

# REZUMAT

al tezei de doctorat

## „Contribuții la utilizarea dispozitivelor haptice în aplicațiile biomedicale”

elaborată de ing. **Raluca Elena SOFRONIA**

Teza de doctorat abordează domeniul modern al realizării de echipamente mecatronice pentru utilizare în medicină și biologie, bazate pe tehnici de realitate virtuală. Echipamentele din această categorie sunt necesare pentru creșterea eficienței instruirii personalului medical, în special a medicilor chirurghi, pentru care resursele de material didactic real sunt extrem de limitate, dar care au nevoie de exersarea procedurilor de un număr foarte mare de ori, în condiții diverse.

Prin prezenta cercetare se dorește crearea unor metode originale în vederea conceperii și realizării unui simulator medical utilizat în chirurgia ortognatică. Acest tip de simulator a fost ales deoarece constituie tema unui proiect de cercetare în lucru la Centrul de Calcul al Universității RWTH Aachen, unde autoarea tezei a efectuat două stagii de cercetare de șase, respective două luni. Obiectivul central al tezei este dezvoltarea unui simulator medical pentru etapa de debitare din cadrul osteotomiei sagitale bilaterale. În acest context, teza de doctorat are drept obiective secundare: determinarea cerințelor impuse simulatorului, modelarea matematică a îndepărtării de material prin debitare cu ferăstrăul și dezvoltarea elementelor de realitate virtuală ale simulatorului prin conceperea de algoritmi și implementarea acestora.

Teza de doctorat este structurată pe opt capitole, din care primul de introducere și ultimul de concluzii finale. Lucrarea se extinde pe 178 de pagini, din care 31 de pagini sunt alocate celor zece anexe, conținând 85 de figuri și 15 tabele, cu o listă de referințe bibliografice ce conține 159 de titluri.

Capitolul 1, „Introducere”, prezintă motivația abordării tematicii alese și structura tezei de doctorat. Creșterea performanțelor adaptoarelor video și necesitatea creșterii realismului interfețelor om-calculator a dus la utilizarea reacției de forță, generată de dispozitive haptice, în cadrul realității virtuale. În domeniul biomedical dispozitivele haptice

se întâlnesc în cadrul simulatoarelor medicale, ce sunt folosite la instruirea personalului medical. Principalul avantaj al simulatoarelor este faptul că permit practica repetitivă, în condiții diverse, fără a periclita viața participanților, fapt pentru care simulatoarele au ajuns să înlocuiască parțial tehnicile tradiționale de învățare în unele specializări, precum chirurgia minim invazivă. Totuși, simularea bazată pe principii fizice și integrarea feedback-ului vizual cu cel haptic în condițiile unei interacțiuni în timp real, cu precădere în domeniul chirurgiei clasice, reprezintă la ora actuală încă o provocare.

Capitolul 2, „Stadiul actual al utilizării dispozitivelor haptice în aplicațiile biomedicale”, prezintă suportul teoretic necesar rezolvării unor probleme de actualitate din domeniul tezei. După prezentarea pe scurt a dispozitivelor haptice, echipamente ale realității virtuale, sunt prezentate aspecte teoretice privind interacțiunea haptică, necesare rezolvării obiectivelor tezei. Capitolul se continuă cu o analiză critică a aplicațiilor dispozitivelor haptice din domeniul biomedical, cu evidențierea principalelor limitări și cerințe de viitor. Sunt tratate atât simulatoarele pentru proceduri efectuate asupra țesutului moale, cât mai ales cele pentru țesutul tare, ce face obiectul tezei.

Următorul subcapitol prezintă unul dintre posibilele domenii de interes pentru dezvoltarea simulatoarelor medicale, și anume chirurgia ortognatică. Este analizată în detaliu una din cele mai utilizate proceduri din domeniu, osteotomia sagitală bilaterală, pentru care s-a propus realizarea unei aplicații de realitate virtuală pentru instruirea medicilor chirurghi în vederea înlocuirii metodelor tradiționale de învățare pe cadavre sau pacienți. Analizând mandibula, obiectul procedurii, se remarcă faptul că datele din literatura de specialitate privind proprietățile mecanice ale acesteia sunt relativ puține, și acelea cu o dispersie relativ mare a valorilor.

În vederea determinării elementelor esențiale ce trebuie simulate, sunt prezentate în următorul subcapitol o serie de metode de cercetare folosite în proiectarea simulatoarelor medicale. În al șaselea subcapitol sunt analizate principalele instrumente software pentru dezvoltarea aplicațiilor de realitate virtuală din domeniu, instrumente folosite pentru eliminarea reimplementării unor lucruri deja rezolvate. Ultimul subcapitol conține concluziile capitolului, în principal deciziile privind metode și instrumente care să fie utilizate în cercetările din cadrul tezei.

Capitolul 3, „Obiectivele tezei de doctorat”, prezintă în detaliu obiectivele tezei și activitățile prevăzute pentru îndeplinirea acestora. Astfel, în conformitate cu obiectivele formulate, în următoarele capitole sunt prezentate contribuțiile personale ce au dus la îndeplinirea acestor obiective.

Capitolul 4, „Elemente dezvoltate pentru deformarea virtuală a țesuturilor”, prezintă conceperea și realizarea unui simulator haptic pentru operații de deformare, ceva mai simple decât cele de îndepărtare de material. Datorită aspectelor teoretice prezentate în capitolul anterior s-a optat pentru utilizarea modelării prin elemente de suprafață. Rezultate obținute au dezvoltat necesitatea utilizării modelării prin elemente de volum în cadrul simulării îndepărtării de țesut tare, heterogen.

Cercetarea a avut ca scop evidențierea graduală a problemelor ce apar la simulările cu reacție haptică. Pornind de la soluții existente în bibliotecile software specifice, pentru adaptarea la cerințele obiectivelor tezei, au fost aduse modificări esențiale funcțiilor existente și introduse noi funcții: pentru integrarea modelelor obținute prin imagistica medicală și pentru a da un caracter general deformărilor posibile, care să urmeze orice direcție indică operatorul prin dispozitivul haptic.

Capitolul se încheie cu prezentarea concluziilor, în care se evidențiază faptul că modelarea prin elemente de suprafață nu este adecvată reprezentării materialelor stratificate sau anizotrope. Un alt dezavantaj îl constituie faptul că, deși acest mod de modelare este adecvat vizualizării, nu este potrivit modificării formei obiectelor, deoarece produce rezultate nerealiste. Dezavantajele evidențiate au condus la căutarea unor soluții bazate pe alte tipuri de reprezentare a obiectelor, de exemplu prin elemente de volum, cu rezultate prezentate în capitolele următoare.

În urma stagiilor de cercetare în străinătate, cercetarea științifică a fost focusată către chirurgia ortognatică, următoarele capitole prezentând contribuțiile aduse în vederea dezvoltării unui simulator pentru osteotomia sagitală bilaterală.

Capitolul 5, „Elemente pentru proiectarea simulatorului haptic pentru osteotomia sagitală bilaterală. Analiza modurilor de defectare și a efectelor lor”, prezintă analiza procedurii medicale în vederea determinării principalelor cerințe ale simulatorului. Analiza a fost realizată în cadrul unui grup mixt, alcătuit din trei medici experți, doi experți în realitate virtuală și un specialist în asigurarea calității, domeniu în care se în cadrează metoda utilizată, analiza modurilor de defectare și a efectelor lor. Metoda constă în descompunerea ierarhică a procedurii în etape și sub-etape, care mai apoi sunt analizate în vederea determinării erorilor ce pot apărea în timpul procedurii, precum și a cauzelor ce duc la apariția acestora. Pentru fiecare cauză a fost determinat un coeficient de risc, ce ține cont de probabilitatea de apariție, de gravitate și de gradul de nedetectare a efectelor. Analiza indică ca fiind etape critice etapa de debitarea a liniei de osteotomie și fracturarea mandibulei. În baza analizei efectuate au fost

stabilite o serie de cerințe suplimentare pentru simulator, care să permită semnalizarea complicațiilor, precum lezarea nervului alveolar sau îndepărtarea de planul intervenției.

Capitolul 6, „Modelarea matematică a îndepărtării de material prin debitare cu ferăstrăul pentru aplicații de realitate virtuală utilizând dispozitive haptice”, prezintă modalitatea de modelare a îndepărtării de material osos în funcție de forța de debitare în cadrul osteotomiei sagitale bilaterale în scopul utilizării în sisteme haptice de realitate virtuală.

Pornind de la procesul tehnologic de așchiere a fost analizată forța de debitare cu un ferăstrău electric cu mișcare rectilinie alternativă specific chirurgiei ortognatice pentru a determina care sunt parametrii de care depinde aceasta. Este stabilită o primă relație analitică între forța normală și rata de îndepărtare a materialului. Pentru confirmarea relației și stabilirea valorilor parametrilor ce intervin, au fost realizate o serie de încercări experimentale. Încercările au fost realizate pe un stand experimental proiectat de către autoarea lucrării și realizat în cadrul laboratorului de biomecanică al Universității de Științe Aplicate Aachen. Standul este prevăzut cu senzori de forță și de deplasare și este cuplat la un sistem de achiziție de date de pe un sistem de calcul. Pentru experimente, pe stand a fost montat un ferăstrău de tipul celor folosite în astfel de intervenții de către medicii de la departamentul de chirurgie maxilo-facială al Spitalului Universitar RWTH Aachen. Protocolul experimentelor este descris în subcapitolul următor.

Subcapitolul cinci prezintă prelucrarea datelor experimentale, rezultatele obținute și modelarea procesului. În urma prelucrării imaginilor cu secțiunile debitate s-au obținut lungimile de contact sculă-mandibulă, pe cele două tipuri de țesut osos: compact, respectiv spongios. Datele obținute de la senzori au fost prelucrate statistic pentru eliminarea zgomotului, reducerea setului de date la zona de prelucrare efectivă și sincronizarea acestora cu cele obținute din prelucrarea imaginilor. De asemenea, au fost calculate vitezele de pătrundere, au fost estimate lungimile de așchiere pe fiecare tip de os și s-a realizat exportarea datelor în vederea prelucrărilor ulterioare. Prelucrarea datelor a fost realizată cu ajutorul unei aplicații software creată de autoarea tezei. Ținând cont de proprietățile anizotrope ale mandibulei au fost determinate modele analitice (de tip polinomial de gradul doi) pentru îndepărtarea de os compact pentru fiecare din cele trei segmente ale liniei de osteotomie (orizontal, vertical și sagital) și pentru osul spongios. Se observă diferențe între rata de îndepărtare de material pentru cele trei zone ale intervenției, fapt confirmat și de literatura de specialitate, precum și faptul că osul spongios asigură o rata de îndepărtare mult mai mare decât cel cortical.

Capitolul 7, „Algoritmi dezvoltați pentru elementele de realitate virtuală ale simulatorului haptic pentru osteotomia sagitală bilaterală”, prezintă simulatorul haptic pentru instruirea medicilor chirurghi asupra debitării cu ferăstrăul a liniei de osteotomie din cadrul osteotomiei sagitale bilaterale, punându-se accent pe contribuțiile personale. Capitolul începe cu evidențierea cerințelor ce se impun algoritmilor ce urmează a fi concepuți. În cel de-al doilea subcapitol este prezentată structura simulatorului, atât din punct de vedere hardware cât și software. Structura hardware conține: un sistem de calcul pe care rulează aplicația, un dispozitiv haptic pentru interacțiunea om-calculator și un ecran pentru afișarea scenei virtuale. Structura software corespunde celei hardware, fiind alcătuită din trei module: simulare, interacțiune haptică și vizualizare.

Următorul subcapitol prezintă metodele și algoritmi dezvoltați pentru modelarea țesuturilor tari. Un prim algoritm a fost creat pentru conversia imaginilor din fișiere cu extensia .png în fișiere cu extensia .nrrd, utilizate în simulator. Pentru a putea personaliza modelul mandibulei s-a impus preluarea modelului 3D din imagistica medicală și conversia imaginii segmentate obținute în standardele acceptate de simulator. Pentru realizarea acestui scop, a fost concepută și implementată o aplicație.

În subcapitolul al patrulea sunt descriși algoritmi dezvoltați pentru detectarea coliziunii. Detectarea se face parcurgând elementele de volum ce compun mandibula și verificând poziția lor față de ferăstrău, elementele ce se găsesc în interiorul ferăstrăului fiind marcate pentru îndepărtare. Detectarea coliziunii a ridicat o serie de probleme datorită particularităților lamei (lungime mult mai mare față de lățime și înălțime). Însă problemele și-au găsit soluționarea într-un algoritm original care permite obținerea unei interacțiuni haptice la frecvența recomandată, de 1 kHz. Algoritmul reduce considerabil numărul de treceri dintre sistemele de coordonate ale mediului virtual prin segmentarea volumului lamei și prin parcurgerea prin incrementare a celor trei axe ale sistemului de coordonate al ferăstrăului.

În al cincilea subcapitol este prezentată conceperea și implementarea algoritmilor pentru calculul reacției haptice. Simularea debitării cu ferăstrăul implică șase grade de libertate pentru reacția haptică. Datorită dispozitivelor haptice avute la dispoziție, reacția haptică s-a limitat la transmiterea unei forțe. Algoritmul dezvoltat în primă fază pentru calcularea forței pe baza volumului intersectat s-a dovedit a avea unele limitări din cauza coeficientului de proporționalitate al forței. Un coeficient mic în cazul unui volum intersectat de valoare mică conduce la pătrunderea prin mandibulă fără a îndepărta material; pe când un coeficient mare în cazul unor volume intersectate de valoare mare conduce la discontinuități ale forței. Cel de-al doilea algoritm dezvoltat, bazat pe proporționalitatea forței cu adâncimea

de pătrundere a ferăstrăului în material, a soluționat problemele anterioare, obținându-se totodată forțe de reacție mai mari.

Următorul subcapitol are ca obiect conceperea și implementarea algoritmilor pentru îndepărtarea materialului. În prima fază sunt determinate elementele de volum ce participă la coliziune, iar în a doua fază se realizează eliminarea acestora. Elementele detectate sunt eliminate succesiv, pornind de la suprafața mandibulei, ceea ce asigură o variație suficient de netedă a forței de reacție haptice, fără apariția unor discontinuități.

Pentru etapa de vizualizare a celor două modele, mandibula și fierăstrăul, au fost testate cele două tehnici utilizate frecvent pentru obiectele tridimensionale, ray-casting și marching cubes. Cea de-a doua s-a dovedit mai eficientă, asigurând o calitate mai bună a scenei, la o frecvență de vizualizare recomandată de 30 Hz.

Mediul virtual al simulatorului este prezentat în subcapitolul al optulea și este creat pe baza standardului X3D, standard specific dezvoltării de aplicații de realitate virtuală. Mediul virtual conține atât noduri și câmpuri deja create în cadrul altor biblioteci dar și unele create de către autor. Pe lângă interacțiunea propriu-zisă, simulatorul conține și elemente care vin în ajutorul îmbunătățirii procesului de învățare. Spre exemplu, novicele este atenționat vizual de lezarea nervului alveolar inferior și de abaterea de la planul de debitare prin modificarea culorii unor elemente de control.

În penultimul subcapitol este prezentat schematic algoritmul întregii proceduri, fiind evidențiați toți algoritmi utilizați cu datele de intrare și ieșire corespunzătoare, și circuitele de informații. Capitolul se încheie cu o sinteză a acestuia.

Capitolul 8, „Concluzii, contribuții originale și direcții viitoare de cercetare”, conține o sinteză a concluziilor și contribuțiilor originale desprinse din prezenta lucrare. Se observă că obiectivele tezei au fost îndeplinite cu succes.

Se remarcă în mod deosebit următoarele contribuții teoretice:

- O serie de analize critice cu privire la metodele de modelare a obiectelor virtuale, a metodelor de detectare a coliziunii în cadrul interacțiunii haptice, a principalelor limitări și cerințe de viitor ale simulatoarelor medicale, a metodelor de cercetare în proiectarea simulatoarelor medicale și a instrumentelor software utilizate la ora actuală pentru interacțiunea haptică și pentru prelucrarea imaginilor medicale;
- Determinarea cerințelor esențiale ce se impun simulatorului pentru trainingul osteotomiei sagitale bilaterale;

- Modelarea matematică a procesului de debitare cu fierăstrău electric cu mișcare rectilinie alternativă;
- Dezvoltarea unei metode originale pentru transferarea datelor de la aplicația de segmentare la simulator, detectarea coliziunii cu obiecte ce au o dimensiune mult mai mare față de celelalte două, calculul forței de reacție haptică și simularea îndepărtării de material în cadrul interacțiunii ferăstrău-mandibulă.

Din cadrul contribuțiilor aplicative se remarcă:

- Implementarea analizei modurilor de defectare și a efectelor lor în cadrul etapei de proiectare a unui simulator medical;
- Proiectarea și construcția unui stand experimental în vederea determinării cantitative a parametrilor procesului de debitare;
- Realizarea unei aplicații software pentru prelucrarea datelor experimentale;
- Dezvoltarea unui simulator de realitate virtuală pentru trainingul debitării liniei osteotomiei din cadrul osteotomiei sagitale bilaterale;
- Implementarea metodelor originale pentru transferarea datelor de la aplicația de segmentare la simulator, detectarea coliziunii cu obiecte ce au o dimensiune mult mai mare față de celelalte două, calculul forței de reacție haptică și simularea îndepărtării de material în cadrul interacțiunii ferăstrău-mandibulă;
- Modelarea mandibulei prin segmentarea unei tomografii computerizate;
- Implementarea în simulator a doi algoritmi pentru vizualizarea datelor științifice volumetrice;
- Dezvoltarea mediului virtual al simulatorului;
- Integrarea unor aspecte educaționale în cadrul simulatorului.

Pentru viitor, se prevede realizarea de cercetări privind integrarea în simulator a dispozitivelor haptice cu șase grade de libertate, integrarea simulatorului în procesul educațional, perfecționarea modelelor matematice prin integrarea unor parametri suplimentari și creșterea valorii forței de reacție.

Teza cuprinde și zece anexe, cu informații detaliate referitoare la etapele osteotomiei sagitale bilaterale, anatomia mandibulei, codul sursă al programului pentru prelucrarea datelor experimentale, comenzile bibliotecii de funcții pentru conversia datelor, coduri sursă ale implementărilor algoritmilor pentru detectarea coliziunii, reacția haptică, îndepărtarea de material, detectarea situațiilor de risc, precum și codul sursă al modelului scenei virtuale.

Teza se încheie cu o listă de 159 referințe bibliografice. Titlurile sunt de actualitate și relevante pentru tema tezei.

Rezultatele cercetărilor din cadrul tezei au fost prezentate și publicate în șapte lucrări la conferințe internaționale sau reviste de specialitate.