

ABSTRACT

În lucrare sunt realizați algoritmi generali pentru simularea remodelării osoase, adaptivă și de mentenanță, independenți de mediul de programare. Pentru studiul remodelării adaptive, bazele matematice ale algoritmilor încadrează modelele Stanford, Nijmegen, Mecanostatul Frost, Manchester și Principiul acomodării celulare într-o ecuație generalizatoare, formulată în cadrul acestei lucrări. Într-o simulare dată, ecuația atașază modelelor Stanford, Nijmegen sau Mecanostat, sub controlul unor opțiuni inițiale, efectele termenului cuadric, formulat în modelul Manchester și funcția acomodării celulare. Cele două efecte, pot fi activate simultan, pe rând, sau pot fi dezactivate, astfel încât simularea să se deruleze pe baza unuia dintre cele trei modele în formă standard. Pentru studiul remodelării de mentenanță este utilizat modelul matematic realizat la Universitatea din Zaragoza, conform căruia evoluția modulului de elasticitate longitudinal se bazează pe trei variabile independente: fracția volumică osoasă, coeficientul de cenușă și deteriorarea.

Este studiată influența metodei numerice de integrare a ecuației diferențiale a remodelării adaptive asupra distribuției densității aparente, utilizând modelul Nijmegen. Pentru comparație sunt aplicate cinci metode numerice, respectiv metodele Euler, Heun, Runge Kutta de ordin patru, Adams Bashford de ordin doi și Adams Bashford de ordin doi corectată cu Adams-Moulton.

Algoritmii propuși sunt implementați în mediile de simulare MATLAB și ANSYS, primul pentru procedurile de remodelare, iar al doilea pentru efectuarea simulării cu elemente finite. Generalitatea programului este controlată prin parametrizarea modelelor și variabilelor implicate. Sunt efectuate simulări ale remodelării osoase, cu programul rezultat, pe patru structuri: două geometrii simple, una plană și una spațială, devenite referințe în literatură pentru studiile de optimizare topologică, femurul proximal plan și femurul proximal tridimensional, reconstruit din imagini de tomografie computerizată. Pentru acesta din urmă, este realizată o rutină în vederea validării cantitative a distribuției densității aparente obținute prin simularea remodelării, cu densitatea obținută pe baza nuanțelor de gri generate de computerul tomograf. Este propusă o metodologie de efectuare a studiilor de remodelare osoasă cu scopul proiectării, analizei mecanice și optimizării implanturilor protetice, prin integrarea programului realizat într-un ansamblu de sisteme și aplicații software profesionale.

Within the thesis there are presented original algorithms for simulating the bone remodeling process, according to theories of adaptive and maintainance remodeling. The algorithms do not depend upon the simulation environment, being expresed in a general formulation. The mathematical basis of adaptive remodeling lies on a general equation, proposed in this work, that brings toghether the Stanford, Nijmegen, Frost's Mechanostat, Manchester and Principle of cellular accommodation models. Within a given simulation, the equation combines one of the Stanford, Nijmegen or Mechanostat models with the effects of the quadric term and the accommodation function. The two effects may be activated simultaneously, independently of each other or not activated at all if the simulation concerns only the behavior of the model under the standard mathematical form of the three theories mentioned above. In the case of maintenance remodeling, it is used the mathematical model developed within the Zaragoza University. According to this model, the Young modulus evolves as a function of three variables: the bone volume fraction, the ash fraction and damage.

It is also accomplished a comparison between five numerical methods used for integration of the density evolution equation, namely Euler, Heun, forth order Runge Kutta, second order Adams Bashford uncorrected and corrected using Adams-Moulton.

The algorithms are particularized and implemented in MATLAB and ANSYS simulation environments, the first one for the remodeling procedures and the last one for the finite element evaluations. The generality is controled by models parametrization. Next, simulations are performed using four different structures: two simple geometries, one bi-dimensional and one three-dimensional, which are comonly used in topology optimization, and the proximal femur in two and three dimensions, respectively. For the latter, virtually reconstructed from computer tomography images, there is accomplished a rutine for validation of density distributions achieved by simulations, with the ones determined according to gray scale of bone tissue. For performing personalized studies under the purpose of prosthetic design, mechanical analysis and optimization, using three dimensional bone components, it is proposed a methodology based on integration of the algorithms into a set of professional systems.