

Περιεχόμενα

Πρόλογος	17
----------	----

Ευχαριστίες	19
-------------	----

I Βασικά στοιχεία 21

1 Εισαγωγή 23

1.1	Η αβεβαιότητα στη ρομποτική	23
1.2	Πιθανοτική ρομποτική	25
1.3	Συνέπειες	29
1.4	Οδικός χάρτης	30
1.5	Διδασκαλία της πιθανοτικής ρομποτικής	31
1.6	Βιβλιογραφικά σχόλια	32

2 Αναδρομική εκτίμηση κατάστασης 35

2.1	Εισαγωγή	35
2.2	Βασικές έννοιες πιθανοτήτων	36
2.3	Αλληλεπίδραση ρομπότ-περιβάλλοντος	41
2.3.1	Κατάσταση	41
2.3.2	Αλληλεπίδραση περιβάλλοντος	44
2.3.3	Πιθανοτικοί παραγωγικοί νόμοι	46
2.3.4	Κατανομές πεποίθησης	48
2.4	Φίλτρα Bayes	49
2.4.1	Ο αλγόριθμος του φίλτρου Bayes	49
2.4.2	Παράδειγμα	51
2.4.3	Μαθηματική απόδειξη του φίλτρου Bayes	54
2.4.4	Η υπόθεση Markov	56
2.5	Αναπαραστάσεις και υπολογισμοί	57
2.6	Περίληψη	58
2.7	Βιβλιογραφικά σχόλια	59
2.8	Ασκήσεις	59

3	Φίλτρα Gauss	63
3.1	Εισαγωγή	63
3.2	Το φίλτρο Kalman	64
3.2.1	Γραμμικά συστήματα Gauss	64
3.2.2	Ο αλγόριθμος του φίλτρου Kalman	66
3.2.3	Παράδειγμα	68
3.2.4	Μαθηματική απόδειξη του KF	69
3.3	Το επεκτεταμένο φίλτρο Kalman	78
3.3.1	Γιατί είναι απαραίτητη η γραμμικοποίηση;	78
3.3.2	Γραμμικοποίηση μέσω αναπτύγματος Taylor	80
3.3.3	Ο αλγόριθμος του EKF	82
3.3.4	Μαθηματική απόδειξη του φίλτρου EKF	83
3.3.5	Πρακτικά ζητήματα	84
3.4	Το φίλτρο Kalman χωρίς καθοδήγηση	88
3.4.1	Γραμμικοποίηση μέσω του μετασχηματισμού χωρίς καθοδήγηση	89
3.4.2	Ο αλγόριθμος UKF	92
3.5	Το φίλτρο πληροφοριών	94
3.5.1	Κανονική παραμετροποίηση	95
3.5.2	Ο αλγόριθμος του φίλτρου πληροφοριών	96
3.5.3	Μαθηματική απόδειξη του φίλτρου πληροφοριών	98
3.5.4	Ο αλγόριθμος του επεκτεταμένου φίλτρου πληροφοριών	99
3.5.5	Μαθηματική απόδειξη του επεκτεταμένου φίλτρου πληροφοριών	100
3.5.6	Πρακτικά ζητήματα	101
3.6	Περίληψη	103
3.7	Βιβλιογραφικά σχόλια	105
3.8	Ασκήσεις	105
4	Μη παραμετρικά φίλτρα	109
4.1	Το φίλτρο ιστογράμματος	110
4.1.1	Ο αλγόριθμος του διακριτού φίλτρου Bayes	110
4.1.2	Συνεχής κατάσταση	111
4.1.3	Μαθηματική απόδειξη της προσέγγισης με ιστόγραμμα	114
4.1.4	Τεχνικές ανάλυσης	116
4.2	Δυναδικά φίλτρα Bayes με στατική κατάσταση	118
4.3	Το φίλτρο σωματιδίων	120
4.3.1	Βασικός αλγόριθμος	120
4.3.2	Δειγματοληψία σπουδαιότητας	124
4.3.3	Μαθηματική απόδειξη του φίλτρου σωματιδίων	127

4.3.4	Πρακτικά ζητήματα και ιδιότητες των φίλτρων σωματιδίων	128
4.4	Περίληψη	138
4.5	Βιβλιογραφικά σχόλια	139
4.6	Ασκήσεις	139
5	Ρομποτική κίνηση	143
5.1	Εισαγωγή	143
5.2	Προπαρασκευή	144
5.2.1	Κινηματική διευθέτηση	144
5.2.2	Πιθανοτική κινηματική	145
5.3	Το μοντέλο κίνησης της ταχύτητας	147
5.3.1	Υπολογισμός κλειστής μορφής	147
5.3.2	Αλγόριθμος δειγματοληψίας	149
5.3.3	Μαθηματική απόδειξη του μοντέλου κίνησης της ταχύτητας	151
5.4	Μοντέλο κίνησης της οδομετρίας	158
5.4.1	Υπολογισμός κλειστής μορφής	158
5.4.2	Αλγόριθμος δειγματοληψίας	161
5.4.3	Μαθηματική απόδειξη του μοντέλου κίνησης της οδομετρίας	162
5.5	Κίνηση και χάρτες	165
5.6	Περίληψη	168
5.7	Βιβλιογραφικά σχόλια	170
5.8	Ασκήσεις	170
6	Ρομποτική αντίληψη	175
6.1	Εισαγωγή	175
6.2	Χάρτες	178
6.3	Μοντέλα δέσμης για αισθητήρες μέτρησης απόστασης	179
6.3.1	Ο βασικός αλγόριθμος μέτρησης	180
6.3.2	Ρύθμιση των εγγενών παραμέτρων του μοντέλου	185
6.3.3	Μαθηματική απόδειξη του μοντέλου δέσμης	188
6.3.4	Πρακτικά ζητήματα	193
6.3.5	Περιορισμοί του μοντέλου δέσμης	194
6.4	Πεδία πιθανοφάνειας για αισθητήρες μέτρησης απόστασης	195
6.4.1	Βασικός αλγόριθμος	195
6.4.2	Επεκτάσεις	198
6.5	Μοντέλα μέτρησης που βασίζονται στη συσχέτιση	200
6.6	Μοντέλα μέτρησης βασισμένα σε χαρακτηριστικά	202
6.6.1	Εξαγωγή χαρακτηριστικών	202

6.6.2	Μετρήσεις οροσίων	203	
6.6.3	Μοντέλο αισθητήρα με γνωστή αντιστοιχία	204	
6.6.4	Δειγματοληψία στάσεων	205	
6.6.5	Επιπλέον ζητήματα	206	
6.7	Πρακτικά ζητήματα	208	
6.8	Περίληψη	209	
6.9	Βιβλιογραφικά σχόλια	211	
6.10	Ασκήσεις	211	

II Εντοπισμός θέσης 215

7	Εντοπισμός θέσης κινητού ρομπότ: μέθοδοι Markov και Gauss	217
7.1	Ταξινόμια των προβλημάτων εντοπισμού θέσης	219
7.2	Εντοπισμός θέσης Markov	223
7.3	Παράδειγμα του εντοπισμού θέσης Markov	225
7.4	Εντοπισμός θέσης με EKF	227
7.4.1	Παράδειγμα	227
7.4.2	Ο αλγόριθμος εντοπισμού θέσης με EKF	229
7.4.3	Μαθηματική απόδειξη του εντοπισμού θέσης με EKF	231
7.4.4	Φυσική υλοποίηση	236
7.5	Εκτίμηση αντιστοιχιών	242
7.5.1	Εντοπισμός θέσης με EKF για άγνωστες αντιστοιχίες	242
7.5.2	Μαθηματική απόδειξη της συσχέτισης δεδομένων ML	244
7.6	Παρακολούθηση πολλών υποθέσεων	245
7.7	Εντοπισμός θέσης με UKF	247
7.7.1	Μαθηματική απόδειξη του εντοπισμού θέσης με UKF	247
7.7.2	Παράδειγμα	250
7.8	Πρακτικά ζητήματα	254
7.9	Περίληψη	258
7.10	Βιβλιογραφικά σχόλια	260
7.11	Ασκήσεις	261
8	Εντοπισμός θέσης κινητού ρομπότ: πλέγματα και μέθοδοι Μόντε Κάρλο	265
8.1	Εισαγωγή	265
8.2	Εντοπισμός θέσης με πλέγμα	266
8.2.1	Βασικός αλγόριθμος	266
8.2.2	Αναλύσεις πλέγματος	267

8.2.3	Υπολογιστικά ζητήματα	270
8.2.4	Παράδειγμα	273
8.3	Εντοπισμός θέσης Μόντε Κάρλο	278
8.3.1	Παράδειγμα	278
8.3.2	Ο αλγόριθμος MCL	280
8.3.3	Φυσικές υλοποιήσεις	281
8.3.4	Ιδιότητες του MCL	281
8.3.5	MCL με τυχαία σωματίδια: ανάκαμψη από αποτυχίες	283
8.3.6	Τροποποίηση της κατανομής εισήγησης	288
8.3.7	Δειγματοληψία KLD: προσαρμογή του μεγέθους των συνόλων δειγμάτων	291
8.4	Εντοπισμός θέσης σε δυναμικά περιβάλλοντα	295
8.5	Πρακτικά ζητήματα	301
8.6	Περίληψη	303
8.7	Βιβλιογραφικά σχόλια	304
8.8	Ασκήσεις	305

III Χαρτογράφηση 309

9	Χαρτογράφηση πλέγματος κατάληψης	311
9.1	Εισαγωγή	311
9.2	Ο αλγόριθμος χαρτογράφησης πλέγματος κατάληψης	314
9.2.1	Συγχώνευση δεδομένων από πολλούς αισθητήρες	322
9.3	Εκμάθηση αντίστροφων μοντέλων μέτρησης	324
9.3.1	Αντιστροφή του μοντέλου μέτρησης	324
9.3.2	Δειγματοληψία από το προς τα εμπρός μοντέλο	325
9.3.3	Η συνάρτηση σφάλματος	327
9.3.4	Παραδείγματα και πρόσθετα ζητήματα	328
9.4	Μέγιστη εκ των υστέρων χαρτογράφηση κατάληψης	330
9.4.1	Η περίπτωση της διατήρησης εξαρτήσεων	330
9.4.2	Χαρτογράφηση πλέγματος κατάληψης με προς τα εμπρός μοντέλα	331
9.5	Περίληψη	334
9.6	Βιβλιογραφικά σχόλια	335
9.7	Ασκήσεις	337
10	Ταυτόχρονος εντοπισμός θέσης και χαρτογράφηση	341
10.1	Εισαγωγή	341
10.2	SLAM με επεκτεταμένα φίλτρα Kalman	344
10.2.1	Προπαρασκευή και υποθέσεις	344

10.2.2	SLAM με γνωστή αντιστοιχία	345
10.2.3	Μαθηματική απόδειξη του EKF SLAM	349
10.3	EKF SLAM με άγνωστες αντιστοιχίες	353
10.3.1	Ο γενικός αλγόριθμος EKF SLAM	353
10.3.2	Παραδείγματα	356
10.3.3	Επιλογή χαρακτηριστικών και διαχείριση χάρτη	359
10.4	Περίληψη	363
10.5	Βιβλιογραφικά σχόλια	364
10.6	Ασκήσεις	368
11	Ο αλγόριθμος GraphSLAM	371
11.1	Εισαγωγή	371
11.2	Περιγραφή	374
11.2.1	Δημιουργία του γραφήματος	374
11.2.2	Συμπερασμός	377
11.3	Ο αλγόριθμος GraphSLAM	380
11.4	Μαθηματική απόδειξη του GraphSLAM	386
11.4.1	Η εκ των υστέρων πιθανότητα του πλήρους SLAM	387
11.4.2	Η αρνητική λογαριθμική εκ των υστέρων πιθανότητα	388
11.4.3	Ανάπτυγμα Taylor	389
11.4.4	Κατασκευή της μορφής πληροφοριών	390
11.4.5	Μείωση (μεγέθους) της μορφής πληροφοριών	391
11.4.6	Ανάκτηση της διαδρομής και του χάρτη	394
11.5	Συσχέτιση δεδομένων στον GraphSLAM	396
11.5.1	Ο αλγόριθμος GraphSLAM με άγνωστη αντιστοιχία	397
11.5.2	Μαθηματική απόδειξη του ελέγχου αντιστοιχίας	399
11.6	Ζητήματα αποδοτικότητας	402
11.7	Πειραματική υλοποίηση	403
11.8	Εναλλακτικές τεχνικές βελτιστοποίησης	408
11.9	Περίληψη	411
11.10	Βιβλιογραφικά σχόλια	413
11.11	Ασκήσεις	415
12	Το αραιό επεκτεταμένο φίλτρο πληροφοριών	417
12.1	Εισαγωγή	417
12.2	Περιγραφή	420
12.3	Ο αλγόριθμος SEIF SLAM	423
12.4	Μαθηματική απόδειξη του SEIF	426
12.4.1	Ενημέρωση κίνησης	426
12.4.2	Ενημερώσεις μέτρησης	429

12.5	Αραίωση	430	
12.5.1	Γενική ιδέα	430	
12.5.2	Η αραίωση στα φίλτρα SEIF	431	
12.5.3	Μαθηματική απόδειξη της αραίωσης	433	
12.6	Αντισταθμιστική ανάκτηση χάρτη	434	
12.7	Πόσο αραιά πρέπει να είναι τα φίλτρα SEIF;	436	
12.8	Αυξητική συσχέτιση δεδομένων	439	
12.8.1	Υπολογισμός πιθανοτήτων της αυξητικής συσχέτισης δεδομένων	440	
12.8.2	Πρακτικά ζητήματα	442	
12.9	Συσχέτιση δεδομένων με διακλάδωση και οριοθέτηση	445	
12.9.1	Αναδρομική αναζήτηση	447	
12.9.2	Υπολογισμός τυχαίων πιθανοτήτων συσχέτισης δεδομένων	448	
12.9.3	Περιορισμοί ισοδυναμίας	450	
12.10	Πρακτικά ζητήματα	451	
12.11	Πολυρομποτικό SLAM	454	
12.11.1	Συγχώνευση χαρτών	455	
12.11.2	Μαθηματική απόδειξη της συγχώνευσης χαρτών	458	
12.11.3	Προσδιορισμός αντιστοιχίας	459	
12.11.4	Παράδειγμα	460	
12.12	Περίληψη	462	
12.13	Βιβλιογραφικά σχόλια	465	
12.14	Ασκήσεις	466	
13	Ο αλγόριθμος FastSLAM	469	
13.1	Ο βασικός αλγόριθμος	471	
13.2	Παραγοντοποίηση της εκ των υστέρων πιθανότητας του SLAM	473	
13.2.1	Μαθηματική απόδειξη της παραγοντοποιημένης εκ των υστέρων πιθανότητας του SLAM	474	
13.3	FastSLAM με γνωστή συσχέτιση δεδομένων	476	
13.4	Βελτίωση της κατανομής εισήγησης	481	
13.4.1	Επέκταση της εκ των υστέρων πιθανότητας της διαδρομής με δειγματοληψία μιας νέας στάσης	483	
13.4.2	Ενημέρωση των εκτιμήσεων για τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά	486	
13.4.3	Υπολογισμός των συντελεστών σπουδαιότητας	487	
13.5	Άγνωστη συσχέτιση δεδομένων	489	
13.6	Διαχείριση χάρτη	491	
13.7	Οι αλγόριθμοι FastSLAM	492	
13.8	Αποδοτική υλοποίηση	493	
13.9	FastSLAM για χάρτες βασισμένους σε χαρακτηριστικά	500	

13.9.1	Πειραματικές παρατηρήσεις	500
13.9.2	Κλείσιμο βρόχων	503
13.10	FastSLAM βασισμένος σε πλέγμα	507
13.10.1	Ο αλγόριθμος	507
13.10.2	Πειραματικές παρατηρήσεις	508
13.11	Περίληψη	511
13.12	Βιβλιογραφικά σχόλια	513
13.13	Ασκήσεις	515

IV Σχεδιασμός δράσης και έλεγχος 517

14 Διαδικασίες αποφάσεων Markov 519

14.1	Κίνητρα	519
14.2	Αβεβαιότητα στην επιλογή δράσης	522
14.3	Επανάληψη τιμών	527
14.3.1	Στόχοι και απολαβή	528
14.3.2	Εύρεση βέλτιστων πολιτικών ελέγχου για την πλήρως παρατηρήσιμη περίπτωση	532
14.3.3	Υπολογισμός της συνάρτησης τιμών	533
14.4	Εφαρμογή στον ρομποτικό έλεγχο	536
14.5	Περίληψη	540
14.6	Βιβλιογραφικά σχόλια	542
14.7	Ασκήσεις	543

15 Μερικώς παρατηρήσιμες διαδικασίες αποφάσεων Markov 547

15.1	Κίνητρα	547
15.2	Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα	549
15.2.1	Προπαρασκευή	549
15.2.2	Επιλογή ενέργειας ελέγχου	550
15.2.3	Αίσθηση	553
15.2.4	Πρόβλεψη	557
15.2.5	Ορίζοντες με βάθος και περικοπή	560
15.3	Ο αλγόριθμος POMDP για πεπερασμένους κόσμους	561
15.4	Μαθηματική απόδειξη των POMDP	564
15.4.1	Επανάληψη τιμών στον χώρο των πεποιθήσεων	564
15.4.2	Αναπαράσταση της συνάρτησης τιμών	566
15.4.3	Υπολογισμός της συνάρτησης τιμών	567
15.5	Πρακτικά ζητήματα	570
15.6	Περίληψη	574
15.7	Βιβλιογραφικά σχόλια	576
15.8	Ασκήσεις	578

16 Προσεγγιστικές τεχνικές POMDP	581
16.1 Κίνητρα	581
16.2 QMDP	582
16.3 Επαυξημένες διαδικασίες αποφάσεων Markov	584
16.3.1 Ο επαυξημένος χώρος καταστάσεων	584
16.3.2 Ο αλγόριθμος AMDP	585
16.3.3 Μαθηματική απόδειξη των AMDP	587
16.3.4 Εφαρμογή στην πλοήγηση κινητών ρομπότ	589
16.4 POMDP Μόντε Κάρλο	593
16.4.1 Χρήση συνόλων σωματιδίων	593
16.4.2 Ο αλγόριθμος MC-POMDP	594
16.4.3 Μαθηματική απόδειξη των MC-POMDP	596
16.4.4 Πρακτικά ζητήματα	597
16.5 Περίληψη	599
16.6 Βιβλιογραφικά σχόλια	600
16.7 Ασκήσεις	601
17 Εξερεύνηση	605
17.1 Εισαγωγή	605
17.2 Βασικοί αλγόριθμοι εξερεύνησης	607
17.2.1 Κέρδος πληροφορίας	607
17.2.2 Άπληστες τεχνικές	608
17.2.3 Εξερεύνηση Μόντε Κάρλο	609
17.2.4 Πολυβηματικές τεχνικές	610
17.3 Ενεργητικός εντοπισμός θέσης	611
17.4 Εξερεύνηση για εκμάθηση χαρτών πλέγματος κατάληψης	617
17.4.1 Υπολογισμός του κέρδους πληροφορίας	617
17.4.2 Διάδοση του κέρδους	621
17.4.3 Επέκταση σε πολυρομποτικά συστήματα	623
17.5 Εξερεύνηση για το πρόβλημα SLAM	629
17.5.1 Ανάλυση εντροπίας στον SLAM	629
17.5.2 Εξερεύνηση στον αλγόριθμο FastSLAM	631
17.5.3 Πειραματική απόδοση	634
17.6 Περίληψη	636
17.7 Βιβλιογραφικά σχόλια	638
17.8 Ασκήσεις	641
Βιβλιογραφία	643
Αγγλοελληνικό λεξικό όρων	671
Ευρετήριο	677