细节; 然后再利用改进的 Beamlet 变换提取线特征; 接着在利用 Beamlet 变换提取线特征时, 还制定了一个新的划线规则以及为了适应新规则而重新定义的能量统计公式, 以确保每个二进方块最多只用一条最优基表征。结果表明, 本文算法不仅较好地克服了用传统的 Beamlet 变换无结构算法提取线特征时存在的线断裂、重叠模糊等问题, 而且既能保证长的线特征完整连续, 又可使细节特征清晰精确。

## 1 Beamlet 变换

Donoho 等人在文献[2]中完整详细地论述了 Beamlet 变换的基本理论和 4 个不同层次的算法, 同时将其成功地应用于图像处理等相关领域, 并预测了该理论在粒子物理、大尺度宇宙结构测量等方面应用的潜在优势。2005 年, Huo Xiaoming 等人将 Beamlet 变换应用于多尺度曲线和轮廓编码, 进一步提出了离散 Beamlet 变换的理论<sup>[7]</sup>。

离散 Beamlet 基<sup>[7-8]</sup>: 二进方块中 4 条边界上的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, 本文

采用文献[3]中使用的 Bresenham 方法来进行确定。

图 1(a)~图 1(c)表示了一个  $16 \times 16$  pixels 大小的图像中, 不同尺度( $j=1, 2, 3$ )、不同方向、不同位置的 Beamlet 基(黑色像素为基的端点, 灰色像素为基上的其他点)。基的水平分量用数对  $\{p, q\}$  表示,  $p$  是其中的较大者。如图 1(a)所示, 基  $b_1$  的长度分量为  $\{10, 5\}$ 。

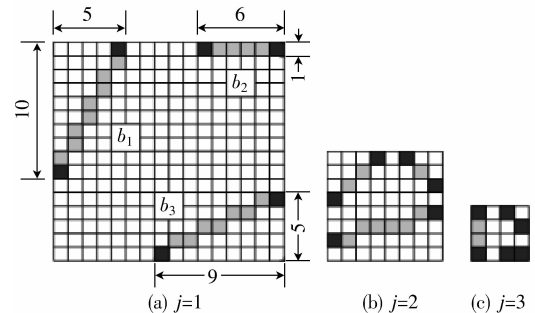


图 1 不同尺度、位置、方向的离散 Beamlet 基

Fig. 1 Discrete Beamlets at different scales, locations, orientations

离散 Beamlet 变换<sup>[7-8]</sup>: 一条基的离散 Beamlet 变换就是这条基上所有像素点灰度值的加权和。整幅图像的离散 Beamlet 变换就是所有基的离散 Beamlet 变换构成的集合。

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

$B$  是图像中由所有离散 Beamlet 基构成的集合,  $b$  是  $B$  中的一条子基,  $(x, y)$  是基  $b$  上的像素点,  $G(x, y)$  是点  $(x, y)$  的灰度值,  $T(b)$  是基  $b$  的离散 Beamlet 变换系数集。

经过离散处理后, 由于简化了 Beamlet 词典的生成过程, 从而为 Beamlet 在图像处理等领域更好地应用带来了方便。

## 2 Beamlet 变换无结构算法的不足

Donoho 利用基于 Beamlet 变换的无结构算法(为了叙述方便, 以下简称 Donoho 算法)来提取图像中的线性特征, 过程如下<sup>[2]</sup>:

1) Beamlet 变换, 即通过确定尺度, 对图像进行 Beamlet 变换, 即可得到 Beamlet 变换系数;

2) 阈值化, 即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基置零,

作为背景;

3) 可视化,即将大于阈值的能量统计对应的基划线显示。

在阈值化过程中,Donoho 算法定义的能量统计为

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

$L(\mathbf{b})$  是基  $\mathbf{b}$  的几何长度。

由于这样定义  $Y^+$ ,在将图像分解到较细尺度(如  $4 \times 4$ 、 $2 \times 2$ )时,会产生“过激励”问题,从而会造成线特征重叠变粗。以下是具体的分析。

以图 2 所示的情况为例,在一个  $2 \times 2$  的方块中(白色代表灰度值为 1 的线目标;黑色代表灰度值为 0 的背景),基  $\mathbf{b}_{AB}$ 、 $\mathbf{b}_{BD}$  的 Beamlet 变换系数与基  $\mathbf{b}_{AD}$  的变换系数相等,但由于基  $\mathbf{b}_{AB}$ 、 $\mathbf{b}_{BD}$  的几何长度相等,且小于基  $\mathbf{b}_{AD}$  的几何长度,因此根据式(2),基  $\mathbf{b}_{AB}$ 、 $\mathbf{b}_{BD}$  会被同时检测出来。也就是说,在这么小的方块中,会有两条几乎是在相同位置的基同时作为线特征,这样就会造成线重叠模糊、细节特征无法得到精确地刻画的问题。

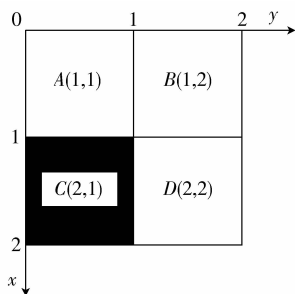


图 2 某  $2 \times 2$  方块中的 6 条基

Fig. 2 6 Beamlets in one  $2 \times 2$  dyadic square

### 3 本文的改进算法

针对 Donoho 算法的不足,本文提出了一种改进算法,即首先利用小波变换突显图像的细节特征;接着利用 Beamlet 变换得到系数集合;然后在阈值化时,定义了新的能量统计,并在可视化时,制定了新的划线规则。通过这两个步骤,就能够确保一个二进方块最多用一条最优基表征。

#### 3.1 小波变换突显细节

小波变换具有时频局部化特性,可以准确定位信号的突变点;小波变换又具有多分辨率特性,可以在不同尺度上描述信号的局部特征<sup>[6]</sup>;这样就可以根

据不同的要求,分别处理对应低频的缓变信号和对应高频的突变信号。

图像是一种 2 维离散信号,图像的小波变换一般采用 2 维离散小波变换,即对图像的行、列分别进行 1 维离散小波变换。从信号处理的角度来看,即首先将图像  $S$  分解为低频信息  $M$  和高频信息  $H$ ,然后将低频信息  $M$  分解为低频部分  $ML_1$  和高频部分  $LH_1$ (称为垂直高频);对于高频信息  $H$ ,重复同样的操作得到  $HL_1$ (称为水平高频)和  $HH_1$ (称为对角高频)……依此类推。图 3 为 Miss 图像的小波 3 层分解示意,使用的小波基是 db4,为了清楚显示细节,本文将高频分量系数放大 5 倍。图像经小波变换后,低频部分保存着图像的能量,高频部分对应着图像的细节,而细节的变化将导致边缘的变化。由于小波变换的多尺度特性,致使对应图像边缘的高频系数幅值较大,而且相邻尺度层间具有很强的相关性<sup>[9]</sup>,因此可以利用小波变换的边缘检测性和层间系数的持续性,先将图像的低频系数置零,保留高频,再进行小波逆变换重构图像,这样就达到了突显图像细节特征的目的,为下一步进行 Beamlet 变换提供基础。

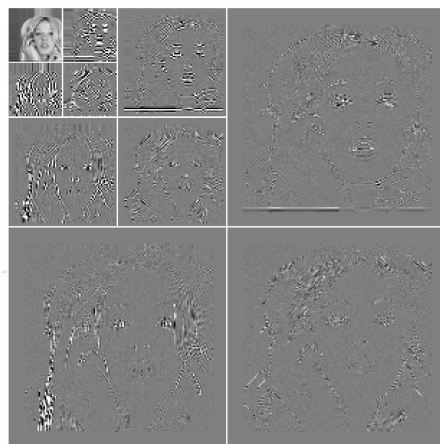


图 3 Miss 图像的 3 层小波分解示意图

Fig. 3 The sketch diagram of the Miss image decomposed by wavelet at level 3

#### 3.2 阈值化和可视化时的改进

##### 3.2.1 确定最优基的必要性

定义新的能量统计和制定新的划线规则的目的就是要确定较细尺度下方块中的最优基,并使用该最优基来表征这个二进方块。

仍以  $2 \times 2$  尺度的二进方块为例(如图 4 所示),在这样的一个二进方块中,像素有 16 种可能

的组合。一个  $256 \times 256$  pixels 大小的图像,分解到  $2 \times 2$  尺度,将有 16 384 个这样的二进方块,图 4 中的 12、13、14 和 15 是造成线重叠的主要原因,其出现的概率是 0.25,故整个图像将有几千个这样的二进方块。如果不对这种情况进行处理,那么就会造成线重叠而影响刻画细节特征的精确性。因此,对于边缘复杂必须分解到较细尺度的图像来说,一个二进方块最多只用一条最优基表征是必要的。

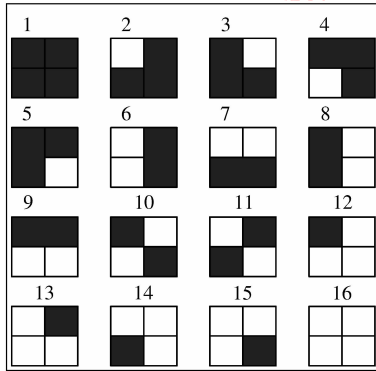


图 4  $2 \times 2$  方块中所有可能的像素组合

Fig.4 All possible pixel combinations in one  $2 \times 2$  dyadic square

### 3.2.2 新的能量统计和新的划线规则

为了找到较细尺度下方块中的最优基,本文首先定义了一个新的能量统计,然后制定了一个新的划线规则。

1) 定义新的能量统计,记为  $Y(\mathbf{b})$ :

$$Y(\mathbf{b}) = \{ |T(\mathbf{b})| / l(\mathbf{b}), \mathbf{b} \in \mathbf{B} \} \quad (3)$$

$l(\mathbf{b})$  就是数对  $\{p, q\}$  中的  $p$ ,其他参数与式(2)同。

利用式(3)能量统计来制定新的划线规则,以达到一个二进方块中最多提取一条最优基的目的。

2) 制定新的划线规则

为了描述新的划线规则,需先定义基的平行基。

**平行基:** 给定  $N \times N$  pixels 大小的图像,对于任意尺度  $j$ ,二进方块的大小为  $n \times n$ 。其中,  $j = 0, 1, 2, \dots, \lfloor \log_2 N \rfloor, n = N/2^j$ 。设二进方块中任意一条基为  $\mathbf{b}$ ,其端点为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ ;则基  $\mathbf{b}$  存在两条平行基  $\mathbf{b}_1$  和  $\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_1$  的端点为  $(x_1 - 1, y_1 - 1), (x_2 - 1, y_2 - 1)$ ;  $\mathbf{b}_2$  的端点为  $(x_1 + 1, y_1 + 1), (x_2 + 1, y_2 + 1)$ 。其中,  $x_1 - 1, x_1, x_1 + 1, x_2 - 1, x_2, x_2 + 1 \in \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $y_1 - 1, y_1, y_1 + 1, y_2 - 1, y_2, y_2 + 1 \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。基上的其他像素点同样可通过 Bresenham 方法获得。特殊情况下,基  $\mathbf{b}$  的平行基只有一条,这种情况比较简单,不再赘述。

**新的划线规则:** 设基  $\mathbf{b}$  及其两条平行基  $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$  的能量统计分别为  $Y_b, Y_{b_1}, Y_{b_2}$ ,若把  $Y_b > \varepsilon$  记为  $\alpha, Y_{b_1} < \varepsilon_1$  记为  $\beta, Y_{b_2} < \varepsilon_2$  记为  $\gamma$ ,则必须满足  $\alpha \& (\beta \parallel \gamma)$  为真,才认为基  $\mathbf{b}$  是方块中的最优基,此时可把它作为该方块中的线特征;否则将基  $\mathbf{b}$  置零,作为背景。其中,  $\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2 \in (0, 1)$  为设定的阈值。

**$\eta$  规则:** 若  $(Y_b = Y_{b_1} = Y_{b_2}) = 1$ ,此时意味着基  $\mathbf{b}, \mathbf{b}_1$  和  $\mathbf{b}_2$  是方块中固有的线特征,则将它们全部保留。

观察图 2 可见,基  $\mathbf{b}_{AD}$  的能量统计与  $Y^+$  相差无几,且其几何长度更长,  $\mathbf{b}_{AD}$  是这个方块中的最优基。由于按照本节新的能量统计和划线规则,可确保基  $\mathbf{b}_{AD}$  作为唯一的最优基来表征这个二进方块,因此能够解决线重叠、模糊不清的问题。

具体推导过程如下:设 6 条基的平均灰度为  $Y$ ,用  $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3, \mathbf{b}_4, \mathbf{b}_5, \mathbf{b}_6$  分别代表基  $\mathbf{b}_{AB}, \mathbf{b}_{AC}, \mathbf{b}_{AD}, \mathbf{b}_{BC}, \mathbf{b}_{BD}, \mathbf{b}_{CD}$ ,平均灰度  $Y$  值由式(3)计算(如表 1 所示);设阈值  $\varepsilon$  为 0.6,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  均为 0.3。

由表 1 可见,有  $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_3$  和  $\mathbf{b}_5$  等 3 条基的能量统计超过了阈值  $\varepsilon$ ,满足条件  $\alpha$ ;而  $\mathbf{b}_2, \mathbf{b}_4, \mathbf{b}_6$  的能量统计不满足  $\alpha$ ,舍弃。

1) 计算与  $\mathbf{b}_1$  平行的基  $\mathbf{b}_6$ (注意,此时  $\mathbf{b}_1$  只有一条平行基;  $\mathbf{b}_5$  也是)的能量统计  $Y(\mathbf{b}_6) = 0.5$ ,若不满足条件  $\beta$  和  $\gamma$ ,则  $\alpha \& (\beta \parallel \gamma)$  不为真,将  $\mathbf{b}_1$  置零作为背景。

2) 与  $\mathbf{b}_3$  平行的基有两条,即  $\mathbf{b}_{BB}$  和  $\mathbf{b}_{CC}$ (此时已退化点  $B$  和  $C$ ),  $Y(\mathbf{b}_{BB}) = 1, Y(\mathbf{b}_{CC}) = 0$ ;如果能够满足  $\alpha \& (\beta \parallel \gamma)$  为真,则保留  $\mathbf{b}_3$ ;

3) 计算与  $\mathbf{b}_5$  平行的基  $\mathbf{b}_2$  的能量统计  $Y(\mathbf{b}_2) = 0.5$ ,若不满足条件  $\beta$  和  $\gamma$ ,则  $\alpha \& (\beta \parallel \gamma)$  不为真,将  $\mathbf{b}_5$  置零,作为背景。

至此,基  $\mathbf{b}_3(\mathbf{b}_{AD})$  即为要寻找的最优基,可用来表示此块中的线特征,这与前面的分析一致。

表 1 Y 值表  
Tab.1 Values of Y

	$T(\mathbf{b})$	$l(\mathbf{b})$	$Y$
$\mathbf{b}_1$	2	2	1
$\mathbf{b}_2$	1	2	0.5
$\mathbf{b}_3$	2	2	1
$\mathbf{b}_4$	1	2	0.5
$\mathbf{b}_5$	2	2	1
$\mathbf{b}_6$	1	2	0.5

再观察图 4 可见,对于组合 1 ~ 15,可以通过设定合适的阈值  $\varepsilon, \varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$ ,使一个二进方块中最多

只用一条最优基表征;对于组合 16,若符合  $\eta$  规则,则按照  $\eta$  规则处理。

对于  $4 \times 4$  尺度,上述规则同样适用,只是情况稍微复杂一些。另外,在本文中,由于图像的复杂程度不同,阈值是根据经验选择的,大体范围是  $0.3 \sim 0.7$ ,因此在实验中,可以将  $0.5$  作为基点,再做适当调整,以期获得较好的视觉效果。

### 3.3 基于改进算法的图像线特征提取

利用本文的改进算法提取复杂图像线特征的步骤如下:

- 1) 利用小波变换对图像进行预处理,以突显细节特征;
- 2) 确定分割尺度,对处理后的图像进行 Beamlet 变换,得到 Beamlet 变换系数集合;
- 3) 按照新的能量统计,处理 Beamlet 金字塔中的变换系数,并按照新的划线规则提取每个二进方块中的最优基;
- 4) 将图像中的所有最优基作为线特征显示出来。

## 4 实验结果及分析

为了验证本文改进算法的有效性,选取了一幅线条丰富的图像和一幅边缘复杂的真实图像分别进行了测试。由于图像比较复杂,需要分解到较细尺度。最后对本文算法与 Donoho 算法的线特征提取效果和计算复杂度进行了对比分析。

### 4.1 线特征提取效果对比分析

**算例 1** 实验图像为一幅  $256 \times 256$  pixels 大小的 Picasso 图像(如图 5(a)所示)。采用本文算法与 Donoho 算法进行了线特征提取实验,提取结果如图 5 所示。图 5(b)为文献[10]中 Donoho 算法提供的 Demo 图,分解尺度  $j$  为 6;提取的线特征均为绿色线,灰色线为未被提取的线特征。为了与 Donoho 算法进行准确对比,本文算法提取的线特征尺度  $j$  为 6 和尺度  $j$  为 7 的效果图如图 5(d)(e)所示。图 5(c)为小波变换突显的边缘特征,由于将存储能量的低频系数置零,所以图像看起来很黑。小波变换使用的小波基是 db4,小波变换进行了 3 层分解。尺度  $j$  为 6 时,Beamlet 变换的阈值  $\varepsilon$  为  $0.55$ , $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  均为  $0.3$ ;尺度  $j$  为 7 时,Beamlet 变换的阈值  $\varepsilon$  为  $0.6$ , $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  均为  $0.3$ 。

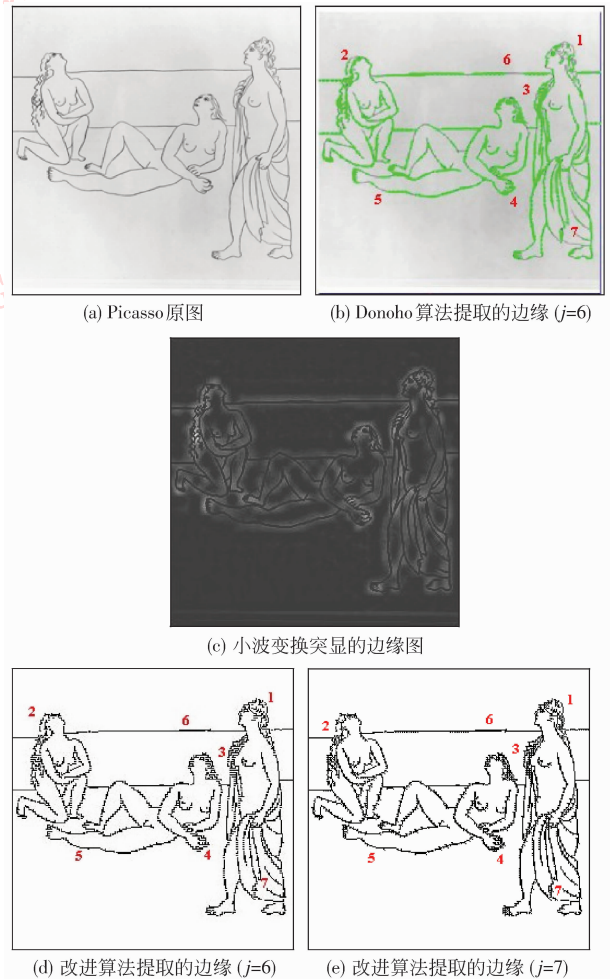


图 5 算例 1 实验结果

Fig. 5 The results of the two algorithms in example 1

由图 5(d)与图 5(b)对比可以看出,图 5(d)不仅在整体效果上(图中标记的 5、6 和 7 等处)要好于图 5(b),基本无断线、漏线之处,而且在细节刻画上(图中标记的 1、2、3 和 4 的头发、手指等处)更清晰精确。图 5(e)由于分割的尺度更细,能够获得更多的细节特征,且又不重叠,因此视觉效果更明显。

**算例 2** 实验图像为一幅  $256 \times 256$  pixels 大小的 Lena 自然图像(如图 6(a)所示)。小波变换的小波基和变换层次以及 Beamlet 变换的分割尺度和阈值均与算例 1 相同。图 6(c)为小波变换后突显的边缘特征。

观察图 6(b)可以看出,对像 Lena 这样的边缘复杂的自然图像,Donoho 算法由于 Beamlet 基之间缺乏“空间抑制”已经难以检测出边缘,不仅基本上提取不到线特征,而且细节特征更是难以刻画。而图 6(d)中长的线特征虽然比较连续完整,但毕竟边

缘相当复杂,因此在细节表现上还不够丰富;图 6(e)不仅长的线特征连续完整,而且像帽缨等这样的细节特征更是清晰可辨,这充分体现出了本文算法的优势。

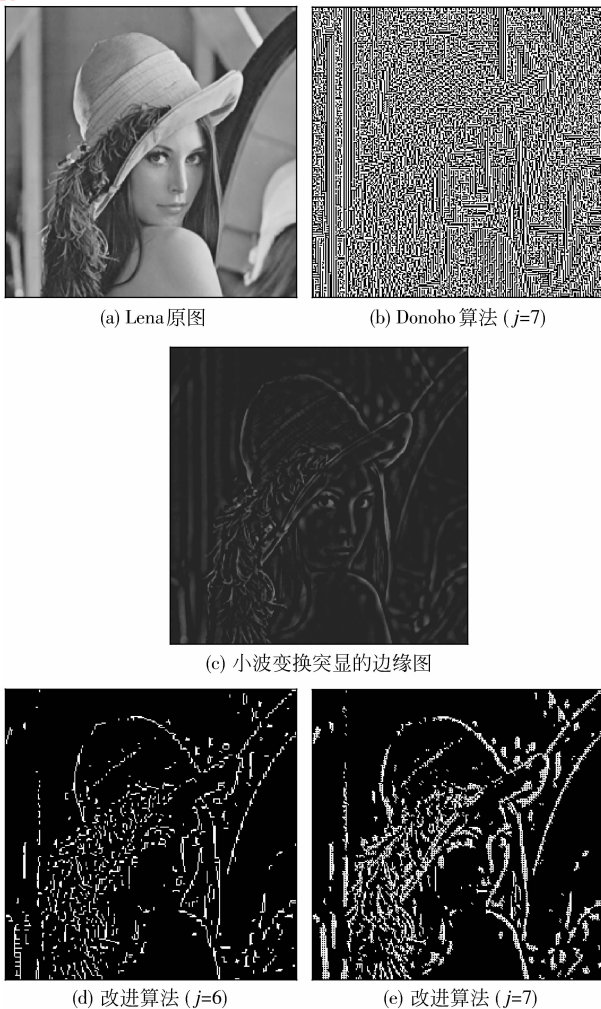


图 6 算例 2 实验结果

Fig. 6 The results of the two algorithms in example 2

#### 4.2 计算复杂度对比分析

典型的图像处理算法的复杂度是  $O(N^2)$  ( $N$  表示图像尺寸大小,单位: pixels,下同), Donoho 算法的复杂度是  $O(N^2 \ln N)$ 。本文为了克服 Donoho 算法在线特征提取时存在的不足,只是增加了小波预处理环节和最优基筛选过程,因此在复杂度上与 Donoho 算法完全相同,也是  $O(N^2 \ln N)$ ,但是在计算时间上要略多于 Donoho 算法。实验时用 Matlab 实现了 Donoho 算法和本文算法,两种算法的计算时间对比如表 2 所示(实验在 CPU:2.4 GHz,内存:512 MB 的计算机上实现)。

表 2 计算时间/s 对比表

Tab. 2 Comparison of Computing Time /s

	尺度 6		尺度 7	
	Donoho 算法	本文改进算法	Donoho 算法	本文改进算法
Picasso 原图	22.302 5	24.403 1	9.186 *	12.167 5
Lena 原图	22.801 *	24.921 9	9.843 8	13.049 4

注: \* 表示本文不需要此项实验,这里只是列出了它们的计算时间。

从表 2 可以看出,本文算法的计算时间要稍多一些,但是并没有显著增加。也就是说,本文在没有明显增加计算量的前提下,获得了比 Donoho 算法更好的线特征提取效果。

## 5 结 论

线特征是图像中非常重要的 1 维奇异特征,在图像处理、计算机视觉、模式识别等领域有着重要的研究价值。本文提出的改进算法,不仅克服了传统的 Beamlet 变换无结构算法在提取复杂图像线特征时遇到的困难,而且利用小波变换突显了图像的细节特征,同时定义了新的能量统计和制定了新的划线规则,并使两者结合,以确保每个二进方块最多只用一条最优基表征。从实验结果看,与 Donoho 算法相比,本文改进算法在复杂图像的线特征提取方面表现出明显的优势,即既能保证长的线特征连续完整,又能使细节特征精细清晰。但也应注意到,对于像 Lena 这样边缘复杂的自然图像,随着尺度的增大,提取的线宽也有所增加,如何解决这一问题,将是以后重点研究的内容。

## 参考文献 (References)

- [1] Leavers V F. Shape Detection in Computer Vision Using the Hough Transform [M]. New York, USA: Springer-Verlag New York Inc, 1992.
- [2] Donoho D L, Huo Xiaoming. Beamlets and multiscale image analysis [C]//Multiscale and Multiresolution Methods: Theory and Applications, Lecture Notes in Computational Science and Engineering. Berlin, Germany: Springer Press, 2001, (20): 149-196.
- [3] Shi Qinfeng, Zhang Yanning. Adaptive linear feature detection based on beamlet [C]//Proceeding of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2004: 3981-3984.

- [ 4 ] Qu Qingchun, Peng Yuhua, Yang Mingqiang. 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. ]
- [ 5 ] Yang Lingxiang, Li Junxia, Shui Penglang. 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. ]
- [ 6 ] Jiao Licheng, Tan Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 1975-1981. [ 焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾与展望[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1975-1981. ]
- [ 7 ] Huo Xiaoming, Chen Jihong. JBEAM: Multiscale curve coding via beamlets[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(11): 1665-1677.
- [ 8 ] Yang Ming, Yin Yong, Peng Yuhua, et al. Beamlet transform and multiscale linear feature extraction [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 100-103. [ 杨明, 尹勇, 彭玉华, 等. Beamlet 变换与多尺度线特征提取[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 100-103. ]
- [ 9 ] Xie Jiecheng, Zhang Dali, Xu Wenli. Overview on wavelet denoising[J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(A)(3): 209-217. [ 谢杰成, 张大力, 徐文立. 小波图象去噪综述[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(A)(3): 209-217. ]
- [ 10 ] Donoho D L. Beamlab Toolbox [CP/OL]. (2003 - 01 - 29) [2009 - 03 - 10]. <http://www-stat.stanford.edu/~beamlab/>.