

59-61, 65

基于分形维数的图像分割研究*

朱光喜 张平 朱耀庭
(华中理工大学 武汉 430074)

A

摘要 本文在分形图象模型研究基础上,采用离散分形布朗增量随机场(DFBIR),通过提取特性参数——H值、方差、平均灰度值,然后结合传统的聚类分割技术,实现图象分割。在对自然背景中的人造物体图象和金相图的实验结果表明,分割效果良好,且抗噪性能较强。

一、引言

图象分割是将图象分解成具有一定意义的部分,或将物体与背景分开,或将物体与其它物体分开的技术。对于一幅图象,尽管人可以识别出不同纹理,但要做到计算机自动描述和识别却复杂得多,传统的识别技术主要基于图象的灰度或边缘信息。

Mandelbrot^[1]创立了分形几何学理论,他提出用分形维数这一度量概念来描述自然现象的不规则程度。在自然界中,许多自然现象与物体(如云雾、青山、湍流、凹凸不平的地面、风化而斑剥的岩石等等)均在一定标尺范围内具有分形特性,而许多人工建造的物体(如机械、交通工具、建筑物等等)则不具有分形特性。这就使得我们可以利用各种不同的特性参数(包括分形特性与非分形特性,某种分形特性与另一种分形特性)来区分不同的物体,实现图象分割。

本文首先阐明DFBIR基本概念,然后给出图象分割的思路与步骤,最后提供实验结果与分析。

二、图象的DFBIR模型及其参数估算

理论上的分形在所有尺度上都具有自相似性,其度量特性和分形维数的关系如下

$$M(\epsilon) = K\epsilon^{d-D}$$

其中, ϵ 为尺度大小, $M(\epsilon)$ 为在尺度 ϵ 上的度

量值, D 为分形维数, d 为拓扑维数加1, K 为常数。

分形的基本特点是自相似性,但实际中的自然物体一般不具严格的自相似性,而通常具有统计意义上的自相似性。因此,宜用随机分形的数学模型来描述它们。Pentland^[2]证明了自然界的大多数表面是空间各向同性的分形,且这些表面所映射成的灰度强度分布场也具有分形特性。这样,我们可以通过对表面的图象数据分析得出自然界存在的物体的分形特性。

离散分形布朗随机场(DFBR)数学模型是由拓广布朗运动得到的。设 $B_H(t)$ 为一高斯随机场,对于 $0 < H < 1$,若 $B_H(t)$ 满足:

$$P_r\left(\frac{B_H(t+\Delta t) - B_H(t)}{\|\Delta t\|^H} < y\right) = F(y)$$

则称 $B_H(t)$ 为分形布朗随机场(FBR), $F(y)$ 为零均值、方差为 σ 的高斯随机变量的分布函数。这里 $P_r(\cdot)$ 表示概率测定、 $\|\cdot\|$ 表示范数、 H 为分形参数。

$B_H(t)$ 有如下性质:

- 1) $E|B_H(t+\Delta t) - B_H(t)| = E|B_H(t+1) - B_H(t)| \cdot \|\Delta t\|^H$
- 2) $E|B_H(t+\Delta t) - B_H(t)|^2 = E|B_H(t+1) - B_H(t)|^2 \cdot \|\Delta t\|^{2H}$
- 3) $E|B_H(t+h\Delta t) - B_H(t)|^2 = h^{2H} \cdot E|B_H(t+\Delta t) - B_H(t)|^2$

*国家自然科学基金资助项目

其中 h 为任意正数, 这里 t 及 Δt 取离散值, 即为离散分形布朗随机场 (DFBR)。

Pentland 在用 DFBR 模型时遇到了关于适用的尺度范围的困惑。换句话说, DFBR 场虽然与自然界景物吻合较好, 但它是不平稳的, 处理起来较困难, 且不能处理长记忆长相关的图像, 于是, 我们将 DFBR 场做了进一步发展, 提出了 DFBR 图像模型^[3], 并已证明 DFBR 场与 DFBR 场具有相同的局部统计特性, 且 DFBR 场是平稳的, 易于处理, 易于分析, 它保留了 DFBR 与大多数自然界景物吻合较好的特点。因此, 宜选用 DFBR 场作为图像处理的模型。

设图像灰度场满足 DFBR, 其某一像素的灰度值用 $I(x, y)$ 表示, 则有:

$$E(|I(x_2, y_2) - I(x_1, y_1)|) \\ = K \cdot (\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2})^H$$

令:

$$\Delta I_r = |I(x_2, y_2) - I(x_1, y_1)| \\ \Delta r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

则: $E(\Delta I_r) = K \cdot \Delta r^H$

两边取对数:

$$\log(E(\Delta I_r)) = H \log(\Delta r) + \text{常数}$$

通过最小二乘法拟合数据点对 $\{\log(E(\Delta I_r)), \log(\Delta r)\}$ 拟合直线的斜率即为 H 值。

在完成上述运算时, 涉及三个矢量: 尺度变化范围 \overline{SR} , 像素对数目 \overline{PN} , 多尺度灰度差 \overline{MD} 。

\overline{SR} 包括所有可能的像素距离 Δr , $\overline{SR} = \{d_r(1), d_r(2), \dots, d_r(k), \dots, d_r(n)\}$, 且 $d_r(k) < d_r(k+1)$ 。

\overline{PN} 包括在每个尺度下所有可能像素对的数目, $\overline{PN} = \{P_n(1), P_n(2), \dots, P_n(k), \dots, P_n(n)\}$, 这里 $P_n(k)$ 为在距离 $d_r(k)$ 下所有像素对数目。

\overline{MD} 包括在每个尺度下灰度值差的绝对值的均值, $\overline{MD} = \{d_1(1), d_1(2), \dots, d_1(k), \dots, d_1(n)\}$

$$d_1(k) = \left[\sum_{x_1=0}^{m-1} \sum_{y_1=0}^{m-1} \sum_{x_2=0}^{m-1} \sum_{y_2=0}^{m-1} |I(x_2, y_2) - I(x_1, y_1)| \right] / P_n(k)$$

这里 x_1, y_1, x_2, y_2 满足:

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = \Delta r_k$$

分别计算 $\log(d_r(k))$ 及 $\log(d_1(k))$, $k=1, \dots, n$, 画出所有点对 $(\log(d_r(k)), \log(d_1(k)))$, 用最小二乘法拟合即可。

采用 DFBR 模型计算一阶绝对矩时, 考虑的是圆域上的点, 这样会出现圆域效应, 而且会影响计算速度的提高, 由于 DFBR 场是一种增量场, 且它是平稳的, 各向同性的。因此只需要考虑 x 和 y 方向上的灰度变化, 令

$$\Delta r_k = \max(|x_2 - x_1|, |y_2 - y_1|)$$

这样便克服了 DFBR 场上述的缺点。

在拟合直线时需确定适用的尺度范围 Δr_{\max} 及 Δr_{\min} , 一般计算时都假定 $\Delta r_{\min} = 1$, 在估计 Δr_{\max} 的大小时引入直线性度量 I 来判断数据点在一条直线上的精确程度。这里用 $\rho(\|\Delta x\|)$ 代表点 $(\log(d_r(k)), \log(d_1(k)))$, 问题就转化为估算点集 $\{\rho(\|\Delta x\|)\}$ 的直线性。采用直线性度量 I 有效地限制了不满足良好自相似性的数据点参加拟合, 从而提高了参数估计的有限性和准确性。

三、分形方法的图像分割

图像分割方法有好几种, 但都分别存在一些不可避免的弱点, 现分述如下: (1) 特征参数门限法, 由于它没有涉及空间信息, 通常是无效的。(2) 边缘检测法, 它可以找出图像中存在的局部边缘的空间信息, 但对于有噪声的复杂图像, 经常会产生错误的边缘或额外的边缘。(3) 区域生长法, 它的结果好坏受“种子”点的选取及算法的执行顺序影响很大。

分形方法的图像分割的特点在于, 由于分形维数直观上与物体表面的粗糙程度相吻合, 而自然界中的不同纹理粗糙度有很大差别。因此, 分形维数可以作为区别不同类别纹理的有效参数。尤其是位于自然场景中的人

造物体,我们利用人造物体本身不具有自相似性结构的特点,便可以将其与自然纹理分割开来。

具体分割步骤如下:

(1)计算分形维数,采用DFBIR场模型及上述方法估算局部范围的分形维数,对一幅 $N \times N$ 的图像,选取 $M \times M$ 的窗口,从图像起始点开始,计算窗口内图像子块的H值,然后沿水平和垂直方向移动窗口,设移动步长为step,则所得H值矩阵大小为 $(N/step) \times (N/step)$ 。

窗口的大小很重要,选得太大会严重影响计算速度,太小又不能正确反映统计特性。经过实验比较,以 6×6 大小为宜,且取步长为3,这样每个 3×3 大小的子块所对应的H值可取自四个不同窗口的计算结果,如图1所示:

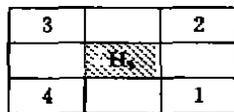


图 1

阴影部分表示一个待确定的H值的 3×3 子块,1~4为四个包含该子块的窗口,用如下规则确定 H_0 ,求出:

$$H_{max} = \max \{H_1, H_2, H_3, H_4\}$$

$$H_{min} = \min \{H_1, H_2, H_3, H_4\}$$

设定门限值 $Thed$,当 $(H_{max} - H_{min}) > Thed$ 时, $H_0 = (H_{max} + H_{min})/2$;否则 $H_0 = H_1$ 。

(2)计算均值和方差:

$$\text{均值: } mean = \frac{1}{9} \times$$

$\sum_{i,j} f_{i,j}$ 在当前子块。

$$\text{方差: } \sigma = \frac{1}{9} \times$$

$\sqrt{\sum_{i,j} (f_{i,j} - mean)^2}$, i, j 在当前子块。至此,我们得到一组特性参数数据 $\{H, mean, \sigma\}$

(3)图像聚类分割。

采用k-平均法通过分

裂、合并的聚类过程实现,将数据点集 $\{H, mean, \sigma\}$ 作为聚类过程的原始数据,通过判定得出聚类结果,这样每一小块就对应一类别标号。将这些类别标号还原到它所对应的小子块上,即得分割结果图像。

四、实验结果与结论

我们选取了两类处理对象。第一类是空中飞翔的飞机图像(图2),图中背景是天空,它具有统计的分形特性;而飞机是人造物体,不具有分形特性,因此两者的特性参数有明显差异,尤其在交界处,H值会小于0或大于1。图2(a)是原图,图2(b)是分割结果。第二类是扫描电镜下摄取的金屬断口表面形貌,



图 2 (a)正在空中飞翔的飞机图
(b)图像分割的结果

图3(1)是形貌原图,其中因断裂的动力过程而形成的复杂形貌包括背景、解理纹理和石墨球部分,三者的灰度分布是混合的,找不到截然分开的灰度门限,传统的纹理分析也很难找到区别函数,用我们的方法则可以将三者满意地分割开来,图3(1)是金属断口原图,图3(2)是分割出来的石墨球,图3(3)是分割出来的解理部分。

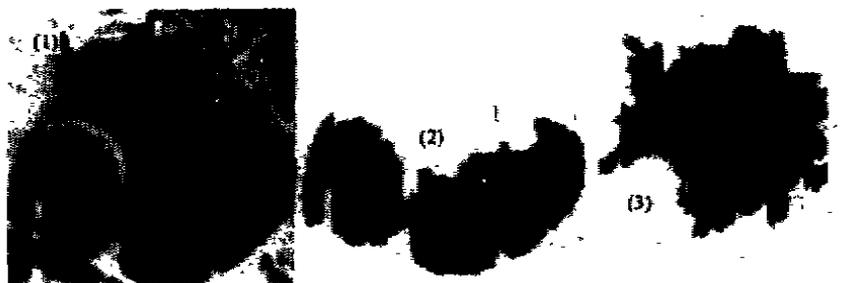


图 3

(转第 65 页)

Garden 是一个可以支持多种可视语言的程序设计环境^[9],它包括一个支持多种语言的程序设计系统,一个提供多窗口界面的的工具集和一个支撑整个系统的面向对象的数据库系统。

对于不同的可视语言,Garden 都提供一致的面向对象的内部语义框架,所有的程序和数据都被认为是对象。每一种可视语言在进行语法描述和语义定义时,要求所有的语法单位都规定有各自的类型,再根据语义为每一种类型都附上所需的计算函数。这样,用户通过语法制导的图形编辑器给出可视程序后,Garden 把它映射成这种可视语言的程序类型的一个实例对象,该对象是可执行的。

虽然上述两个系统都不完全与图 1 的模型相符合,但我们可以看到它们从不同的方面验证了这个模型的可行性。

五、结束语

可视语言的研究和发展必将对软件工程产生重大影响,国际上对可视语言实现技术进行了深入的研究,1986 年以来每年都有一次 IEEE Workshop on Visual Languages 并出版会议文集。国内可视语言的研究尚处于起步阶段,我们正在 SUN 工作站上实现 State-Charts,工作正在进展之中;计划在完成这项工作并取得经验以后,再按图 1 的模型建立一个软件开发环境。本文不揣浅陋,根据国外已有系统,结合我们自己的工程设想,探讨可

视语言技术在软件工程中的作用,希望能达到抛砖引玉的效果。

参考文献

- [1] S. K. Chang, Visual Languages: A Tutorial and Survey, IEEE Software, Vol. 4, No. 1, Jan. 1987
- [2] S. K. Chang, et al., A Visual Language Compiler, IEEE Trans. on Software Engineering, Vol. 15, No. 5, May 1987
- [3] E. J. Golin, S. P. Reiss, The Specification of Visual Language Syntax, in Proc. 1989 IEEE Workshop on Visual Languages, Rome, Italy, Oct. 1989
- [4] R. V. Rubin, et al., Early Experience with the Visual Programmer's WorkBench, IEEE Trans. on Software Engineering, Vol. 16, No. 10, Oct. 1990
- [5] W. W. Agresti eds, New Paradigms for Software Development, Tutorial, IEEE Computer Society Press, 1986. ISBN 0-8186-0707-6
- [6] A. M. Davis, Software Requirements-Analysis and Specification, Prentice-Hall, Inc. 1990
- [7] D. Harel, et al., STATEMATE: A Working Environment for the Development of Complex Reactive Systems, IEEE Trans. on Software Engineering, Vol. 16, No. 4, Apr. 1990
- [8] G. L. Coleman, et al., Experience in Modeling a Concurrent Software System Using STATEMATE, Proc. 1990's International Conference on Computer Design & Software Engineering
- [9] S. P. Reiss, Working in the Garden Environment for Conceptual Programming, IEEE Software, Vol. 4, No. 6, Nov. 1987

(接第 61 页)

因此,分形图像模型为描述自然界中的现象提供了一种有效工具,我们的方法既可以分割自然场景中的人造物体,也可以分割金属断口复杂形貌中的不同纹理部分。由实验看出,分形布朗随机增量场是进行图像处理的一个好的模型。

(编注:文中图 2、图 3 系照片反拍而非底片直接制版,故保真度有所下降。)

参考文献

- [1] B. B. mandelbrot, The Fractal Geometry of Nature, San Francisco, CA; Freeman, 1982
- [2] A. P. Pentland, Fractal-Based Description of Natural Scenes, IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-6, No. 6, Nov. 1984
- [3] 李炳成,朱耀庭,朱光喜,万发贵,图像综合的非规则维布朗模型方法,模式识别与人工智能, Vol. 1, No. 4, 1989