

文章编号 1004-924X(2013)09-2464-08

# 基于改进的图论最小生成树及骨架距离 直方图分割细胞图像

王卫星\*, 田利平, 王悦

(福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350000)

**摘要:**为了解决模糊且有粘连的细胞图像的难以分割问题,本文针对医学细胞图像的特点,应用图论的思想提出了一种图论与数学形态学结合的图像分割算法。该算法先对图像进行去噪和增强,然后用改进的图论最小生成树(MST)算法对细胞图像进行初始分割。改进的主要内容是在算法中引入了细胞尺寸和形状的信息,从而在一定程度上改善了图论算法过分割的缺陷。在进一步的图像分割中,为了解决二值图像中的细胞粘连问题,结合数学形态学的骨架边界距离信息找出分裂线将粘连细胞分离。与常规的分水岭算法完全不同,该算法没有重复性的运算。一系列细胞图像的试验表明,该算法能够很好地分割模糊且有粘连的细胞图像,其结果令人满意。

**关键词:**细胞图像;图像分割;图论;最小生成树;数学形态学

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132109.2464

## Segmentation of cell images based on improved graph MST and skeleton distance mapping

WANG Wei-xing\*, TIAN Li-ping, WANG Yue

(School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350000, China)

\* Corresponding author, E-mail: znn525d@qq.com

**Abstract:** To segment fuzzy and touching cell images accurately, an image segmentation algorithm based on graph theory and morphological mathematics was proposed according to the characteristics of medical cell images. With proposed algorithm, the images were smoothed and sharpened, firstly. Then, the improved Minimum Spanning Tree (MST) algorithm was used to segment the cell images, in which the cell size and shape information were added into MST graph to avoid the over-segmentation. Furthermore, the adherent cells were split by combining the distance mapping and the skeleton information in morphological mathematics to solve the problem of cell adhesion in the binary image. Different from the traditional watershed algorithms, the split algorithm has no repeat operation. By experiments, it shows that the proposed algorithm can segment fuzzy and touching cell images well and can obtain desired results.

**Key words:** cell image; image segmentation; graph theory; Minimum Spanning Tree(MST); mathematical morphology

## 1 引言

细胞是生物体最基本的组成单元,显微镜的研究发展对细胞的识别起到了推进作用。2008年 Keller 等人在国际著名期刊《科学》(SCIENCE)上发表了相关论文<sup>[1]</sup>,他们的工作将细胞等微物质更清晰地显示给人们,但这种高精度的细胞图像给细胞识别提出了更高的要求。近些年发展迅速的生物医学的一个重要方向就是通过细胞的识别、计数来分析纹理图像是否发生畸变以诊断疾病,但是由于细胞间存在相互重叠、粘连的情况,使得对细胞的计数和识别等后续分析变得困难<sup>[2-3]</sup>。为此,图像分割显得尤为重要。Yousef 等<sup>[4]</sup>和 Jaroslaw 等<sup>[5]</sup>提出了多阈值的图像分割方法:将一维灰度直方图划分成 3 个独立子块,先确定出各个子块的信息熵,再根据最大信息熵原理,进一步确定最佳图像分割阈值。Nassir<sup>[6]</sup>结合  $K$  均值聚类法、分水岭法和区域增强方法进行图像分割和边缘检测。Jo<sup>[7]</sup>等人用混合流域和区域增长算法来处理相衬显微镜下背景颜色和细胞颜色具有低对比度的细胞。Pohle<sup>[8]</sup>等把待分割区域像素值看作一个正态分布,先用原始区域生长算法估算出分布参数,再将该参数应用到第二遍生长过程中,从而获得更好的分割结果。基于图论的分割方法是近些年来国内外研究的热点<sup>[9]</sup>,Eitan 等人在国际著名杂志《自然》(NATURE)上发表了相关内容的论文<sup>[10]</sup>。研究结果显示:不易分辨的草丛中的蝴蝶及岩石背景中的猎豹(皮毛与岩石的模式类似)都可以被清晰地提取出来。Vanhamel<sup>[11]</sup>等提出了基于图论的非线性多尺度彩色图像分割算法;胡学刚等<sup>[12]</sup>提出基于图论和归一化的分割准则,并把对数图像处理模型(LIP 模型)应用到图像处理中;叶伟等<sup>[13]</sup>结合 Mumford—Shah 理论,提出了一种优化方法,通过考虑图像中区域间的结合程度以及各区域的几何性质,计算区域间基于结合度的权值并将其加入到最小生成树的图像分割方法;Zhang 等人<sup>[14]</sup>提出分水岭和图论结合的图像分割方法。

上述算法大都是基于具体的图像特点来确定的,很难分割具有目标粘连情况的模糊细胞图像。为此,本文设计了一种新的图像分割算法,该算法先用改进的分数阶微积分算法对图像进行预处理;

然后用改进的最小生成树(Minimum Spanning Tree, MST)算法进行灰度图像分割,最后根据细胞的形状特征用基于数学形态学的算法来解决欠分割的问题。试验证明该方法对试验中的图像效果较为理想。

## 2 基于图论的图像分割的基本原理

### 2.1 图论的基本思想

基于图论的图像分割方法的主要思想是将图像映射为无向的加权图,每一个像素看成一个节点,像素与像素的相邻关系看作图像的边,像素与像素间的差异或相似性及空间距离作为对应边上的权重,这样就把图像转化为图,再利用图论的成熟理论对其进行分割。图论用于图像分割的基本方法有最小割、最小生成树、图谱等方法。鉴于最小生成树算法结构简单、易于实现且从全局考虑,分割效果较为理想,所以本文用最小生成树方法。

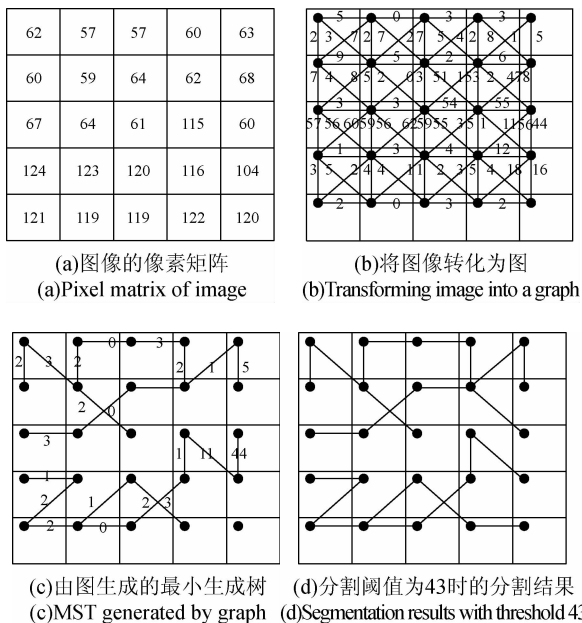


图1 图论算法的简要说明

Fig. 1 Brief description of graph theory algorithms

上图为图论算法的详细说明,图 1(a)为图像的灰度值矩阵。图 1(b)为由图像转化为图(8 邻域)的结果。图 1(c)为图 1(b)对应的最小生成树。图 1(d)为边的阈值为 11~43 的分割结果,图像被分成 2 个不同区域。

### 2.2 MST 的基本概念及其算法

最小生成树法是通过计算图像中的最小生成

树来寻找差异最小的连通区域的分割算法。该算法将整幅图像按相邻边的像素差生成一棵 MST,再用动态规划的方法将 MST 划分成像素值较为均一的几部分。最小生成树的实现算法通常有:Kruskal(避圈法)算法、Prim(边割法)算法。本文所使用的 Kruskal 算法的思想是:每次选取权值最小的边  $e$  加入树中,如果此时构成回路,那么它一定是这个回路中的最长边,将其删除,如此循环直至把所有的顶点都包含在树里。这时树中不含任何回路,因此是最小生成树。

针对灰度图像,对边上的权值定义为:

$$\omega(i, j) = \frac{\sqrt{(f_i - f_j)^2}}{e} \times \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (1)$$

其中,  $f_i, f_j$ , 分别为像素的灰度值,  $x_i, x_j, y_i, y_j$  为该点的横纵坐标分量。该权重的定义不但考虑到灰度图像的像素差值,也考虑到像素间的空间距离。

对于形成的最小生成树,确定一个阈值  $H$ ,将边长大于该阈值的边断开,这样就形成一个森林集。将最佳阈值的确定转化为一个优化问题,即按此阈值分成的森林集类间距离与类内距离的比值最大,这样得到目标函数:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^m p_i (m_i - m)^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^i (X_j - m_i)^2 h_j}. \quad (2)$$

此目标函数中分子是类间总距离,分母是类内总距离。 $H$  越大说明分割越准确。 $p_i$  是类内  $i$  个样本点出现的频率, $m$  是全图像素的均值, $m_i$  是  $i$  个分类的像素均值。 $i$  是聚类个数, $h_j$  是类内  $i$  个数据出现的频率。分别把图中的所有边值作为阈值边,计算出对应的  $H$ ,得到最大  $H$  的边即为最优分割阈值边  $d_y$ 。

$$d_y = \max\{H\}. \quad (3)$$

### 2.3 基于尺寸和形状信息的 MST 算法

按上述最佳阈值边把图像分割为多个树的森林集,但是可能会出现单个像素点或小区域,本文采用合并准则将一些小区域合并。

细胞形态特征:成熟的红细胞无核,正常情况下呈凹圆盘形,细胞的边缘光滑,形状规则,形状近似于圆或椭圆;细胞的面积大小近似相同。

细胞的面积可用细胞边界所围区域中包含的像素个数来表示。在数字图像中,区域面积可以

定义为区域内所含的像素个数,即可将区域内像素标记为  $f(x, y) = 1$ ,区域外标记为  $f(x, y) = 0$ ,则面积为:

$$A = \sum_{x=0}^{x-1} \sum_{y=0}^{y-1} f(x, y), \quad (4)$$

$$(a) \text{ 若 } A_i < \min(\text{area}) \begin{cases} True \\ False \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $A_i$  为第  $i$  个区域的面积,  $\min(\text{area})$  为用户设定的细胞面积最小值。若相邻两区域上式结果都为真,且满足:

$$Dif(C_1, C_2) > MInt(C_1, C_2), \quad (6)$$

其中,  $Dif(C_1, C_2) = \min_{u \in C_1, v \in C_2, (u, v) \in E} \omega(u, v)$ , 类间的差异为连接 2 个区域边的最小权重,  $MInt(C_1, C_2) = \min(Int(C_1), Int(C_2))$ , 其中  $Int(c) = \max_{e \in MST(C, E)} \omega(e)$ , 表示类内的差异为区域内所有边的最大权重,即若两个区域都比设定的最小区域小,且区域内的相似度小于区域间的相似度,则将两区域合并。

$$(b) \text{ 若 } A_i > \max(\text{area}) \begin{cases} True \\ False \end{cases}, \quad (7)$$

其中,  $\max(\text{area})$  为用户设定区域的最大面积,若第  $i$  个区域的面积超出设定的范围,则找到区域内的权重最大的边将它断开。

这样就将细胞的形状控制在一定的范围内,减少原图论算法产生的过分割。尽管如此,基于灰度分割后的二值图像往往会有细胞粘连的现象,一般的解决方法是基于细胞形状的分离<sup>[15]</sup>,本文提出了一种不同于分水岭算法的数学形态学方法。

### 3 基于骨架距离直方图的粘连细胞分离

在图像处理中,对于粘连的目标物体,目前已经有着各种不同的分离算法<sup>[16-18]</sup>,每种算法都是针对具体的目标特征而设计的。在本文的研究中,基于细胞形状的分割是运用数学形态学原理对粘连的细胞进行再分割。骨架是一幅图像的重要的几何特征。在本算法中先用最大圆盘法将粘连细胞的骨架提取出来,然后根据骨架直方图将粘连细胞的分割点找到,对粘连细胞进行分离。由于骨架上的毛刺会对这一过程产生影响,因此,

本文又研究了一种去除毛刺的算法。

### 3.1 骨架提取及其直方图

(1)如果  $z$  是区域内的一个点,  $A$  是以  $z$  为中心的最大圆盘。

(2)圆盘在 2 个或多个不同位置与  $A$  边界接触。

$A$  的骨架可以用腐蚀和开操作来表达,即骨架可以表示为:

$$S(A) = \bigcup_{k=1}^k S_k(A), \quad (8)$$

其中,  $S_k(A) = (A \ominus k B) - (A \ominus (k-1) B) \cdot B$ 。式中,  $B$  是一个结构元,而  $(A \ominus k B)$  表示对  $A$  的连续  $k$  次腐蚀:

$$(A \ominus k B) = ((\dots(A \ominus B) \ominus B) \ominus \dots) \ominus B). \quad (9)$$

如果对每一个骨架点,都求出其垂直方向上与细胞边界的距离,就会得到一个骨架距离直方图。具体直方图画法是(图2):从  $O$  点(边界与骨架的交点)开始沿着边界计算边界点到骨架所在直线的距离,并将距离用二维坐标表示出来。

该直方图中的谷点就是要找的可能的分离粘连目标的初始点。如:找到距离所在曲线的 2 个波谷点  $F_1$ 、 $F_2$ ,将两点以某种方式连接,这样就可以将 2 个粘连的细胞分割开了。

图2给出了这一思想的例子,图中的直线为粘连细胞的骨架所在的直线。确定每一个谷点是否为分离初始点时,主要决定于  $F_1$ - $F_2$  的相对长度。

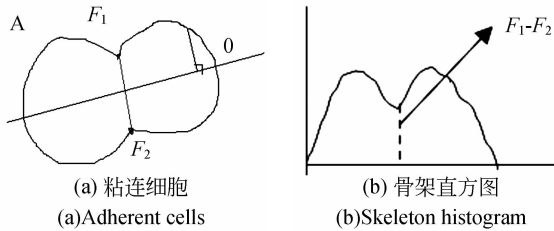


图2 细胞粘连及其骨架距离直方图  
Fig. 2 Adherent cells and their skeleton histogram

### 3.2 骨架的毛刺去除

上述过程涉及到一个骨架是否光滑的问题,在实际应用中,一般情况下,骨架(单像素宽度或非单像素宽度)都会带有长短不一的毛刺,毛刺一般是由于目标物体的形状或者噪声等干扰引起的。毛刺的长度不一,但相对骨架来讲,毛刺长度要小许多。这些毛刺对骨架直方图会有很大影响,为解决这一问题,本文设计了一种去除毛刺的

算法。

考虑到在骨架的端点处也可能会存在分支,采用长度阈值滤除的方法可能会丢失部分主干骨架信息,因此,在去除毛刺的同时应尽可能保持骨架主体信息不丢失。具体去除骨架毛刺的算法步骤如下:

步骤1:对骨架单像素宽度的二值图像:当  $f(x,y)=255$  时,该像素属于细胞骨架点,否则为背景点;当扫描到  $i$  像素时,若满足  $f(x_i, y_i) = 225$ ,则在像素点  $i$  的 8 邻域模板内统计  $f(x_i + m, y_i + n) = 255$  的像素点的个数并计入  $S_i$  中,其中,  $m, n = \{-1, 0, 1\}$ 。重复此操作,直至所有像素点操作完毕;

步骤2:对于二值图像中的像素点,如果  $S_i > 3$ ,则记该像素点为线条分支点  $P_i$ ;如果  $S_i = 1$ ,则记该像素点为顶点  $D_i$ ;

步骤3:在原图像  $f(x,y)$  中去除记录的线条分支点  $P_i$ ,从而产生多个不连通区域,然后进行连通区域标记,得到标记图  $f_p(x,y)$ ;

步骤4:在所述标记图  $f_p(x,y)$  中,从所有顶点  $D_i$  像素开始计算  $D_i$  所在的各个连通区域的长度信息,记作  $N_i$ ;

步骤5:设长度阈值为  $T$ ,取最小长度  $\text{Min}(N_i)$ ,如果  $\text{Min}(N_i) < L$ ,则将  $\text{Min}(N_i)$  对应的连通区域置零,并转至步骤6;否则,处理结束,得到结果;

步骤6:恢复去除的线条分支点  $P_i$ ,得到去除毛刺的初步结果图,并重复步骤1~5操作。

具体例子见图3。

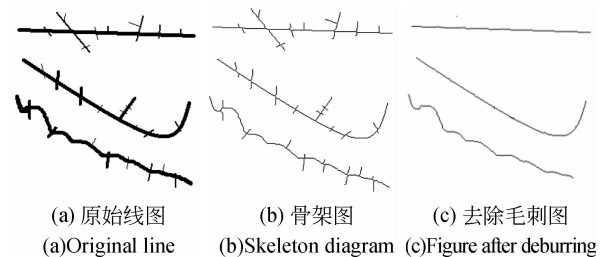


图3 二值图的骨架提取及去除毛刺过程  
Fig. 3 Skeleton extraction of binary image and its deburring process

### 3.3 应用例子

图4(a)是一幅模糊的细胞图像,有4个细胞粘连在一起,用 OTC 阈值算法分割成二值图像(图4(b)中的灰色部分为细胞),进行空洞充填,

然后提取出其骨架(见图 4(b)中的白线),在图 4(b)的基础上再进行骨架边界距离的计算,并用不同亮度显示目标物体中每个像素的距离值,如图 4(c)所示。图 4(d)是骨架边界距离的直方图,此图中有 3 个明显的谷点,它们可以作为分离粘连细胞的分割初始位置。最后根据两点之间的梯度大小及其平滑度将 4 个粘连细胞分离,其结果显示在图 4(e)中。

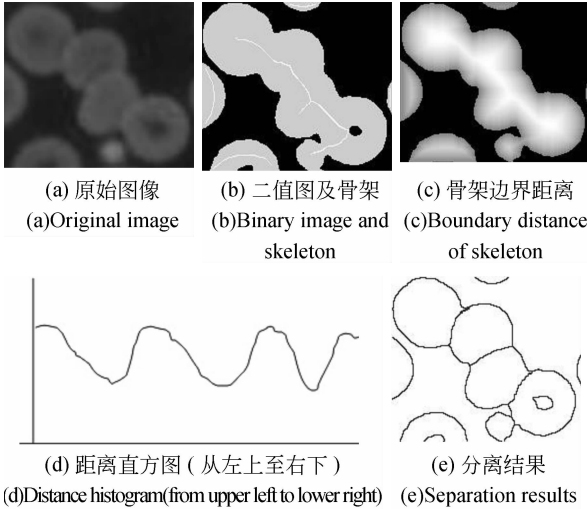


图 4 基于骨架直方图的粘连细胞分离过程

Fig. 4 Separation of adherent cells based on skeleton histogram

图 5(a)是一幅血细胞图像,图中具有几十个红细胞和一个白细胞。每个红细胞的内部几乎都有白色的小区域,而且细胞有互相粘连在一起的严重现象。与一些红细胞相粘连的白细胞面积较大,但内部有多个颗粒状物体。这些为图像分割带来了很大的困难。当结合分裂、合并及图论算法将该图转化成二值图像时(见图 5(b)),像预计的一样,许多血细胞相互粘连,但仍可以根据图 4 的方法得到较好的分离结果,如图 5(c)所示,图像分割结果基本上令人满意。

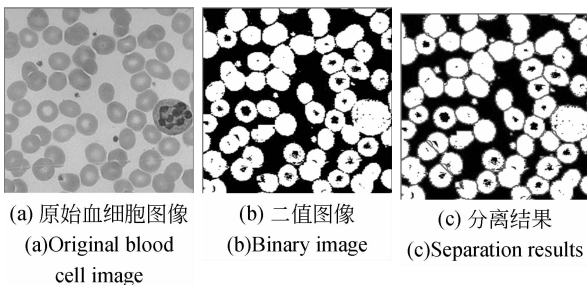


图 5 基于骨架直方图的粘连细胞分离图例

Fig. 5 Examples of separation for adherent cells based on skeleton histogram

### 4 试验结果及对比分析

根据上面基于图论的改进的灰度图像分割算法及本文提出的基于骨架直方图的二值图像分割算法的思想,将整个算法分成 9 个部分,每一个部分由至少一个子算法组成,见图 6。算法是用 VC++ 实现的。具体试验及比较分析结果如图 7~图 9 所示。

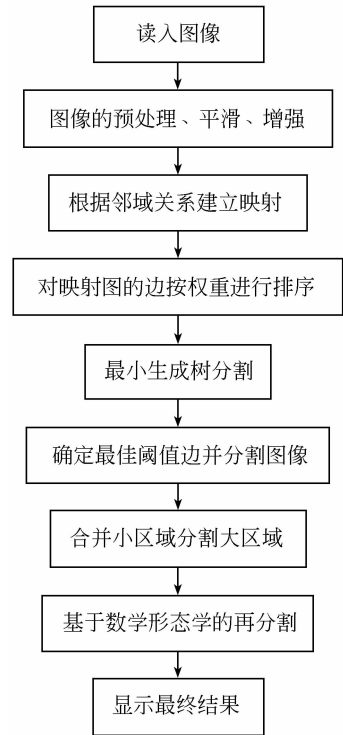


图 6 算法流程框图

Fig. 6 Algorithm flowchart

图 7(a)为要分割的细胞图像,背景较为清晰,图像中除了有红细胞,还有一些小颗粒。细胞内有细胞核,细胞核的灰度值比较大,与细胞浆的灰度值有较大的差别,所以用普通方法较难分割。细胞总体形状规则,有少量细胞发生粘连。因为该图像中细胞大小较为均匀,所以用本文的算法将细胞面积大小控制在一定范围内比较合理,见图 7(b)。另外,有少量的细胞发生粘连,能将本文算法的优越性很好的体现出来,见图 7(c)。

为了验证算法的普遍性,又选择 2 幅图像进行试验(见图 8 和图 9),这 2 幅图像比上幅复杂,目标与背景灰度值较为接近,细胞不均匀,细胞内的染色体及其它噪声小颗粒等比较多,且发生粘连的细胞也很多,常用的图像分割算法较难对这

类图像进行分割。

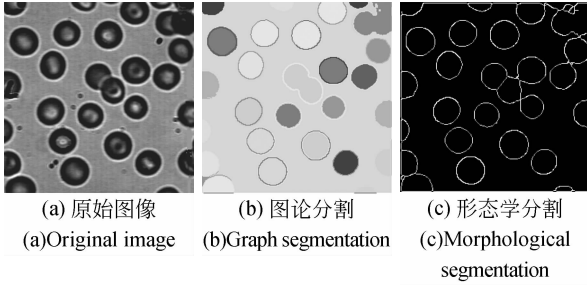


图 7 粘连细胞图像的分割过程

Fig. 7 Segmentation processing of adherent cell

由于图像难免会有噪声,所以需要用分数阶微积分设计的平滑模板将噪声滤除。图 7(b), 8(b) 和 9(b) 为考虑细胞大小的图论分割结果,可以发现原图中的小颗粒被去除了,这是因为对图像的最小区域面积做了限制。图 7(c), 8(c) 和 9(c) 为在图论算法分割的基础上进行粘连细胞的分割结果。

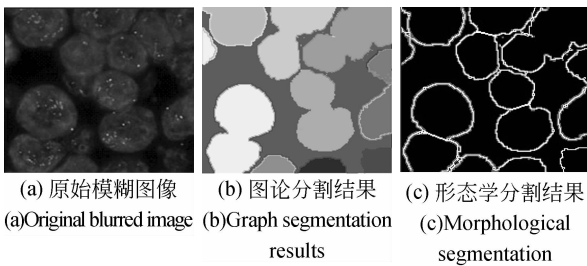


图 8 模糊且具有染色体的细胞图像分割结果

Fig. 8 Segmentation results of blurred cell images with chromosome

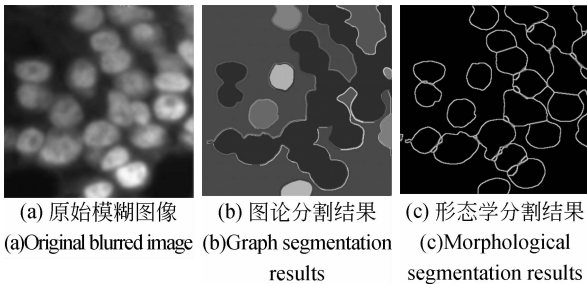


图 9 模糊细胞且带有黑洞等噪声的图像分割结果

Fig. 9 Segmentation results of blurred cell images with noises(such as black hole)

### 5 新算法与其它算法的比较

同其它通常应用的细胞图像分割算法相比,新算法在多数情况下都能显示出其优点。本文用几种常用的算法分别对图 7, 图 8 及图 9 中的原

始图像进行了分割。在图 10 中,原始图像是图 7(a), 由图 10 可知,分水岭算法往往产生过分割及小的噪声颗粒;模糊数学中的 k 均值分割算法导致了欠分割的结果;而基于边界扫描的边界跟踪分割算法将产生过多的噪声。在图 11~图 12 中,由于原始图像(图 8(a) 和 9(a))的质量低下,细胞模糊且粘连严重。与新算法相比,其它几种图像的分割结果非常不理想(过/欠分割)。

为了说明新算法和其它算法的差异,上述多种算法的处理结果及其比较分析数据列在表 1 中。主要用欠分割、过分割、总的目标个数及错误率等几个指标来进行比较分析。本文算法这几方面的概率是最小的。

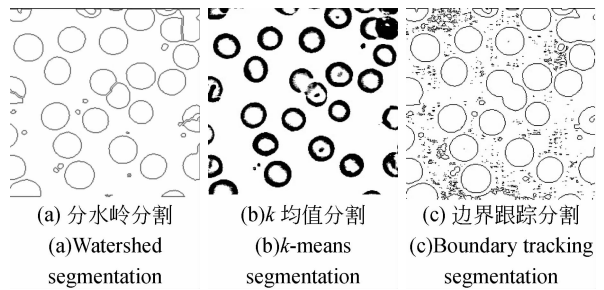


图 10 针对图 7(a)的其它算法分割结果

Fig. 10 Segmentation results of Fig. 7(a) by using other algorithms

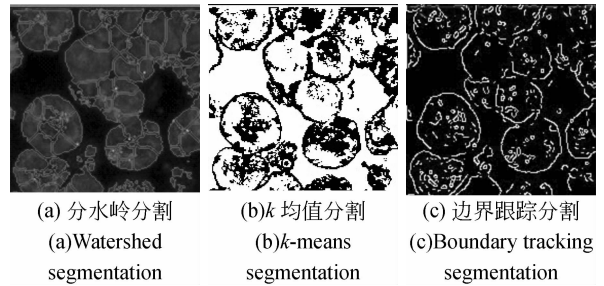


图 11 针对图 8(a)的其它算法分割结果

Fig. 11 Segmentation results of Fig. 8(a) by using other algorithms

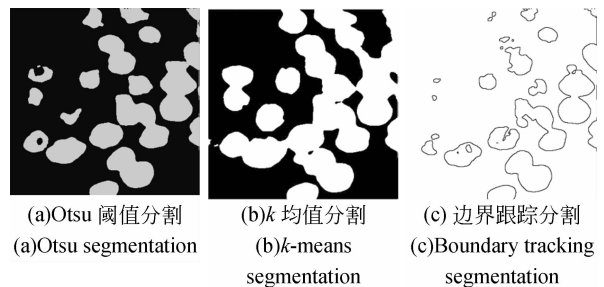


图 12 针对图 9(a)的其它算法分割结果

Fig. 12 Segmentation results of Fig. 9(a) by using other algorithms

从表 1 分析结果可以发现本文算法可以取得比较好的效果,误差率只有 8%。 $k$  均值算法没有将目标与背景清楚地分开,所以误差率为 51%。边界跟踪法结果虽然目标较为清晰,但出现很多不是目标的小区域,其误差率更大。分水岭法处理结果同样有很多小区域,效果也不太理想。对于该图像,Otsu 算法相对其它算法要好一些,但有欠分割问题。

表 1 几种算法的比较(原始图为图 7(a):30 个细胞)

Tab. 1 Comparison results of algorithms(for Fig. 7 (a) : 30 cells)

| 算法      | 欠分割<br>细胞数 | 过分割<br>细胞数 | 分割<br>细胞数 | 误差率 |
|---------|------------|------------|-----------|-----|
| 分水岭     | 1          | 2          | 40        | 33% |
| $k$ 均值  | 0          | 1          | 46        | 51% |
| 边界跟踪    | 3          | 1          | 较多        | 较大  |
| Otsu 阈值 | 3          | 1          | 37        | 16% |
| 本文算法    | 2          | 1          | 28        | 8%  |

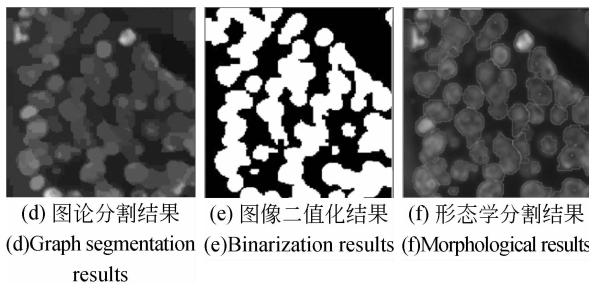
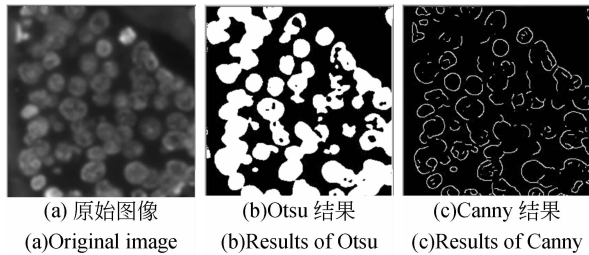


图 13 模糊细胞且带有黑白洞等噪声的图像分割比较  
Fig. 13 Segmentation results of blurred cell images with black hole noises

在图 13(a)中,原始细胞图像同时具有图 8(a)和图 9(a)的低质量因素,是一种更难分割的细胞图像。经过分数阶积分算法平滑后,分别用 Otsu 阈值法和 Canny 边界扫描法对该图像进行操作,结果显示在图 13(b)和图 13(c)中。两种算法分别代表了相似性及不连续性的分割算法的特点,但对该图像都有严重的过分割和欠分割现象。经过改进的图论算法分割后,细胞表面变得平滑,但二值图像显示了大量的欠分割现象(图 13(e)),当对此二值图像用本文提出的基于骨架距离直方图分离算法(形态学算法)进行分割后,大部分粘连的细胞被分离(图 13(f))。

## 6 结 论

由于细胞图像具有特殊性,即目标的大小形状差别较小,作者首先将细胞的面积大小加入图论算法中,从而在一定程度上减少了图论 MST 算法的过分割和欠分割的缺点;然后用骨架距离直方图(数学形态学)的方法对粘连细胞进行再分割。与分水岭算法相比,该算法较为简单,更易于实现。与其它的算法相比,该算法不会出现过多的小区域,基本不会出现过分割现象,而且可以准确地将粘连的细胞分割开,这对以后的计数、识别带来很大好处。尤其是对于细胞形状比较规则、大小均匀的情况,粘连细胞图像分割效果更为理想。另外,图论的 MST 是从图像的全局考虑,而形态学是基于局部的处理,这样可以很好地将图像的全局信息和局部信息结合在一起。大量细胞图像试验表明,与一般的图像分割算法及相近的分水岭分割算法比较,本文算法欠分割和过分割数比较少,错误率比较低。今后,试验的图像类别和算法的比较还有待进一步扩展。

## 参考文献:

[1] KELLER P J, SCHMIDT A D, WITTBRODT J, *et al.*. Reconstruction of zebrafish early embryonic development by scanned light sheet microscopy [J].

*Science*, 2008, 322(5904):1065-1089.

[2] 王卫星, 苏培垠. 基于颜色、梯度矢量流活动轮廓及支持向量机实现白细胞的提取和分类[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2781-2790.

WANG W X, SU P Y. Blood cell image segmenta-

- tion on color information and GVF Snake for Leukocyte classification on SVM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(12): 2781-2790. (in Chinese)
- [3] ZANELLA C, CAMPANA M, RIZZI B, *et al.*. Cells segmentation from 3-D confocal images of early zebrafish embryogenesis [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010,19(3):770-781.
- [4] YOUSEF A K, LASSOUED W, LEE W, *et al.*. Improved automatic detection and segmentation of cell nuclei in histopathology images [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, 51(4): 841-852.
- [5] GOCLAWSKI J, JOANNA S N, ANIOL P. A Segmentation method for microscope images of BY-2 tobacco cells in suspension cultures [J]. 2010 *Proceedings of 14th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMS TECH)*, 2010:192-196.
- [6] SALMAN N. Image segmentation based on watershed and edge detection techniques [J]. *Journal of Information Technology*, 2006,3(2):104-110.
- [7] ORIKAWA J, TANAKA T. Cell segmentation from phase-contrast images using hybrid watershed and region growing algorithm for genomic drug discovery[J]. *Proceedings of SICE Annual Conference*, 2010 :84-88.
- [8] POHLE R, TENNIES K D. A new approach for model-based adaptive region growing in cell image analysis [J]. *Proc of the 9th Int'l Conference on Computer Analysis and Patterns*, 2001.
- [9] WANG S, SISKIND J M. Image segmentation with ratio cut [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 675-690.
- [10] SHARON E, GALUN M, SHARON D, *et al.*. Hierarchy and adaptivity in segmenting visual scenes[J]. *Nature (LETTERS)*, 2006, doi:10.1038/nature04977, 1-4.
- [11] VANHAMEL I, SAHLI H, PRATIKAKIS I. Non-linear multiscale graph theory based segmentation of color images[J]. *18th International Conferences on Pattern Recognition*, 2006,2:407-411.
- [12] 胡学刚,孙慧芬,王顺. 一种新的基于图论的图像分割算法[J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2010, 42(1):138-142.
- HU X G, SUN H F, WANG SH. A new image segmentation algorithm based on graph theory [J]. *Journal of Sichuan University:Engineering Science*, 2010, 42(1): 138-142. (in Chinese)
- [13] 叶伟,王远军. 基于 Mumford-Shah 理论的最小生成树图像分割方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, 21(8):1127-1133.
- YE W, WANG Y J. MST image segmentation based on mumford-Shah theory [J]. *Journal of Computer-aided design and Computer Graphics*, 2009, 21(8) : 1127-1133. (in Chinese)
- [14] ZHANG Y, CHENG X P. Medical image segmentation based on watershed and graph theory[J]. 2010 *3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*, 2010: 1419-1422.
- [15] DAS P, VEKSLER O, ZAVADSKY V, *et al.*. Semiautomatic segmentation with compact shape prior [J]. *Image and Vision Computing*, 2009, 27(1-2):206-219.
- [16] WANG W X. Colony image acquisition system and segmentation algorithms [J]. *Optical Engineering*, 2011,50(12): doi:10.1117/1.3662398.
- [17] WANG W X. Image analysis of aggregates [J]. *International Journal: Computers & Geosciences*, 1999,25(1): 71-81.
- [18] WANG W X. Binary image segmentation of aggregates based on polygonal approximation and classification of concavities [J]. *International Journal: Pattern Recognition*, 1998,31(10): 1503-1524.

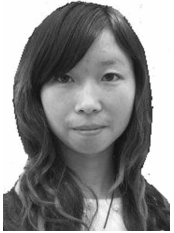
## 作者简介:



王卫星(1959—),男,湖南邵阳人,博士,教授,博士生导师,1997年于瑞典皇家工程学院获得博士学位,主要从事图像处理、模式识别和机器视觉等方面的研究。E-mail: znn525d@qq.com



王悦(1990—),女,福建福州人,现为英国南安普敦大学(Southampton University, United Kingdom)硕士研究生,主要从事信号及信息处理研究工作。E-mail: wangsh@fzu.edu.cn



田利平(1986—),女,山西原平人,硕士研究生,主要从事图像处理和模式识别方面的研究。E-mail: 675536047@qq.com

(本栏目编辑:李自乐)  
(版权所有 未经许可 不得转载)