

Modelamento Fractal da Estrutura Porosa da Matriz Óssea Trabecular

Marco André Argenta, Bioengenharia – CESEC/PPGMNE,

e-mail: marco.argenta@ufpr.br, home-page: <http://www.cesec.ufpr.br/bioengenharia>

Lucas Maximo Alves, GETEME, UEPG,

e-mail: lucasmxalves@gmail.com

Mildred Ballin Hecke, Bioengenharia – CESEC/PPGMNE,

e-mail: mildred@ufpr.br, home page: <http://www.cesec.ufpr.br/bioengenharia>

Introdução

A visualização da estrutura óssea de um paciente pode ser feita por diferentes métodos, tais como: Raios-X, tomografia, micro-CT, etc. A partir de imagens obtidas com esses métodos, pode-se realizar diagnósticos clínicos de enfermidades ósseas como a osteoporose, por exemplo. Contudo, esses métodos qualitativos, que são comumente utilizados, limitam-se a experiência visual do ortopedista. Nenhum dado quantitativo é fornecido, a não ser que se faça uma análise computadorizada dessas imagens.

Sabendo-se que a estrutura trabecular irregular pode ser caracterizada pela geometria fractal, é possível realizar uma análise geométrica de uma estrutura óssea de forma a quantificar as informações que podem ser obtidas por meio de uma imagem através de um modelo fractal.

O objetivo inicial é buscar um método para extrair informações que possam quantificar grandezas matemáticas definidas no modelo fractal em função da área de observação, tais como: volume ósseo efetivo, variação do volume ósseo, variação da densidade óssea, taxa de perda óssea e taxa de remodelamento ósseo.

Fundamentos da teoria Fractal

Quando nos deparamos com uma estrutura geométrica irregular como as trabéculas ósseas, imaginamos ser impossível quantificar dados a respeito dessas estruturas, a não ser por meio de uma análise estatística. Essa informação visual intuitiva pode ser identificada matematicamente pela geometria fractal. Para se obter essas informações de forma quantificada precisamos recorrer a conceitos e equações matemáticas. A primeira delas é a idéia de uma medida geométrica, que pode ser de comprimento, área, volume, etc. No caso de uma imagem 2D de um osso, obtida por raios-X, ou microscopia, por exemplo, podemos avaliar a área examinada por meio da medida da sua extensão.

Mandelbrot (1991) propõe que para a definição de dimensão fractal generaliza-se a medida do tamanho. Uma função teste é utilizada para cobrir-se um conjunto e para formar uma medida com a utilização de um fator geométrico. A dimensão de Hausdorff-Besicovich (D_f) do conjunto é o valor crítico para o qual a medida muda de zero para infinito.

Modelagem Fractal da Estrutura Trabecular

A obtenção da dimensão fractal da estrutura trabecular foi feita utilizando-se inicialmente um procedimento conhecido como Box Counting.



Figura 1: Imagens pretas e brancas usadas no cálculo da dimensão fractal.

O cálculo da dimensão fractal pode ser feito utilizando-se uma simples varredura da imagem sobrepondo sobre esta, vários quadrados de tamanho fixo de modo a cobrir toda a imagem. Cada quadrado terá uma propriedade específica, função da sua posição no osso. Por exemplo, se um quadrado estiver sobre uma trabécula, terá certo valor, se estiver sobre um vazio, outro, e assim por diante para todos os quadrados sobrepostos a imagem.

A cada iteração reduz-se o tamanho desses quadrados, fazendo com que o resultado se torne mais próximo do exato. Decidiu-se reduzir esses quadrados desde um tamanho inicial onde 100 quadrados cobrem a figura toda até o menor quadrado possível para uma imagem computacional, o pixel.

A propriedade usada de cada pixel para identificar a sua característica na imagem, foi a cor. Uma seqüência de imagens preto e branco em 2D de uma vértebra foi montada, simulando uma perda óssea, onde branco indicava presença de material ósseo e preto indicava vazio. A primeira e a última imagem da seqüência são mostradas na figura 1.

Para cada figura da seqüência de imagens foi calculada uma dimensão fractal, função da quantidade de osso da vértebra da imagem.

Remodelação óssea

Os osteoclastos são recrutados para a superfície (processo chamado de ativação) e reabsorvem uma quantidade de mineral, criando uma cavidade - lacuna de Howship - no osso trabecular. Essa fase dura em torno de duas semanas e é seguida por um período de aparente inatividade no sítio da reabsorção. Durante essa fase, os osteoclastos desaparecem e são substituídos por macrófagos, cuja função não está inteiramente elucidada, mas que parece ser a de depositar uma substância que inicia a cimentação. Como esse processo ocorre entre a remoção do osso e sua subsequente substituição, ele é chamado de fase de reversão. Através do recebimento de um sinal, os osteoblastos - células que sintetizam a nova matriz - aderem-se à superfície da cavidade. Essas células sintetizam colágeno e outras proteínas não colagenosas, que são secretadas dentro da cavidade para formar o osteóide, uma matriz não mineralizada, que o será mais tarde, formando osso novo. Essa fase de formação pode levar vários meses para se estabelecer. Sob condições normais, a quantidade de osso novo sintetizado em cada sítio de remodelação é exatamente igual àquela que foi removida pelos osteoclastos.

O metabolismo ósseo é influenciado por vários fatores hormonais, locais, comportamentais e ambientais, além de forças mecânicas, elétricas, químicas e magnéticas. Esse mecanismo é relativamente rápido no osso trabecular e mais lento no osso cortical.

Remodelação óssea com Fractais

A idéia de integrar os processos e teorias sobre remodelação óssea com a teoria de fractais é obter um modelo teórico capaz de demonstrar além variação da densidade óssea, o crescimento das trabéculas, sua direção e tamanho, face a sua posição dentro do osso.

Utilizando-se medições fractais de imagens de ossos, em outras palavras, aplicado a teoria de fractais, para obtenção da dimensão fractal, que pode ser considerada uma descrição quantitativa do grau de irregularidade das superfícies complexas, sobre uma seqüência de imagens de tomografias em função do tempo, obtêm-se características de formação ou de reabsorção das trabéculas. Com isso pode-se definir uma linha guia para a obtenção das propriedades específicas de cada trabécula durante o processo de remodelação óssea.

Resultados parciais

Com a utilização dos passos necessários para a implementação do método Box Counting, é possível visualizar propriedades de cada imagem em pontos específicos, no caso os quadrados, e assim pode-se comparar propriedades desses pontos a cada iteração. A primeira propriedade analisada foi a densidade de osso em um quadrado, ou seja, a quantidade de osso dentro desse quadrado. Os resultados ainda são gerais, pois o modelo atual não diferencia entre osso cortical e trabecular. Uma solução que esta em vias de teste para

resolver esse problema, é a utilização de outra cor para o osso cortical, implementando assim um Box Counting com três cores, partindo-se para os multi-fractais.

O volume total ósseo efetivo é facilmente encontrado, somando-se todas as densidades dos diferentes quadrados analisados da imagem. Observou-se que esse volume total ósseo pode ser função da dimensão fractal da imagem, pois os gráficos da dimensão fractal das imagens e da densidade óssea têm comportamentos semelhantes.

A modelagem do crescimento e da perda óssea nas trabéculas ainda não está completamente funcional. No entanto, a idéia é tentar monitorar isso utilizando-se multi-fractais, porém, não como a imagem com 3 cores, mas sim com a irregularidade das trabéculas, ou seja, cada trabécula tem uma certa propriedade, no caso a densidade óssea, que poderá ser representada como um índice no fator crescimento ou perda óssea. Em outras palavras, cada trabécula se comportaria como um fractal independente dentro de um universo de fractais que juntos compõe a matriz trabecular óssea.

Comentários finais

A remodelação óssea é um processo extremamente complexo e difícil de ser entendido. Referenciar esse processo com medições geométricas capazes de visualizar e identificar as irregularidades das trabéculas ósseas pode ser uma forma de simplificar esse processo para facilitar as análises.

Referências bibliográficas

- FAVUS, M. J. Primer on Metabolic Bone Diseases and Disorders of Mineral Metabolism. 2nd edition. New York: Raven Press, 1993.
- MANDELBROT, B. B., The Fractal Geometry of Nature, Freeman, San Francisco – New York 1982.
- MANDELBROT, B. B. Objectos Fractais. Lisboa: Gradiva, 1991. 296 p.
- FOROUTAN-POUR K., DUTILLEUL P., SMITH D. L., Advances in the implementation of the box-counting method of fractal dimension estimation, Applied Mathematics and Computation, Volume 105, Number 2, 12 November 1999, pp. 195-210(16).
- TOSONI G. M., LURIE A. G., COWAN A. E., BURLESON J. A., Pixel intensity and fractal analyses: detecting osteoporosis in perimenopausal and postmenopausal women by using digital panoramic images, Endod 2006;102:235-41.
- MAJUMDERA S. R., MAZUMDAR S., Mechanical breakdown of trabecular bone: Dependence on microstructure, Physica A 377 (2007) 559-564.
- JETT S., SHROUT M. K., MAILHOT J. M., POTTER B. J., BORKE J. L., An evaluation of the origin of trabecular bone patterns using visual and digital image analysis, Endod 2004;98:598-604.
- MAJUMDAR, S., WEINSTEIN, R. S., PRASAD, R. R., Application of fractal geometry techniques to the study of trabecular bone, Medical Physics, Vol. 20, No. 6, Nov/Dec 1993.