

# Spis treści

<b>Przedmowa</b> . . . . .	9
<b>Wykaz ważniejszych oznaczeń</b> . . . . .	11
<b>1. Opis struktury manipulatora</b> . . . . .	19
1.1. Położenie i orientacja bryły sztywnej w przestrzeni kartezjańskiej . . . . .	19
1.1.1. Wektor położenia i macierz rotacji . . . . .	19
1.1.2. Rotacje elementarne wokół osi $x$ , $y$ , $z$ . . . . .	21
1.1.3. Interpretacja macierzy rotacji . . . . .	22
1.1.4. Składanie rotacji . . . . .	22
1.2. Inne reprezentacje rotacji . . . . .	23
1.2.1. Obrót wokół dowolnej osi . . . . .	23
1.2.2. Kąty Eulera . . . . .	26
1.2.3. Kwaterniony jednostkowe . . . . .	29
1.3. Transformacje jednorodne . . . . .	30
1.4. Opis kinematyki manipulatora . . . . .	32
1.4.1. Łańcuch kinematyczny manipulatora . . . . .	32
1.4.2. Opis ogniwa manipulatora . . . . .	33
1.4.3. Notacja Denavita–Hartenberga . . . . .	34
1.4.4. Zmodyfikowana notacja Denavita–Hartenberga . . . . .	35
<b>2. Zadanie proste kinematyki</b> . . . . .	37
2.1. Wprowadzenie . . . . .	37
2.2. Podstawowe operatory przestrzenne związane z bryłą sztywną . . . . .	39
2.3. Złącza holonomiczne i nieholonomiczne . . . . .	43
2.4. Opis otwartego łańcucha kinematycznego . . . . .	48
2.5. Rozwiązanie zadania prostego kinematyki . . . . .	51
2.6. Kinematyczne przekształcenie prędkości . . . . .	55
2.7. Jakobian analityczny i jego związki z jakobianem geometrycznym . . . . .	69
2.8. Przestrzeń robocza, redundancja kinematyczna oraz jakobian transponowany . . . . .	76
2.9. Kinematyczne przekształcenia przestrzennych przyspieszeń wzdłuż łańcucha kinematycznego . . . . .	85

<b>3. Zastosowanie algebry przestrzennej do opisu złożonych struktur kinematycznych</b> . . . . .	95
3.1. Wprowadzenie . . . . .	95
3.2. Przekształcenia kinematyczne dla manipulatorów z przekładniami . . . . .	95
3.3. Przekształcenia kinematyczne dla kilku robotów wykonujących wspólnie zadanie . . . . .	110
3.3.1. Wyznaczanie prędkości środka masy ładunku . . . . .	116
3.3.2. Wyznaczanie prędkości uogólnionych złączy . . . . .	117
3.3.3. Wyznaczanie prędkości uogólnionych złączy z ograniczeniami . . . . .	118
3.3.4. Wyznaczanie przyspieszeń przestrzennych . . . . .	119
3.4. Przekształcenia kinematyczne dla struktur topologicznych . . . . .	120
<b>4. Algorytmy zadania odwrotnego kinematyki</b> . . . . .	128
4.1. Wprowadzenie . . . . .	128
4.2. Klasyczne metody rozwiązywania zadania odwrotnego kinematyki . . . . .	131
4.3. Rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki z wykorzystaniem jakobianu . . . . .	142
4.4. Obliczenia błędu położenia i orientacji . . . . .	148
4.5. Algorytmy iteracyjnego rozwiązywania zadania odwrotnego kinematyki . . . . .	156
4.5.1. Skalarna funkcja kosztów . . . . .	156
4.5.2. Metoda największego spadku . . . . .	160
4.5.3. Metoda Newtona–Raphsona . . . . .	162
4.5.4. Wykorzystanie kwaternionów w kinematyce różniczkowej . . . . .	165
<b>5. Zadanie odwrotne kinematyki złożonych łańcuchów kinematycznych</b> . . . . .	168
5.1. Wprowadzenie . . . . .	168
5.2. Uwagi o rozwiązywaniu zadania odwrotnego kinematyki manipulatorów z przekładniami i elastycznością w złączach . . . . .	169
5.3. Rozwiązanie zadania odwrotnego kinematyki kilku manipulatorów przenoszących wspólnie ładunek. . . . .	169
5.4. Iteracyjne rozwiązywanie zadania odwrotnego kinematyki dwóch współpracujących manipulatorów. . . . .	173
5.5. Zastosowanie algebry przestrzennej do analizy sił, przyspieszeń i prędkości kontaktowych . . . . .	179
5.5.1. Uzpełnienie ortogonalne sił kontaktowych . . . . .	180
5.5.2. Analiza przestrzennych przyspieszeń punktów kontaktu . . . . .	187
5.5.3. Dekompozycja przestrzennych prędkości . . . . .	191
<b>6. Planowanie trajektorii</b> . . . . .	194
6.1. Wprowadzenie . . . . .	194
6.2. Planowanie trajektorii w przestrzeni wewnętrznej . . . . .	195
6.2.1. Trajektorja wielomianowa trzeciego stopnia . . . . .	195
6.2.2. Trajektorja wielomianowa piątego stopnia . . . . .	196
6.2.3. Trajektorja liniowo-paraboliczna . . . . .	197
6.2.4. Trajektorja liniowo-paraboliczna z punktami pośrednimi . . . . .	199
6.2.5. Wykorzystanie funkcji sklepanych . . . . .	201
6.3. Planowanie trajektorii w przestrzeni zewnętrznej . . . . .	204
6.3.1. Przykładowe trajektorie w przestrzeni zewnętrznej . . . . .	205
6.3.2. Parametryczna reprezentacja trajektorii . . . . .	207
6.3.3. Planowanie trajektorii w kontekście planowania zadań . . . . .	209

6.3.4. Trajektoria liniowo-paraboliczna w przestrzeni zewnętrznej	216
6.4. Przykłady planowania trajektorii w przestrzeni kartezjańskiej	219
6.5. Koordynacja ruchu manipulatorów w przestrzeni zadań	221
6.5.1. Wykorzystanie kwaternionów do opisu ruchu	221
6.5.2. Opis trajektorii w przestrzeni zadań	223
<b>7. Zadanie odwrotne dynamiki</b>	225
7.1. Wprowadzenie	225
7.2. Rozwiązanie zadania odwrotnego dynamiki otwartych łańcuchów kinematycznych	227
7.3. Zadanie odwrotne dynamiki dla manipulatora z przekładniami	248
<b>8. Proste algorytmy sterowania manipulatorów</b>	266
8.1. Wprowadzenie	266
8.2. Sterowanie w przestrzeni złączy	269
8.3. Niezależne sterowanie złączy	271
8.3.1. Wprowadzenie	271
8.3.2. Równania silnika prądu stałego z przekładnią	272
8.3.3. Sterowanie proporcjonalne	277
8.3.4. Sterowanie proporcjonalno-różniczkowe	280
8.3.5. Astatyzm względem sygnału zadanego i zakłócenia	282
8.3.6. Sterowanie typu PID	283
8.4. Sterowanie ze sprzężeniem w przód metodą wyliczanych momentów	286
<b>9. Dobór funkcji Lapunowa dla potrzeb sterowania manipulatorów</b>	290
9.1. Wprowadzenie	290
9.2. Sterowanie pozycyjne	294
9.3. Sterowanie nadążne	305
9.4. Algorytm sterowania robotów z elastycznością w złączach przy znajomości pełnego modelu	310
9.4.1. Manipulator o ogniwach sztywnych	310
9.4.2. Manipulator z elastycznymi złączami	316
9.5. Algorytmy sterowania adaptacyjnego dla manipulatorów z elastycznością w złączach	318
9.5.1. Podstawy matematyczne	318
9.5.2. Sterowanie adaptacyjne wykorzystujące moment jako sygnał sprzężenia zwrotnego	320
9.5.3. Nowy algorytm sterowania adaptacyjnego	322
9.6. Weryfikacja doświadczalna nowego algorytmu sterowania	335
9.6.1. Opis stanowiska laboratoryjnego	336
9.6.2. Badania eksperymentalne	339
<b>10. Systemy programowania robotów</b>	344
10.1. Ogólna koncepcja sprzętu i oprogramowania	344
10.2. Ramka, podstawowe typy danych i operacje	347
10.3. Opis stanowiska doświadczalnego z robotami Stäubli	352
10.3.1. Pojedynczy manipulator Stäubli RX60	362
10.3.2. Układ współpracujących manipulatorów Stäubli RX60	363
10.4. System programowania robota IRp-6	365
10.5. Planowanie trajektorii w przestrzeni wewnętrznej robota IRp-6	371
10.5.1. Zastosowanie interfejsu bezpośredniego dostępu do zasobów sterownika robota IRp-6 w planowaniu trajektorii	371
10.5.2. Opis programu realizującego trajektorie wielomianowe	373

10.6.	Planowanie trajektorii w przestrzeni zewnętrznej robota IRP-6	378
10.6.1.	Procedura	378
10.6.2.	Przykład: program paletyzacji	383
10.7.	Stanowisko laboratoryjne z manipulatorami Comau SMART-3 S	385
<b>A.</b>	<b>Preliminaria matematyczne</b>	392
A.1.	Podstawowe operacje na wektorach	392
A.2.	Pseudoinwersja macierzy	394
A.3.	Iteracyjne metody optymalizacji	397
<b>B.</b>	<b>Wybrane zagadnienia sterowania</b>	399
B.1.	Układ drugiego rzędu	399
B.2.	Metoda linii pierwiastkowych	402
<b>C.</b>	<b>Stabilność układów nieliniowych</b>	406
C.1.	Definicje stabilności	406
C.2.	Zastosowanie funkcji Lapunowa do badania stabilności układów nieliniowych	410
	<b>Literatura</b>	412
	<b>Skorowidz</b>	419
	<b>10 Systemy programowania robotów</b>	
10.1.	Opis programu napisanego w języku wirtualnym IRP-6	422
10.1.1.	Zastosowanie instrukcji podstawowych do zdefiniowania układu współrzędnych manipulatora Sidel B700	422
10.1.2.	Układ współrzędnych manipulatora Sidel B700	422
10.1.3.	Układ współrzędnych manipulatora Sidel B700	422
10.2.	System programowania robota IRP-6	422
10.3.	Planowanie trajektorii w przestrzeni wewnętrznej robota IRP-6	422
10.3.1.	Zastosowanie instrukcji podstawowych do zdefiniowania układu współrzędnych manipulatora Sidel B700	422
10.3.2.	Układ współrzędnych manipulatora Sidel B700	422
10.3.3.	Układ współrzędnych manipulatora Sidel B700	422
10.4.	System programowania robota IRP-6	422
10.5.	Ramka podstawowa typu danych i operacji	422
10.6.	Opis stanowiska badawczego z robotami Sidel B700	422
10.7.	Opis stanowiska badawczego z robotami Sidel B700	422