



POLITECHNIKA
GDAŃSKA

WIKTORIA WOJNICZ

BIOMECHANICZNE
MODELE UKŁADU
MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWEGO
CZŁOWIEKA

GDAŃSK 2018

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Krzysztof J. Kaliński

RECENZENCI

Iwona Adamiec-Wójcik

Izabela Lubowiecka

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.edu.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018

ISBN 978-83-7348-727-7

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 12,0, ark. druku 13,25, 168/1000

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	7
1. WSTĘP	11
2. BIOMECHANICZNE MODELE MIĘŚNI SZKIELETOWYCH	12
2.1. Wprowadzenie	12
2.2. Modelowanie mięśnia wrzecionowatego	14
2.3. Modelowanie mięśnia pierzastego	27
2.3.1. Model mięśnia jednopierzastego	28
2.3.2. Model mięśnia dwupierzastego	30
2.3.3. Model mięśnia jednopierzastego Hilla–Zajaca	31
3. BIOMECHANICZNE MODELE UKŁADÓW MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWYCH	32
3.1. Wprowadzenie	32
3.2. Modelowanie zachowania układów mięśniowo-szkieletowych	34
3.2.1. Model 2DOF	35
3.2.1.1. Model matematyczny 2DOF	36
3.2.1.2. Modelowanie mięśni dwustawowych w postaci elementu kurczliwego	43
3.2.2. Model 4DOF	43
3.2.2.1. Model matematyczny 4DOF	44
3.2.3. Model 3DOF	45
3.2.3.1. Model matematyczny 3DOF	45
3.2.4. Model 5DOF	48
3.2.4.1. Model matematyczny 5DOF	48
3.2.5. Model kulisty	50
3.2.5.1. Model matematyczny modelu kulistego	50
3.2.6. Uwagi do modelowania	52
3.2.6.1. Modelowanie zachowania układu mięśniowo-szkieletowego kończyny górnej	54
3.2.6.2. Modelowanie zachowania układu mięśniowo-szkieletowego kończyny dolnej	56
3.2.7. Wybrane wyniki badań numerycznych	58
3.2.7.1. Modelowanie zachowania układu 2DOF (zadanie odwrotne dynamiki)	58
3.2.7.1.1. Podejście jednoznaczne	60
3.2.7.1.2. Podejście niejednoznaczne	60
3.2.7.1.3. Wyniki badań numerycznych	61
3.2.7.2. Modelowanie zachowania układu 2DOF (zadanie proste dynamiki).....	74
3.2.7.3. Modelowanie zachowania układu 3DOF (zadanie proste dynamiki).....	75
3.2.7.4. Modelowanie zachowania układu 4DOF (zadanie proste dynamiki).....	77
3.2.7.5. Modelowanie zachowania układu 5DOF (zadanie proste dynamiki).....	78
3.2.7.6. Modelowanie zachowania układu kulistego (zadanie proste dynamiki) ..	80
4. BIOMECHANICZNE MODELE UKŁADU SZKIELETOWEGO	83
4.1. Wprowadzenie	83
4.2. Model bryłowy fragmentu kości udowej	86
4.3. Modele fragmentu kości gąbczastej w postaci rusztowania regularnego	87
4.3.1. Fragment kości gąbczastej z rusztowaniem 2,5 mm typu powłokowego z grubością 0,1 mm, wymodelowany za pomocą elementów STR165	90
4.3.2. Fragment kości gąbczastej z rusztowaniem 5,0 mm typu powłokowego z grubością 0,1 mm, wymodelowany za pomocą elementów STR165	91

4.3.3.	Fragment kości gąbczastej z rusztowaniem 2,5 mm typu powłokowego z grubością 0,2 mm, wymodelowany za pomocą elementów STRI65	92
4.3.4.	Fragment kości gąbczastej z rusztowaniem 5,0 mm typu powłokowego z grubością 0,2 mm, wymodelowany za pomocą elementów STRI65	93
4.3.5.	Fragment kości gąbczastej z rusztowaniem 2,5 mm typu bryłowego, wymodelowany za pomocą elementów typu C3D4H	94
4.3.6.	Fragment kości gąbczastej z rusztowaniem 5,0 mm typu bryłowego, wymodelowany za pomocą elementów typu C3D4H	95
4.3.7.	Fragment kości gąbczastej z rusztowaniem 2,5 mm typu bryłowego, wymodelowany za pomocą elementów typu C3D10H	96
4.3.8.	Fragment kości gąbczastej z rusztowaniem 5,0 mm typu bryłowego, wymodelowany za pomocą elementów typu C3D10H	97
4.3.9.	Uwagi do uzyskanych wyników	98
4.4.	Modele fragmentu kości gąbczastej w postaci rusztowania nieregularnego	99
4.4.1.	Modele typu pierwszego	99
4.4.2.	Modele typu drugiego	100
4.5.	Modele wycinka fragmentu kości udowej zawierającego kość gąbczastą w postaci rusztowania regularnego	103
4.6.	Modele wycinka fragmentu kości udowej zawierającego kość gąbczastą w postaci rusztowania nieregularnego	105
4.7.	Uwagi końcowe	106
5.	BIOMECHANICZNE MODELE CHODU	108
5.1.	Wprowadzenie	108
5.2.	Modelowanie ruchu symetrycznego za pomocą płaskich modeli wieloczołonowych	111
5.2.1.	Koncepcja modelowania	111
5.2.1.1.	Model 6DOF	114
5.2.1.2.	Model 7DOF	119
5.2.2.	Model interakcji z podłożem	125
5.2.2.1.	Model interakcji z podłożem: zadanie proste dynamiki	125
5.2.3.	Metoda weryfikacji i analiza wyników	126
5.2.4.	Uwagi do stosowania płaskich biomechanicznych modeli chodu	133
5.3.	Zastosowanie płaskich modeli 6DOF i 7DOF do modelowania stanu zawieszenia	134
5.3.1.	Wyniki dla modelu 6DOF	135
5.3.2.	Wyniki dla modelu 7DOF	136
5.4.	Metoda wyznaczenia funkcjonowania mięśni kończyny dolnej podczas chodu	138
5.5.	Uwagi dotyczące określenia stabilności podczas chodu	142
6.	ZASTOSOWANIE POMIARÓW DO WERYFIKACJI MODELI BIOMECHANICZNYCH	145
6.1.	Wprowadzenie	145
6.1.2.	Zastosowanie EMG	146
6.1.2.1.	Okres aktywności mięśnia	147
6.1.2.2.	Problem wyznaczania siły mięśnia	147
6.1.2.3.	Współczynnik zmęczenia mięśnia	148
6.2.	Badania własne	148
6.2.1.	Metoda wyznaczenia aktywności mięśni	149
6.2.2.	Wyznaczanie wpływu ustawienia kończyny górnej na wykonanie zacisku izometrycznego ręką	152
6.2.3.	Wyznaczanie zmęczenia mięśnia	158
7.	PROJEKTOWANIE URZĄDZEŃ DO REHABILITACJI	161
7.1.	Wprowadzenie	161
7.1.1.	Podstawy teorii sterowania ruchem w układach żywych	162
7.1.2.	Koncepcja synergii	163
7.1.3.	Koncepcja <i>uncontrolled manifold</i>	164

7.1.4. Koncepcja <i>motor equivalence</i>	166
7.1.5. Koncepcja sterowania za pomocą konfiguracji odniesienia	167
7.1.6. Koncepcja <i>M-modes</i>	167
7.1.7. Wskaźniki współpracy układu mięśniowego	168
7.1.8. Hipoteza punktu równowagi	169
7.1.9. Koncepcje uwzględniające aspekty neurologiczne	170
7.1.10. Metody badania stabilności	171
7.1.11. Wybrane cechy funkcjonowania narządu ruchu	171
7.2. Koncepcja rozwiązania autorskiego	174
8. PODSUMOWANIE	181
ZAŁĄCZNIK	183
BIBLIOGRAFIA	202
Streszczenie w języku polskim	210
Streszczenie w języku angielskim	210