



Περιεχόμενα

Πρόλογος 15

1 Τι είναι ρομπότ; 21

2 Ποια είναι η προέλευση των ρομπότ; 29

2.1 Θεωρία ελέγχου 29

2.2 Κυβερνητική 30

2.2.1 Η Χελώνα του Grey Walter 31

2.2.2 Τα οχήματα του Braitenberg 35

2.3 Τεχνητή νοημοσύνη 37

3 Τι υπάρχει μέσα σε ένα ρομπότ; 45

3.1 Απόκτηση υλικής υπόστασης 46

3.2 Αίσθηση 48

3.3 Δράση 51

3.4 Εγκέφαλος και μύες 53

3.5 Αυτονομία 54

4 Βραχίονες, πόδια, τροχοί, ερπύστριες και αυτά που πραγματικά τα κινούν 57

4.1 Ενεργητική και παθητική κίνηση 58

4.2 Είδη μηχανισμών κίνησης 59

4.3	Κινητήρες	61
4.3.1	Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC)	61
4.3.2	Μετάδοση κίνησης με γρανάζια	64
4.3.3	Σερβοκινητήρες	67
4.4	Βαθμοί ελευθερίας	69
5	Προχωράτε!	79
5.1	Ευστάθεια	80
5.2	Κίνηση και βηματισμός	84
5.3	Τροχοί και κατεύθυνση	88
5.4	Μετακίνηση μέσω συγκεκριμένης ή αυθαίρετης διαδρομής	90
6	Πιάνοντας το άπιαστο!	95
6.1	Τελικά όργανα δράσης	95
6.2	Τηλεχειρισμός	97
6.3	Γιατί είναι δύσκολος ο χειρισμός;	100
7	Τι συμβαίνει στον κόσμο;	109
7.1	Επίπεδα επεξεργασίας	115
8	Ανάψτε το φως	127
8.1	Παθητικοί και ενεργοί αισθητήρες	127
8.2	Διακόπτες	128
8.3	Αισθητήρες φωτός	131
8.3.1	Πολωμένο φως	133
8.3.2	Φωτοαισθητήρες ανάκλασης	134
8.3.3	Αισθητήρες ανάκλασης	135
8.3.4	Υπέρυθρο φως	138
8.3.5	Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση του φωτός	139
8.3.6	Αισθητήρας διακοπής ακτίνας	140
8.3.7	Κωδικοποιητές άξονα	140
8.4	Ωμικοί αισθητήρες θέσης	145
8.4.1	Ποτενσιόμετρα	145

9	Ηχοβολιστικά, λέιζερ και κάμερες	149
9.1	Αισθητήρες υπερήχων, ή αλλιώς ηχοβολιστικά	150
9.1.1	Τα ηχοβολιστικά πέρα και πριν από τη ρομποτική	153
9.1.2	Κατοπτρικές ανακλάσεις	156
9.2	Αισθητήρες λέιζερ	159
9.3	Οπτικοί αισθητήρες	163
9.3.1	Κάμερες	165
9.3.2	Ανίχνευση ακμών	167
9.3.3	Όραση βασισμένη σε μοντέλα	170
9.3.4	Όραση βασισμένη σε κίνηση	172
9.3.5	Στερεοσκοπία	173
9.3.6	Υφή, φωτοσκίαση και περιγράμματα	175
9.3.7	Βιολογική όραση	176
9.3.8	Ρομποτική όραση	178
10	Διατηρήστε τον έλεγχο	183
10.1	Έλεγχος ανατροφοδότησης ή έλεγχος κλειστού βρόχου	183
10.2	Οι πολλές όψεις του σφάλματος	185
10.3	Παράδειγμα ενός ρομπότ με έλεγχο ανατροφοδότησης	187
10.4	Είδη ελέγχου ανατροφοδότησης	190
10.4.1	Αναλογικός έλεγχος	190
10.4.2	Έλεγχος παραγώγου	192
10.4.3	Έλεγχος ολοκλήρωσης	193
10.4.4	Ελεγκτές PD και PID	195
10.5	Έλεγχος πρόσθιας τροφοδότησης ή ανοικτού βρόχου	196
11	Τα δομικά συστατικά του ελέγχου	201
11.1	Ποιος χρειάζεται τις αρχιτεκτονικές ελέγχου;	202
11.2	Γλώσσες προγραμματισμού ρομπότ	205
11.3	Οι αρχιτεκτονικές είναι...	207
11.3.1	Χρόνος	209
11.3.2	Τμηματοποίηση	210
11.3.3	Αναπαράσταση	211

- 12 Τι έχετε στο μυαλό σας; 213**
- 12.1 Οι πολλοί τρόποι δημιουργίας ενός χάρτη 214
 - 12.2 Τι μπορεί να αναπαραστήσει το ρομπότ; 216
 - 12.3 Το κόστος της αναπαράστασης 218
- 13 Σκεφτείτε καλά πριν ενεργήσετε 221**
- 13.1 Τι είναι ο σχεδιασμός ενεργειών; 222
 - 13.2 Το «κόστος» του σχεδιασμού ενεργειών 225
- 14 Μη σκέφτεστε, αντιδράστε! 233**
- 14.1 Επιλογή ενέργειας 240
 - 14.2 Αρχιτεκτονική υπαγωγής 243
 - 14.3 Το ρομπότ Herbert 247
- 15 Σκεφτείτε και ενεργήστε ξεχωριστά και παράλληλα 255**
- 15.1 Αντιμετώπιση των αλλαγών στον κόσμο, το χάρτη, την εργασία 258
 - 15.2 Σχεδιασμός και επανασχεδιασμός 259
 - 15.3 Αποφυγή του επανασχεδιασμού 260
 - 15.4 Σχεδιασμός κατά τη λειτουργία και εκτός λειτουργίας 262
- 16 Σκεφτείτε με τον τρόπο που ενεργείτε 267**
- 16.1 Κατανεμημένη αναπαράσταση 275
 - 16.2 Το παράδειγμα της κατανεμημένης χαρτογράφησης 275
 - 16.2.1 Το ρομπότ Τότο 276
 - 16.2.2 Το Τότο και η πλοήγηση 277
 - 16.2.3 Το Τότο και η ανίχνευση οροσίων 279
 - 16.2.4 Το Τότο και η χαρτογράφηση 280
 - 16.2.5 Το Τότο και ο σχεδιασμός διαδρομής στο χάρτη συμπεριφορών 284
 - 16.2.6 Το Τότο και η κίνησή του με βάση το χάρτη 286

17 Διδάξτε στο ρομπότ σας να συμπεριφέρεται 293

- 17.1 Διαιτησία συμπεριφοράς: επιλογή 294
- 17.2 Συγκρασμός συμπεριφορών: άθροισμα 295

18 Όταν συμβαίνει το απροσδόκητο 301

- 18.1 Το παράδειγμα της αναδυόμενης κίνησης κατά μήκος τοίχων 302
- 18.2 Το όλον είναι μεγαλύτερο 303
- 18.3 Τα στοιχεία της ανάδυσης 305
- 18.4 Περιμένοντας το απροσδόκητο 305
- 18.5 Η προβλεψιμότητα της έκπληξης 306
- 18.6 Καλή και κακή αναδυόμενη συμπεριφορά 308
- 18.7 Αρχιτεκτονικές και ανάδυση 310

19 Μετακίνηση και πλοήγηση 313

- 19.1 Εντοπισμός θέσης 316
- 19.2 Αναζήτηση και σχεδιασμός διαδρομής 320
- 19.3 Ταυτόχρονος εντοπισμός θέσης και χαρτογράφηση (SLAM) 322
- 19.4 Κάλυψη 323

20 Εμπρός, ομάδα! 327

- 20.1 Πλεονεκτήματα της ομαδικής εργασίας 329
- 20.2 Προκλήσεις της ομαδικής δουλειάς 331
- 20.3 Είδη συνόλων και ομάδων 333
- 20.4 Επικοινωνία 339
 - 20.4.1 Αναγνώριση συγγενή 346
- 20.5 Ομαδικό παιχνίδι 347
 - 20.5.1 Εγώ είμαι το αφεντικό: Κεντρικός έλεγχος 347
 - 20.5.2 Βρείτε λύση ως ομάδα: Κατανεμημένος έλεγχος 348
- 20.6 Αρχιτεκτονικές ελέγχου ομάδων ρομπότ 350
 - 20.6.1 Ιεραρχίες επικράτησης 352

21	Από το καλό στο καλύτερο	357
21.1	Ενισχυτική μάθηση	359
21.2	Μάθηση με επίβλεψη	364
21.3	Μάθηση με μίμηση/μέσω επίδειξης	367
21.4	Μάθηση και λήθη	372
22	Ποιο είναι το επόμενο βήμα;	377
22.1	Ρομποτική διαστήματος	381
22.2	Χειρουργικά ρομπότ	383
22.3	Αυτό-επαναδιαμορφώσιμη ρομποτική	386
22.4	Ρομποτική ανθρωποειδών	387
22.5	Κοινωνική ρομποτική και αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ	388
22.6	Ρομποτική εξυπηρέτησης, αρωγής και αποκατάστασης	391
22.7	Εκπαιδευτική ρομποτική	395
22.8	Ηθικές επιπτώσεις	397
	Βιβλιογραφία	403
	Γλωσσάρι	429
	Λεξικό όρων	421
	Ευρετήριο	429

10 Διατηρήστε τον έλεγχο

Έλεγχος ανατροφοδότησης

Μέχρι τώρα, μιλήσαμε για το σώμα των ρομπότ, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων και των οργάνων δράσης. Ήρθε η στιγμή να ασχοληθούμε με τον εγκέφαλό τους, τους ελεγκτές που λαμβάνουν τις αποφάσεις και καθορίζουν τις ενέργειες των ρομπότ.

Θα θυμάστε από το Κεφάλαιο 2 ότι η θεωρία ελέγχου υπήρξε μία από τις θεμελιώδεις θεματικές περιοχές της ρομποτικής, καθώς και ότι ο έλεγχος ανατροφοδότησης αποτελεί βασικό συστατικό κάθε πραγματικού ρομπότ. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα μάθουμε τις αρχές του ελέγχου ανατροφοδότησης και μερικές μαθηματικές έννοιες που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των ελεγκτών ανατροφοδότησης σε οποιοδήποτε σύστημα, από τις ατμομηχανές έως τα σύγχρονα ρομπότ.

10.1 Έλεγχος ανατροφοδότησης ή έλεγχος κλειστού βρόχου

ΈΛΕΓΧΟΣ
ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟ-
ΤΗΣΗΣ

ΣΗΜΕΙΟ
ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Ο έλεγχος ανατροφοδότησης είναι ένας τρόπος ελέγχου ενός συστήματος (ενός ρομπότ) με τρόπο ώστε να πετυχαίνει και να διατηρεί μια επιθυμητή κατάσταση, που συνήθως ονομάζεται *σημείο αναφοράς*, μέσα από τη συνεχή σύγκριση της τρέχουσας κατάστασης με την επιθυμητή.

ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟ- ΤΗΣΗ	Ο όρος <i>ανατροφοδότηση</i> αναφέρεται στις πληροφορίες που επιστρέφουν, κυριολεκτικά ανατροφοδοτούνται, στον ελεγκτή του συστήματος. Το πιο γνωστό παράδειγμα συστήματος ελέγχου είναι ο θερμοστάτης. Αν και είναι δύσκολο να περιγράψουμε τις έννοιες της θεωρίας ελέγχου χωρίς να αναφερθούμε στους θερμοστάτες, εμείς θα το τολμήσουμε, αφού γνωρίζουμε ήδη ότι οι θερμοστάτες δεν είναι ρομπότ.
ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	Η <i>επιθυμητή κατάσταση</i> του συστήματος, που ονομάζεται και <i>κατάσταση-στόχος</i>, είναι η κατάσταση στην οποία θέλει να μεταβεί το σύστημα. Δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι η συγκεκριμένη έννοια είναι θεμελιώδης στα συστήματα που οδηγούνται από το στόχο (goal-driven) και επομένως χρησιμοποιείται τόσο στη θεωρία ελέγχου, όσο και στην ΤΝ, δύο πολύ διαφορετικά πεδία, όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 2. Στην ΤΝ, οι στόχοι χωρίζονται σε δύο τύπους: τους στόχους επίτευξης και τους στόχους διατήρησης.
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ- ΣΤΟΧΟΣ	Οι <i>στόχοι επίτευξης</i> είναι καταστάσεις στις οποίες προσπαθεί να μεταβεί το σύστημα, όπως μια συγκεκριμένη τοποθεσία (π.χ., το τέλος ενός λαβυρίνθου). Μόλις το σύστημα φτάσει στο στόχο επίτευξης, η εργασία του έχει ολοκληρωθεί και δεν χρειάζεται να κάνει κάτι άλλο. Η ΤΝ ασχολείται παραδοσιακά (όχι όμως και αποκλειστικά) με τους στόχους επίτευξης.
ΣΤΟΧΟΣ ΕΠΙΤΕΥΞΗΣ	Οι <i>στόχοι διατήρησης</i>, από την άλλη, απαιτούν συνεχή, ενεργή εργασία από την πλευρά του συστήματος. Ένας στόχος διατήρησης, για παράδειγμα, είναι η διατήρηση της ισορροπίας και της κίνησης ενός δίποδου ρομπότ. Αν το ρομπότ σταματήσει, θα πέσει κάτω και θα χάσει το στόχο της ισορροπημένης κίνησης. Η κίνηση του ρομπότ κατά μήκος τοίχων είναι ένας άλλος στόχος διατήρησης. Αν το ρομπότ σταματήσει, χάνει το στόχο της κίνησης παράλληλα με τον τοίχο. Η θεωρία ελέγχου ασχολείται παραδοσιακά (όχι όμως και αποκλειστικά) με τους στόχους διατήρησης.
ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ	Η κατάσταση-στόχος ενός συστήματος μπορεί να σχετίζεται με την εσωτερική ή την εξωτερική κατάσταση του συστήματος, ή και με τις δύο. Για παράδειγμα, ο εσωτερικός στόχος του ρομπότ μπορεί να είναι η διατήρηση της στάθμης της μπαταρίας του σε κάποια επιθυμητά επίπεδα και η επαναφόρτισή της όταν η στάθ-

μη πέφτει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Αντίθετα, η εξωτερική κατάσταση-στόχος του ρομπότ μπορεί να είναι η μετάβαση σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, όπως η κουζίνα. Μερικές καταστάσεις-στόχος συνδυάζουν την εσωτερική με την εξωτερική κατάσταση, όπως η κατάσταση-στόχος που απαιτεί από το ρομπότ να διατηρεί το χέρι του σε έκταση, ισορροπώντας πάνω σε αυτό ένα στύλο. Η κατάσταση του χεριού είναι εσωτερική (παρόλο που μπορεί να παρατηρηθεί από έξω), ενώ η κατάσταση του στύλου είναι εξωτερική. Η κατάσταση-στόχος μπορεί να έχει αυθαίρετη πολυπλοκότητα και να επιβάλλει ποικίλες απαιτήσεις και περιορισμούς. Οτιδήποτε μπορεί να επιτευχθεί ή να διατηρηθεί από το ρομπότ, μπορεί να τεθεί ως στόχος. Ακόμη και πράγματα που δεν μπορεί να κάνει το ρομπότ μπορεί να οριστούν ως στόχοι, αν και μηεπιτεύξιμοι. Το ρομπότ μπορεί να προσπαθεί συνεχώς να τους πετύχει, χωρίς να τα καταφέρνει. Είναι καλό να αγωνίζεται κανείς σκληρά.

Επομένως, όταν η τρέχουσα κατάσταση ταυτίζεται με την κατάσταση-στόχο, το σύστημα δεν χρειάζεται να κάνει κάτι. Όταν όμως η τρέχουσα κατάσταση δεν ταυτίζεται με την κατάσταση στόχο, όπως συμβαίνει τις περισσότερες φορές, πώς αποφασίζει το σύστημα τι πρέπει να κάνει; Σε αυτό το σημείο υπεισέρχεται ο σχεδιασμός του ελεγκτή.

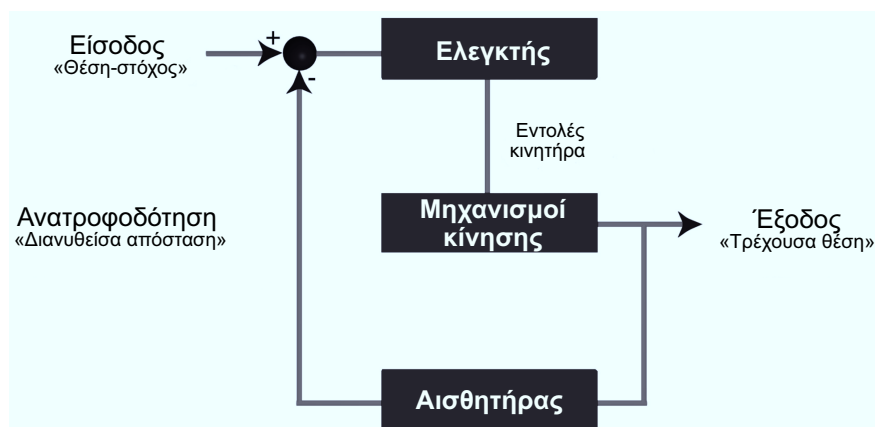
10.2

Οι πολλές όψεις του σφάλματος

ΣΦΑΛΜΑ

Η διαφορά μεταξύ της τρέχουσας και της επιθυμητής κατάστασης ενός συστήματος ονομάζεται *σφάλμα*. Στόχος κάθε συστήματος ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση αυτού του σφάλματος. Ο έλεγχος ανατροφοδότησης υπολογίζει το σφάλμα και ενημερώνει το σύστημα, προκειμένου να το βοηθήσει στην επίτευξη του στόχου του. Όταν το σφάλμα είναι μηδέν (ή αρκετά μικρό), η κατάσταση-στόχος έχει επιτευχθεί. Η Εικόνα 10.1 παρουσιάζει το σχεδιάγραμμα ενός τυπικού συστήματος ελέγχου ανατροφοδότησης.

Ένα πραγματικό παράδειγμα σφάλματος και ανατροφοδότησης είναι το γνωστό παιχνίδι «κρύο ή ζέστη», στο οποίο πρέπει να βρείτε ή να μαντέψετε πού βρίσκεται ένα κρυμμένο αντικείμενο ακολουθώντας τις οδηγίες των φίλων σας, που χρησιμοποιούν



Εικόνα 10.1 Διάγραμμα ενός τυπικού ελεγκτή ανατροφοδότησης.

λέξεις όπως «ζέστη, πολύ ζέστη, κρύο, πολύ κρύο», κ.ο.κ. (Εντάξει, μπορεί να αναφερόμαστε σε θερμοκρασίες, αλλά δεν είπαμε τίποτα για θερμοστάτες). Στην πραγματικότητα, αυτό που κάνουν οι φίλοι σας είναι να υπολογίζουν το σφάλμα και να σας ανατροφοδοτούν με αυτό.

Φανταστείτε τώρα μια πιο πεζή έκδοση του παιχνιδιού, στην οποία οι άλλοι σας λένε απλώς «έφτασες, νίκησες» ή «δεν έφτασες ακόμη». Σε αυτήν την περίπτωση, απλώς υπολογίζουν αν το σφάλμα είναι μηδέν ή όχι, αν δηλαδή επιτεύχθηκε η κατάσταση-στόχος ή όχι. Αυτή η πληροφορία όμως δεν σας βοηθά να επιλέξετε την κατεύθυνση στην οποία πρέπει να κινηθείτε για να πλησιάσετε το στόχο, δηλαδή να ελαχιστοποιήσετε το σφάλμα.

Το να γνωρίζετε αν το σφάλμα είναι μηδέν ή όχι είναι καλύτερο από το να μη γνωρίζετε τίποτα, όχι όμως κατά πολύ. Στην αυθεντική έκδοση του παιχνιδιού, όπου τα μηνύματα είναι «κρύο ή ζέστη», ενημερώνεστε για την κατεύθυνση του σφάλματος, η οποία επιτρέπει την ελαχιστοποίηση του σφάλματος και την προσέγγιση του στόχου.

Παρεμπιπτόντως, στο Κεφάλαιο 21 θα μάθουμε πώς σχετίζεται η έννοια της ανατροφοδότησης με τις βασικές αρχές της ενισχυτικής μάθησης. Αν αντικαταστήσετε τη λέξη «ζέστη» με τη φράση «καλό ρομπότ» και τη λέξη «κρύο» με τη φράση «κακό ρομπότ», θα πάρετε μια ιδέα για το πώς λειτουργούν κάποιες μορφές μάθησης.

ΜΕΤΡΟ ΤΟΥ
ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Όταν το σύστημα γνωρίζει πόσο μακριά είναι από το στόχο, γνωρίζει το *μέτρο του σφάλματος*, δηλαδή την απόσταση μέχρι την κατάσταση-στόχο. Στο παιχνίδι «κρύο ή ζέστη», οι διαβαθμίσεις του κρύου και της ζέστης χρησιμοποιούνται ως ενδείξεις της απόστασης (ή της εγγύτητας) του αντικειμένου-στόχου.

Μπορούμε να τα πάμε ακόμη καλύτερα, αν έχουμε και άλλες πληροφορίες εκτός από το μέγεθος του σφάλματος. Αν το σύστημα λάβει την ακριβή κατεύθυνση και το ακριβές μέτρο του σφάλματος, παίρνει ακριβείς οδηγίες για το πώς θα φτάσει στο στόχο. Ας επιστρέψουμε στο παιχνίδι «κρύο ή ζέστη». Αν οι φίλοι σας σάς έλεγαν «Στρίψε προς την πόρτα, προχώρα στην κουζίνα, άνοιξε τον καταψύκτη και κοίτα κάτω από την παγοθήκη», δεν θα ήταν πια παιχνίδι. Για τα ρομπότ, από την άλλη, ποσότητες πληροφοριών όπως αυτές διευκολύνουν μεν τον έλεγχο ή τη μάθηση, αλλά δεν τα καθιστούν τετριμμένα.

Όπως καταλαβαίνετε, ο έλεγχος γίνεται ευκολότερος όταν το ρομπότ λαμβάνει συχνά αρκετές και ακριβείς πληροφορίες ανατροφοδότησης σχετικά με το σφάλμα του. Ας το εξετάσουμε όμως αυτό μέσα από το παράδειγμα ενός ρομπότ με αποστολή να κινείται κατά μήκος τοίχων.

10.3

**Παράδειγμα ενός ρομπότ με
έλεγχο ανατροφοδότησης**

Πώς θα προγραμματίζατε τον ελεγκτή ενός ρομπότ με αποστολή να κινείται κατά μήκος τοίχων (wall-following) χρησιμοποιώντας τον έλεγχο ανατροφοδότησης;

Το πρώτο βήμα είναι να εξετάσετε το στόχο της αποστολής. Στο παράδειγμα της κίνησης κατά μήκος τοίχων, κατάσταση-στόχος είναι κάθε κατάσταση στην οποία το ρομπότ βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση (ή εύρος αποστάσεων) από τον τοίχο. Πρόκειται για στόχο διατήρησης, καθώς η κίνηση κατά μήκος ενός τοίχου αφορά τη διατήρηση αυτής της απόστασης από τον τοίχο στη διάρκεια του χρόνου.

Δεδομένου του στόχου, είναι εύκολο να υπολογιστεί το σφάλμα. Στην περίπτωση της κίνησης κατά μήκος τοίχων, το σφάλμα είναι η διαφορά ανάμεσα στην επιθυμητή και την πραγματική

απόσταση από τον τοίχο κάθε χρονική στιγμή. Το ρομπότ βρίσκεται στην κατάσταση-στόχο μόνο όταν βρίσκεται στην επιθυμητή απόσταση (ή εύρος αποστάσεων) από τον τοίχο.

Τώρα που εξετάσαμε την αποστολή, είμαστε έτοιμοι να προγραμματίσουμε τον ελεγκτή του ρομπότ. Αλλά πριν το κάνουμε, ας εξετάσουμε και τους αισθητήρες, καθώς αυτοί είναι που παρέχουν τις πληροφορίες για τον υπολογισμό των καταστάσεων και του σφάλματος.

Τι αισθητήρες θα χρησιμοποιούσατε σε ένα ρομπότ με αποστολή να κινείται κατά μήκος τοίχων και τι είδους πληροφορίες θα παρείχαν;

Άραγε θα παρείχαν το μέτρο και την κατεύθυνση του σφάλματος, μόνο το μέτρο, ή μήπως τίποτα από τα δύο; Ένας αισθητήρας επαφής θα παρείχε στο ρομπότ την ελάχιστη δυνατή πληροφορία (Τι περιμένετε; Ένας απλός αισθητήρας είναι!): Θα ενημέρωνε το ρομπότ μόνο για το αν προσέκρουσε σε τοίχο. Επομένως, το ρομπότ θα αντιλαμβανόταν τον τοίχο μόνο μέσω της επαφής, όχι από απόσταση. Ένας αισθητήρας υπερύθρων θα παρείχε στο ρομπότ πληροφορίες για την πιθανή ύπαρξη τοίχου, όχι όμως και για την ακριβή απόσταση μέχρι τον τοίχο. Ένα ηχοβολιστικό, όπως και ένα λέιζερ, θα παρείχε στο ρομπότ πληροφορίες απόστασης. Και ένα σύστημα στερεοσκοπικής όρασης θα μπορούσε να παρέχει πληροφορίες απόστασης, επιτρέποντας την ανακατασκευή περισσότερων χαρακτηριστικών του τοίχου, αλλά αυτό θα ήταν υπερβολικό για τη δεδομένη αποστολή. Όπως καταλαβαίνετε, οι αισθητήρες καθορίζουν τον τύπο της ανατροφοδότησης που παρέχεται στο ρομπότ.

Υποθέστε τώρα, ανεξάρτητα από τον τύπο αισθητήρα που θα επιλέξετε, ότι αυτός παρέχει στο ρομπότ τις απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό της απόστασης μέχρι τον τοίχο. Στόχος του ρομπότ είναι να διατηρεί αυτήν την απόσταση σε συγκεκριμένη τιμή ή, πιο ρεαλιστικά, μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών (π.χ., μεταξύ 60 και 100 εκατοστών). Τώρα, μπορούμε να προγραμματίσουμε τον ελεγκτή ανατροφοδότησης του ρομπότ με τη μορφή τυπικών προτάσεων συνθήκης αν-τότε-αλλιώς, που χρησιμοποιούνται στον προγραμματισμό, όπως η ακόλουθη:

Αν η απόσταση μέχρι τον τοίχο είναι στο σωστό εύρος τιμών, τότε συνέχισε να κινείται.

Αν η απόσταση μέχρι τον τοίχο είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή, τότε κινήσου προς τον τοίχο, αλλιώς απομακρύνσου από τον τοίχο.

Λαμβάνοντας υπόψη τον παραπάνω αλγόριθμο, ποια θα είναι η συμπεριφορά του ρομπότ; Θα συνεχίσει να κινείται και να ταλαντεύεται καθώς προχωρά. Πόσο όμως θα ταλαντεύεται; Αυτό εξαρτάται από δύο παραμέτρους: τη συχνότητα υπολογισμού του σφάλματος και το μέγεθος της διόρθωσης (στροφής) που θα εφαρμόζεται κάθε φορά.

Ας περάσουμε τώρα σε έναν άλλο ελεγκτή:

Αν η απόσταση μέχρι τον τοίχο έχει την επιθυμητή τιμή, τότε συνέχισε να κινείται.

Αν η απόσταση μέχρι τον τοίχο είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή, τότε στρέψου 45 μοίρες προς τον τοίχο, αλλιώς στρέψου 45 μοίρες μακριά από τον τοίχο.

Ο παραπάνω αλγόριθμος δεν είναι ιδιαίτερα έξυπνος. Γιατί; Θα καταλάβετε αμέσως αν ζωγραφίσετε έναν τοίχο και ένα ρομπότ και ακολουθήσετε τους παραπάνω κανόνες για λίγες μόνο επαναλήψεις, ώστε να δείτε πώς θα είναι η διαδρομή που θα ακολουθήσει το ρομπότ. Το ρομπότ θα ταλαντεύεται πολύ και σπάνια, αν όχι ποτέ, θα φτάνει στην επιθυμητή απόσταση από τον τοίχο, πριν πλησιάσει πολύ κοντά ή απομακρυνθεί πολύ από αυτόν.

Γενικά, η συμπεριφορά οποιουδήποτε απλού συστήματος ανατροφοδότησης ταλαντεύεται γύρω από την επιθυμητή κατάσταση (ακόμη και στην περίπτωση των θερμοστατών). Επομένως, το ρομπότ θα ταλαντεύεται γύρω από την επιθυμητή απόσταση από τον τοίχο και την περισσότερη ώρα θα βρίσκεται είτε πολύ κοντά, είτε πολύ μακριά.

Πώς μπορούμε να μειώσουμε την ταλάντωση;

Υπάρχουν κάποια πράγματα που μπορούμε να κάνουμε. Το πρώτο είναι να φροντίσουμε να υπολογίζεται το σφάλμα συχνά, ώστε το ρομπότ να στρίβει συχνά και όχι σπάνια. Το δεύτερο είναι να ορίσουμε μια μικρή γωνία στροφής, ώστε το ρομπότ να μη στρίβει κατά μεγάλες γωνίες. Μια άλλη ιδέα είναι να βρούμε το εύρος αποστάσεων που προσδιορίζει το στόχο του ρομπότ. Οι

ΡΥΘΜΟΣ
ΔΕΙΓΜΑΤΟ-
ΛΗΨΙΑΣ

αποφάσεις σχετικά με τη συχνότητα υπολογισμού του σφάλματος, το μέγεθος της γωνίας στροφής και τον τρόπο καθορισμού του εύρους αποστάσεων εξαρτώνται από τις εξής παραμέτρους του ρομποτικού συστήματος: την ταχύτητα κίνησης του ρομπότ, την εμβέλεια των αισθητήρων του και το ρυθμό αίσθησης και υπολογισμού των νέων αποστάσεων μέχρι τον τοίχο, που ονομάζεται ρυθμός δειγματοληψίας.

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων ελέγχου είναι ένα αναγκαίο, πολύ σημαντικό και χρονοβόρο μέρος του σχεδιασμού ρομποτικών ελεγκτών.

Η θεωρία ελέγχου παρέχει ένα τυπικό πλαίσιο για τη σωστή χρήση των παραμέτρων, προκειμένου οι ελεγκτές να είναι αποδοτικοί. Ας μάθουμε πώς γίνεται αυτό.

10.4

Είδη ελέγχου ανατροφοδότησης

Τα τρία πιο κοινά είδη ελέγχου ανατροφοδότησης είναι ο αναλογικός έλεγχος (P), ο αναλογικός έλεγχος παραγώγου (PD) και ο αναλογικός έλεγχος ολοκλήρωσης - παραγώγου (PID). Συνήθως, αναφέρονται απλώς ως έλεγχοι P , PD και PID . Ας μάθουμε κάποια πράγματα για καθέναν από αυτούς, χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα το ρομπότ που κινείται κατά μήκος τοίχων.

10.4.1

Αναλογικός έλεγχος

ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΣ
ΕΛΕΓΧΟΣ

Η βασική ιδέα του αναλογικού ελέγχου είναι η απόκριση του συστήματος ανάλογα με το σφάλμα, χρησιμοποιώντας τόσο την κατεύθυνση, όσο και το μέτρο του σφάλματος. Ένας αναλογικός ελεγκτής παράγει έξοδο o ανάλογη της εισόδου του, i , και γράφεται τυπικά ως εξής:

$$o = K_p i$$

Η K_p είναι μια σταθερά αναλογικότητας, που εξασφαλίζει συνήθως την ορθή λειτουργία του συστήματος και υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου. Παράμετροι όπως αυτή υπάρχουν σε αφθονία στον έλεγχο και συνήθως ρυθμίζονται μέσω της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος και μέσω βαθμονόμησης.

Τι μορφή θα είχε ένας αναλογικός ελεγκτής για το δικό μας ρομπότ που κινείται κατά μήκος τοίχων;

Θα χρησιμοποιούσε την απόσταση μέχρι τον τοίχο ως παράμετρο για να καθορίσει τη γωνία και την απόσταση και/ή την ταχύτητα με την οποία θα έστριβε το ρομπότ. Όσο μεγαλύτερο το σφάλμα, τόσο μεγαλύτερη η γωνία στροφής και η ταχύτητα και/ή η απόσταση. Όσο μικρότερο το σφάλμα, τόσο μικρότερη η γωνία στροφής και η ταχύτητα και/ή η απόσταση.

ΑΠΟΛΑΒΗ

Στη θεωρία ελέγχου, οι παράμετροι που καθορίζουν το μέτρο της απόκρισης του συστήματος ονομάζονται *απολαβές*. Ο καθορισμός των κατάλληλων απολαβών είναι συνήθως πολύ δύσκολος και απαιτεί τόσο την εφαρμογή της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος, όσο και συνεχείς βαθμονομήσεις του συστήματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν το σύστημα είναι απλό, οι απολαβές μπορούν να υπολογιστούν με μαθηματικό τρόπο, αλλά αυτό είναι σπάνιο.

ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ
ΑΠΟΛΑΒΗ

Η απολαβή με τιμή ανάλογη προς την τιμή του σφάλματος ονομάζεται *αναλογική απολαβή*. Όπως είδαμε στην περίπτωση του ρομπότ που κινείται κατά μήκος τοίχων, οι λανθασμένες τιμές στις απολαβές οδηγούν το σύστημα στο να υπερβεί ή να μη φτάσει στην επιθυμητή κατάσταση. Οι τιμές των απολαβών καθορίζουν αν το ρομπότ θα συνεχίσει να ταλαντεύεται ή θα σταθεροποιηθεί τελικά στην επιθυμητή κατάσταση.

ΑΠΟΣΒΕΣΗ

Η *απόσβεση* αναφέρεται στη διαδικασία της συστηματικής μείωσης των ταλαντώσεων. Η απόσβεση των ταλαντώσεων σε ένα σύστημα είναι σωστή όταν το σύστημα δεν ταλαντεύεται εκτός ελέγχου. Αυτό σημαίνει είτε ότι δεν υπάρχουν καθόλου ταλαντώσεις (πράγμα πολύ σπάνιο), είτε ότι αυτές μειώνονται σταδιακά προς την επιθυμητή κατάσταση, μέσα σε λογικά χρονικά πλαίσια. Η σωστή απόσβεση των ταλαντώσεων ενός συστήματος προϋποθέτει τη ρύθμιση των απολαβών. Αυτή η διαδικασία ρύθμισης αφορά κάθε συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου (ρομποτικό ή άλλο είδους) ξεχωριστά.

Κατά τη ρύθμιση των απολαβών, θα πρέπει να έχετε στο μυαλό σας τόσο τις φυσικές, όσο και τις υπολογιστικές ιδιότητες του συστήματος. Για παράδειγμα, η απόκριση του κινητήρα στις εντολές ταχύτητας παίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο, όπως επί-

ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ
ΚΙΝΗΣΗΣ

σης ο τζόγος και η τριβή στα γρανάζια (θυμάστε το Κεφάλαιο 4;), κ.ο.κ. Οι φυσικές ιδιότητες του ρομπότ επηρεάζουν τις ακριβείς τιμές των απολαβών, επειδή περιορίζουν τις πραγματικές ενέργειες του συστήματος ως απόκριση σε μια εντολή. Η *αβεβαιότητα του μηχανισμού κίνησης* καθιστά αδύνατο για ένα ρομπότ (ή για έναν άνθρωπο) να γνωρίζει από πριν το ακριβές αποτέλεσμα μιας ενέργειας, ακόμη και για μια απλή ενέργεια όπως «Προχώρα ένα μέτρο». Παρόλο που η αβεβαιότητα στους μηχανισμούς κίνησης δεν μας επιτρέπει να προβλέπουμε τα ακριβή αποτελέσματα των ενεργειών, μπορούμε να τα εκτιμήσουμε και να τα μαντέψουμε αρκετά καλά βάσει των πιθανοτήτων, αρκεί βέβαια να έχουμε αρκετές πληροφορίες για το σύστημα, ώστε να ορίσουμε τις πιθανότητες σωστά. Για περισσότερες πηγές σχετικά με την πιθανοκρατική ρομποτική, δείτε την τελευταία ενότητα του κεφαλαίου.

10.4.2 Έλεγχος παραγώγου

Όπως είδαμε παραπάνω, η ρύθμιση των απολαβών είναι μια δύσκολη διαδικασία και η αύξηση της αναλογικής απολαβής, από μόνη της, δεν εξαλείφει τα προβλήματα ταλάντωσης σε ένα σύστημα ελέγχου. Αν και αυτό μπορεί να είναι αποτελεσματικό στην περίπτωση μικρών απολαβών (τις λεγόμενες χαμηλές απολαβές – μια απολαβή χαρακτηρίζεται ως υψηλή ή χαμηλή), όσο αυξάνεται η απολαβή, αυξάνεται και η ταλάντωση του συστήματος. Το βασικό πρόβλημα έχει να κάνει με την απόσταση από το σημείο αναφοράς, δηλαδή την επιθυμητή κατάσταση: *Ο έλεγχος ενός συστήματος πρέπει να είναι διαφορετικός όταν αυτό είναι κοντά στην επιθυμητή κατάσταση απ' ό,τι όταν είναι μακριά της*. Διαφορετικά, η ορμή που παράγεται από την απόκριση του ελεγκτή στο σφάλμα, δηλαδή η διόρθωση του σφάλματος, μεταφέρει το σύστημα πέρα από την επιθυμητή κατάσταση προκαλώντας ταλαντώσεις. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η διόρθωση της ορμής την ώρα που το σύστημα προσεγγίζει την επιθυμητή κατάσταση.

Ας θυμηθούμε όμως πρώτα τι είναι η ορμή:

$$\text{Ορμή} = \text{μάζα} * \text{ταχύτητα}$$

Επειδή η ορμή και η ταχύτητα είναι ευθέως ανάλογες (όσο πιο γρήγορα κινείστε και/ή όσο μεγαλύτεροι είστε, τόσο μεγαλύτερη είναι η ορμή σας), μπορούμε να ελέγξουμε την ορμή ελέγχοντας την ταχύτητα του συστήματος. Καθώς το σύστημα πλησιάζει την επιθυμητή κατάσταση, αφαιρούμε μια ποσότητα ανάλογη της ταχύτητας:

$$- (\text{απολαβή} * \text{ταχύτητα})$$

ΌΡΟΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΟΥ

Η συγκεκριμένη ποσότητα ονομάζεται *όρος παραγώγου* (derivative term), επειδή η ταχύτητα είναι η παράγωγος (ο ρυθμός μεταβολής) της θέσης. Ένας ελεγκτής που χρησιμοποιεί έναν όρο παραγώγου ονομάζεται ελεγκτής παραγώγου, ή αλλιώς ελεγκτής D , από την αγγλική λέξη *derivative*.

Ο ελεγκτής παραγώγου παράγει έξοδο o ανάλογη προς την παράγωγο της εισόδου του, i , και γράφεται τυπικά ως εξής:

$$o = K_d \frac{di}{dt}$$

Η K_d είναι μια σταθερά αναλογικότητας, όπως η K_p που είδαμε παραπάνω, μόνο με διαφορετικό όνομα, για να μην υποθέσετε ότι μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τον ίδιο αριθμό και στις δύο εξισώσεις.

Μια διαισθητική ερμηνεία του ελέγχου παραγώγου είναι ότι ο ελεγκτής διορθώνει την ορμή του συστήματος καθώς αυτό προσεγγίζει την επιθυμητή κατάσταση. Ας εφαρμόσουμε αυτήν την ιδέα στο ρομπότ που κινείται κατά μήκος τοίχων. Ένας ελεγκτής παραγώγου θα επιβράδυνε το ρομπότ και θα μείωνε τη γωνία στροφής όσο η απόσταση του ρομπότ από τον τοίχο θα πλησίαζε περισσότερο στην επιθυμητή κατάσταση, δηλαδή τη βέλτιστη απόσταση από τον τοίχο.

10.4.3

Έλεγχος ολοκλήρωσης

ΌΡΟΣ
ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ

Ένα σύστημα ελέγχου μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την εισαγωγή του λεγόμενου *όρου ολοκλήρωσης* (integral term), ή αλλιώς I . Η βασική ιδέα είναι ότι το σύστημα παρακολουθεί τα σφάλματά του, ειδικά τα επαναλαμβανόμενα, σταθερά σφάλματα, που ονομάζονται *σφάλματα σταθερής κατάστασης*. Το σύστημα ολοκληρώνει (αθροίζει) αυτά τα αυξανόμενα σφάλματα στη διάρκεια του χρόνου και μόλις φτάσουν σε κάποιο προκαθορι-

ΣΦΑΛΜΑ
ΣΤΑΘΕΡΗΣ
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

σμένο κατώφλι (μόλις δηλαδή το συσσωρευμένο σφάλμα γίνει αρκετά μεγάλο), το σύστημα ενεργεί για να τα αντισταθμίσει/διορθώσει.

Ο ελεγκτής ολοκλήρωσης παράγει έξοδο o ανάλογη προς το ολοκλήρωμα της εισόδου του, i , και γράφεται τυπικά ως εξής:

$$o = K_f \int i(t) dt$$

Η K_f είναι μια σταθερά αναλογικότητας, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Πώς μπορούμε να εφαρμόσουμε τον έλεγχο ολοκλήρωσης στο ρομπότ που κινείται κατά μήκος τοίχων;

Στην πραγματικότητα, αυτό δεν είναι τόσο εύκολο, επειδή ο ελεγκτής που δημιουργήσαμε δεν αφήνει περιθώρια συσσώρευσης σφάλματος σταθερής κατάστασης. Αυτό είναι ένα από τα καλά του ελεγκτή μας, οπότε ας επιβραβεύσουμε τον εαυτό μας για την προσπάθεια και ας εξετάσουμε ένα άλλο παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα ρομπότ - χλοοκοπτική μηχανή, το οποίο καλύπτει προσεκτικά όλο το γκαζόν πηγαίνοντας από τη μία πλευρά της αυλής στην άλλη και κάθε φορά μετακινείται λίγο για να καλύψει την επόμενη λωρίδα γκαζόν. Τώρα, υποθέστε ότι ο μηχανισμός στροφής του ρομπότ έχει ένα σταθερό σφάλμα, ώστε όταν το ρομπότ προσπαθεί να στρίψει κατά 90 μοίρες για να μετακινηθεί στην επόμενη λωρίδα, στρίβει κατά μικρότερη γωνία. Λόγω αυτού του σφάλματος, το ρομπότ δεν καταφέρνει να καλύψει όλη την επιφάνεια της αυλής, καθώς όσο περισσότερο κινείται, τόσο μικρότερη είναι η κάλυψη. Όμως, αν το ρομπότ είχε έναν τρόπο να υπολογίσει το σφάλμα του, έστω και όταν αυτό γίνει αρκετά μεγάλο (για παράδειγμα, να είναι σε θέση να καταλάβει ότι μεγάλο ποσοστό των περιοχών που κουρεύει, τις έχει ήδη κουρέψει), θα μπορούσε να εφαρμόσει τον έλεγχο ολοκλήρωσης και να επαναρυθμιστεί.

Τώρα ξέρετε για τα P , I και D , τα βασικά είδη ελέγχου ανατροφοδότησης. Στα περισσότερα συστήματα του πραγματικού κόσμου

σμου χρησιμοποιούνται συνδυασμοί αυτών των τριών βασικών ειδών. Οι ελεγκτές PD και PID είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές. Ας δούμε τι ακριβώς είναι αυτοί.

10.4.4 Ελεγκτές PD και PID

Ο έλεγχος PD είναι ένας συνδυασμός, στην πραγματικότητα ένα απλό άθροισμα, των όρων του αναλογικού ελέγχου (P) και του ελέγχου παραγώγου (D):

$$o = K_p i + K_d \frac{di}{dt}$$

Ο έλεγχος PD είναι ιδιαίτερα χρήσιμος και εφαρμόζεται στα περισσότερα βιομηχανικά εργοστάσια για τον έλεγχο διεργασίας.

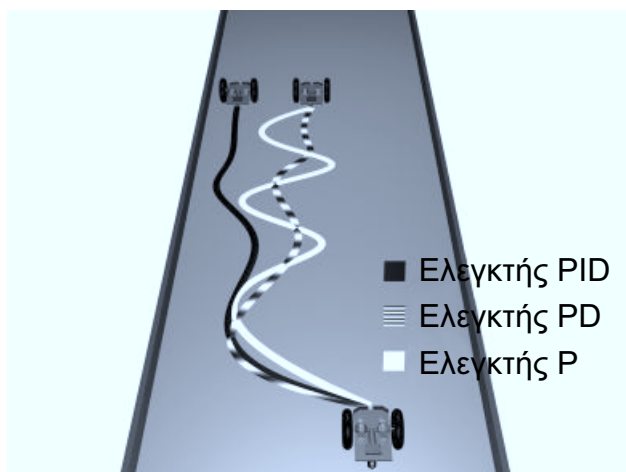
Ο έλεγχος PID είναι ένας συνδυασμός (ναι, και πάλι άθροισμα) των όρων του αναλογικού ελέγχου (P), του ελέγχου ολοκλήρωσης (I) και του ελέγχου παραγώγου (D):

$$o = K_p i + K_f \int i(t) dt + K_d \frac{di}{dt}$$

Η Εικόνα 10.2 παρουσιάζει τις διαφορετικές τροχιές τις οποίες θα παρήγαγε το ρομπότ που κινείται κατά μήκος τοίχων αν ελεγχόταν από ελεγκτές ανατροφοδότησης P , PD και PID .

Μπορείτε να μάθετε πολλά περισσότερα σχετικά με τον έλεγχο ανατροφοδότησης και το ευρύτερο πεδίο της θεωρίας ελέγχου από τις πηγές που δίνονται στο τέλος του κεφαλαίου. Είναι ένα ευρύ πεδίο, το οποίο μελετάται από τους ηλεκτρολόγους και τους μηχανολόγους μηχανικούς.

Πριν προχωρήσουμε, θα πρέπει να εξετάσουμε τη θεωρία ελέγχου σε σχέση με τη ρομποτική. Όπως έχετε ήδη διαβάσει και θα διαβάσετε και στο επόμενο κεφάλαιο, ο έλεγχος των ρομπότ για να κάνουν κάτι χρήσιμο απαιτεί πολλά στοιχεία. Ο έλεγχος ανατροφοδότησης παίζει σημαντικό ρόλο στο κατώτερο επίπεδο, π.χ., για τον έλεγχο των τροχών ή άλλων μηχανισμών κίνησης που



Εικόνα 10.2 Οι διαφορετικές τροχιές που παράγουν οι ελεγκτές ανατροφοδότησης P, PD και PID.

κινούνται συνεχώς. Όμως για άλλα ζητήματα του ρομποτικού ελέγχου και, συγκεκριμένα, για την επίτευξη στόχων υψηλότερου επιπέδου (π.χ., πλοήγηση, συντονισμός, αλληλεπίδραση, συνεργασία, αλληλεπίδραση ανθρώπου - ρομπότ), θα πρέπει να επιστρατευτούν άλλες προσεγγίσεις, που αρμόζουν καλύτερα στην αναπαράσταση και το χειρισμό αυτών των προκλήσεων. Σε αυτά τα επίπεδα του ρομποτικού ελέγχου χρησιμοποιούνται τεχνικές του πεδίου της Τεχνητής Νοημοσύνης, οι οποίες βέβαια απέχουν πολύ από αυτό που ήταν η ΤΝ στις αρχές της, όπως μάθαμε στο Κεφάλαιο 2. Θα ασχοληθούμε με αυτά τα ζητήματα παρακάτω, οπότε κάντε υπομονή.

10.5 Έλεγχος πρόσθιας τροφοδότησης ή ανοικτού βρόχου

ΈΛΕΓΧΟΣ
ΚΛΕΙΣΤΟΥ
ΒΡΟΧΟΥ

Ο έλεγχος ανατροφοδότησης ονομάζεται και *έλεγχος κλειστού βρόχου*, επειδή κλείνει το βρόχο μεταξύ της εισόδου και της εξόδου και παρέχει στο σύστημα το σφάλμα ως ανατροφοδότηση.

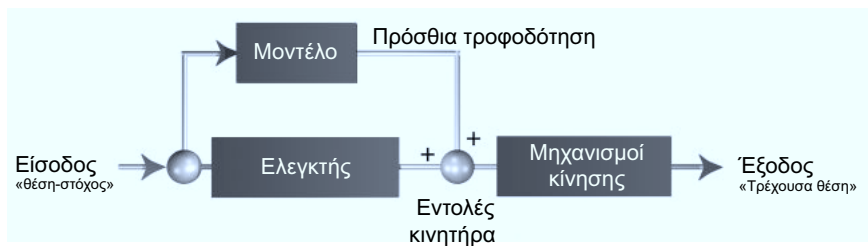
Ποια είναι η εναλλακτική προσέγγιση στον έλεγχο κλειστού βρόχου;

ΈΛΕΓΧΟΣ
ΑΝΟΙΚΤΟΥ
ΒΡΟΧΟΥ

ΈΛΕΓΧΟΣ
ΠΡΟΣΘΙΑΣ
ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

Όπως μπορείτε να διαβάσετε και στον τίτλο της ενότητας, η εναλλακτική στην ανατροφοδότηση ή στον έλεγχο κλειστού βρόχου είναι η πρόσθια τροφοδότηση, αλλιώς έλεγχος ανοικτού βρόχου. Όπως δηλώνει και το όνομα, ο έλεγχος ανοικτού βρόχου ή πρόσθιας τροφοδότησης δεν χρησιμοποιεί ανατροφοδότηση από τους αισθητήρες, ούτε ανατροφοδοτεί το σύστημα με την τρέχουσα κατάσταση. Επομένως, ο βρόχος μεταξύ της εισόδου και της εξόδου είναι ανοικτός, δηλαδή δεν υπάρχει καν βρόχος. Στον έλεγχο ανοικτού βρόχου, το σύστημα εκτελεί την εντολή που του δίνεται με βάση αυτό που έχει προβλεφτεί, όχι εξετάζοντας την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος και ενημερώνοντάς την καθώς το σύστημα προχωρά, όπως συμβαίνει στον έλεγχο ανατροφοδότησης. Για να αποφασίσει πώς θα δράσει εκ των προτέρων, ο ελεγκτής καθορίζει από πριν σημεία αναφοράς ή υποστόχους που πρέπει να πετύχει. Αυτό απαιτεί από το σύστημα να κοιτά στο μέλλον και να προβλέπει την κατάστασή του. Η Εικόνα 10.3 παρουσιάζει το σχηματικό διάγραμμα ενός ελεγκτή πρόσθιας τροφοδότησης ή ανοικτού βρόχου.

Τα συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόχου ή πρόσθιας τροφοδότησης είναι αποτελεσματικά όταν είναι καλά βαθμονομημένα και το περιβάλλον τους είναι προβλέψιμο και δεν μεταβάλλεται με τρόπο που να επηρεάζει την απόδοσή τους. Επομένως, είναι κατάλληλα για επαναλαμβανόμενες αποστολές που δεν εξαρτώνται από τις καταστάσεις τους. Όμως αυτές οι αποστολές δεν είναι πολύ συχνές στη ρομποτική.



Εικόνα 10.3 Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού ελεγκτή πρόσθιας τροφοδότησης.

Σύνοψη

- Ο έλεγχος ανατροφοδότησης/κλειστού βρόχου και ο έλεγχος πρόσθιας τροφοδότησης/ανοικτού βρόχου είναι σημαντικές πτυχές της ρομποτικής.
- Στόχος του ελέγχου ανατροφοδότησης είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος του συστήματος, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ της τρέχουσας κατάστασης και της επιθυμητής.
- Η επιθυμητή κατάσταση ή κατάσταση-στόχος είναι μια έννοια που χρησιμοποιείται στην ΤΝ, όπως και στη θεωρία ελέγχου, και μπορεί να έχει τη μορφή επίτευξης ή διατήρησης.
- Το σφάλμα είναι μια πολύπλοκη έννοια με κατεύθυνση, μέτρο και συσσωρευτικές ιδιότητες.
- Ο αναλογικός έλεγχος, ο έλεγχος παραγώγου και ο έλεγχος ολοκλήρωσης είναι οι βασικές μορφές ελέγχου ανατροφοδότησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό στα συστήματα ελέγχου (ρομποτικά ή άλλα) του πραγματικού κόσμου.

Τροφή για σκέψη

- Τι συμβαίνει όταν υπάρχει σφάλμα στους αισθητήρες του συστήματος; Τι συμβαίνει όταν ο αισθητήρας ενημερώνει εσφαλμένα το ρομπότ ότι βρίσκεται μακριά από έναν τοίχο, ενώ στην πραγματικότητα βρίσκεται κοντά; Τι συμβαίνει στην αντίστροφη περίπτωση; Πώς θα μπορούσατε να αντιμετωπίσετε αυτά τα ζητήματα;
- Πώς μπορείτε να αξιοποιήσετε τον έλεγχο ανοικτού βρόχου στο ρομπότ σας; Σε τι θα μπορούσε να φανεί χρήσιμος;

Περαιτέρω μελέτη

- Θα βρείτε τις ασκήσεις του συνοδευτικού βιβλίου ασκήσεων γι' αυτό το κεφάλαιο στη διεύθυνση: http://roboticsprimer.sourceforge.net/workbook/Feedback_Control
- Σε περίπτωση που θέλετε να μάθετε (πολύ) περισσότερα για τη θεωρία ελέγχου, ρίξτε μια ματιά στα εξής βιβλία:
 - *Signals and Systems* των Simon Haykin, Barry Van Veen και John Wiley.
 - *Intelligent Control Systems, Theory and Applications* των Madan M. Gupta και Naresh K. Sinha.
 - *Linear Control System Analysis and Design: Conventional and Modern* των J. J. D'Azzo και C. Houpis.
 - *Automatic Control Systems* του B. C. Kuo.

Βασικές Αρχές Ρομποτικής Maja J Matarić

Το βιβλίο *Βασικές Αρχές Ρομποτικής* φιλοδοξεί να αποτελέσει μια κατανοητή εισαγωγή στη Ρομποτική για φοιτητές, μαθητές της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, ερασιτέχνες ρομποτιστές, και οποιονδήποτε άλλο ενδιαφέρεται γι' αυτό το ανερχόμενο επιστημονικό πεδίο. Το βιβλίο ταξιδεύει τον αναγνώστη από τις βασικότερες έννοιες της Ρομποτικής (στις οποίες περιλαμβάνονται η αίσθηση και η μετακίνηση) έως τις πιο καινοτόμες και εξελιγμένες εφαρμογές και θεματικές περιοχές (ανθρωποειδή, ρομπότ που αλλάζουν μορφή, ρομποτική διαστήματος), με έμφαση στα στοιχεία που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία αυτόνομης και ευφυούς ρομποτικής συμπεριφοράς. Παράλληλα, αναλύει τις θεμελιώδεις έννοιες της Ρομποτικής, χρησιμοποιώντας βασικούς ορισμούς αλλά και πιο πολύπλοκες επεξηγήσεις, με ένα ελκυστικό και οικείο ύφος που θα γοητεύσει τους αναγνώστες ανεξάρτητα από το γνωστικό τους υπόβαθρο.

Στο βιβλίο καλύπτονται θέματα όπως ο ορισμός και η ιστορία της Ρομποτικής, τα συστατικά στοιχεία των ρομπότ, η μετακίνηση, ο χειρισμός, οι αισθητήρες, ο έλεγχος, οι αρχιτεκτονικές ελέγχου, η αναπαράσταση, η συμπεριφορά, η πλοήγηση, η ρομποτική συνόλου, η μάθηση, καθώς και το μέλλον και οι ηθικές προεκτάσεις της Ρομποτικής. Στο συνοδευτικό ιστότοπο του βιβλίου περιλαμβάνεται ένα δωρεάν βιβλίο ασκήσεων προγραμματισμού ρομπότ (στα αγγλικά), στο οποίο εφαρμόζονται πολλές από τις ιδέες του βιβλίου στις πλατφόρμες iRobot με στόχο την ενθάρρυνση του αναγνώστη για περαιτέρω ενασχόληση, πειραματισμό, και σχεδιασμό μαθημάτων.

Το βιβλίο *Βασικές Αρχές Ρομποτικής* προσεγγίζει το θέμα της Ρομποτικής με μοναδικό, δομημένο, και παιδαγωγικό τρόπο, γεγονός που το κάνει προσιτό σε ένα ευρύ κοινό. Τα μόνα προσ απαιτούμενα είναι η περιέργεια και η συγκέντρωση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά τόσο για διδακτικούς σκοπούς όσο και για αυτοδιδασκαλία, και μπορεί να αποτελέσει εφελκυστικό για κάθε αναγνώστη ανεξάρτητα από το υπόβαθρό του – φοιτητές που διδάσκονται τη Ρομποτική ως μάθημα επιλογής, μεταπτυχιακούς φοιτητές που σκοπεύουν να ειδικευτούν στη Ρομποτική, και καθηγητές της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης που διδάσκουν τη Ρομποτική στις αίθουσες διδασκαλίας.

«Όπως συνέβη με τα ηλεκτρονικά και τους υπολογιστές, ο κόσμος πρόκειται να αλλάξει για μία ακόμη φορά με την έλευση της εποχής των ρομπότ. Κάθε εποχή απαιτεί την υιοθέτηση των τεχνολογιών της από εξυπνά παιδιά και αφοσιωμένους ερασιτέχνες, οι οποίοι θα αναλάβουν το ρόλο να αλλάξουν τον κόσμο. Το βιβλίο *Βασικές Αρχές Ρομποτικής* γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ της πανεπιστημιακής κοινότητας και του απλού αναγνώστη, προετοιμάζοντας το έδαφος για τη νέα εποχή.»

—Rodney Brooks, Διευθυντής του Εργαστηρίου
Επιστήμης των Υπολογιστών και Τεχνητής
Νοημοσύνης του MIT

«Η Δρ Matarić κατάφερε να κάνει ένα σύνθετο αντικείμενο προσφιλές σε μαθητές κάθε ηλικίας. Οι μαθητές μπορούν να συνδυάσουν τη μάθηση με την απόκτηση πρακτικής εμπειρίας χρησιμοποιώντας το βιβλίο ασκήσεων προγραμματισμού ρομπότ που είναι διαθέσιμο στο Διαδίκτυο. Το βιβλίο *Βασικές Αρχές Ρομποτικής*, μαζί με το συνοδευτικό βιβλίο ασκήσεων, προσφέρουν στους μαθητές μια πρώτη ματιά στις απεριόριστες δυνατότητες της Ρομποτικής.»

—Helen Greiner, Πρόεδρος και Συνιδρύτρια της
iRobot

«Το βιβλίο *Βασικές Αρχές Ρομποτικής* προσφέρει μια πραγματικά ενθουσιώδη εισαγωγή στη Ρομποτική. Είναι ένα εξαιρετικό διδακτικό βιβλίο για όλους όσους ασχολούνται με το σχεδιασμό ή παρακολουθούν κάποιο προπτυχιακό εισαγωγικό μάθημα, αλλά και ένα εξαιρετικό ανάγνωσμα για όσους ενδιαφέρονται να μάθουν για τα ρομπότ.»

—Daniela Rus, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Επιστήμης των Υπολογιστών του MIT

Η Maja J Matarić είναι Καθηγήτρια Επιστήμης των Υπολογιστών και Νευροεπιστήμης και Διευθύντρια του Κέντρου για τη Ρομποτική και τα Ενσωματωμένα Συστήματα στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνιας, όπου είναι επίσης Συνδιευθύντρια του Εργαστηρίου Ρομποτικής Έρευνας και Αντιπρύτανης Έρευνας του Τμήματος Μηχανικών.



ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ

Λορκαίου 4, Στάθμος Λαρίσης, 10440 Αθήνα, Τηλ: 210-5207805

Επισκεφθείτε μας στο Internet:
www.klidarithmos.gr

ISBN 978-960-461-354-0



9 789604 613540