

基于分形特征的自然景物图象分割方法

杨波 徐光祐 朱志刚

(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘要 提出了一种基于分形特征分割自然景物图象的方法。分割的主要目标是找出景物中的人造物体。首先构造了一组分形纹理特征,给出了图象不同部分的粗糙度及纹理基元大小、方向等特性的描述,以此为基础进行图象分割。此外,通过对盒维数方法中的参数拟合性能的分析,对维数估计方法进行了优化。理论和实验表明,在自然环境中,该方法能够区分不同的纹理区域及人造目标,达到满意的分割结果。

关键词 分形 盒维数估计 纹理分割 回归分析

0 引言

可视纹理的判定一直是计算机视觉研究中一个活跃的领域。一般来说纹理分布特性有以下6种:稀疏性,对比度,方向性,邻接性,恒常性,粗糙度。基于这些特性,现有的纹理分割方法大致可分为以下几类:基于共生特性度量的方法、基于马尔可夫随机场特性的方法、基于Gabor滤波器特性的方法和基于分形特性的方法。前3种纹理分割方法分别基于图象的统计特性和结构特性。Pentland^[1]指出,分形模型有效地涵盖了图象中的所有二阶变化信息。也就是说理论上分形模型可以达到以上3种模型的能力。常用的分形特征有2种,即分形维数(Fractal Dimension, FD)和Lacunarity,前者一定程度上度量了纹理的视觉粗糙度,后者则包含了纹理基元的某些信息。

在军用自主式或半自主式移动机器人的研究中,自然环境理解是一个主要的研究领域,而人造目标的寻找是其中的一个主要研究方向。自然景物图象基本满足基于分形特征的分割方法的要求。同时由于分形特征是对纹理粗糙度的一种度量,适用于草地、树林之类粗糙纹理与房屋、车辆之类平滑纹理的分割,所以它可以被用来在自然景物图象中分割

出人造目标。

1 分形理论基础及应用现状

1.1 分形理论基础

分形理论由Mandelbrot于六、七十年代提出,被广泛应用于图象压缩,图象生成,纹理分割及其他生物、物理和社会科学中^[2]。对于分形维数,除了Mandelbrot给出的定义外,基于不同的测度和分形构造方法,以及应用领域的差异,人们还定义了其他一些分形维数,如自相似维数,Housdorff维数,盒维数等等。其中盒维数的定义为:对于 $F \subseteq R^n$,令 $N_\epsilon(F)$ 表示用直径不超过 ϵ 的集合覆盖 F 的最小集合数。则 F 的盒维数为: $\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N_\epsilon(F)}{-\log \epsilon}$,条件是此极限存在。实际应用中,由于盒维数易于估计,所以成为基于分形几何的纹理分割中常用的分形特征。

一般情况下,自然景物的固有特性(粗糙度等)与其所处的位置及图象拍摄的视点无关。在此条件下,Pentland^[1]指出,表面法向量的分形维数表征了图象亮度表面的分形维数,当然也表征了物体表面的维数。这就表明分形描述应该是恒定的,我们可以利用分形特征进行纹理分割。

1.2 分形特征的估测及基于分形特征的图象分割

基于分形几何的特征大致有3类:分形维数, Lacunarity 和分形标注(多分形)。其中分形维数由于具有较强的描述能力,而且与人类的视觉感知有直观的对应,成为纹理分割中最常用的特征。Keller^[3]指出,虽然自相似性分形维数的定义较为直接,但由于图象的自相似性是概率意义上的而非完全的,且难于从图象数据中估测出来,所以人们转而去求取分形维数的一个相关度量——盒维数。Dubuc et al. 提出了变化量(Variation)方法,通过计算在一个边长为 ϵ 的方格中图象表面 $f(x,y)$ 的最大变化 $V(\epsilon)$ 来估测分形维数。Peleg^[4]提出了 ϵ 覆盖(ϵ -blanket Covering)方法,通过计算灰度级表面的面积随分辨率变化而变化的趋势,估测分形维数。此外, Keller et al.^[3]和 Chaudhuri et al.^[5]也提出了各自的分形盒维数估计方法。

基于分形特征的图象分割方法一般采用 K-NN 算法或 K-平均算法。实现中涉及到一些细节问题,包括 K 的选择、距离度量的选择以及欧氏距离需规格化。此外,由于在局部地方有异常出现时(例如纹理边界或人造目标等),分形维数的度量值可能低于拓扑维数,所以也可以由此类估计值定出区域边界。

2 分形特征获取

2.1 纹理图象分形维数估计

在分形维数的估计方面,我们基于 Voss^[6]和 Keller^[3]分别给出的一种分形盒维数估测方法。首先将图象 A 视为一个三维空间中的一个表面 $(x,y,f(x,y))$,其中 $f(x,y)$ 为图象 (x,y) 位置处的灰度值。令 $P(m,L)$ 为以图象表面中任一点为中心的大小为 L 的盒子中,图象点的数目为 m 的概率, N 为盒子中最多可容纳的点的数目($N \leq L^2$), M 为图象中点的数目。所以含有 m 个点的盒子的数目为 (M/m) 。这样,用来覆盖整个图象所需的盒子数的期望值为:

$$\langle N(L) \rangle = \sum_{m=1}^N (M/m)P(m,L) = M \sum_{m=1}^N (1/m)P(m,L) \quad (1)$$

这样,如果我们令

$$N(L) = \sum_{m=1}^N (1/m)P(m,L) \quad (2)$$

可得:

$$N(L) \propto L^{-D} \quad (3)$$

其中 D 即为要求的分形维数,且有 $D \in [2.0, 3.0]$ 。在实际计算中,我们通过 $P(m,L)$ 的计算,以求得一系列点对 $\{\log(L), \log N(L)\}$ 。由式(3)可知,这些点呈线性关系,可通过最小二乘拟合,得出直线方程,其中直线的斜率即为待估测的分形维数。

2.2 待分割图象的分形维数的计算

对于待分割的图象,我们将它分割为一组具有相同大小、间距且相互重叠的局部区域,来覆盖整幅图象。对于每一个局部区域,将之视为一个子图,按上述方法计算它的分形维数,并将计算结果作为局部区域的中心点位置的特征存储起来,以便进行后续的分割处理。

由于图象分形维数处于 $[2.0, 3.0]$ 之间,不同的纹理可能对应相同的分形维数,所以,为了达到更好的分割效果,我们在原图象的分形维数的基础上,又定义了一组基于变换图象的分形维数,将它们组成一个特征向量,用来分割纹理图象。具体定义如下:

设 $I_0(x,y)$ 为原图象, $F_i(i=2, \dots, 7)$ 分别对应于水平、垂直及全方向的平滑滤波器和边缘检测器,则变换图象 $I(x,y) = F_i(I_0(x,y))$ 的分形维数为 $FD_i(x,y)$;其中,特征1对应原图象的分形维数,特征2,3,5,6分别可以给出纹理的方向性的描述,特征4,7可以给出纹理基元稀疏性的描述。通过这样一组分形特征的定义,增加了不同纹理在特征空间中分布的距离,有助于实现充分的描述和满意的分割。

3 拟合性能分析及优化

3.1 存在的问题及其原因

现有分形维数计算方法,均面临维数估计的准确性问题^[7]。对于一般的线性拟合方法,根据回归分析理论,如果观测数据中存在异常点,其对回归直线的斜率将产生较大影响,从而导致计算出的分形维数与其精确值有较大的差异。另一方面,由于纹理表面是统计自相似的,而自相似的程度有较大差异,对线性回归效果也有较大的影响。此外,对于盒维数计算,分形维数估测误差主要出现于维数较高的情况,其内在原因为受到灰度级量化和图象分辨率的限制。针对以上问题,对分形维数算法的可靠性、模型选择的可行性以及统计自相似的程度,必须给予定

量的描述,而在算法设计上,也应充分利用这些分析结果,以便得到更为精确有效的维数估计。

3.2 整体拟合线性性分析

设在双对数坐标系 $\{\log(L), \log(N(L))\}$ 下所测得的 n 个点的坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, $l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, $l_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$, $l_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$, 则其拟合回归直线方程为: $y = \hat{\alpha} + \beta x$, 其中 $\hat{\beta} = l_{xy}/l_{xx}$, $\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x}$, 其中 β 即为估测得到的分形维数。

设 \tilde{y}_i 为 x_i 由回归直线方程计算得的结果, $U = \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2$, $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2$, 而 l_{yy} , U 和 Q 分别称为总平方和、回归平方和及剩余平方和。三者之间有如下平方和等式: $l_{yy} = U + Q$ 。设 $r = \sqrt{U/l_{yy}}$, $r \in [0, 1]$, 有 $r^2 = U/l_{yy} = \hat{\beta}^2 l_{xx}/l_{yy}$, 所以 r 为 y 与 x 之间的相关系数。又由 $Q = (1-r^2)l_{yy}$ 可见, r 的值越大, 剩余平方和越小, 回归直线与观测数据点拟合得也就越好。因此, r 可作为 y 与 x 之间线性关系程度的一种度量。

由回归分析理论可知, 令 $r_{\alpha}(n-2) = t_{\alpha/2}(n-2) / ((n-2) + (t_{\alpha/2}(n-2))^2)^{1/2}$, 称 $r_{\alpha}(n-2)$ 为相关系数 r 在显著性水平 α , 自由度为 $(n-2)$ 的临界值。式中 $t_{\alpha/2}(n-2)$ 为显著性水平 α 下自由度为 $(n-2)$ 的 t 分布的概率密度值。则有如下评定准则: 若 $r > r_{\alpha}(n-2)$, 则 y 与 x 之间具有强线性关系, 这时模型被认为是合理的, 可以利用 $\hat{\beta}$ 计算分形维数 D_F ; 否则需要对观测数据进一步分析处理。

因 r 是 y 与 x 之间线性相关程度的一种度量, 而在某个尺度范围内, y 与 x 的线性相关程度是分形集的统计自相似性程度的具体体现。因此, 可以将 r 定义为分形集 S 相对于观测数据的统计自相似度, 简称为统计自相似度。当 $r=1$ 时, y 与 x 之间具有确定的线性关系, 从而分形集 S 是(严格)自相似的。而当 r 趋近于 0 时, 此时 y 与 x 之间无线性关系, 可以认为 S 不是统计自相似的。可见 r 定量地描述了 S 的统计自相似程度。在以后的分割算法中, r 可作为分形特征的一个权值, 来确定该特征的可信度, 使特征具有更明确的含义及更好的可用性。

3.3 残差分析、异常点剔除及模型的合理性

原始测量数据的变化对分形维数的估测结果有

较大的影响。为了进一步提高估测的精确性, 分析回归效果不显著的原因, 我们有必要利用残差分析研究数据点对拟合方程的作用, 找出不符合要求的数据点(outlier), 剔除之, 以获得显著的回归效果和更为准确的分形维数估测值。

异常点的产生是由于用来计算此点的图象区域的统计自相似性不能很好地满足。比如盒维数计算时盒子的尺寸太小以致于小于纹理基元时, 这种自相似性就有可能消失。再如当利用分形维数作为特征进行图象分割时, 计算区域中如果存在 2 种以上的纹理, 就会导致自相似性的不满足。对于第 1 种情况, 我们可以通过残差分析, 去掉不满足条件的盒子对应的点, 以获得较为准确的估计, 对于第 2 种情况, 由于得出的分形维数估计值可能小于 2.0。所以它正好可以作为判断纹理边界的一个证据。

设第 i 个点的残差值为 $e_i = y_i - \tilde{y}_i$ ($i=1, 2, \dots, n$), e_i 的标准残差定义为 $d_i = e_i/\delta_i$, 其中 $\delta_i = ((1 + 1/n + (x_i - \bar{x})^2/l_{xx})(1-r^2)l_{yy}/(n-2))^{1/2}$ 。以预测值 \tilde{y}_i 为横坐标, 以标准残差 d_i 为纵坐标的散点图称为残差图。通过残差图可以揭示出 3 种常见的偏离。

(1) 个别测量数据的残差的绝对值比所有其他点大很多, 称之为异常点。一种检验方法是: 若 $|d_i| > c$, 则将它剔除。其中 c 可根据误差的分布及预设的可信度 α 确定。对于 $n \geq 20$, $\alpha = 0.05$, 由标准正态分布表中可查出 c 可取值为 3。

(2) 方差均匀变化, 也即残差是均匀的, 此时为正常情况。

(3) 测量数据相对于拟合结果的残差图表现为弯曲的形状, 这样的情况说明此数据集合不适合用线性回归模型。

4 实验设计、实验结果及应用性能讨论

4.1 实验设计及实验结果

为了进行纹理图象分割, 我们需要在图象的不同位置计算相应的局部区域的分形特征。实验中, 我们分别计算了原图, x, y 方向平滑图和边缘图, 整体边缘图和平滑图的不同位置的分形维数, 以及原图的 Lacunarity, 它们构成了一个分形特征向量。我们采用 Voss^[6] 的分形维数估测方法, 与 Keller 方法不同的是采用了新的盒内点的计数方法, 以保证测量数据符合线性模型。此外我们还加入了异常点检测

剔除的改进手段,并可以给出估测结果的可信度(自相似度) r 。

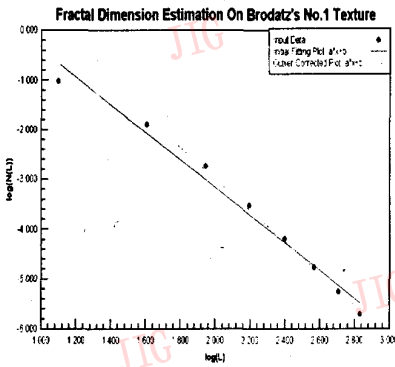


图1 异常点剔除前后的分形维数拟合结果

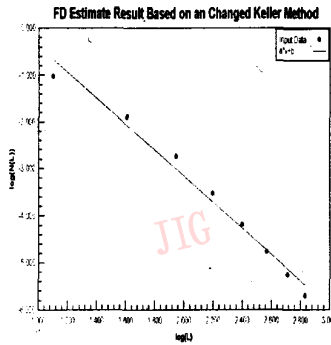


图2 变异的 Keller 维数估计方法的拟合结果

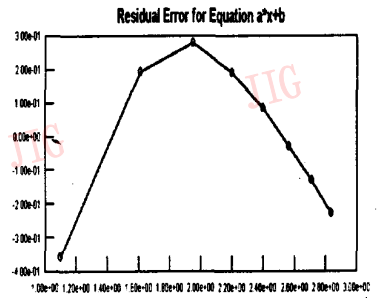


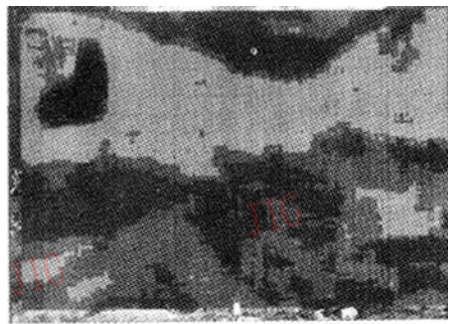
图3 变异的 Keller 维数估计方法的拟合残差图

图1是对 Brodatz 纹理册^[8]中的第1号纹理进行维数计算,并采用了异常点控制后的估测结果。图中2条拟合直线分别对应于直接拟合结果和去掉异常点之后的拟合结果。由图中实现可以看出,异常点出现在盒子尺寸 L 较小的地方($L=3$),这是由于盒子太小,受到量化精度,分辨率及纹理基元大小影响的结果。去掉此异常点后,回归性能得到了明显的改善。图2、3对应于由 Keller 给出的维数估计方法得

出的测量数据进行直线拟合的结果及残差图。此方法在点计数中,将盒子中的点数计算为图象中每个点在盒子中的高度之和。由其残差图可见,它表现为一种弯曲的轨迹,这表明 Keller 方法或模型不是线性模型,也就是说用 Keller 的方法估计分形维数是不适宜的。



(a) 溪流图象中人工剪贴入房屋



(b) 分割结果

图4 自然景物图象与人造目标的分割

图4(a)是一幅溪流的图象,并且人工剪贴入一座房子。图4(b)是分割结果。其中不同的灰度表示不同的类,而灰度值的大小取决于该类中心向量中,对应于原图象分形维数的项的大小。维数越高,灰度值越高。由图可见,人工剪贴入的房子归为一类,山林灌木归为一类,深色河床砂石与有白云的天空归为一类,溪水及浅色河床砂石归成一类,基本上达到了合理的分割。此外,图4(b)中的次浅灰色区域还包含了纹理边界,包括山林与天空的边界,河床砂石

与树林及小溪的边界,以及在左上角人工剪贴的房屋与周围景物的边界均被归为这一类中。它也可对纹理分割提供一定的线索。

4.2 应用性能讨论

在实际景物中,整个大尺度范围内的纹理大部分是非分形的。这时,2.2节提到的几种分形维数估计方法均难以在此条件下获得准确估计,特别是当分形维数较大时。但这里需说明,我们估算分形维

数,并没有说图象一定是严格的或强概率意义下的分形;其次,虽然不能得到准确的估计值,但由于估测结果与实际分形维数及人类视觉对粗糙度的感知结果之间具有单调性,试验表明,在纹理特征表示及纹理图象分割中是可用的。

5 结论及后续目标

本文构造了一组基于分形几何的纹理特征,对现有的分形特征估计方法的有效性加以分析,并提出了改进手段。实验表明,基于分形的特征对于自然景物图象的分割,有着较好的性能;由于分形特征对粗糙度的度量,特别是有助于从自然环境中分割出人工目标;此外,改进的分形特征估测方法也有助于得到满意的分割结果。

在后续的研究中,我们希望结合小波特征进行分割,并对分割好的区域进行再验证,根据人造目标的一些基于感知组织的特性,求得更为准确的物体边界。我们还希望研究各种纹理特征的选择和组合,以便可以自动地对不同环境的图象采用一组合适的特征,达到更为灵活、鲁棒的分割。最后,基于我们对分形维数估测算法的性能分析,我们希望将此分析结果作为特征的置信度,应用于特征的组合中,以便各种特征能够更好地反映其对图象分割的能力,从而取得更好的分割结果。



朱志刚 副教授,分别于 1988 年、1991 年 3 月和 1997 年 6 月获清华大学计算机系学士、硕士和博士学位,现为 IEEE 会员。专业研究方向为计算机视觉、虚拟现实建模和智能机器人。在国内外刊物、学术会议上发表论文 50 余篇。



杨波 博士研究生,1995 获清华大学计算机系学士学位,研究方向为计算机视觉和图象理解。在国内外刊物、学术会议上发表论文 10 余篇。



徐光祐 教授,博士生导师。1963 年毕业于清华大学自动控制系,现为 IEEE 高级会员。研究兴趣为计算机视觉,分布式多媒体和人机交互技术。已发表专(译)著 5 部,在国内外重要刊物上发表论文近 80 篇。

参考文献

- 1 Pentland Alex P. Fractal-Based Description of Natural Scenes. IEEE PAMI1984, 6(6): 661~674.
- 2 Mandelbrot. Benoit B. The fractal geometry of nature. San Francisco, Freeman, W H. 1982.
- 3 Keller James M, Chen Susan. Texture Description and Segmentation through Fractal Geometry. CVGIP, 1989, 45: 150~166.
- 4 Peleg Shmuel, Naor Joseph, Hartley Ralph, et al. Multiple Resolution Texture Analysis and Classification. IEEE PAMI, 1984, 6(4):518~523.
- 5 Chaudhuri B B, Nirupam Sarkar. Texture Segmentation using Fractal Dimension. IEEE PAMI 1995, 17(1):72~77.
- 6 Voss R. Random fractals; Characterization and measurement. Scaling Phenomena in Disordered System Pynn R. and Skjeltorp A., Eds., New York; Plenum, 1986.
- 7 Fisher Yuval. Fractal image compression; theory and application. New York, Springer-Verlag, 1995.
- 8 Brodatz P. Texture; A Photographic Album, Designers. New York Dover, 1956.
- 9 谢和平,薛秀谦编著. 分形应用中的数学基础与方法. 北京: 科学出版社, 1996.

Natural Environment Image Segmentation Based on The Fractal Characters

Yang Bo, Xu Guangyou, Zhu Zhigang

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua university, Beijing 100084)

Abstract In this paper, we proposed a fractal-characters-based method for nature environment image segmentation. The main goal of the segmentation is to find the artifact object from the image. Based on several kinds of fractal characters, we can acquire the description of roughness of each part of the image. Then we can get the segmentation of the image. We also analysis the performance of the data fitting in the box-dimension estimation, and present an optimized method. According to a

lot of experiments, the proposed approach is proved to be suitable for texture segmentation and artifact object finding in natural environment images.

Keywords Fractal, Box-dimension, Texture segmentation, Regression analysis

请订阅《中国体视学与图象分析》

《中国体视学与图象分析》杂志是中国体视学学会主办的反映体视学研究理论和应用的学术性刊物,主要面向生物学、医学等生命科学及钢铁、矿冶、石油、地质等材料科学领域的从事体视学与图象分析的科技工作者,是各大专院校、各级医院和广大体视学科技工作者可读性很强的专业性刊物。本刊的办刊方针以提高为主,提高与普及相结合,重点传播体视学的科研新成果、新经验和新技术,刊登的主要内容:(1)有关体视学和图象分析的基础理论研究的论著、综述性和评论性论著,新方法、新技术、新仪器和新设备应用的专题论述和讲座。(2)不同专业和科技领域应用体视学与图象分析方法、技术所完成的研究工作论著。(3)有关本学科的国内外进展、动态以及国内外学术会议报道。主要栏目有:专家述评、论著、讲座、专题讨论、研究简报、短篇报道、国内国际学术活动和会议纪要等。

《中国体视学与图象分析》是国内第一个有关体视学的全国性专业学术期刊,为大16开本,季刊,全年定价30元(含邮寄费)。1999年第4卷已开始办理订阅,欲订阅者请来函联系。

《中国体视学与图象分析》编辑部地址:北京复兴路28号解放军总医院内

邮编:100853

电话:(010)66939274

请订阅《计算机辅助工程》

《计算机辅助工程》是反映各行业和学术界关于CAD/CAM/CAE等计算机技术的科研成果与应用的综合性的科技刊物。她向国内外公开发刊。

杂志主要刊载反映如下内容的学术论文、科研成果、专题综述、经验总结和科技动态等各种文章:

CAD/CAM/CAE的新理论、新技术及其在工程领域中的应用;

软件工程、计算机图形学、数据库、网络、人工智能、专家系统、多媒体、控制与仿真等计算机学科的新理论、新技术及其应用;

系统科学、应用数学、计算力学的新理论与新技术及其应用。

杂志力求充实内容,不断提高质量。

1992年创刊,每年出版4期,16开本,每期五个印张。现征求订户,欢迎全国科研部门、企事业单位、大专院校、软件开发公司、各地图书馆及有关人员订阅。

杂志每期酌收工本费10元(包括平寄邮寄)全年共计40元。

订阅手续:

订费请汇上海海运学院财务处。[开户银行:上海市工行陆支乳山分,帐号:2061-14482932(并在汇单注明:《计算机辅助工程》编辑部订费)]

地址:上海市浦东大道1550号(邮政编码:200135)

《计算机辅助工程》编辑部