

Spis treści

Przedmowa

xi

1. Wprowadzenie

1

1.1. Wprowadzenie	1
1.2. Robotyka	1
1.3. Elementy składowe i struktura robotów	4
1.3.1. Dokładność i powtarzalność	7
1.4. Ogólna klasyfikacja kinematyki	8
1.4.1. Konfiguracja stawowa (RRR)	9
1.4.2. Konfiguracja sferyczna (RRP)	11
1.4.3. Konfiguracja SCARA (RRP)	12
1.4.4. Konfiguracja cylindryczna (RPP)	16
1.4.5. Konfiguracja kartezjańska (PPP)	16
1.4.6. Inne metody klasyfikacji robotów	17
1.4.7. Kiść i końcówka robocza	19
1.5. Układ książki	21
1.5.1. Problem 1: kinematyka prosta	23
1.5.2. Problem 2: kinematyka odwrotna	24
1.5.3. Problem 3: kinematyka prędkości	26
1.5.4. Problem 4: dynamika	28
1.5.5. Problem 5: sterowanie pozycyjne	28
1.5.6. Problem 6: sterowanie siłą	28
Literatura	29
Zadania	29

2. Ruchy sztywne i przekształcenia jednorodne

33

2.1. Obroty	33
2.1.1. Podsumowanie	39
2.2. Składanie obrotów	39
2.2.1. Obrót wokół dowolnej osi	43
2.3. Dalsze własności obrotów	44
2.3.1. Reprezentacja „oś–kąt”	44
2.3.2. Kąty Eulera	46
2.3.3. Kąty obrotu, nachylenia, odchylenia	47
2.4. Przekształcenia jednorodne	48

2.5. Macierze skośniesymetryczne	52
2.6. Prędkość kątowa i przyspieszenie kątowe	56
2.7. Dodawanie prędkości kątowych	58
Literatura	60
Zadania	60
3. Kinematyka prosta: reprezentacja Denavita-Hartenberga	66
3.1. Łańcuchy kinematyczne	66
3.2. Reprezentacja Denavita-Hartenberga	69
3.2.1. Podsumowanie	76
3.3. Przykłady	77
Literatura	90
Zadania	90
4. Kinematyka odwrotna	97
4.1. Wstęp	97
4.2. Odsprężenie kinematyczne	99
4.2.1. Podsumowanie	101
4.3. Kinematyka odwrotna pozycji: podejście geometryczne	102
4.3.1. Konfiguracja stawowa	102
4.3.2. Konfiguracja sferyczna	107
4.4. Kinematyka odwrotna orientacji	108
4.4.1. Kąty Eulera	109
4.4.2. Podsumowanie rozwiązania dla manipulatora z łokciem	112
Literatura	114
Zadania	115
5. Kinematyka prędkości – jacobian manipulatora	118
5.1. Wyprowadzenie jacobianu	119
5.1.1. Prędkość kątowa	120
5.1.2. Prędkość liniowa	121
5.2. Przykłady	124
5.3. Osobliwości	128
5.3.1. Odsprężenie osobliwości	129
5.3.2. Osobliwości kiści	131
5.3.3. Osobliwości ramienia	132
5.4. Kinematyka odwrotna prędkości i przyspieszenia	136
Literatura	137
Zadania	137
6. Dynamika	138
6.1. Równania Eulera-Lagrange'a	138
6.2. Wyrażenia opisujące energię kinetyczną i potencjalną	146
6.3. Równania ruchu	152
6.4. Pewne powszechnie stosowane konfiguracje	155
6.4.1. Mechanizm pięcioczołowy	162
6.5. Formalizm Newtona-Eulera	164

6.6. Ponownie płaski manipulator z łokciem	172
6.6.1. Rekurencja w przód: człon 1	172
6.6.2. Rekurencja w przód: człon 2	173
6.6.3. Rekurencja wstecz: człon 2	174
6.6.4. Rekurencja wstecz: człon 1	174
Literatura	175
Zadania	176

7. Niezależne sterowanie osiami 180

7.1. Wstęp	180
7.2. Dynamika napędów	182
7.3. Sterowanie od punktu do punktu	188
7.3.1. Regulator PD	190
7.3.2. Jakość regulatorów PD	192
7.3.3. Regulator PID	195
7.4. Dynamika przekładni przenoszącej napęd	197
7.4.1. Projektowanie w konwencji zmiennych stanu	201
7.4.2. Regulator ze sprzężeniem zwrotnym stanu	203
7.4.3. Obserwatory	206
7.5. Interpolacja trajektorii	209
7.5.1. Podsumowanie	215
7.5.2. Segmentacja liniowo-paraboliczna	216
7.5.3. Trajektorie minimalnoczasowe	219
7.6. Sterowanie ze sprzężeniem wyprzedzającym i obliczanym momentem	220
7.6.1. Kompensacja zakłóceń przez sprzężenie wyprzedzające: obliczany moment	223
Literatura	224
Zadania	225

8. Sterowanie wielowymiarowe 229

8.1. Wstęp	229
8.2. Ponownie sterowanie PD	229
8.2.1. Efekt podatności przegubów	232
8.3. Dynamika odwrotna	235
8.4. Zagadnienia zastosowania i krzepkości	239
8.5. Konstrukcja krzepkiej pętli zewnętrznej	241
Literatura	252
Zadania	254

9. Sterowanie siłowe 256

9.1. Wstęp	256
9.1.1. Zależności statyczne siła–moment	257
9.1.2. Osobliwości	259
9.2. Ograniczenia naturalne i sztuczne	260
9.3. Sztywność i podatność	262
9.3.1. Sterowanie sztywnością pojedynczego stopnia swobody	263
9.4. Dynamika odwrotna w przestrzeni zadania	266
9.5. Sterowanie impedancyjne	268
9.5.1. Zastosowanie i problemy krzepkości	269

9.6. Sterowanie hybrydowe pozycja/siła	270
9.6.1. Sterowanie siłowe wzdłuż pojedynczego stopnia swobody	270
9.6.2. Sterowanie hybrydowe	271
Literatura	272
Zadania	272

10. Linearyzacja sprzężeniem zwrotnym 274

10.1. Wstęp	274
10.2. Podstawy: twierdzenie Frobeniusa	276
10.3. Układy jednowejsiowe	281
10.4. Linearyzacja sprzężeniem zwrotnym robota n -członowego	291
10.5. Wprowadzenie do projektowania pętli zewnętrznej	294
10.6. Projektowanie pętli zewnętrznej z zastosowaniem drugiej metody Lapunowa	297
Literatura	299
Zadania	299

11. Sterowanie o zmiennej strukturze i sterowanie adaptacyjne 302

11.1. Wstęp	302
11.1.1. Układy ze zmienną strukturą	302
11.1.2. Parametryczne sterowanie adaptacyjne	305
11.2. Metoda ślizgowych trybów pracy	306
11.2.1. Projektowanie ruchu ślizgowego dla układów jednowejsiowych	306
11.2.2. Warunki istnienia ruchu ślizgowego	307
11.2.3. Równoważna metoda sterowania	310
11.2.4. Niezmienniczość	311
11.2.5. Układy wielowejsiowe	312
11.2.6. Zastosowanie prawa sterowania ze zmienną strukturą	313
11.2.7. Drgania sterowania	316
11.2.8. Komentarz	318
11.2.9. Osiągalność powierzchni ślizgowej	318
11.2.10. Zmiennostrukturalne sterowanie manipulatorami	318
11.3. Sterowanie adaptacyjne	319
11.3.1. Adaptacyjna dynamika odwrotna	321
11.3.2. Zbieżność parametrów	325
11.3.3. Algorytm Slotine'a i Liego	325
11.3.4. Wersja adaptacyjna	327
11.3.5. Zagadnienie nie opisanej dynamiki	329
Literatura	332
Zadania	333

Dodatek A. Algebra liniowa 335

Dodatek B. Teoria przestrzeni stanów układów dynamicznych 340

Dodatek C. Stabilność Lapunowa 344

Skorowidz 351