·论著·

椎体松质骨的三维构筑学成像研究

王鸣鹏 吴威岚 朱汉民 张国桢

摘要：目的 研究骨量和松质骨显微结构的变化，及其与骨质疏松症骨折发生之间的关系。**方法** 研究采用相对较为成熟的螺旋 CT 扫描三维重建，并借助工程学上的 Euler 定律，以活体无创三维成像方法，对小梁骨的结构和连接性进行观察和分析。**结果** 随着年龄的增长，横向排列的骨小梁逐渐消失，纵向骨小梁变细，与周围的小梁逐步失去其连接性；二维横断面图像在小梁连接性描述上有一定的局限性，原因是小梁骨在垂直方向的走向并非规律有序。由于松质骨的显微结构具有不同的类型，它们之间不能等同比较。**结论** 三维结构连接性和连接密度的结果显示：板状型的小梁具有较高的连接密度和较小的连接性；而杆状型的小梁则连接密度较低和连接性较好。

关键词：小梁骨；骨结构；连接性；三维重建；骨质疏松

Imaging evaluation of 3-D architecture in vertebral trabecular bone *WANG Mingpeng, WU Weilan, ZHU Hanmin, et al. Department of Radiology, Huadong Hospital of Shanghai, Shanghai* 200040, China

Abstract: Objective In our paper, the change of trabecular bone mass and microstructure and their relationship with the incidence of osteopenic fractrure were studied. **Methods** In this study, we used an advanced spiral CT scanner to perform a series of 3-D reconstruction of cancellous bone, and we investigated the architecture and connectivity of cancellous bone calculated by a Euler law with an implementation of noninvasive 3-D reconstruction *in vivo*. **Results** Results demonstrate that the transversal cancellous bone gradually disappears and the longitudinal one gets thinner as age increases. And the connectivity of cancellous bone is gradually lost. Images of 2-D transversal section may contribute to the connective depicting of cancellous bone to the limit, owing to irregular orientations in longitudinal cancellous bone. We could not simply make a comparison between the cancellous bone which have different microstructure patterns. **Conclusions** We found from the connectivity and density of 3-D reconstruction, that one case with a platelike structure has a relatively high density and relatively low connectivity, whereas the other case with a rod-like structure has a relatively low density and a relatively high connectivity.

Key words: Cancellous bone; Bone structure; Connectivity; 3-D reconstruction; Osteoporosis

松质骨是一种由杆状和板状骨小梁组成的连续三维网状结构。近年来的众多研究表明，骨质疏松症骨折的发生除骨量的原因外，还存在着影响松质骨力学性能的其他因素。研究还发现，松质骨显微结构变化是影响其力学性能的一个重要因素。因而，有些研究工作已把注意力转向对小梁骨的构筑学和力学方面的研究[1-4]。目前，临床上对于松质骨构筑学方面的研究采用的三维成像方法主要有 3 种，即骨标本切片电镜下扫描三维成像、磁共振三维成像和 CT 扫描三维成像。我们的研究采用了相对更为成熟的螺旋 CT 扫描技术，及其现代科学技术 CT 扫描机的高分辨率成像性能，对人体椎体松质骨作了三维结构成像，并借助工程学上的 Euler 定律，对小梁骨的结构和连接性作了观察和分析。现将初步结果报道如下。

1 材料和方法

1.1 三维图像的成像方法

在医学领域所采用的三维图像成像方法主要分成两大类，即表面法和体积法（Surface Shade Display and Volume rendering）。根据实验研究的要求和三维成像软件的特点，本研究设计和采用了表面法作为椎体松质骨三维成像的基本方法。本文的资料统计采用了线性相关和回归，因实验所取样本数较小，未作显著性统计。

1.1.1 三维图像资料的获取：受检对象共 120 例，

作者单位：200040 上海华东医院放射科 CT 室（王鸣鹏、吴威岚、张国桢）；上海市老年医学研究所（朱汉民）

通讯作者：王鸣鹏，Email：cjr.wangmingpeng@vip.163.com

其中男性 43 例(年龄 26 ~ 90 岁, > 50 岁 = 29 例),女性 77 例(年龄 19 ~ 84 岁, > 50 岁 = 57 例)。在常规 CT 骨密度测量程序后,采用超高分辨率(Ultra High Resolution)成像算法(分辨率 24 LP/cm),对受检者进行 L_3 椎体的螺旋 CT 扫描,获得的容积扫描数据先行 1.0 mm 的二维图像重建,在二维图像的基础上,再进行表面法三维图像的成像。

1.1.2 三维图像处理的方法 :首先对图像进行预处理,即将所有的二维图像进行取舍,并划定兴趣区;然后将选定的二维图像迭加,作灰阶滤过处理。根据预先确定的阈值重新确定像素的大小,采用内插方式或重新编排像素序列。

1.1.3 三维成像阈值的确定 :根据表面法的定义,阈值的选择,对结果的三维图像显示具有相当重要的意义。在阈值确定前,先采用了 CT 机的 Profile 功能,对随机选择的 50 例志愿者的 L_3 椎体作了测量,并经过统计分析,选择阈值 250 HU 作为以下表面法三维成像的阈值。

1.2 骨小梁连接性的 Euler 定理

Euler 定理近年来被用作表示骨小梁的连接性[5,6]。一个三维结构,用 Euler 定理解释可看作为是一个拓扑学上的不变量,其内容是一个三维结构的质点数加上去掉连接性的封闭腔数字。其具有 3 个典型的拓扑学特性 :①参考相位部分的数量 ;②连接性 ;③在参考相位内补充相位部分的数量[7]。

1.2.1 小梁骨的连接性 :大量的研究已表明,小梁骨是一个多重连接的结构,骨髓与小梁骨也是完全连接的,即没有一片小梁骨与主要结构是完全孤立的 ;骨髓也不是完全孤立地存在,而全部由骨和骨髓两相连接成无数的囊状物,其被称为质点或颗粒(Particles)。这种现象不仅存在于椎体松质骨内,同时也存在于全身具有松质骨的骨骼内。根据 Euler 定理,一个三维结构 X 可由下述公式表示:

$$\chi(X) = \beta_0 - \beta_1 + \beta_2 \qquad (1)$$

此处 β_0 是骨质点的数量,β_1 表示连接性,β_2 表示完全由骨包裹的髓腔数量。根据拓扑学的定义,几乎无异议地认为小梁骨相是一完全的连接结构而无孤立部分($\beta_0 = 1$) ;若骨内无闭合的骨髓腔,即不存在完全有骨相包裹的并与主要骨髓间隙相分隔的骨髓腔,则 $\beta_2 = 0$。在 $\beta_2 = 0$ 时,Euler 定义是质点和连接性的差($\chi = 1 - \beta_1$)。假如一个有 4 个分支的三维结构(不含闭合腔),则等式 $\beta_0 - \beta_1 + \beta_2 = 1 - 4 + 0 = -3$;一个具有 7 个分支 3 个闭合腔的三维结构,则等式 $\beta_0 - \beta_1 + \beta_2 = 1 - 7 + 3 = -3$。如果一个独立的参考相位存在($\beta_0 = 1$),如果补充相位无闭合腔($\beta_2 = 0$),那么 x 只与连接性(β_1)相关。以松质骨连接为例,即只包含一个质点的复合连接结构,必定是一个负 Euler 值。

连接性计算通常是以一个简单的三维结构为前提。以二维图像表示的三维结构,可看作一条主结构形成的多个突起,并以二维和一维方式构成一组闭合的结点。根据 Euler 定理,突起(p)的两次函数 $\in$ 遵循下述关系:

$$\in(p) = \begin{cases} 1, \text{假定 } p \neq \varnothing \\ 0, \text{假定 } p = \varnothing \end{cases} \qquad (2)$$

在某些情况下根据拓扑学定义的公式也有一些例外,如在骨的修复和愈合过程中骨岛的形成,一般这些例外情况在计算中不予考虑,因为这种类似骨岛的情况对于计算的影响极其微小,由此而得到下述等式:

$$\beta_1 = 1 - \chi \qquad (3)$$

2 结果

采用表面法成像的腰椎 L_3 椎体的三维图像如图 1 所示。其连接性和连接密度的原始数据通常需经过灰阶滤过和噪声去除以便于正确计算。根据上述公式,经随机选取的某一椎体以下述方式划分作预处理试验,即以几何级数递增将该三维椎体划分成 n 份($n = 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128$ 和 256)并进行计算,表 1 是经过和未经过数据预处理的计算结果,三维连接性和连接密度的正确计算结果应不受体积改变的影响。随后,全部研究对象的连接性和连接密度的计算根据公式(3),计算均以兴趣区体积为单位。

表 1 预处理及未预处理对计算结果的影响

采样数	兴趣区体积 (mm^3)	平均连接密度	
		预处理(mm^{-3})	未预处理(mm^{-3})
1	36325.08	0.63	0.63
2	18162.54	0.63	0.62
4	9081.27	0.63	0.62
8	4540.64	0.63	0.61
16	2270.32	0.63	0.60
32	1135.16	0.63	0.58
64	567.58	0.63	0.56
128	283.79	0.63	0.54
256	141.89	0.64	0.52

随机选取的 36 例病例(兴趣区 2 cm × 2 cm × 2 cm),经三维成像后,与二维图像(兴趣区 2 cm × 2

cm)作连接性和连接密度比较，根据拓扑学的 Euler 计算公式[8]，它的连接密度通常表述为每体积单位的 Euler 值(Euler/mm^3)，又因在小梁骨连接密度值常取负数，则其单位为 - Euler/mm^3 或直接写成 mm^{-3}。结果二维和三维的连接密度、小梁均数和三维连接密度以及三维兴趣区和连接密度，分别以线性回归分析图表示(图 2～4)，三者之间的计算结果非密切相关($r \leqslant 0.85$)。图 5、6 的小梁图像，其计算结果在图 4 A 和 B 处。

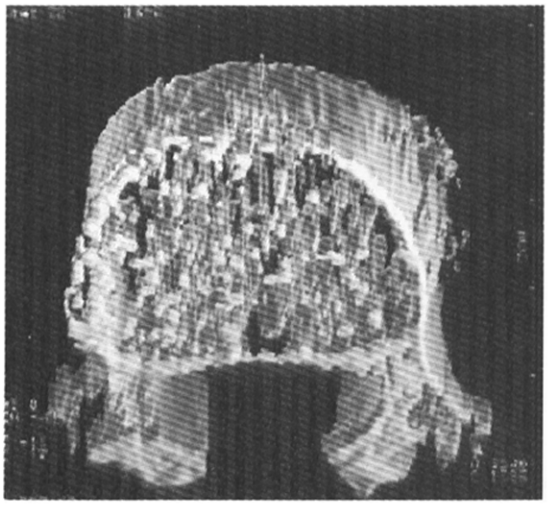

图 1 表面法成像 L_3 三维图(正常老年人)

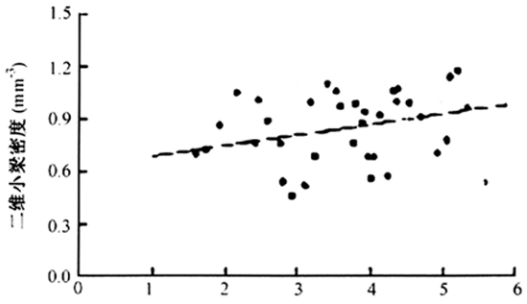

图 2 三维连接密度(mm^{-3})

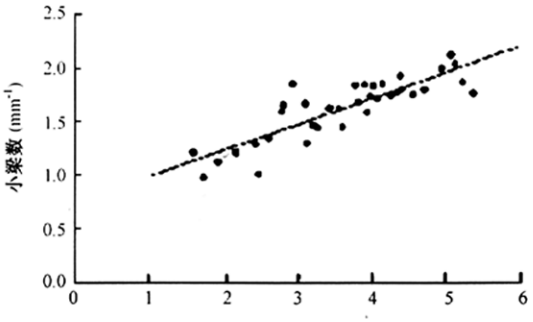

图 3 三维连接密度(mm^{-3})

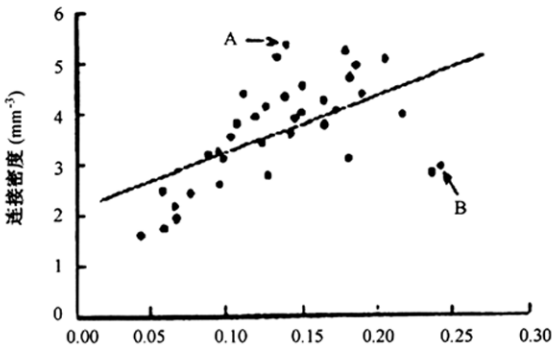

图 4 三维体积

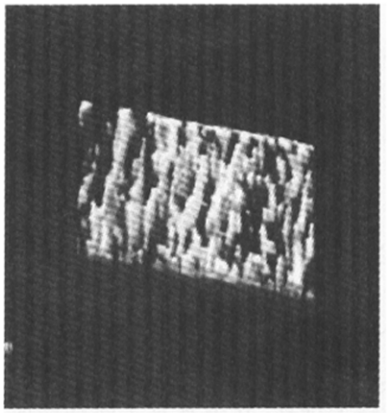

图 5 图 4 标 A 处小梁三维图像

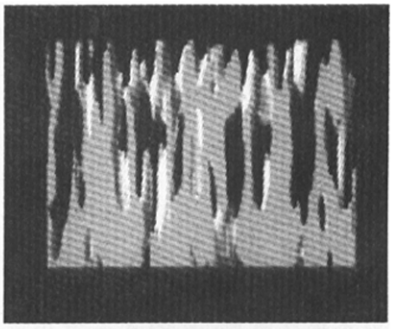

图 6 图 4 标 B 处小梁三维图像

3 讨论

基于高分辨率 CT 扫描三维成像评价微观椎体的结构是方法学上的探索，由于目前三维成像技术上的一些限制，我们还无法更精确地还原人体的一些微细结构；但我们已经能初步地看到无损伤的活体三维图像，在微观椎体骨构筑学方面的一些价值。三维的图像经过技术上的预处理后，比较真实地再现了椎体松质骨的三维结构，预处理中的一些方法

如数据的编辑和图像的平滑，得到了较好的三维结构再现效果。

椎体松质骨三维成像的结果显示，小梁骨排列的纵向结构上，无论在体积上和形态方面正常情况下明显强于横向的排列；随着年龄的增长，横向的骨小梁逐渐消失，而纵向的骨小梁变细，与周围的骨小梁逐步失去其连接性。当与年龄相关的椎体松质骨显微结构变化进一步加重时，垂直骨小梁与水平骨小梁间距逐渐加大，根据 Euler 定理，结构的垂直强度与立柱的截面积平方成正比，而与横向间距平方成反比，结果使椎体承重方向的垂直强度明显丧失，直至骨折的发生。

正常人腰椎椎体整体结构通过三维成像的图像可以发现，松质骨呈“工”字型致密结构，在终板附近骨小梁以板状骨小梁为主，结构致密，有些情况骨小梁密切融合；而“工”型结构的中央部分，主要由来自两个方面的杆状骨小梁交叉构成——垂直骨小梁以及水平骨小梁，在其周围的马蹄形结构内骨小梁分布减少，以垂直骨小梁减少为主，邻皮质骨处的松质骨骨小梁数量再次增加。观察研究还发现，老年人以及骨质疏松患者的松质骨改变具有特征性且在椎体中部水平更明显。首先是骨小梁的平行性、分布的均匀性特点破坏；其次是骨小梁的间距增加，且间距不等，相同视野内垂直骨小梁数量减少，而垂直骨小梁的矢状径改变不明显；其三是原有的格栅样结构不复存在，特别是在“工”形结构中，数量的减少十分明显，走行也偏离水平，垂直的小梁形成类似拱的结构。

二维横断面图像在小梁连接性描述上有一定的局限性。这是因为小梁骨在垂直方向的走向并非是那么有规律，当一个横断面的切层通过部分走向弯曲的小梁骨断面时，对该层面小梁连接性的计算的结果可能就不那么准确，从图 4 三维小梁连接密度和二维小梁连接密度线性回归分析，我们可以认为：二维图像小梁骨的连接密度是不客观的。

椎体松质骨三维重建的结果同时揭示，不同的松质骨显微结构类型不能等同比较。研究已经发现[9]，松质骨的显微结构基本分成 3 种类型，即杆状型、板状型和杆、板混合型，在这 3 种类型基础上并派生出多种亚型。我们的观察发现，连接性和连接密度之间的相关性较差（图 4），将两种明显不同类型的小梁骨重新计算后发现：板状型的骨小梁具有较高的连接密度和较小的连接性；而杆状型的骨小梁则连接密度较低和连接性较好。两种类型的松质骨三维图像如图 5、6 所示，其中图 5 在回归分析图 4 标 A 处，而图 6 则在标 B 处。这结果也进一步提示了连接性和连接密度之间的关系，两者的参数不能等同比较，在以后研究中必须加以充分地考虑。

【参考文献】

[1] Moseklide L. Vertebral structure and strength *in vivo* and *in vitro*. Calcif Tissue Int, 1993, 53(Suppl 1): s12-s16.

[2] Moseklide L, Moseklide L. Sex differences in age-related changes in vertebral body size, density and biomechchanical competence in normal individuals. Bone, 1990, 11: 67-72.

[3] Moseklide L. Consequences of the remodeling process for vertebral trabecular bone structure: a scanning electron microscopy study. Bone Mineral, 1990, 10: 13-19.

[4] 王鸣鹏，谭军，吴威岚，等. 椎体小梁骨结构的 CT 定量分析. 中国骨质疏松杂志, 1996, 2(3): 1-4.

[5] Bhanu PP, Lantuejoul C, Jernot JP, et al. Unbiased estimation of the Euler-Poincare characteristic. Acta Stereol, 1989, 8: 101-105.

[6] Lee CN, Rosenfeld A. Computing the Euler number of a 3D image. Proceedings of the First International Conference on Computer Vision, Bellingham, WA: SPIE, 1987, 567-569.

[7] Odgaard A, Gundersen HJG, Quantification of connectivity in cancellous bone, with special emphasis on 3-D reconstruction. Bone, 1993, 14: 173-182.

[8] Goulet RW, Goldstein SA, Ciarelli MJ, et al. The relationship between the structural and orthogonal compressive properties of trabecular bone. J Biomechanics, 1994, 27: 375-389.

[9] Singh I. The architecture of cancellous bone. J Anat, 1978, 127: 305-309.

（收稿日期：2006-04-19）