

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	1
1.1.1 Η Εμφάνιση των Ρομπότ	1
1.1.2 Ορισμοί.....	2
1.1.3 Σύντομη Ιστορία Τηλεχειριστών και Ρομπότ	5
1.2 ΡΟΜΠΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	9
1.2.1 Αιτίες για τη Χρήση Ρομπότ.....	9
1.2.2 Πλεονεκτήματα από τη Χρήση Ρομπότ.....	12
1.2.3 Κριτήρια Επιθυμητότητας των Ρομπότ.....	13
1.2.4 Ικανότητες των Ρομπότ.....	15
1.2.5 Κατηγορίες Εφαρμογών.....	16
1.2.6 Βιομηχανικοί Χρήστες Ρομπότ.....	20
1.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	22
1.3.1 Αρχή Λειτουργίας.....	22
1.3.2 Μέθοδος Ελέγχου Κίνησης.....	23
1.3.3 Γεωμετρικός Σχηματισμός.....	24
1.3.4 Κατηγορία Εφαρμογής	33
1.3.5 Τύπος Μετάδοσης Κίνησης	34
1.3.6 Άλλες Ταξινομήσεις	35
1.4 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	36
1.4.1 Η Γενική Δομή των Ρομποτικών Συστημάτων	36
1.4.2 Το Σύστημα Χειρισμού.....	38
1.4.3 Οι Κινητήρες των Αρθρώσεων	39
1.4.4 Ο Ελεγκτής και το Λογισμικό Παραγωγής της Κίνησης.....	46
1.4.5 Το Ηλεκτρονικό Σύστημα της Κίνησης.....	47
1.4.6 Εξωτερικές Διασυνδέσεις και Αισθητήρες	49
1.4.7 Το Σύστημα Επικοινωνίας Ανθρώπου–Μηχανής	52
1.4.8 Κριτήρια Κινηματικής Απόδοσης Ρομπότ.....	54
1.5 ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	59
1.5.1 Η Κατάσταση της Βιομηχανίας Ρομποτικής.....	59
1.5.2 Τάσεις της Αγοράς.....	61
1.5.3 Χαρακτηριστικά Μελλοντικών Ρομποτικών Συστημάτων και Εφαρμογών ..	64
1.5.4 Μελλοντικές Εφαρμογές.....	69
1.5.5 Η Ρομποτική στην Ελλάδα	72
2. ΕΝΑ ΓΕΝΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ.....	87
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ–ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	87

2.2	Ο ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΣ ΧΕΙΡΙΣΤΗΣ 2-DOF	90
2.2.1	Ευθεία Κινηματική Ανάλυση.....	90
2.2.2	Ρομποτικός Χώρος Εργασίας.....	91
2.2.3	Αντίστροφη Κινηματική Ανάλυση	93
2.2.4	Κινηματική της Ταχύτητας	96
2.2.5	Κινηματική της Επιτάχυνσης.....	99
2.2.6	Στατική Ανάλυση.....	100
2.2.7	Δυναμική Ανάλυση.....	104
2.3	ΠΡΟΣΘΗΚΗ 3^{ΟΥ} ΒΑΘΜΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ.....	110
2.3.1	Κινηματική Ανάλυση.....	111
2.3.2	Κινηματική της Ταχύτητας – Σημεία Ιδιομορφίας	113
2.3.3	Στατική Ανάλυση.....	114
2.3.4	Δυναμική Ανάλυση.....	114
2.4	ΟΙ ΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΤΩΝ 3-Δ.....	115
2.4.1	Ευθεία Κινηματική	116
2.4.2	Αντίστροφη Κινηματική	116
2.4.3	Στατική και Δυναμική.....	117
3.	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΡΟΜΠΟΤ.....	119
3.1	ΧΩΡΙΚΕΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΣ ΣΕ 2-Δ ΚΑΙ 3-Δ	119
3.1.1	Διανύσματα Μεταφοράς.....	119
3.1.2	Πίνακες Περιστροφής.....	120
3.1.3	Συστήματα Συντεταγμένων και Συμβολισμοί.....	123
3.2	ΟΜΟΓΕΝΕΙΣ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	127
3.2.1	Γενική Περιγραφή.....	127
3.2.2	Ιδιότητες	128
3.2.3	Περιγραφή Τοποθέτησης Αρπάγης.....	136
3.2.4	Περιστροφή Γύρω από Τυχαιο Διάνυσμα.....	141
3.2.5	Υπολογιστικές Απαιτήσεις	147
3.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΟΦΩΝ.....	148
3.4	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΡΟΜΠΟΤ	153
3.4.1	Μεταφορικές και Περιστροφικές Αρθρώσεις.....	153
3.4.2	Αλγόριθμος Denavit–Hartenberg.....	154
3.4.3	Κινηματικές Παράμετροι Ρομπότ.....	157
3.5	ΕΥΘΕΙΑ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΜΠΟΤ	162
3.5.1	Εισαγωγή	162
3.5.2	Αλγόριθμοι Ευθείας Κινηματικής και Υπολογιστικές Απαιτήσεις.....	162
3.6	ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	164

3.6.1	Προβλήματα Αναπαράστασης Denavit–Hartenberg.....	164
3.6.2	Επίδραση Κατασκευαστικών Σφαλμάτων	166
3.6.3	Βαθμονόμηση (Calibration).....	168
3.7	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	170
4.	ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΜΠΟΤ.....	181
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	181
4.2	ΕΠΙΛΥΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	181
4.2.1	Σχηματισμός των Εξισώσεων Αντίστροφης Κινηματικής.....	181
4.2.2	Ύπαρξη Λύσεων	183
4.2.3	Πολλαπλότητα των λύσεων	186
4.2.4	Μέθοδος επίλυσης	187
4.3	ΑΠΟΠΛΕΓΜΕΝΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ.....	188
4.4	ΣΗΜΕΙΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΑΣ (SINGULARITIES)	190
4.5	ΑΛΓΕΒΡΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΡΙΓΩΝΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	192
4.5.1	Γενική Μέθοδος.....	192
4.5.2	Η Συνάρτηση ATAN2	193
4.5.3	Αριθμητικές Έναντι Γεωμετρικών Μεθόδων Επίλυσης	197
4.5.4	Αλγεβρική Λύση Μέσω Μετατροπής σε Πολυώνυμα.....	202
4.5.5	Υπολογιστικές Απαιτήσεις	202
4.6	ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ	203
4.6.1	Αναπαράσταση Roll-Pitch-Yaw	203
4.6.2	Αναπαράσταση Γωνιών Euler Z-Y-Z	205
4.7	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	206
	ΕΓΧΡΩΜΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ	241
5.	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΡΟΜΠΟΤ	257
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	257
5.2	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	258
5.2.1	Παράγωγος Διανύσματος.....	258
5.2.2	Παράγωγος Πίνακα.....	261
5.2.3	Παράγωγοι Συναρτήσεων Διανυσμάτων και Πινάκων.....	263
5.2.4	Ανάπτυξη Μοναδιαίων Τιμών	268
5.3	ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ.....	272
5.3.1	Διαφορική Μετάθεση και Περιστροφή.....	272
5.3.2	Ισοδυναμία Διαφορικών Περιστροφών	273
5.3.3	Γραμμική και Περιστροφική Ταχύτητα Στερεών Σωμάτων	275

5.3.4	Ταυτόχρονη Γραμμική και Περιστροφική Ταχύτητα	278
5.3.5	Φυσική Εξήγηση του Διανύσματος Γωνιακής Ταχύτητας.....	281
5.3.6	Διαφορικές Περιστροφές με Αναπαραστάσεις Γωνιών Euler	282
5.4	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	285
5.4.1	Γραμμική και Γωνιακή Ταχύτητα Τελικού Στοιχείου Δράσης.....	285
5.4.2	Ιακωβιανή	288
5.4.3	Υπολογισμός Ιακωβιανής σε Διαφορετικά Συστήματα Αναφοράς	290
5.5	ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ	290
5.6	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	292
5.6.1	Μετάδοση Ταχύτητας Μεταξύ Συνδέσμων	292
5.6.2	Αριθμητικοί Αλγόριθμοι Υπολογισμού Ιακωβιανής	293
5.6.3	Υπολογιστικές Απαιτήσεις	293
5.6.4	Συγκριτική Αποτίμηση Αριθμητικών Αλγορίθμων	294
5.6.5	Αντίστροφη Ιακωβιανή.....	295
5.6.6	Αλγόριθμοι Υπολογισμού Κινηματικής Επιτάχυνσης.....	296
5.6.7	Υπολογισμός του Διανύσματος Υπολειπομένης Επιτάχυνσης.....	299
5.6.8	Αντίστροφη Κινηματική της Επιτάχυνσης	300
5.6.9	Υπολογιστικές Απαιτήσεις	301
5.7	ΣΗΜΕΙΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΑΣ (SINGULARITIES)	302
5.7.1	Ορισμός	302
5.7.2	Απόπλεξη των Σημείων Ιδιομορφίας.....	303
5.8	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΡΟΜΠΟΤ	306
5.8.1	Διαχειρίσιμος Χώρος και Βαθμός Διαχειρισιμότητας	306
5.8.2	Μηδενικός Χώρος.....	307
5.8.3	Μέγεθος Ευχρηστίας	308
5.8.4	Ισοτροπικά Σημεία.....	310
5.8.5	Η AMT σε 2-DOF	312
5.9	ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	314
5.9.1	Η Αρχή των Δυνατών Έργων	314
5.9.2	Στατικές Δυνάμεις Ρομποτικών Χειριστών	316
5.10	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	318
5.11	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	335
6.	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤ.....	337
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	337
6.2	Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ LAGRANGE–EULER	340
6.2.1	Γενικά	340

6.2.2	Κινητική Ενέργεια ενός Ρομποτικού Χειριστή	343
6.2.3	Δυναμική Ενέργεια ενός Ρομποτικού Χειριστή	344
6.2.4	Εξισώσεις Κίνησης ενός Χειριστή	344
6.3	ΑΝΑΔΡΟΜΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ LAGRANGE–EULER	352
6.3.1	Λαγκρανζιανή Δυναμική με Αντίστροφη Αναδρομή	352
6.3.2	Λαγκρανζιανή Δυναμική με Ευθεία Αναδρομή	353
6.3.3	Αναδρομικές Εξισώσεις Lagrange με 3×3 Πίνακες	354
6.4	Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ NEWTON–EULER	355
6.4.1	Γενικά	355
6.4.2	Κινηματική των Συνδέσμων	356
6.4.3	Αναδρομικές Εξισώσεις Κίνησης Χειριστών	356
6.4.4	Αναδρομικές Εξισώσεις Κίνησης σε Τοπικό Σύστημα Αναφοράς	359
6.4.5	Υπολογιστικός Αλγόριθμος	362
6.5	ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ D’ ALEMBERT	372
6.5.1	Γενικά	372
6.6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	384
6.7	ΕΞΑΓΩΓΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ LAGRANGE–EULER	385
7.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΡΟΜΠΟΤ	391
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	391
7.2	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ, ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΡΟΧΙΩΝ 393	
7.2.1	Η Περιγραφή και η Δημιουργία Διαδρομών	393
7.2.2	Ο Σχεδιασμός Τροχιών	395
7.3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΣΤΟΝ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ	398
7.3.1	Γενικοί Περιορισμοί	398
7.3.2	Υπολογισμός Τροχιάς Άρθρωσης 4–3–4	401
7.3.3	Τροχιά 3–3–3–3–3 (Τροχιά Κυβικών Splines)	410
7.3.4	Γραμμική Συνάρτηση με Παραβολικές Μίξεις	417
7.3.5	Γραμμική Συνάρτηση με Παραβολικές Μίξεις για Τροχιά με Ενδιάμεσα Σημεία	420
7.4	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΟΝ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΟ ΧΩΡΟ	424
7.4.1	Γενικά	424
7.4.2	Μέθοδος Ομογενών Πινάκων Μετασχηματισμού	425
7.4.3	Μετάβαση Μεταξύ Δύο Τμημάτων Τροχιάς	430
7.4.4	Σχεδιασμός με Περιορισμούς Ροπών	433
7.4.5	Γεωμετρικά Προβλήματα Καρτεσιανών Τροχιών	439
7.5	ΑΠΟΦΥΓΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΑΣ	441

7.5.1	Γενικά	441
7.5.2	Κινηματικός Έλεγχος Ρομπότ.....	442
7.5.3	Αποπλεγμένος Έλεγχος με Ευρωστία στα Σημεία Ιδιομορφίας	445
7.5.4	Συγκρίσεις και Αποτελέσματα	455
7.6	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΠΙΘΥΜΗΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΦΥΓΗ ΕΜΠΟΔΙΩΝ	459
7.6.1	Γενικά	459
7.6.2	Επιθυμητή Τροχιά Γύρω Από Επαυξημένες Απαγορευμένες Περιοχές	460
7.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	465
8.	ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΧΕΙΡΙΣΤΩΝ	467
8.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	467
8.2	ΓΕΝΙΚΑ ΣΧΗΜΑΤΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	469
8.3	ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΡΥΜΑ.....	474
8.4	ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΗΣ ΡΟΠΗΣ	479
8.4.1	Γενικά	479
8.4.2	Συνάρτηση Μεταφοράς Απλής Άρθρωσης.....	480
8.4.3	Ελεγκτής Θέσης Απλής Άρθρωσης	486
8.4.4	Κριτήρια Απόδοσης και Ευστάθειας	490
8.4.5	Ελεγκτής για Ρομπότ Πολλών Αρθρώσεων.....	495
8.4.6	Αντιστάθμιση Ψηφιακά Ελεγχόμενων Συστημάτων	497
8.4.7	Μετατροπή Τάσης-Ροπής	498
8.5	ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΧΕΔΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ	498
8.6	ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΑΛΥΜΕΝΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	501
8.6.1	Έλεγχος Ρυθμού Αναλυμένης Κίνησης	503
8.6.2	Έλεγχος Επιτάχυνσης Αναλυμένης Κίνησης.....	505
8.6.3	Έλεγχος Δύναμης Αναλυμένης Κίνησης	507
8.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	510
9.	ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	511
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	627
	ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ	641
	ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ	649