

# 基于 Hilbert 扫描和小波变换的自适应图像分割

张荣祥<sup>1)</sup> 郑世杰<sup>1)</sup> 夏庆观<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (南京航空航天大学智能材料与结构研究所, 南京 210016)

<sup>2)</sup> (南京工程学院自动化系, 南京 210013)

**摘要** 阈值的选择是图像阈值分割法的关键, 针对现有阈值法中存在的没有充分地考虑图像像素之间的空间相关信息等问题, 提出把 Hilbert 图像扫描方法和小波变换相结合, 获得了连续光滑的阈值曲线, 从而建立了一种局部自适应阈值法。首先通过 Hilbert 图像扫描的方法将 2 维图像信息转化为 1 维 Hilbert 序列; 然后利用小波变换对其进行多分辨率分析获得信号的发展趋势曲线, 并将该曲线作为阈值曲线对 Hilbert 序列进行量化处理; 最后对量化后的 Hilbert 序列运用 Hilbert 图像扫描的反过程恢复为 2 维图像信息, 从而实现原图像的分割。该方法所建立的阈值曲线能够随像素点的环境变化而自适应调整, 反映出当前区域图像灰度信息的变化趋势, 从而充分地保留了图像的局部信息和原图像中相邻像素的相关性, 提高了图像分割效率。实验结果表明, 该方法具有分割性能好以及受噪声影响小等优点, 是一种非常有效的图像分割方法。

**关键词** 图像分割 图像扫描 Hilbert 曲线 多分辨率分析 阈值曲线

中图法分类号: TP391.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)04-0666-06

## Self-adaptive Image Segmentation Method Based on Hilbert Scan and Wavelet Transform

ZHANG Rong-xiang<sup>1)</sup>, ZHENG Shi-jie<sup>1)</sup>, XIA Qing-guan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (Department of Smart Materials & Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

<sup>2)</sup> (Department of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013)

**Abstract** Threshold selection is the critical process of image threshold segmentation method. Considering the neglect of spatial correlation of image pixels in current threshold segmentation methods, we propose to combine Hilbert image scan with wavelet transform to obtain a continuous and smooth threshold curve, and then propose a local self-adaptive threshold method in this paper. Firstly, the image is translated into 1D Hilbert order via Hilbert image scan method; Secondly, the curve of the developing trend of the Hilbert order is obtained by the multi-resolution analysis using wavelet transform. Furthermore this curve is chosen as self-adaptive threshold and the Hilbert order binarization is realized. Lastly, the binarized Hilbert order is translated into 2D image using the reverse Hilbert matrix scan and the image segmentation is achieved. The threshold curve achieved by the above-mentioned method is able to self-adaptively adjust along with neighborhood property, and reflects the developing trend of grayscale information in current image region. So the present algorithm preserves the local information and the relativity of adjacency pixels in the image. Moreover, it also improves the efficiency of image segmentation. Experiments indicate that the proposed method is an extraordinary effective image segmentation technique. It is with very good performance and immunes to noise.

**Keywords** image segmentation, image scanning, Hilbert curve, multi-resolution analysis, threshold curve

## 1 引言

图像分割是图像处理中的基本问题,计算机视觉研究中目标检测、目标识别、特征提取等的精度都依赖于图像分割的质量。其中阈值分割法简单可靠、运算量小,在图像分割中占着主要地位。在图像阈值分割法中,阈值的选择是分割的关键,阈值取得过高或过低,都会造成目标和背景错分,直接影响图像分割的效果。国内外许多学者在如何确定合适的分割阈值这一问题上已做了大量的研究工作<sup>[1-8]</sup>,但是各种方法都有自己特定的实用范围,到目前为止还没有一种通用的方法。

现有的阈值分割方法可分为整体阈值法和局部阈值法两大类。整体阈值法一般根据整幅图像的灰度直方图信息确定一个固定阈值,对整幅图像进行分割。这种算法简单、易于实现,但阈值的确定主要依赖于直方图,很少考虑像素的空间位置关系,当背景较复杂时易造成分割不完整。如著名的类间方差(Otsu法)方法<sup>[3]</sup>,当目标与背景比例适当时,分割效果较好,但是当目标与背景的比例悬殊,或者被噪声污染时,类间方差法的分割精度变差。文献[4]通过引入模式识别理论中的 Fisher 评价函数,提出了基于 Fisher 评价函数的图像分割新方法,并通过实验论证了该方法比最大熵法、最小误差准则法具有分割性能稳定等优点。与整体阈值法不同,局部阈值一般是将图像分成一些子块,对于每一子块由像素灰度值和局部灰度特性分别选取一个不同的阈值进行分割处理。可见局部阈值法并没有从根本上改变整体阈值法的不足,其图像分割精度仍然明显依赖于各子块的尺寸<sup>[5]</sup>,同时还可能产生“块效应”。可见,整体阈值法和局部阈值法并没有充分利用图像像素之间的空间相关信息,其阈值都是一个或几个固定值,不能随像素点的环境变化而自适应连续调整。随着对小波变换方法的深入研究,多分辨分析方法在图像处理中的应用研究逐渐受到人们的关注<sup>[1,6-8]</sup>。该方法克服了分块处理带来的不足,为小波变换在图像分割处理中的应用提供了重要的研究方向。

结合小波变换的多分辨分析方法,提出一种新的针对于整体的局部自适应阈值分割方法。该方法利用包含图像像素灰度信息和像素空间相关信息的 Hilbert 序列,在利用小波变换的多分辨分析提取出该 Hilbert 序列的发展趋势曲线的基础上,确定出光滑且连续的阈值曲线,在依据图像整体信息的基础上,兼顾了局部信息,实现了图像局部的自适应分割。与著名的 Otsu 法以及文献[4]中的 Fisher 法处理结果对比表明,在图像背景较复杂、目标与背景的比例悬殊以及受噪声污染的情况下,本文方法图像分割精度明显提高。

## 2 基于 Hilbert 扫描-小波的图像分割

### 2.1 图像扫描的 Hilbert 序列快速生成

Hilbert 曲线是经典分形曲线之一,可以看作一种从  $N$  维(一般是 2 维)空间到 1 维空间的映射,具有严格的自相似性,能尽可能地保持原空间中相邻点的相关性,当阶数足够大时,它将充满整个正方形。Hilbert 扫描是一种连续、没有交叉且经过相邻点的 2 维空间扫描方法,是一种重要的图像处理工具,它较好地保留了图像中相邻点的相关性,比其他扫描方法(如 Zig-Zag 扫描法、连续光栅扫描法等)具有明显的优越性<sup>[9]</sup>,现已被广泛应用于图像压缩<sup>[10]</sup>、数字图像置乱<sup>[11]</sup>等,但目前还很少见到应用于图像分割的研究报道<sup>[12]</sup>。

Hilbert 曲线的具体生成过程如下<sup>[13]</sup>:首先将一个正方形方阵 4 等分,标记出各个小正方形的中心并连接成图 1(a)所示的折线,然后将各个小正方形 4 等分,连接各个小正方形的中心如图 1(b)所示,重复上述分割和连接过程得图 1(c)图形。根据图像的维数信息设置相应的分割次数就得到对应图像的 Hilbert 扫描曲线。

这里采用基于矩阵运算的 Hilbert 曲线扫描矩阵的递推算法<sup>[11]</sup>获得相应的 Hilbert 扫描矩阵,将 Hilbert 扫描矩阵中的元素按照先小后大的顺序依次连接起来,便得到相应的 Hilbert 扫描曲线。

记  $2^n$  阶 Hilbert 扫描矩阵为  $H_{2^n}$ ,生成  $H_{2^{n+1}}$  的递推关系为

$$H_{2^{n+1}} = \begin{cases} \begin{bmatrix} H_{2^n} & (2^{2n+1} + 2^{2n})E_{2^n} + \text{flipud}(\text{fliplr}(H_{2^n})) \\ 2^{2n}E_{2^n} + H_{2^n}^T & 2^{2n+1}E_{2^n} + H_{2^n}^T \end{bmatrix} & n \text{ 为奇数} \\ \begin{bmatrix} H_{2^n} & 2^{2n}E_{2^n} + H_{2^n}^T \\ (2^{2n+1} + 2^{2n})E_{2^n} + \text{flipud}(\text{fliplr}(H_{2^n})) & 2^{2n}E_{2^{n+1}} + H_{2^n}^T \end{bmatrix} & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1)$$

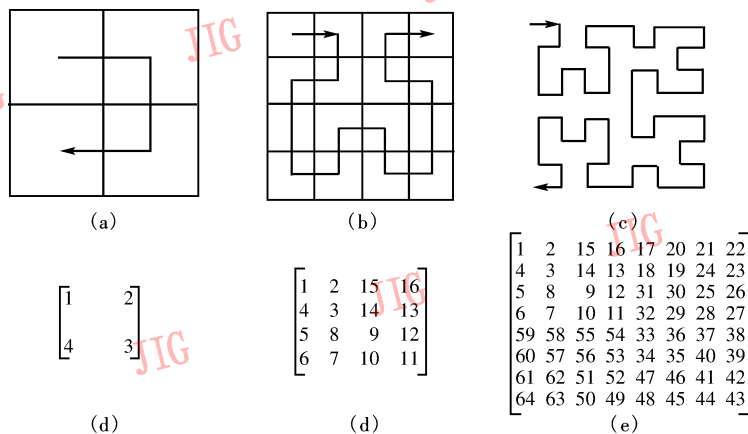


图 1 Hilbert 扫描曲线和矩阵生成过程

Fig. 1 The generation of Hilbert curve and Hilbert matrix

其中,  $\mathbf{E}_{2^n}$  是全 1 的  $2^n$  阶方阵,  $\text{flipud}(\mathbf{A})$  表示矩阵  $\mathbf{A}$  的元素上下对调,  $\text{fliplr}(\mathbf{A})$  表示矩阵  $\mathbf{A}$  的元素左右对调, 初始条件:  $\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 3 \end{bmatrix}$ 。因此, 图 1 中 (a) ~ (c) 扫描曲线对应的扫描矩阵分别为图 1 中的 (d) ~ (f)。

对于一大大小为  $2^l \times 2^l$  个像素的图像, 可以表示为  $F(u, v)$ ,  $u, v \in \{1, 2, \dots, 2^l\}$ , 其中,  $F(u, v)$  表示图像中像素点  $(u, v)$  的灰度值, 利用式 (1) 计算出的相应 Hilbert 扫描矩阵  $\mathbf{H}_{2^l}$  对图像进行扫描, 即可得 Hilbert 序列  $G(m)$ , 不难发现

$$G(m) = \langle F(u, v) \rangle \quad (2)$$

式中,  $m \in \{1, 2, \dots, 2^{2l}\}$  表示扫描序号,  $\langle \cdot \rangle$  表示将图像  $F(u, v)$  通过 Hilbert 矩阵  $\mathbf{H}_{2^l}$  扫描为 Hilbert 序列的映射。经上述方法获得的 Hilbert 序列  $G(m)$  保留了原图像中像素间的最佳连续特性, 充分兼顾了各个方向上的相邻相关性, 同时易于实时实现。

## 2.2 Hilbert 序列的小波变换多分辨分析

通常, 信号的发展趋势往往在信号的分析与处理中起着重要的作用, 但是时域信号的发展趋势并不能很容易地看出, 而小波变换的多分辨分析功能使其具备了解决这一问题的条件。

实际中, 常用离散小波变换, 即对尺度因子  $a$  和平移因子  $b$  进行离散采样:  $a = 2^j$ ,  $b = k2^j$ ,  $k, j \in \mathbf{Z}$ , 小波函数为  $\Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j}t - k)$ 。对于任意函数  $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$  的离散小波变换定义为  $f(t)$  和小波函数  $\Psi_{j,k}(t)$  的内积:

$$W_f(j, k) = \langle f(t), \Psi_{j,k}(t) \rangle = \int_{\mathbf{R}} f(t) \tilde{\Psi}_{j,k}(t) dt \quad (3)$$

式中,  $\tilde{\Psi}$  表示  $\Psi$  的共轭。

小波变换的多分辨分析建立在对信号进行离散小波分解和重构的基础上。对于由 Hilbert 图像扫描得到的离散 Hilbert 序列  $G(m)$ , 可采用 Mallat 塔式算法<sup>[14]</sup>进行小波分解和重构。根据多分辨分析和滤波器组理论, 可得下式分解:

$$\begin{cases} x_k^{(j)} = \sum_m h_0(m - 2k)x_m^{(j-1)} \\ d_k^{(j)} = \sum_m h_1(m - 2k)x_m^{(j-1)} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $x_k^{(j)}$  与  $d_k^{(j)}$  是信号在分解水平  $j$  下的离散低频系数与离散高频系数;  $h_0(m)$  和  $h_1(m)$  分别是低通滤波器系数和高通滤波器系数, 分解的初始信号  $x_m^{(0)}$  为待分解的原信号, 即  $G(m)$ 。信号的重构算法为

$$x_m^{(j-1)} = \sum_k h_0(m - 2k)x_k^{(j)} + \sum_k h_1(m - 2k)d_k^{(j)} \quad (5)$$

通过上述的小波分解和重构算法可以实现对任意平稳和非平稳信号的处理。

通过小波分解, 去除那些高频分量, 对最后一层分解的低频分量进行重构, 即可以得到 Hilbert 序列  $G(m)$  的发展趋势曲线  $g(m)$ 。由于是通过小波分解的低频分量进行重构, 因此重构信号不易受原信号局部脉冲的影响, 决定了提取出的信号趋势具有抗干扰性, 这为本文方法的抗噪能力打下了基础。

## 2.3 Hilbert 扫描——小波图像分割方法

整体阈值法和局部阈值法的实质, 实际上分别是整体和子块上的固定阈值法, 二者的主要缺陷就是没有充分考虑图像灰度信息特征的局部和整体变化趋势。为此, 通过把 Hilbert 图像扫描和小波变换相结合, 提出了一种新的局部自适应阈值方法, 该方

法利用 Hilbert 图像扫描获取包含图像像素灰度信息和像素空间相关信息的 Hilbert 序列,把利用小波变换的多分辨分析提取出的该 Hilbert 序列的发展趋势曲线作为阈值曲线,从而实现阈值的连续调整和图像的自适应分割。具体方案如下:

(1) 利用式(1)的递推算法产生与待分割图像维数相对应的 Hilbert 矩阵,如图 2(a)所示的 Lena 图像(256 × 256),其对应的 Hilbert 矩阵是 256 × 256 的方阵。

(2) 利用该 Hilbert 矩阵扫描图像将 2 维图像信息转化为 1 维 Hilbert 序列,图 3(a)即为扫描 Lena 图像而获得的 Hilbert 序列(横坐标表示像素的扫描序号,纵坐标表示相应像素的灰度值),它包含了各

像素的灰度信息以及像素间的空间位置关系。

(3) 利用上述 Mallat 小波分解与重构算法提取 Hilbert 序列的发展趋势曲线,将该曲线作为阈值曲线对原 Hilbert 序列进行阈值处理。设从原图扫描出的 Hilbert 序列为  $G(m)$ ,小波多分辨分析提取出的阈值曲线为  $g(m)$ ,阈值量化处理后的信号为  $H(m)$ ,阈值处理的量化规则如下:

$$H(m) = \begin{cases} 255 & G(m) > g(m) \\ 0 & G(m) \leq g(m) \end{cases} \quad (6)$$

(4) 将阈值处理后的 1 维信号  $H(m)$  通过 Hilbert 矩阵反扫描转化为 2 维图像即实现了图像的局部自适应分割。

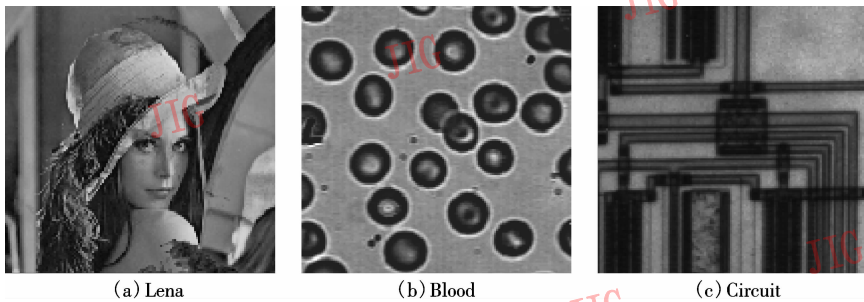


图 2 用于分割和比较的图像

Fig. 2 Images for segmentation and comparison

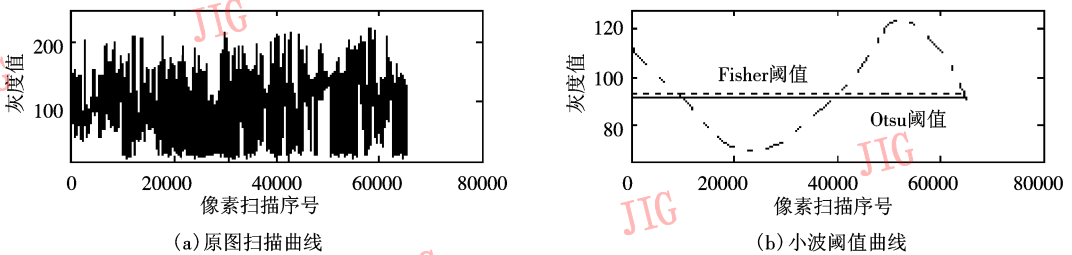


图 3 Hilbert 序列及阈值曲线

Fig. 3 Hilbert order and threshold curve

### 3 实验分析

为了验证本文图像分割方法的有效性,选择背景较复杂的标准测试图像 Lena 为实验对象,同时对另外两幅不同复杂度的图像(如图 2(b)、(c)所示)进行处理,并且将处理结果与经典的 Otsu 法以及 Fisher 法进行比较。

首先,对无噪声的 Lena 图像进行 Hilbert 扫描得相应的 Hilbert 序列数据如图 3(a)所示。

采用 db4 小波函数,对该 1 维 Hilbert 序列分解 14

层,取第 14 层的低频分量重构获得信号发展趋势曲线。图 3(b)中的点划线为采用本文方法即多分辨分析识别出的信号发展趋势曲线,由于该方法考虑了图像的局部信息,所以该阈值曲线时高时低,表现出很强的局部自适应能力。以该曲线对图 3(a)的 1 维信号按照式(6)进行阈值量化处理,图 4(c)为阈值量化后的 1 维信号经过 Hilbert 反扫描恢复出的二值图像;Otsu 法的处理结果如图 4(a)所示;由图 3(b)可见 Fisher 阈值与 Otsu 阈值相差无几,故其处理效果(如图 4(b)所示)并无明显改善。比较图 4(a) ~ (c)可以发现,在图像背景较复杂时,本文方法保留了更多的细节信息,改善

了图像分割效果,真实有效地反映了图像的主题。

图 4(d) ~ (f) 分别是被加入 0.001 方差高斯白噪声的 Lena 图像的 Otsu 法、Fisher 法以及本文提出的 Hilbert 扫描一小波图像分割方法的图像分割结果,其中图 4(f) 的边缘细节仍然清晰可见。可以看出在噪声的影响下,先用 Hilbert 矩阵扫描图像为

Hilbert 序列后再用小波多分辨分析提取出信号的发展趋势并进行阈值量化处理,由此可以有效地从噪声中提取出图像的细节信息,而 Otsu 法以及 Fisher 法分割的图像细节则被淹没在噪声中,说明本文方法具有一定的抗噪能力。若能先通过适当的图像滤波操作则可以获得更好的分割效果。

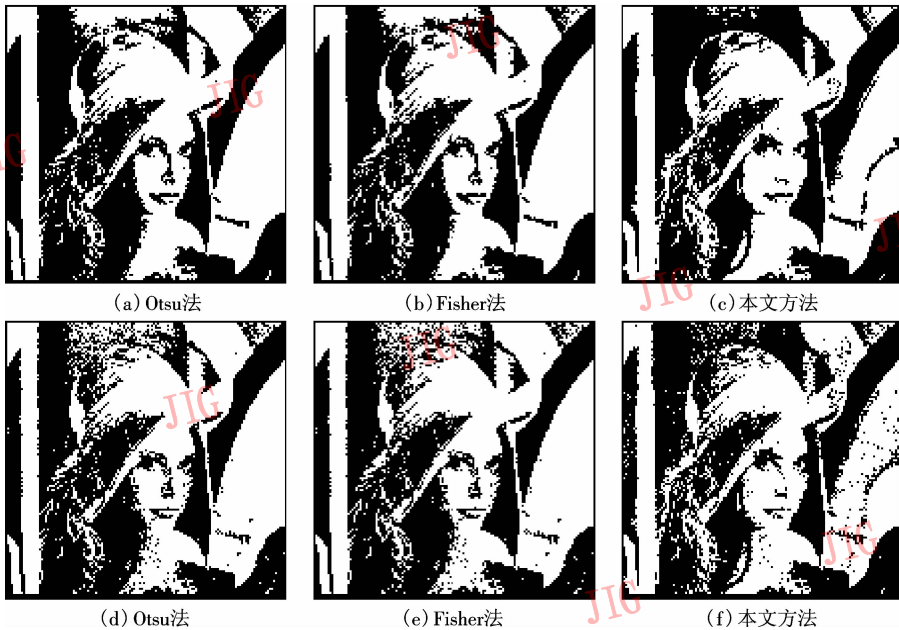


图 4 含噪声 Lena 图像分割结果及比较

Fig. 4 The segmentation result and comparison of noised Lena

对另外两幅不同复杂度的图像 Blood 和 Circuit 进行图像分割和比较,结果如图 5、图 6 所示。观察图 5(a) ~ (c) 可知,Hilbert 扫描一小波的图像分割方法很好地提取了细胞的边缘,同时也去除了不必要的背景小斑点,细胞和背景分割清晰;Otsu 方法分割的 Circuit 图像如图 6(a) 所示,可见线路与线路之间不能很好地分离,模糊不清,有的甚至连在一起,这对于电路的检测是很不利的,图 6(b) 所示的 Fisher 法分

割结果较 Otsu 方法有所改善,但依然存在较多的模糊地带。本文方法的分割结果如图 6(c) 所示,它利用了局部区域像素的灰度特性和其空间相关性进行分割,所以线路边缘清晰可见。因此通过小波变换的多分辨分析识别出原图扫描曲线的发展趋势的方法充分考虑和利用了图像的局部信息,在图像分割过程中综合考虑了图像的整体信息和局部信息,在保证图像的整体完好分割的同时也不丢失细节。

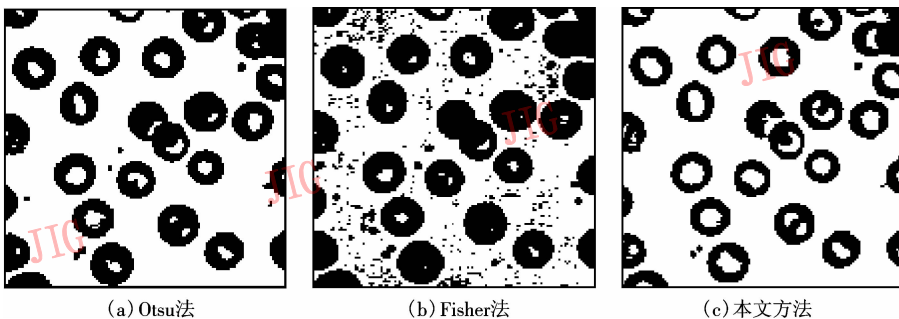


图 5 Blood 图像分割结果与比较

Fig. 5 The segmentation result and comparison of Blood

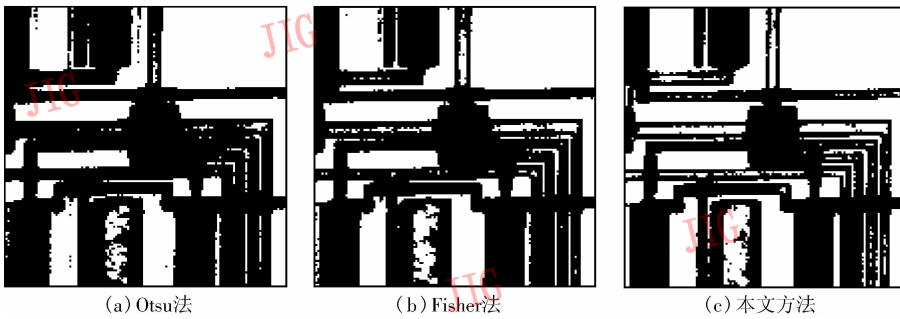


图6 Circuit 图像分割结果与比较

Fig. 6 The segmentation result and comparison of Circuit

## 4 结 论

利用 Hilbert 图像扫描方法将 2 维图像信息转化为 1 维信号,进而与小波变换多分辨分析相结合,建立了一种严格意义上基于整体信息的局部自适应阈值法,并获得了连续光滑的阈值曲线,该阈值曲线能够随像素点的环境变化而动态调整,反映出当前区域图像灰度信息的变化趋势,最后通过对 1 维信号的阈值量化处理达到对原图像的分割处理,实验结果验证了该方法的可行性。本文方法有效地克服了依据灰度直方图分割不能兼顾图像局部信息的缺点,在图像背景较复杂时能很好地保留图像的细节信息,而且具有很强的局部自适应能力和抗噪声能力。

### 参考文献 (References)

- 1 Kim Byung-Gyu, Shim Jae-Ick, Park Dong-Jo. Fast image segmentation based on multi-resolution analysis and wavelets [J]. Pattern Recognition Letters, 2003, **24** (16): 2995 ~ 3006.
- 2 Bir Bhanu, Jing Peng. Adaptive integrated image segmentation and object recognition [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 2000, **30** (4): 427 ~ 441.
- 3 Otsu. A threshold selection method from grey-level histograms [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1979, **9**(1): 62 ~ 66.
- 4 Chen Guo. The fisher criterion function method of image thresholding [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, **24** (6): 564 ~ 567. [陈果. 图像阈值分割的 Fisher 准则函数法 [J]. 仪器仪表学报, 2003, **24** (6): 564 ~ 567.]
- 5 Chu Ya-yun, Zhan Xiao-si, Sun Zhao-cai. A novel fingerprint image binarization algorithm based on orientation information [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, **11** (6): 855 ~ 860. [楚亚蕴, 詹小四, 孙

兆才. 一种结合方向信息的指纹图像二值化算法 [J]. 中国图象图形学报, 2006, **11** (6): 855 ~ 860.]

- 6 Inna Stainvas, David Lowe. A generative probabilistic oriented wavelet model for texture segmentation [J]. Neural Processing Letters, 2003, **17** (3): 217 ~ 238.
- 7 Arivazhagan S, Ganesan L, Bama S. Fault segmentation in fabric images using Gabor wavelet transform [J]. Machine Vision and Applications, 2006, **16** (6): 356 ~ 363.
- 8 Pichel J C, Singh D E, Rivera F F. Image segmentation based on merging of sub-optimal segmentations [J]. Pattern Recognition Letter, 2006, **27** (10): 1105 ~ 1116.
- 9 Liu Xiang-dong, Duan Xiao-dong. Measurement of undulation on image scanning and a fast algorithm for constructing Hilbert scanning matrix [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2002, **17** (2): 146 ~ 150. [刘向东, 段晓东. 图像扫描波动性定量标准及分形扫描矩阵的快速生成 [J]. 数据采集与处理, 2002, **17** (2): 146 ~ 150].
- 10 Kamata Sei-ichiro, Niimi Michiharu. A gray image compression using a Hilbert scan [A]. In: Proceedings of Thirteenth International Conference on Pattern Recognition [C], Vienna, Austria, 1996, **3**: 905 ~ 909.
- 11 Wang Sun, Xu Xiao-shuang. A new algorithm of Hilbert scanning matrix and its MATLAB program [J]. Journal of Image and Graphic, 2006, **11** (1): 119 ~ 122. [王笋, 徐小双. Hilbert 曲线扫描矩阵的生成算法及其 MATLAB 程序代码 [J]. 中国图象图形学报, 2006, **11** (1): 119 ~ 122]
- 12 Cai Yong, Chen Nian-nian, Li Bo. Automatic segmentation of ultrasound medical images [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University (Natural Sciences), 2004, **23** (4): 61 ~ 64. [蔡勇, 陈念年, 李波. 超声医学图像的自动分割 [J]. 兰州交通大学学报 (自然科学版), 2004, **23** (4): 61 ~ 64]
- 13 Xian Liu. Four alternative patterns of the Hilbert curve [J]. Mathematics and Computation, 2004, **147** (3): 741 ~ 752.
- 14 Mallat S. A wavelet tour of signal processing (Second Edition) [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 235 ~ 367.