

妊娠期胎盘超声图像分形特征的数量化分析

马翔¹, 汪源源¹, 王威琪¹, 常才², 刘智²

(1. 复旦大学电子工程系, 上海 200433; 2. 复旦大学医学院妇产科医院, 上海 200011)

摘要:应用分数布朗运动模型(FBM),对孕妇不同妊娠期的胎盘B型超声图像进行分形处理,提取出用以胎盘分级的分形特征参数,并结合临床医学专家的判断,利用数量化理论,建立起胎盘功能的自动分级模型。通过106例胎盘图像的分析,结果表明:胎盘B型超声图像的分形特征可以有效地表征胎盘的功能状况,而数量化理论可以使胎盘功能的无损自动分级成为可能,因此有较好的临床应用前景。

关键词:医学超声;分形;数量化理论;胎盘功能
中图分类号:TB559 文献标识码:A

Quantitative analysis of the fractal parameters gained from the B-mode ultrasound placenta image

MA Xiang¹, WANG Yuan-yuan¹, WANG Wei-qi¹, CHANG Cai², LIU Zhi²

(1. Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. Obstetrics and Gynecology Hospital, Medical Center of Fudan University, Shanghai 200011, China)

Abstract: Based on Fractional Brown Motion theory, the B-mode ultrasound image from the placenta during gestational period is analyzed, and two fractal parameters are obtained. Then together with the grading results judged by medical experts, the rules of automatic classification are established by applying the quantification theory. The application results of 106 ultrasound images of placenta show that the fractal feature extracted from the B-mode ultrasound image is a valuable parameter for the placental function, and it is feasible in clinic to evaluate automatically the placental function using the proposed method.

Key words: medical ultrasound; fractal; the quantification theory; placental function

1 引言

在临床胎儿生长发育监护中,监测不同阶段的胎盘发育情况有重要意义:作为胎儿与母体间进行物质交换的关键场所,胎盘担负着胎儿的呼吸、营养物质的吸收、代谢产物的排泄等重要功能,因此胎盘功能的状态将直接影响胎儿宫内的生长发育,甚至是安危。临床常用胎盘宫内评价方法^[1]主要有胎盘的超声分级、母体血清雌三醇测定、胎儿心率变化、脐动脉及子宫动脉血流测定,其中利用超声观察胎盘是一种较为直观的无损方法。此方法是医生通过

观察超声仪器得到胎盘的B型超声图像,判断胎盘的位置、厚度、回声及其内部结构,了解胎盘组织成分是否发生变化,如纤维化、钙化以及血窦形成,从而对胎盘的发育阶段和功能进行评估^[1]。这种目测评估方法仅粗略地将胎盘功能分为四级,完全由医生凭经验靠肉眼进行判别,没有客观的评价标准,容易受主观因素的影响,存在着重复性差、准确性因医生水平而异的缺点。

为了准确而客观地评价胎盘的功能,本文对采集的胎盘超声图像,应用分数布朗运动模型(FBM),引入图像的分形特征提取方法,对胎盘超声图像进行分形曲面的研究,并通过数量化理论对图像分形参数进行分析,建立胎盘功能的无损自动分级系统,为临床诊断提供了一种客观评估胎盘功能的手段。

2 胎盘超声图像的分形特征提取

很多自然对象和景物展现了一种称为自相似的

收稿日期:2000-04-28;修订日期:2000-07-07

国家自然科学基金资助项目(批准号:39800137)

庆祝上海市声学学会成立20周年征文

作者简介:马翔(1975-),男,山西人,硕士研究生,研究方向:医学图像处理。

基本性质,即在不同的缩放尺度下具有相同的结构,并且可用一个称为分数维的基本参数来表示。如果灰度图像的亮度表面是分形的,那么其分数维就可以准确地描述图像的结构。在医学图象处理领域,分形理论已经成为一种有效的图象纹理分析方法^[2,3]。我们已经知道,胎盘图像的灰度变化程度是医生评估胎盘功能的主要依据,所以可以假设胎盘的灰度图象是分形的,尝试用分数维来描述这种变化,并与胎盘功能分级建立一定的联系。

本文用分形理论中的分数布朗运动模型^[4](Fractional Brown Motion)所得出的特征对胎盘超声图像进行处理与分析。

分数布朗运动 FBM 是 1968 年 Mandelbrot 和 Ness 两人提出的一种数学模型,它主要用于描述自然界的山脉、云层、地形地貌等不规则形状。分数布朗运动模型属于静态自仿射类分形,是研究分形特征的最有效和最常用的模型。分形理论认为:FBM 模型是随机行走所产生的。本文将胎盘图像的灰度平面也视为随机行走的结果,故可用 FBM 模型进行胎盘图像的处理与分析。

设 FBM 函数 $V_H(S)$ 是单变量标尺 S 的单值函数,若它的绝对增量的方差存在下列关系:

$$E[|V_H(S_i) - V_H(S_j)|^2] = k |S_i - S_j|^{2H} \quad (1)$$

式中 k 为常数, H 称为 Hurst 参数,且 $0 < H < 1$ 。经研究表明: H 反映了 FBM 函数产生的平面的粗糙度。 H 越接近 0,说明该曲面粗糙程度越小; H 越接近 1,说明该曲面粗糙程度越大。对于二维分形布朗曲面而言,分形维数 D_S 与 H 满足:

$$D_S = 3 - H \quad (2)$$

因此当分形维数越接近 2,即 H 越接近 1,则该曲面的粗糙程度越大。所以分形维数 D_S 和 H 一样,可以作为表征图像特征的参量。

对超声图像进行处理时,我们取图像中像素的位置为 S ,其对应的灰度值为 $V_H(S)$,采用空间域的方法估计图像中每个像素的分数维。计算某个像素分数维的具体方法为:先取以此像素点为中心的像素模块作为分形计算区域,模块的大小可以根据实际需要取 3×3 、 5×5 或 7×7 的正方形区域(像素模块较大,则抗噪声能力较强,但计算量较大;像素模块较小,比较适于分析小纹理特征),我们分析的胎盘超声图像中噪声较少,而主要分析对象胎盘的纤维化部分则主要以小亮点的形式出现,所以这里选取 5×5 模块为分形计算区域。接着在此像素模块中计算所有两两像素 S_i 、 S_j 间的空间距离

$|S_i - S_j|$ (由于正方形区域的象素总数为 25,所以有 300 对象素对,但不同的象素对距离情况只有 14 种),对每种象素对的距离 $|S_i - S_j|^2$,求其两象素灰度差的平方 $V_H(S_i) - V_H(S_j)$ 并求平均得 $E[|V_H(S_i) - V_H(S_j)|^2]$ 。式(1)两边取对数,得:

$$\begin{aligned} & \lg\{E[|V_H(S_i) - V_H(S_j)|^2]\} \\ & = \lg k + H \lg(|S_i - S_j|^2) \end{aligned} \quad (3)$$

根据(3)式,象素模块中 14 种象素对距离 $|S_i - S_j|^2$ 及其对应的 $E[|V_H(S_i) - V_H(S_j)|^2]$,可以用最小二乘法拟合出一直线,此直线的斜率 H 即为 Hurst 参数,然后由(2)式得到分形维数 D_S 。

以胎盘超声图像中 ROI 区域的各点为中心,逐点进行分形运算,用求得的分形维数 D_S 可构成一幅新的“分形”图像。这幅“分形”图像中包含了原胎盘图像中灰度变化剧烈程度的信息,可用此图中分形维数 D_S 的统计特征作为自动判断分级的依据。

在具体的分形计算中,选取分形维数 D_S 的两个统计特征作为胎盘图象的特征参量:一个为整个“分形”图像的分形维数均值 \bar{D}_S ,另一个是“分形”图像中分形维数小于 2.35 的点占 ROI 区域总点数的百分比 P (此处选取 2.35 为分形维数阈值是根据经验得出,目的是使 P 值对不同分级的图像有较大的区分度)。若图像灰度变化较小,其大部分点对应的 H 接近 0,其分形维数就比较大,所以整个“分形”图像的分数维均值较大,而分形维数小于 2.35 的点占图像总点数的百分比则较小。反之亦然。

3 数量化理论

得到两个分形特征参量后,还需将这两个分形特征参量与胎盘的分级联系起来。但两者之间的关系较复杂,无法利用简单的线性关系或经验公式描述。为了模拟胎盘图像的分形特征参数与胎盘功能分级之间的非线性关系,本文引入数量化理论^[5],对分形特征参量到胎盘分级进行非线性映射。

具体方法是:参照数量化理论中将定性变量(称作项目, item)的不同取值划分为类目(category)的方法,将估计用的参数作为项目,等间隔地划分成不同的类目。考虑有 m 个项目 x_1, x_2, \dots, x_m (在本文中即为胎盘图像的两个分形特征参数)对定量的基准变量(criterion variable) y (在本文中即为胎盘功能的分级)进行估计: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 。设第 j 个项目 x_j 有 r_j 个类目,总共有 $\sum_{j=1}^m r_j = p$ 个类目。假定观测了 n 个样本,则式(4)矩阵称为反应矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} \delta_1(1, 1) \dots \delta_1(1, r_1) & \delta_1(2, 1) \dots & \delta_1(2, r_2) \dots & \delta_1(m, 1) \dots & \delta_1(m, r_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_i(1, 1) \dots \delta_i(1, r_1) & \delta_i(2, 1) \dots & \delta_i(2, r_2) \dots & \delta_i(m, 1) \dots & \delta_i(m, r_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_n(1, 1) \dots \delta_n(1, r_1) & \delta_n(2, 1) \dots & \delta_n(2, r_2) \dots & \delta_n(m, 1) \dots & \delta_n(m, r_m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\delta_i(j, k)$ 称为第 i 样本的第 j 项目第 k 类目的反应, 即:

$$\delta_i(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x_j \text{ 属于类目 } k \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

则可以建立下列模型:

$$y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j, k) b_{j, k} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$, 为样本数, ε_i 为误差项, $b_{j, k}$ 是当第 i 个样本的第 j 个项目属于第 k 个类目时对应的系数。

首先利用已知胎盘分级的图像的分形特征参数进行建模, 即求得系数 $b_{j, k}$ 。这里采用了伪逆法求解式(6), 得:

$$\hat{b} = [X^T \cdot X]^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (7)$$

这种求法可以使整个预测误差 $E = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$ 达到最小。

求得系数 $b_{j, k}$ 后, 就完成了数量化理论的建模。以后应用时, 只需将待测胎盘的图像分形参数代入模型, 就可以得到自动分级的结果, 此结果可以与临床医生的人工分级进行比较。

4 临床应用与结果

临床应用在上海复旦大学医学院妇产科医院进行, 所用超声仪器为 ATL ULTRAMARK 9 HDI, 超声仪器上冻结的 B 型胎盘图像用计算机图像卡 AVER PCIMAGER 进行采集, 图像大小为 576×432 像素, 每像素为 8 位灰度值, 图像以 BMP 格式存于计算机中。所有采集均由有经验的医生操作, 并在图像上由医生勾勒胎盘的具体位置。在获取的 106 例胎盘图像中, 随机抽取 67 例图像作为训练集, 其余 39 例图像作为测试集, 通过分形计算, 建立一个自动分级系统。这些分析是在 PENTIUM- II 350 计算机上用 MATLAB 5.3 编程实现的。

表 1 给出了自动分级的结果与医生分级结果之间的误差(这里将有经验医生的分级结果作为标准)情况比较。

表 1 自动分级的误差总情况

分级误差统计量	训练集(67例)	测试集(39例)
均值	0.26	0.47
方差	0.36	0.60

从表 1 可以看出, 对于 67 例训练集和 39 例测试集, 自动分级与有经验医生人工分级的误差均值、方差都比较小, 这不仅说明胎盘图像的分形特征可以有效地作为胎盘分级的特征参量, 而且说明数量化理论能够较好地模拟分形特征参量和胎盘分级之间的非线性关系。同时可以看出, 39 例测试集的自动分级效果比训练集的自动分级效果略差, 这主要是因为训练集的样本数还不够大, 而应用数量化理论需要较大的训练集。随着不断地采集数据, 增大样本集, 就可以更精确地模拟这种非线性关系, 得到更好的测试效果。

5 结论

本文提出了利用超声图像的分形特征和数量化理论对胎盘功能进行无损自动分级的方法, 这种方法先从原始图像中计算其每一像素点的分数值, 构成一幅新的“分形”图像, 并从中提取出两个分形特征参数, 再对此特征参数应用数量化理论, 确立自动分级的规则, 从而进行胎盘功能的自动分析。

从临床应用结果发现: 此方法能得到与有经验医生手工分级基本吻合的自动分级结果, 可以为临床提供一种高效而准确的胎盘功能自动分析方法, 从而有可能提高中小医院的临床诊断水平。

参考文献:

- [1] Jauniaux E, *et al.*. Perinatal assessment of placental and cord abnormalities [A]. In Chervak FA, *et al* eds, The textbook of obstetrics and gynecologic ultrasound [M], Boston, 1991: 1331.
- [2] Wu C, Chen Y, Hsieh K. Texture feature for classification of ultrasonic liver image [J]. IEEE Trans. Med. Imag., 1992, 11: 144-152.
- [3] Wang YY, Wang WQ. Fractal concept and its method for Doppler ultrasound signals [J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 1993, 19(8): 664-666.
- [4] 胡瑞安, 胡纪阳, 徐树公. 分形的计算机图象及其应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- [5] 夏立显, 周光亚. 数量化理论及其应用 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 1985.