

Przedmowa	9
Wykaz ważniejszych oznaczeń	11
1. Opis struktury manipulatora	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
2. Zadanie proste kinematyki	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 jacobianem geometrycznym	69
2.8. Przestrzeń robocza, redundancja kinematyczna oraz jacobian transponowany	76
2.9. Kinematyczne przekształcenia przestrzennych przyspieszeń wzdłuż łańcucha kinematycznego	85

3. Zastosowanie algebry przestrzennej do opisu złożonych struktur kinematycznych	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
4. Algorytmy zadania odwrotnego kinematyki	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
5. Zadanie odwrotne kinematyki złożonych łańcuchów kinematycznych	168
5.1. Wprowadzenie	168
5.2. Uwagi o rozwiązywaniu zadania odwrotnego kinematyki manipulatorów z przekładniami i elastycznością w złączach	169
5.3. Rozwiązywanie 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. Uzupełnienie ortogonalne sił kontaktowych	180
5.5.2. Analiza przestrzennych przyspieszeń punktów kontaktu	187
5.5.3. Dekompozycja przestrzennych prędkości	191
6. Planowanie trajektorii	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 sklejących	201
6.3. Planowanie trajektorii w przestrzeni zewnętrznej	204
6.3.1. Przykładowe trajektorie w przestrzeni wewnętrznej	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
7. Zadanie odwrotne dynamiki	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
8. Proste algorytmy sterowania manipulatorów	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
9. Dobór funkcji Lapunowa dla potrzeb sterowania manipulatorów	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
10. Systemy programowania robotów	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

8 Spis treści

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
A. Preliminaria matematyczne	392
A.1. Podstawowe operacje na wektorach	392
A.2. Pseudoinwersja macierzy	394
A.3. Iteracyjne metody optymalizacji	397
B. Wybrane zagadnienia sterowania	399
B.1. Układ drugiego rzędu	399
B.2. Metoda linii pierwiastkowych	402
C. Stabilność układów nieliniowych	406
C.1. Definicje stabilności	406
C.2. Zastosowanie funkcji Lapunowa do badania stabilności układów nieliniowych	410
Literatura	412
Skorowidz	419