

基于边界几何特征的重叠颗粒图像分割算法

孙小伟^{1,2}, 金 光¹, 王 智^{1,2}

(1. 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130031; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 图像分割是图像处理中的重要问题, 也是计算机视觉领域低层次视觉中的主要问题, 是成功进行图像分析、理解和描述的关键技术。该文构造了一种针对二值图像边界几何特征的提取的算法, 通过对图形边界的凹特性分析, 实现了对不规则颗粒图像的分割。该算法仅对提取的图像数据作处理, 不对图像本身作任何运算, 避免了传统的基于图像形态学的分割算法所导致的图像信息丢失。

关键词: 线段; 线段序列; 单连通图; 边界点序列

Overlapping Grain Image Segmentation Algorithm Base on Boundary Geometrical Characteristics

SUN Xiaowei^{1,2}, JIN Guang¹, WANG Zhi^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

【Abstract】 Image segmentation is an important problem in image processing, the main of vision bottom in computer vision field, and the key technology of analyzing, understanding and characterizing images. In this paper an algorithm of extracting boundary geometrical characters from a bi-value image is constructed. Anomalous image segmentation is completed by analyzing concave properties of graph. The algorithm processes image data extracted without operating the image itself to avoid the loss of image information by traditional segmentation algorithm based on image morphology.

【Key words】 line section; a serial of line sections; simply-connected graph; a serial of boundary points

图像分割是将待处理图像分成具有特殊涵义的互不相交的区域。在早期的图像研究中, 建立在经典 Minkowski 和差运算基础上的数学形态学是图像分析的主要手段^[1]。对于颗粒图像分割, 通常的方法是选择一个结构元素, 对要分割图像的二值图像反复利用结构元素进行腐蚀运算, 腐蚀过程中, 不连通区域不断产生, 同时某些区域不断消失。一个连通区域集消失前的最后一步, 称为一个物体的“种子”。对所有的目标腐蚀完后, 记录下所有物体的“种子”的集合, 再以“种子”为核, 进行反复的条件膨胀, 最后生长成互不相交的物体^[2~4]。该算法最大的缺点是很难确定一个合适的用于腐蚀的结构元素, 而结构元素的选取直接关系到图像处理的效果与成败, 由于其只是将图像分割开, 改变了颗粒本身的面积和粒径等统计特性, 因此不可避免地导致了图像信息的丢失。

1 颗粒图像分割与图像的边界

图像的边界是对具有一定特殊涵义的图像区域的限定, 也是图像边缘几何特征的反映。图像分割的主要任务是按照一定的图像属性和特征对图像区域重新定义, 即图像边界特征的重构。进行颗粒图像分割主要是为了获取其边界几何属性, 其边界内的图像特征并不重要。但由于其外形边界的不规则性, 其几何特征无法从模板中给出一个合理的定义, 常用的模糊处理和模板匹配的方法较难处理这一问题。本文尝试从图像的边界几何特征及其边界运动的趋势出发, 对图像边界进行分析, 从而实现颗粒图像的分割。

首先作这样的约定: 直观地研究图像的几何外形或获取图形边界信息时, 对图像边界内部像素点的灰度变化不作重

点考虑, 分析的对象可以简化为二值化图。

2 二值图像的边界集

图像的数学模型建立在把图像看作像素点的集合的基础上。数字图像是对连续图像信号进行采样和量化的结果, 其图像阵列形成可供观测的信号序列。对于一幅数字图像, 可以用其灰度函数 G 在二维空间上序列表达, 即 $G=G(i,j)(i=0,1,2,3,\dots,N-1; j=0,1,2,3,\dots,M-1)$ 。对于一幅二值化图, $\{g|g(i,j)=0, g \in G\}$ 称为图像区域, $\{g|g(i,j)=255, g \in G\}$ 称为图像的背景。对于任意图像上的一个像素点 b , 若 $g_b(i,j)=0$, 且 4 个式子 $g(i \pm 1, j)=255$, $g(i, j \pm 1)=255$ 中的任意一个成立, 则称像素点 b 为图像的一个边界点。所有像素点 b 组成的集合称为图像的边界集。提取边界集并不困难, 但是图像的边界需要划分图像区域属性, 特别是要反映图像的几何结构, 因此, 简单的边界提取对于定义图像的边界信息是远远不够的。

3 行采样下边界的两点线段结构

图像的边界完成了对特殊涵义的图像区域的限定, 一幅数字图像由若干子图构成。通常组成一个完整的子图的边界集是封闭的, 能够用若干封闭曲线来表达。由于计算机处理的数字图像是对连续图像采样和量化的结果实质是一个一维

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60575025)

作者简介: 孙小伟(1975 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 光学工程; 金 光, 研究员; 王 智, 博士研究生

收稿日期: 2006-09-09 **E-mail:** sxwlux@sohu.com

有限序列，因此可以只通过定义边界来确定一幅图像，采样方法如下。

对于图像 $G=G(i,j)(i=0,1,2,3,\dots,N-1; j=0,1,2,3,\dots,M-1)$ ，在其 i 行上，若存在 $G(i, j_1)=0$ ，当 $j_1 \neq 0$ ， $G(i, j_1-1)=255$ ； $G(i, j_2)=0 (j_2 \geq j_1)$ ，当 $j_1 \neq N-1$ ， $G(i, j_2+1)=255$ ，对任意 $j_0 \in [j_1, j_2]$ ，存在 $G(i, j_0)=0$ ，则可以定义线段 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ ，其中， j_1 为线段的左起点； j_2 为线段的右终点； i 表示线段所在的行数； k 为线段 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 的段位，表示在 i 行 $0 \leq j \leq N-1$ 方向上第 k 个这样的线段； p 表示这一线段所在的子图，其值用于子图的边界处理。那么整个图像或任一子图都可以用有限线段集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 来表达，但表述子图线段之间存在一定的关系。

若线段 $J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ 与 $J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)$ 存在

$$J_{(i+1)k_2p} \cdot j_1 \leq J_{ik_1p} \cdot j_1 \leq J_{(i+1)k_2p} \cdot j_2$$

或者

$$J_{(i+1)k_2p} \cdot j_1 \leq J_{ik_1p} \cdot j_2 \leq J_{(i+1)k_2p} \cdot j_2$$

则定义线段 $J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ 与 $J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)$ 连通。

若集合 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 任一元素可以通过连通关系遍历到集合中的所有元素，而且集合按照遍历顺序排布，则称集合 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 是一个线段序列。可以证明单一子图总与一个线段序列对应。

由线段的定义及其连通关系可以推导出：

- (1) 线段连通是相互的、可逆的；
- (2) 同一行上不存在相互连通的两条线段；
- (3) 单一子图能够用具有连通关系的线段序列表达；
- (4) 属于 2 个子图的线段不存在连通关系。

4 线段序列与子图拓扑结构的关系

线段的连通关系确定了子图的区域分布，通过线段的连通关系可以获取一幅图像中的所有子图，但一个子图线段序列的结构是图形拓扑结构的反映，通常线段序列不全是线型结构，所以，在获取单一子图的线段序列时还必须考虑图形的拓扑结构。其中单连通图形的线段序列结构包括：

(1) 线型结构

若序列 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 是一个完全线型序列，则序列中一行上的元素个数等于 1。线型结构是线段序列中最基本的结构，所有子图的线段序列都由有限个线型结构组成。其拓扑结构如图 1 所示。

(2) 正分叉结构

若线段序列 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 中，存在元素 J_{ik_1p} ，存在 $k_n - k_m + 1$ 个元素 $J_{(i+1)k_2p}, \dots, J_{(i+1)k_n p}$ 分别与 J_{ik_1p} 连通，则称线段序列 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 中具有正分叉结构，元素 J_{ik_1p} 称为一个正分叉结点，从 $J_{(i+1)k_2p}$ 到 $J_{(i+1)k_n p}$ 引出的 $k_n - k_m + 1$ 个分叉，依次称为属于元素 J_{ik_1p} 的第 1~第 $k_n - k_m + 1$ 个正分叉，记作 $PB_t (1 \leq t \leq k_n - k_m + 1)$ 。其拓扑结构如图 2 所示。

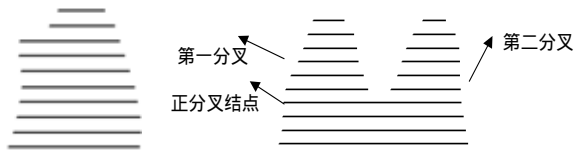


图 1 线型结构

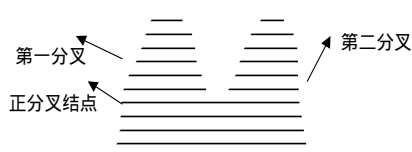


图 2 正分叉结构

(3) 负分叉结构

若存在元素 J_{ik_1p} ，且 $k_n - k_m + 1$ 个元素 $J_{(i-1)k_2p}, \dots, J_{(i-1)k_n p}$ 分

别与 J_{ik_1p} 连通，则称线段序列 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 中具有负分叉结构，元素 J_{ik_1p} 称为一个负分叉结点。从 $J_{(i-1)k_2p}$ 到 $J_{(i-1)k_n p}$ 引出的 $k_n - k_m + 1$ 个分叉，依次称为属于元素 J_{ik_1p} 的第 1~第 $k_n - k_m + 1$ 个负分叉，记作 $NB_t (1 \leq t \leq k_n - k_m + 1)$ 。其拓扑结构如图 3 所示。

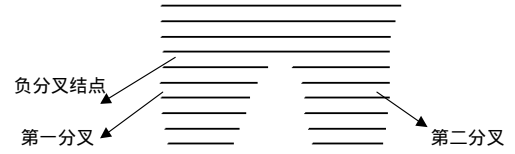


图 3 负分叉结构

图形的拓扑结构决定了正负分叉点个数，通常分叉的个体上还可能出现子分叉。若线段序列 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 中，元素 J^l 是元素 $J^{l1}, J^{l2}, \dots, J^{ll}$ 的一个分叉点，称 $J^{l1}, J^{l2}, \dots, J^{ll}$ 是 J^l 的一阶分叉；若 $J^{l1}, J^{l2}, \dots, J^{lle}$ 元素 J^{ll} 或元素 J^{ll} 线型方向上结点元素 $J^{ll'}$ 的 e 个一阶分叉，则称 $J^{l1}, J^{l2}, \dots, J^{lle}$ 是元素 J^l 在 J^{ll} 方向上的二阶分叉；依此可定义正负 N 阶分叉。

5 单连通子图线段序列的生成

单连通子图的结构可由线型结构、正分叉和负分叉 3 种结构组成，任何 2 个分叉支路不会相交，在数据结构上是一种树形结构，分叉点构成就是数据结点，线型结构为树的枝干。其基本算法思想如下：

- (1) 选择适当的滤波器，对图像进行二值化处理；
- (2) 对整个图像进行行采样，生成全图像的线段集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ ；
- (3) 判断线段集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 不为空，否则退出；
- (4) 图号 $p=p+1$ ；取线段集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 首线段 $J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ 保存，并将地址保存在图 p 的首地址单元，令 $J_0 = J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ ；
- (5) 取 J_0 ，令 $J^0_{ikp}(j_1, j_2) = J_0$ ；
- (6) 取 $i+1$ 行子线段集 $\{J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)\}$ 和 i 行子线段集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ ；
- (7) 从 $k=1$ 开始，判别 $\{J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)\}$ 子集中元素与 $J^0_{ikp}(j_1, j_2)$ 连通关系，若 $\{J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)\}$ 中不存在与 $J^0_{ikp}(j_1, j_2)$ 连通的元素，若子集中不存在与 $J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ 连通的元素，在全集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 中删除元素 $J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ ，返回(3)；
- 1) 在 $\{J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)\}$ 子集中，若存在 $k \in [m, n]$ ，即 $n-m+1$ 个元素与 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 连通，若 $n-m+1=1$ ，即存在元素 $J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)$ 与 $J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ 连通；
- 2) 判断子线段集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ ，若仅有 $J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ 与 $J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)$ ，令 $J_0 = J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)$ ， $i=i+1$ ，在全集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 中删除元素 $J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ ，返回(5)；
- 3) 当 $n-m+1>1$ ，若在线段集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 中，存在 $k < k_1$ 的 u 个元素与 $J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)$ 连通，存在 $k > k_1$ 的 v 个元素与 $J_{(i+1)k_2p}(j_1, j_2)$ 连通，则以顺序，在 i 行(以段位序 k_1-1, \dots, k_1-u) u 个负分叉，在 $i+1$ 行(以段位 $m \dots n$) $n-m+1$ ，在 i 行(以段位序 k_1+v, \dots, k_1+1) v 个负分叉，建立 $u+n-m+1+v$ 个结点；
- 4) 每个结点的在结构上等同于一个线型结构起点；令 p 指针指向其各自分叉结点，在全集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 中删除元素 $J_{ik_1p}(j_1, j_2)$ ；
- 5) 从第一个结点开始，依 $u+n-m+1+v$ 个结点进行遍历，其中负分叉的遍历方向指向 i 减少，正分叉的遍历方向指向 i 增加，将遍历中关系明确的元素在全集 $\{J_{ikp}(j_1, j_2)\}$ 删除；
- 6) 分叉遍历过程出现多阶分叉，可依(7.3)的方法继续细分遍历；
- 7) 依次完成所有分叉的遍历；

(8)返回(3),循环至全集为空,完成对速个图形线段序列的遍历。

6 单连通子图边界点序列的形成

要对图形几何特征进行分析就要获得每一个图形的有序边界点,即提取每个子图线段序列中元素左起点和右终点,并按照边界点的次序形成一种有序结构。上一节子图线段序列的生成完成了子图区域的划分,并依照图形的分叉结点的关系形成一种有序结构,使得这一工作并不复杂。具体方法如下:

(1)定义序列的数据结构点为 $P_k(i, j)$, k 表示点的个数, i 表示行, j 表示列;

(2)定义方向控制变量 $enum\ count=(leftup, rightdown)$, 因为线段序列正常的方向是行增加的方向,所以先从序列首元素左起点开始遍历;

(3)出现分叉结构时,方向控制变量的值要改变:

1)在 i 行,当 $count=leftup$ 时,线段序列中的下元素 $J_{(i+1)k,p}(j_1, j_2)=1$, 令 $count=leftup$, $P_k(i, j)=P_k(i, j_1)$;

2)在 i 行,当 $count=leftup$ 时,线段序列中的下元素 $J_{ik,p}(j_1, j_2)$ 是一个负分叉的开始,则令 $count=rightup$, $P_k(i, j)=P_k(i, j_2)$;

(4)在分叉结束方向,控制变量值也要改变。

7 单连通子图边界分割

通过以上步骤形成了一个有序边界点序列,需要指出这一序列实际上并不与组成图形严格边界点相对应,而与数字图像边界的行采样结果相对应。即在序列 $\{P_k(i, j)\}$ 中,存在 $P_k(i, j_1) \cdot j_1 < P_{k+1}(i, j_2) \cdot j_2$ 或 $P_k(i, j) = P_{k+1}(i, j)$, 在处理的时候可以这一序列采用插值方法使序列更完善。

具体边界分割过程由以下 2 个步骤来完成:

(1)分割点判别

1)分割点凹点属性及凹判别

由图形几何特性分析,在序列 $\{P_k(i, j)\}$ 中,若 $P_{k_1}(i, j)$ 和 $P_{k_2}(i, j)$ 是可再分子图的一对分割点,则 $P_{k_1}(i, j)$ 和 $P_{k_2}(i, j)$ 必为图形凹点。设 $P_{k_0}(i_0, j_0)$ 是序列 $\{P_k(i, j)\}$ 中 $P_{k_1}(i, j)$ 和 $P_{k_2}(i, j)$ 之间的一个点,若存在以下关系式:

$$L = -(i_2 - i_1) \times j_0 + (j_2 - j_1) \times i_0 + (i_2 - i_1) \times j_1 + (j_1 - j_2) \times i_1 < 0$$

则认为 $P_{k_0}(i_0, j_0)$ 是序列 $\{P_k(i, j)\}$ 中的一个凹点。

定义凹深度,记作: $dis = -L / \sqrt{(j_2 - j_1)^2 + (i_2 - i_1)^2}$, 在同一凹区域上选取深度最大的凹点。定义凹方向:

$$\vec{c} = \left(\frac{j_2 + j_1}{2} - j_0, \frac{i_2 + i_1}{2} - i_0 \right); \text{取其单位矢量为 } \vec{c} = \frac{\vec{c}}{|\vec{c}|}.$$

2)分割点的判据

若点 $P_{k_1}(i, j)$ 和 $P_{k_2}(i, j)$ 是一对分割点,则应有

$$\begin{cases} L_{k_1} < 0, L_{k_2} < 0 \\ \vec{c}_{k_1} \cdot \vec{c}_{k_2} \approx -1 \end{cases}$$

(2)分割后线插值

在 $P_{k_1}(i, j)$ 和 $P_{k_2}(i, j)$ 间作一条直线,从图像上将位于这条直线上像素点的值置为 255,就完成了图像的分割,但是要统计分割后的子图特性,还有必要对图形的边界信息进行重构。最基本的做法就是在点 $P_{k_1}(i, j)$ 和 $P_{k_2}(i, j)$ 的前后元素分别进行线性插值,实现线段序列与边界序列的重构,为图形的后续处理创造条件,这一工作并不复杂,只须记录分割结点的在 2 种序列中的位置,子图中序列中插入新的子图。算法

实例及其步骤见图 4~图 8。



图 4 二值化图像



图 5 只显示结段两端点全集图

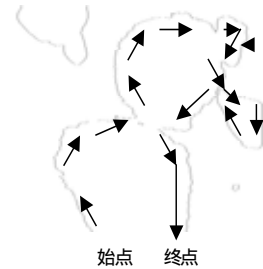


图 6 边界序列图
(十字叉中心为凹点)



图 7 边界凹点图



图 8 对应分割点图
(十字叉中心为分割点)



图 9 分割完成后的插值复原图

8 结束语

本文从重叠颗粒图像分割算法出发,以几何结构的思想构造了通过线段遍历实现边界二值图像边界处理的算法,算法具有如下几个特征:

(1)从图像的几何特征考虑,算法上尽量避免传统图像形态学中由于对图像和差运算导致的图像信息的丢失;

(2)针对重叠颗粒图像分割来设计,文中仅对图像的凹属性作了分析,并实现了最终图像分割,构造的边序列还可作为其它几何量如曲率、曲线方程等信息提取的基础数据;

(3)考虑的图形对象是单连通的,涉及正负分叉结构相互关系时,对于更复杂的网状多连通图的遍历仍有效,但算法较为复杂;

(4)对二值图像边界进行了提取,但并不破坏图像原有任何信息,只是对图像的边界信息进行了提取分析,这些信息在本来的非二值图中仍有可利用价值。

参考文献

- 1 吴敏金. 图像形态学[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1990.
- 2 聂守平, 王 鸣. 球状重叠区域分割与参数统计算法研究[J]. 中国激光, 2003, 30(11): 1036-1040.
- 3 王金涛, 刘文耀, 路 烁. 流域分割算法在细胞图像分割中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(3): 290-294.
- 4 朱 昊, 刘文耀. 多梯度流域变换算法与传统算法比较[J]. 天津大学学报, 2004, 37(1): 37-40.