

Zaangażowanie Autorów

A – Przygotowanie projektu badawczego
B – Zbieranie danych
C – Analiza statystyczna
D – Interpretacja danych
E – Przygotowanie manuskryptu
F – Opracowanie piśmiennictwa
G – Pozyskanie funduszy

Author's Contribution

A – Study Design
B – Data Collection
C – Statistical Analysis
D – Data Interpretation
E – Manuscript Preparation
F – Literature Search
G – Funds Collection

**Szczepan Piszczatowski^{1(A,D,E,F,G)}, Marek Okoński^{2(A,B,D,F)},
Konstanty Skalski^{3(A,D,G)}**

¹ Wydział Mechaniczny, Katedra Materiałoznawstwa, Politechnika Białostocka

² Katedra i Klinika Ortopedii i Rehabilitacji Dziecięcej Akademii Medycznej im. prof. F. Skubiszewskiego, Lublin

³ Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Mechaniki i Konstrukcji, Politechnika Warszawska

Komputerowe modelowanie porażennego stawu biodrowego na podstawie danych tomograficznych – doniesienie wstępne

Computer-aided modeling of palsied hip joints based on data from CT scans – preliminary report

Słowa kluczowe: symulacja komputerowa, stawy, porażenie mózgowie, tomografia komputerowa

Key words: computer simulation, joints, cerebral palsy, computed tomography

STRESZCZENIE

Wstęp. Przedmiotem pracy jest opracowanie metodyki budowy zindywidualizowanych, trójwymiarowych modeli numerycznych dziecięcego stawu biodrowego, zarówno prawidłowego, jak i zdeformowanego w przebiegu mózgowego porażenia dziecięcego.

Materiał i metody. Punktem wyjścia do modelowania jest wykorzystanie danych z tomografii rentgenowskiej. Stosując specjalistyczne oprogramowanie można na ich podstawie opracować trójwymiarowe modele poszczególnych obiektów (np. miednica, kość udowa).

Wyniki. Analizie poddano dwa przypadki pacjentów leczonych w Klinice Ortopedii i Rehabilitacji Dziecięcej Akademii Medycznej w Lublinie. Opracowano trójwymiarowe modele numeryczne zarówno stawów zdrowych, jak też zdeformowanych w przebiegu mózgowego porażenia dziecięcego. Wykonano również modele zgodne z metodą elementów skończonych uwzględniające niejednorodność materiałową tkanki kostnej.

Wnioski. Dotychczasowe rezultaty w pełni potwierdzają możliwość budowy trójwymiarowych, komputerowych modeli dziecięcego stawu biodrowego na podstawie wyników badania tomograficznego. Ich wykorzystanie umożliwi lepsze zrozumienie procesu deformacji stawu i ułatwi planowanie leczenia.

SUMMARY

Background. The goal of our study was to develop a three-dimensional numerical modeling method for the juvenile hip joint. Both anatomically correct joints and those deformed by cerebral palsy were taken into consideration.

Materials and methods. The modeling process was carried out on radiological data obtained from CT scans. Specialized software was used to develop three-dimensional models of particular objects (e. g. pelvis, femur) in the hip joint.

Results. CTs from two patients treated in the Pediatric Orthopedics and Rehabilitation Clinic at the Medical University of Lublin were used to provide data for three-dimensional geometrical models of their hip joints. Finite-element models were also prepared, taking into account the heterogeneous nature of bone tissue.

Conclusions. The results of our research clearly show that three-dimensional computer modeling of the juvenile hip joint can be performed based on CT data. The use of these methods will enable us to gain a better understanding of the deformation process in the immature hip joint and facilitate the planning of treatment.

Liczba słów/Word count: 2477

Tabele/Tables: 0

Ryciny/Figures: 5

Piśmiennictwo/References: 6

Adres do korespondencji / Address for correspondence

dr inż. Szczepan Piszczatowski

Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka

15-351 Białystok, ul. Wiejska 45c, tel./fax: (0-85) 746-92-54, e-mail: spisz@pb.bialystok.pl

Otrzymano / Received

17.04.2006 r.

Zaakceptowano / Accepted

29.11.2006 r.

WSTĘP

Jednym z najpoważniejszych powikłań występujących u dzieci dotkniętych mózgowym porażeniem dziecięcym (mpdz) jest patologiczna deformacja stawu biodrowego. Na skutek postępującego zniekształcenia zarówno główki, jak i panewki stawowej ulega on decentracji, a następnie podwichnięciu i ostatecznie zwichnięciu (porażenne zwichnięcie stawu biodrowego). U podstaw tej patologii leży prawdopodobnie brak równowagi sił mięśniowych działających na staw, będący wynikiem spastycznego napięcia niektórych mięśni (w szczególności przywodzicieli i zginaczy oraz mięśni grupy kulszowo-goleniowej). Istnieją przesłanki by sądzić, że właśnie czynnik mechaniczny ma dominujący wpływ na pojawienie się i rozwój deformacji elementów kostnych tworzących staw biodrowy [1]. W lepszym zrozumieniu tego procesu pomocne mogą być badania modelowe wykorzystujące nowoczesne metody symulacji komputerowej. Pozwalają one odtworzyć geometrię badanych obiektów i poddać ją wnikliwej analizie, a następnie wyznaczyć stan deformacji oraz naprężenia wynikające z działania określonych obciążeń. Tego typu analiza może być bardzo przydatna w procesie diagnozowania i planowania leczenia poszczególnych pacjentów [2,3].

Podjęcie symulacji numerycznej wymaga wcześniejszego przygotowania odpowiednich modeli opisujących geometrię, własności materiałowe oraz obciążenia działające na badany obiekt. W literaturze światowej znaleźć można dwa podejścia do problemu modelowania elementów anatomicznych. Pierwsze bazuje na wykorzystaniu danych pozyskiwanych post mortem, w drugim – źródłem większości niezbędnych informacji są badania tomograficzne. Pierwsze podejście jest najczęściej stosowane przy opracowywaniu modeli odnoszących się do pewnej uśrednionej populacji, w drugim – można mówić o budowie modeli w pełni zindywidualizowanych, wiernie odtwarzających (w granicach dokładności stosowanej metody) warunki panujące w organizmie konkretnej osoby [4]. W przypadku, gdy badane zjawisko wykazuje wyraźne zróżnicowanie u poszczególnych pacjentów lub gdy celem badań jest poszukiwanie indywidualnych rozwiązań, np. projektowanie implantów custom design [5], planowanie zabiegów operacyjnych itp., możliwe jest wyłącznie drugie podejście, to jest budowa modeli na podstawie danych tomograficznych. Taka właśnie sytuacja ma miejsce w przypadku stawu biodrowego zdeformowanego w wyniku mpdz. Występuje tutaj indywidualne zróżnicowanie stopnia zniekształcenia elementów kostnych, a symulacja planowanych działań lecz-

niczych również musi odnosić się do konkretnej sytuacji klinicznej. Stąd decyzja autorów o celowości budowy indywidualnych modeli stawu biodrowego dla dzieci z porażeniem mózgowym.

Prezentowane badania, prowadzone we współpracy inżynierów biomechaników i lekarzy ortopedów, mają na celu opracowanie metodyki budowy zindywidualizowanych, trójwymiarowych modeli numerycznych dziecięcego stawu biodrowego. W zamierzeniach autorów będą one mogły być wykorzystane zarówno w badaniu samych procesów deformacji stawów u dzieci z mpdz, jak i przy planowaniu leczenia konkretnych pacjentów.

MATERIAŁ I METODY

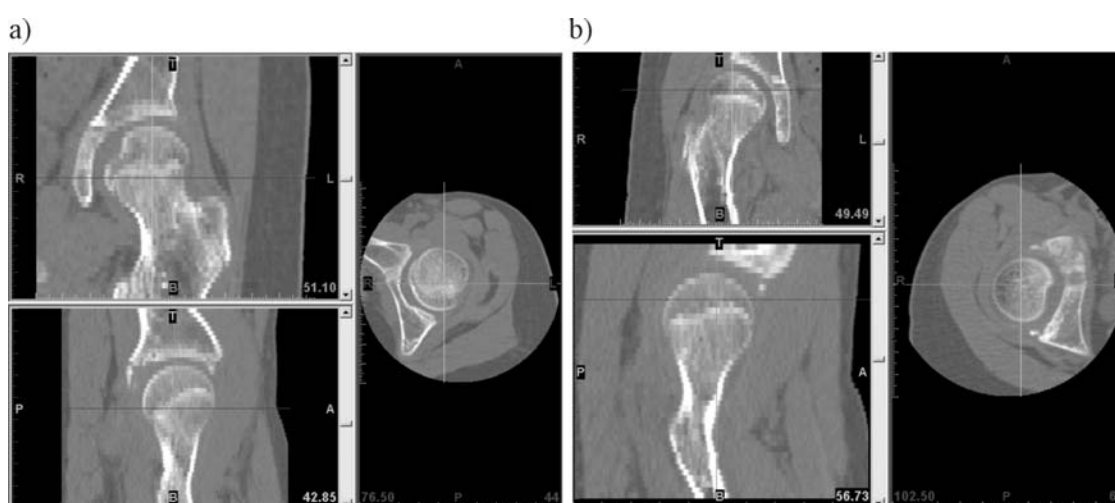
Prezentowane w pracy badania przeprowadzono przy wykorzystaniu danych dwóch pacjentek, leczonych w Klinice Ortopedii i Rehabilitacji Dziecięcej Akademii Medycznej w Lublinie. Dane te uzyskano w wyniku rentgenowskiej tomografii komputerowej wykonanej przy zastosowaniu aparatu Shimadzu SCT-7800TX (zapis w formacie DICOM).

W pierwszym przypadku (pacjentka P. K.) wykorzystano wyniki archiwalne, uzyskane podczas badania wykonanego standardowo w procesie diagnostyki stawu biodrowego (Ryc. 1). Modelowano w związku z tym oddzielnie lewy i prawy staw biodrowy, gdyż w takim rozbiciu dostępne były wyniki badania tomograficznego. Staw biodrowy lewy nie wykazywał żadnych wyraźnych cech deformacji, podczas gdy po stronie prawej można było zaobserwować przemieszczenie głowy kości udowej w kierunku bocznym i do góry oraz silną deformację zarówno głowy, jak i panewki stawowej. W przypadku pacjentki A. M. badanie wykonano z dopuszczeniem swobodnej pozycji ciała (Ryc. 2). Celem tej modyfikacji było uzyskanie w obrazie TK naturalnego dla danej pacjentki ustawienia elementów kostnych i mięśni. Będzie to szczególnie istotne w planowanych dalszych pracach zmierzających do określenia kierunków działania sił mięśniowych u pacjentów z porażeniami spastycznymi. Podobnie jak w poprzednim przypadku, jeden staw (prawy) nie wykazywał poważniejszych odchyżeń od normy, podczas gdy drugi był dość znacznie zdeformowany.

Metodyka budowy indywidualnych, trójwymiarowych modeli numerycznych obiektów anatomicznych musi godzić specyfikę danych uzyskiwanych w badaniu tomograficznym i wymagania stawiane przez narzędzia (oprogramowanie) użyte do modelowania. Problemem jest bowiem brak kompatybilności obu tych elementów.

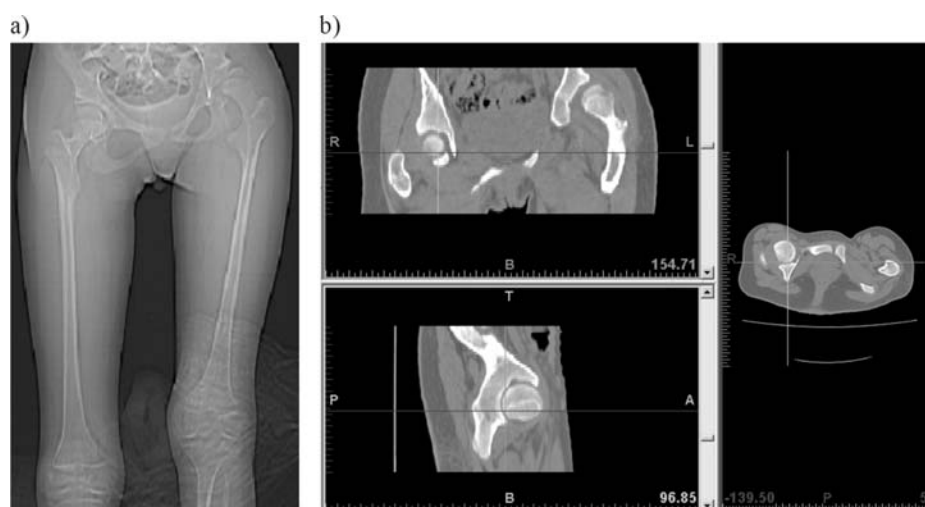
W wyniku tomografii rentgenowskiej uzyskuje się zbiór współczynników Hounsfielda, wyrażających intensywność pochłaniania promieniowania rentgenowskiego przez badany obiekt, wyznaczony dla określonej liczby punktów leżących na kolejnych warstwach, w których wykonano skanowanie. W celu prezentacji graficznej wyników badania poszczególnym wartościom współczynnika przypisuje się określony odcień szarości. Na tej podstawie można dokonać wizualizacji (również trójwymiarowej) badanego obszaru. Tego typu dane nie mogą być jednak wykorzystane bezpośrednio do komputerowego modelowania elementów anatomicznych. Konieczne jest bowiem utworzenie wektorowej reprezentacji

obiektów, zamiast dostępnych w tomografii bitmap. Jest to proces dość złożony i z uwagi na charakter opracowania zostanie tu omówiony bez zbędnych szczegółów. Szerszy opis problemu znaleźć można w literaturze [5]. Pierwszym z koniecznych działań jest wyznaczenie na każdej z warstw granic (konturów) oddzielających od siebie obszary wypełnione różnymi materiałami, np. tkanką kostną, mięśniową itp. Z uwagi na złożoną budowę wewnętrzną elementów anatomicznych zadanie to jest zazwyczaj bardzo trudne. Na tak otrzymanych dwuwymiarowych zarysach należy następnie rozciąć powierzchnie stanowiące trójwymiarowe granice poszczególnych obiektów anatomicznych. Daje to podstawę do kolejnego etapu – bu-



Ryc. 1. Stawy biodrowe pacjentki P. K. widziane w trzech projekcjach – opracowane na podstawie danych TK w systemie MIMICS 8.1: a) biodro lewe (prawidłowe), b) biodro prawe zdeformowane w przebiegu mpdz.

Fig. 1. Hip joints of patient PK presented in three projections – prepared on the basis of CT data using a MIMICS 8.1 system. a) left hip (normal), b) right hip (deformed by cerebral palsy)



Ryc. 2. Stawy biodrowe pacjentki M. A.: a) zdjęcie RTG – widok w płaszczyźnie czołowej, b) widok w trzech projekcjach – opracowanie na podstawie danych TK w systemie MIMICS 8.1 (pacjent w pozycji swobodnej)

Fig. 2. Hip joints of patient MA, X-ray images. a) view in coronal plane, b) view in three projections – performed on the base of CT-date using the MIMICS 8.1 system (free standing posture)

dowy trójwymiarowych modeli bryłowych. Są one wystarczające do prowadzenia symulacji zabiegów operacyjnych, projektowaniu implantów custom-design, itp. Analiza wytrzymałościowa wymaga natomiast dalszego przekształcenia opracowanych modeli bryłowych w modele dyskretne zgodne z metodą elementów skończonych (MES). W praktyce sprowadza się do podziału bryły na zbiór odpowiednio ze sobą połączonych elementów (bryły lub figury o prostych kształtach i odpowiedniej topografii).

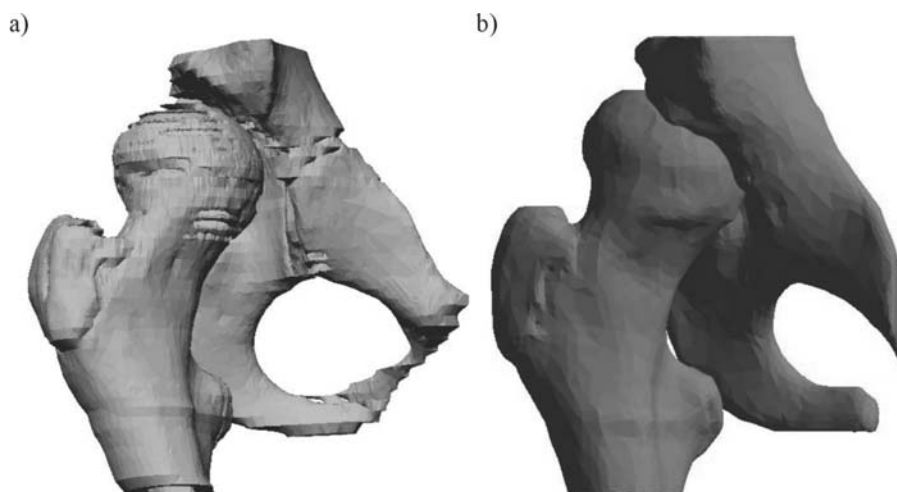
Praktyczna realizacja powyższych prac była prowadzona przy wykorzystaniu szeregu systemów komputerowego wspomaganie prac inżynierskich. Bardzo efektywnym narzędziem okazał się system MIMICS 8.1 opracowany przez firmę Materialise. Umożliwia on przetworzenie danych tomograficznych, ich wizualizację, separację poszczególnych rodzajów materiału i generowanie na poszczególnych warstwach krzywych ograniczających obszar ich występowania. Do modelowania powierzchniowego i bryłowego wykorzystywano systemy Rhinoceros i SolidWorks. Modelowanie MES prowadzono w systemie ANSYS.

WYNIKI

Podstawowym rezultatem prezentowanych badań było opracowanie trójwymiarowych bryłowych modeli stawów biodrowych, zarówno tych zdrowych, jak i zdeformowanych w przebiegu mpdz. W toku badań stosowano dwa podejścia do modelowania, w których odpowiednio:

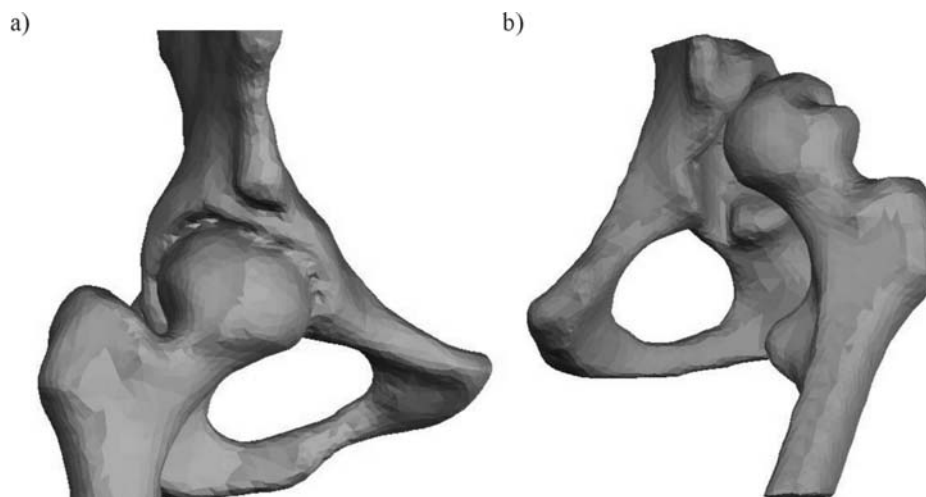
- rozdzielono badany staw na części składowe, uwzględniając m.in. obecność chrząstek wzrostowych, podział kości miednicznej na kość biodrową, kulszową i łonową oraz obecność kości korowej i gąbczastej,
- modelowany staw początkowo traktowano jako obiekt złożony jedynie z kości udowej i fragmentu miednicy, a niejednorodną budowę wewnętrzną poszczególnych elementów kostnych uwzględniono dopiero w modelu MES. W tym celu odwzorowano różnice gęstości i własności wytrzymałościowych materiału w poszczególnych elementach modelu.

Przykład trójwymiarowego modelu bryłowego uzyskanego wg pierwszego podejścia (prawe biodro pacjenta P. K.) przedstawiono na Ryc. 3a. Widać w tym przypadku dość znaczną nieregularność budowy poszczególnych brył. Model jest skomplikowany, a jego budowa pracochłonna. Nie udało się też uniknąć widocznych gołym okiem niedoskonałości, takich jak nieciągła i poszarpana powierzchnia w obrębie głowy kości udowej. Wydaje się, że metoda ta może okazać się niewystarczająco efektywna w przypadku tak złożonych obiektów, jak staw biodrowy, aczkolwiek możliwe jest dalsze jej doskonalenie. Lepszą jakość modelu udało się jak dotychczas uzyskać stosując drugą metodę, tj. tworząc jedną bryłę obejmującą cały element kostny (Ryc. 3b). Potwierdzają to uzyskane tą drogą rezultaty modelowania stawów biodrowych pacjentki M. A. przedstawione na Ryc. 4. Warto zwrócić uwagę na fakt, iż w tym



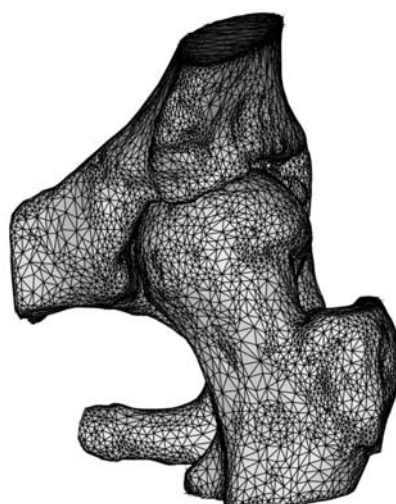
Ryc. 3. Model bryłowy prawego (zdeformowanego) stawu biodrowego pacjentki P. K.: a) uzyskany jako złożenie oddzielnie tworzonych modeli elementów stawu (widoczne rozdzielanie m.in. kości kulszowej, biodrowej i łonowej, zachowana obecność jamy szpikowej kości udowej), b) model złożony jedynie z dwóch brył – modeli kości udowej i fragmentu miednicy

Fig. 3. Solid model of right (deformed) hip joint of patient PK. a) an assembly of separately constructed models of the particular elements of the hip joint (separation of ischium, ilium and pubis is visible, marrow cavity of femur present), b) model consisting of only two volumes: models of the femur and a fragment of the pelvis



Ryc. 4. Bryłowe modele stawu biodrowego wykonane na podstawie danych tomograficznych (pacjentka M. A.): a) biodro prawe – prawidłowe, b) biodro lewe – zdeformowane w przebiegu mpdz.

Fig. 4. Solid models of hip joints made on the basis of CT data (patient MA). a) right hip (normal), b) left hip (deformed by cerebral palsy)



Ryc. 5. Model MES lewego stawu biodrowego (pacjent P. K.)

Fig. 5. FEM model of the left hip joint (patient PK)

przypadku prezentowane modele opracowano na podstawie danych uzyskanych w badaniu TK wykonanym przy swobodnej pozycji ciała pacjenta. Model wyraźnie uwidacznia w tej sytuacji znaczne przemieszczenie głowy lewej kości udowej w stronę boczną, do przodu i w górę tak, że styka się ona z panewką niemal punktowo. Widać więc, że modele bryłowe pozwalają na bardzo łatwą ocenę stopnia deformacji stawu i to z uwzględnieniem efektów trójwymiarowych.

Ostatnim etapem modelowania komputerowego dziecięcego stawu biodrowego było opracowanie modeli MES. Jak było już wspomniane są one niezbędne do symulacji biomechanicznych warunków panu-

jących w stawie, wyznaczenia deformacji elementów anatomicznych czy wartości panujących w nich naprężeń. Model taki, opracowany dla prawego biodra pacjentki M. A., przedstawiono na Ryc. 5. Uwzględniono w nim niejednorodność tkanki kostnej na bazie dostępnych w literaturze zależności pomiędzy gęstością radiologiczną, gęstością pozorną tkanki kostnej a jej właściwościami mechanicznymi [6].

DYSKUSJA

Przedstawione powyżej rezultaty w postaci modeli bryłowych stawów stanowiąc będą punkt wyjścia do dalszych badań. Podstawowym obszarem ich wy-

korzystania będzie trójwymiarowa analiza geometrii stawu, w tym w szczególności ocena stopnia jego patologicznej deformacji oraz symulacja zabiegów operacyjnych (np. osteotomii). Możliwe będzie też prawdopodobnie wprowadzenie do praktyki klinicznej nowych wskaźników pozwalających oceniać i porównywać stan deformacji biodra w trzech wymiarach. Pozwoli to uniknąć błędów, do których może prowadzić diagnozowanie w oparciu o dwuwymiarowe zdjęcia RTG.

Analizie biomechaniki stawu i procesu jego deformacji służyć będzie natomiast modelowanie MES. Należy jednak zauważyć, że wykonanie niezbędnych obliczeń wymagać będzie bardzo szczegółowej analizy sił mięśniowych działających w dziecięcym stawie biodrowym, co może być trudne w przypadku porażenia spastycznych.

Podsumowując można stwierdzić, że cele postawione na wstępie udało się osiągnąć. W toku badań opracowano metodykę budowy zindywidualizowanych modeli dziecięcego stawu biodrowego. Do ich opracowania mogą być wykorzystywane dane uzyskiwane w trakcie rutynowo wykonywanych badań tomograficznych. Otrzymane wyniki należy uznać za zadawalające, szczególnie w aspekcie planowanej analizy biomechanicznej funkcjonowania stawu. Bardzo efektywną okazała się bowiem ta metoda budowy modeli, w której cały obiekt anatomiczny (np. staw biodrowy) traktujemy jako całość i następnie tworzymy model MES uwzględniający niejednorodność tkanki kostnej. Niekorzystnie należy natomiast ocenić trudności w budowie bryłowych modeli uwzględniających w pełni anatomiczny podział stawu biodrowego na elementy składowe, takie jak kość biodrowa, kulczowa, łonowa itd. Udało się wprawdzie uzyskać tego typu modele, ale okazały się one być bardzo złożone, a przy tym mało dokładne. Prace w tym zakresie muszą być kontynuowane. Wydaje się bowiem, że tego rodzaju podejście byłoby korzystne w przypadku analizy geometrycznej stawu jak też przy planowaniu zabiegów operacyjnych.

WNIOSKI

1. Tomografia komputerowa może być źródłem danych niezbędnych do budowy trójwymiarowych modeli numerycznych porażonego stawu biodrowego.

2. Budowa tego rodzaju modeli, z uwagi na złożoność obiektu oraz skomplikowaną metodykę postępowania, wymagać będzie w praktyce ścisłej współpracy lekarzy (ortopeda, radiolog) z inżynierami. Konieczne jest też stosowanie specjalistycznego oprogramowania.
3. Trójwymiarowa komputerowa rekonstrukcja stawu biodrowego zdeformowanego w przebiegu mpdz. pozwala na łatwiejsze i bardziej poprawne diagnozowanie stanu badanego stawu. Celowe jest podjęcie próby opracowania nowych, trójwymiarowych wskaźników opisujących stopień jego deformacji. W dalszych badaniach zweryfikowana zostanie użyteczność opracowanej metodyki modelowania w aspekcie planowania leczenia konkretnych pacjentów.
4. Analiza biomechaniki stawu biodrowego na podstawie modeli numerycznych może w przyszłości pomóc lepiej zrozumieć sam proces jego deformacji. Kluczowe znaczenie będzie miało jednak wyznaczenie sił mięśniowych działających na staw w przypadku dzieci z mpdz.

PIŚMIENNICTWO

1. Graham K. Classifying Cerebral Palsy. *J Pediatric Orthopedics* 2005; 25 (1): 127-128.
2. Henderson JH, Carter DR. Mechanical Induction in Limb Morphogenesis: The Role of Growth-generated Strains and Pressures. *Bone* 2002; 31 (6): 645-653.
3. Piszczałowski S. Modelowanie procesu adaptacji funkcjonalnej tkanki kostnej przy zastosowaniu systemu ANSYS. *Acta of Bioengineering and Biomechanics* 2003, 5 Suppl 1: 407-412.
4. Fernandez JW, Mithraratne P, Thrupp SF, Tawhai MH, Hunter PJ. Anatomically based geometric modeling of the musculo-skeletal system and other organs. *Biomechan Model Mechanobiol* 2004; 2: 139-155.
5. Werner A, Lechniak Z, Skalski K, Kędzior K. Design and Manufacture of Anatomical Human Hip Joint Endoprosthesis using CAD/CAM Systems. *Journal of Materials Processing Technology* 2000; 107/1-3: 181-186.
6. Lotz JC, Gerhart TN, Hayes WC. Mechanical properties of trabecular bone from the proximal femur: a quantitative CT study. *J Comput Assist Tomogr* 1990; 14 (1): 107-114.

Praca wsparta finansowo ze środków na badania własne Politechniki Białostockiej (W/WM/6/04).