

Spis treści

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	5
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

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. Trajektoria wielomianowa trzeciego stopnia	195
6.2.2. Trajektoria wielomianowa piątego stopnia	196
6.2.3. Trajektoria liniowo-paraboliczna	197
6.2.4. Trajektoria 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
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 StEubli.	352
10.3.1. Pojedynczy manipulator StEubli RX60.	362
10.3.2. Układ współpracujących manipulatorów StEubli 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
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