

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΧΑΟΤΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»



Του φοιτητή
ΤΟΠΑΛΙΔΗ Ισαάκ
Αρ. Μητρώου: 113800

Επιβλέπουσα
ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ Μαρία
Επίκουρη Καθηγήτρια

Ημερομηνία 10/9/2024

ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΧΑΟΤΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Κωδικός Π.Ε. 24165

Φοιτητής: ΤΟΠΑΛΙΔΗΣ Ισαάκ

Επιβλέπουσα: ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ Μαρία

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 24-03-2024

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 10-9-2024

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.Π.Α.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή ΤΟΠΑΛΙΔΗ Ισαάκ που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στην κάθαρση που έρχεται μέσα από τη γνώση»

Φωτογραφία εξωφύλλου: Strange Attractor: 3-Scroll Unified Chaotic1 by Aiekick
[www.artstation.com/artwork/yb9Rg9] από τον Γάλλο Stephane Cuillardier (αυτοδίδακτος
προγραμματιστής).

Πρόλογος

Το προσδόκιμο ζωής για τον άνθρωπο μεγαλώνει, όμως αυτή η αναμενόμενη διάρκεια δεν παύει να έχει ημερομηνία λήξης. Η επιστήμη και η τεχνολογία, εργαλεία στα χέρια του ανθρώπου, γεννημένα από τον ίδιο, υπηρέτες στην επίτευξη της ευμάρειας αλλά και της προστασίας του πολυτιμότερου αγαθού της ζωής λειτουργούν προς μία κατεύθυνση που σκοπό έχει την όσο πιο άνετη και μακρά διαβίωση. Η κοντινότερη εξελισσόμενη και πολλά υποσχόμενη λύση για να γίνουν πραγματικότητα τα παραπάνω είναι η υποκατάσταση του ανθρώπου από οποιαδήποτε μηχανική συσκευή σε όσο το δυνατόν περισσότερες εργασίες. Η μικρότερη συμμετοχή του ανθρώπου, αν όχι η παντελής απουσία του, από χώρους εργασίας με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος, λιγότερο χρόνο και περισσότερη ασφάλεια για τον ίδιο μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση τεχνητής νοημοσύνης, μηχανικής μάθησης, ρομποτικής και γενικά αυτοματοποιημένων λειτουργιών που χρειάζονται έναν τεχνητό εγκέφαλο του οποίου το κέντρο εντολών δίνει την δική του υλοποίηση μέσα από αλγόριθμους. Όλα τελικά καταλήγουν στην εύρεση αποδοτικότερων μοντέλων και στον συνδυασμό αλγορίθμων που θα οδηγήσουν στην αντικατάσταση του ανθρώπου από την μηχανή, όπου αυτό απαιτείται.

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία επιχειρείται να μελετηθεί η επίδραση των χαοτικών μοντέλων στην αυτονομημένη λειτουργία ρομποτικών συστημάτων. Σκοπός είναι να αξιολογηθούν παράμετροι όπως η ταχύτητα σάρωσης και η εύρεση αποδοτικότερης διαδρομής σάρωσης μίας επιφάνειας. Δίνεται έμφαση στη χρήση χαοτικών μοντέλων για τη διευκόλυνση των κινήσεων όσον αφορά την ταχύτητα με την οποία θα ολοκληρώνουν το έργο τους οι αυτονομημένες κινούμενες μηχανικές συσκευές σε διάφορα περιβάλλοντα εργασίας και στα θετικά αποτελέσματα που έρχονται από την μίξη αλγορίθμων και χάους.

«Control robotic systems using chaotic systems »

«TOPALIDIS Isaak»

Abstract

In this thesis, an attempt is made to study the impact of chaotic models on the autonomous operation of robotic systems. The purpose is to evaluate parameters such as scanning speed and finding a more efficient scanning path of a surface. Emphasis is placed on the use of chaotic models to facilitate movements in terms of the speed at which autonomous moving mechanical devices will complete their work in various working environments and the positive results that come from the mix of algorithms and chaos.

Ευχαριστίες

Είναι χαρά και τιμή να ευχαριστήσω την καθηγήτριά μου κ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ Μαρία για τις γνώσεις που γενναιόδωρα μου μεταλαμπάδευσε με τον απλούστερο και κατανοητότερο τρόπο, την βοήθεια που μου πρόσφερε αδιαλείπτως και αόκνως αλλά κυρίως για την θετική ενέργεια που την περιβάλλει, ενέργεια που εκπέμπεται και μεταδίδεται.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	v
Περίληψη	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Κατάλογος Σχημάτων.....	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xv
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2 ^ο : Θεωρητικό μέρος	6
2.1 Εισαγωγή	6
2.2 Δυναμικά συστήματα.....	6
2.3 Θεωρία του Χάους	7
2.4 Ρομποτική.....	10
2.4.1 Αυτόνομα κινούμενα ρομπότ	10
2.4.2 Ρομπότ αντί για τον άνθρωπο	11
2.5 Επίλογος	17
Κεφάλαιο 3 ^ο : Επισκόπηση των μη χαοτικών σχεδιαστών	18
3.1 Εισαγωγή	18
3.2 Πλήρεις CPP – Μέθοδοι τμηματικού διαχωρισμού.....	18
3.3 Ευρετικοί CPP – Τυχαίοι	22
Κεφάλαιο 4 ^ο : Ανάλυση Χάους στην ρομποτική.....	24
4.1 Έρευνες χαοτικής δυναμικής σε χειριστές και ρομπότ	24
4.2 Χαοτική συμπεριφορά αλληλεπίδρασης ρομπότ-περιβάλλοντος (REI)	26
Κεφάλαιο 5 ^ο : Σύνθεση Χάους στη Ρομποτική.....	29
5.1 Εισαγωγή	29
5.2 Χαοτικά κινούμενο ρομπότ	29
5.3 Ενσωμάτωση χάους σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης	35
5.3.1 Χαοτικός γενετικός αλγόριθμος (CGA)	35
5.3.2 Χαοτικός αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών (CABC).....	36
5.3.3 Χαοτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης (COA)	37
5.3.4 Χαοτικός αλγόριθμος IPSO-GWO	37
5.3.5 Ένα multi-scroll χαοτικό σύστημα.....	38
5.3.6 Χαοτικός αλγόριθμος IC-VAINDIWPSO.....	39

5.3.7 Χαοτικός αλγόριθμος Aquila	41
5.3.8 Χαοτικός αλγόριθμος με βάση τη βιογεωγραφία (BBO)	44
5.3.9 Χαοτικός αλγόριθμος OLTC-MFO	44
5.3.10 Χαοτικός γενετικός αλγόριθμος με Logistic map	45
5.3.11 Χαοτικό νευρωνικό μοντέλο	45
5.4 Επίλογος	45
Κεφάλαιο 6 ^ο : Αντιμετώπιση προβλημάτων – Στρατηγικές ελέγχου κίνησης	47
6.1 Εισαγωγή	47
6.2 Κλασικά χαοτικά συστήματα	47
6.2.1 Σύστημα Arnold	50
6.2.2 Δυναμικό σύστημα Lorenz	51
6.2.3 Συστήματα Chen	52
6.2.4 Σύστημα Chua και multi-scroll	54
6.2.5 Διακριτά Συστήματα	55
6.3 Πλεονασμός τροχιών	57
6.4 Ποσοστό Κάλυψης	59
6.5 Στρατηγική ελέγχου κίνησης για αυτόνομα ρομπότ	60
6.6 Χειρισμός Χάους	65
6.6.1 Μετασηματισμός τόξου συνημιτόνου και τόξου ημιτόνου	65
6.6.2 Σχεδιασμένοι Υπο-Στόχοι, Σημεία Ενδιαφέροντος (POIs) και Συγγενικοί (Affine) Μετασηματισμοί	66
6.6.3 Συγχρονισμός χάους	67
6.6.4 Διαχωρισμός, έλεγχος προσανατολισμού και κλιμάκωση	67
6.7 Επίλογος	68
Κεφάλαιο 7 ^ο : Συγκρίσεις αλγορίθμων	70
7.1 Εισαγωγή	70
7.2 Σύγκριση χαοτικού και τυχαίων αλγορίθμων	71
7.3 Σύγκριση χαοτικών αλγορίθμων	74
7.4 Σύγκριση double-scroll και multi-scroll χαοτικών συστημάτων	75
7.5 Επίλογος	76
Κεφάλαιο 8 ^ο : Οι μόνιμοι περιορισμοί του χαοτικού σχεδιασμού διαδρομής και των μελλοντικών εργασιών	78
8.1 Εισαγωγή	78
8.2 Αυτονομία και πραγματικές εφαρμογές	78

8.3 Χρόνος κάλυψης	79
8.4 Επίλογος- Μελλοντικές εργασίες.....	79
Κεφάλαιο 9 ^ο : Συμπεράσματα	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Διάφορα μη γραμμικά δυναμικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για χαοτικό σχεδιασμό διαδρομής [1].....	1
Σχήμα 1.2: Αίσθηση θερμότητας σε σύγκριση με τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας [126].....	4
Σχήμα 1.3: Μηχανισμός πληντυρίου πιάτων [130].....	4
Σχήμα 2.1: Δύο τροχιές που ξεκινούν η μια κοντά στην άλλη αλλά αποκλίνουν μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα [148].....	7
Σχήμα 2.2: Η πλοκή του ελκυστή Lorenz [149].....	8
Σχήμα 2.3: Πυκνότητα ρομπότ (2013-2022) [188].....	12
Σχήμα 2.4: Πυκνότητα ρομπότ ανά χώρα και μέσοι όροι [188].....	13
Σχήμα 2.5: Ρομποτική στο διάστημα [190].....	15
Σχήμα 3.1: κάλυψη ενός χώρου χρησιμοποιώντας κατά προσέγγιση τμηματικό διαχωρισμό με τα εμπόδια που εμφανίζονται ως γεμάτα ορθογώνια. (α) Αλγόριθμος wavefront με το μονοπάτι που εμφανίζεται ως διαχωρισμένη γραμμή. β) STC με διαδρομή που εμφανίζεται ως σταθερή μπλε γραμμή [1].....	19
Σχήμα 3.2: Η διαδρομή του ρομπότ που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τον κατά προσέγγιση τμηματικό ημδιαχωρισμό. Το ρομπότ αναγνωρίζει και καλύπτει τις εισόδους I_0 και I_1 [1].....	20
Σχήμα 3.3. Διαδρομές ρομπότ που παράγονται με τη χρήση (α) τραπεζοειδών και (β) αλγορίθμων βουστροφηδόν διαχωρισμού [1].....	21
Σχήμα 3.4: (α, β) Ο τμηματικός διαχωρισμός χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Morse και (γ) οι ορθογώνιοι κύκλοι εντός της διαδρομής επιτρέπουν την ανίχνευση κρίσιμων σημείων [1].....	22
Σχήμα 3.5: Διαδρομές που παράγονται χρησιμοποιώντας (α) Brownian κίνηση και (β) πτήση Lévy για την εξερεύνηση ενός κλειστού χώρου σε ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Οι διαδρομές έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης (πράσινο χρώμα) αλλά διαφορετικά σημεία λήξης (κόκκινο χρώμα) [1].....	22
Σχήμα 4.1: Πολυωνυμικό χάος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόδοσης ενός ρομποτικού βραχίονα SCARA [236].....	25
Σχήμα 4.2: Μπλοκ διάγραμμα του αλγόριθμου [238-240].....	26
Σχήμα 4.3: Η αλληλεπίδραση ρομπότ- περιβάλλοντος μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αναλογικός υπολογιστής που λαμβάνει περιβαλλοντικά, μορφολογικά και δεδομένα που σχετίζονται με την εκτέλεση εργασίας ως είσοδο και την υπολογισμένη συμπεριφορά του ρομπότ ως έξοδο [247].....	27
Σχήμα 4.4: α) Πειραματική διάταξη β) Δοκιμασμένα περιβάλλοντα i) λαβύρινθος ii) τετράγωνο iii) δυναμικό iv) διάδρομος (σε ευθεία) [250].....	28
Σχήμα 5.1: α) Αναζήτηση στόχου μέσα από ένα χαοτικό μονοπάτι β) Ένα πρωτότυπο χαοτικά κινούμενο ρομπότ [183].....	29
Σχήμα 5.2. Αριστερά: Τροχιές εξισώσεων Lorenz. Μέση: Τροχιές εξισώσεων Hamilton. Δεξιά: Τροχιές εξισώσεων υπερχάους. Όλες με ύπαρξη σταθερών εμποδίων [257].....	30
Σχήμα 5.3. Η διαδρομή του κινούμενου ρομπότ με Chua, Lorenz και VKS από αριστερά προς τα δεξιά [261].....	30

Σχήμα 5.4. Πειραματικός double- scroll χαοτικός ελκυστής [261].....	31
Σχήμα 5.5. Αριστερά: Το αυτόνομο κινούμενο ρομπότ που χρησιμοποιεί την πλατφόρμα “Magic Chassis”. Δεξιά: Η κάλυψη του εδάφους από το ρομπότ με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων [265]...32	
Σχήμα 5.6. Αριστερά: Αποτελέσματα ψαριών που πιάστηκαν στο δίχτυ με την πάροδο του χρόνου πριν την ενσωμάτωση της χαοτικής κίνησης. Δεξιά: Αποτελέσματα ψαριών που πιάστηκαν στο δίχτυ με την πάροδο του χρόνου μετά την ενσωμάτωση της χαοτικής κίνησης [271].....	33
Σχήμα 5.7: Ανάλυση δεδομένων του αριθμού των ψαριών που παγιδεύτηκαν [271].....	34
Σχήμα 5.8. Σύγκριση της απόδοσης για διάφορες τυχαίες και χαοτικές γεννήτριες [275].....	35
Σχήμα 5.9. Αριστερά: Τυπικό μοντέλο πεδίου μάχης του UCAV. Δεξιά: Οι καμπύλες εξέλιξης των δύο αλγορίθμων [279].....	36
Σχήμα 6.1: Το πρότυπο κινούμενο ρομπότ δύο τροχών που ταξιδεύει σε ένα επίπεδο κατά μήκος μιας διαδρομής $r(t)$ με ταχύτητα οχήματος V και κλίση ταχύτητας θ [316].....	49
Σχήμα 6.2: Χαοτική Arnold 3D ροή χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους $A = 1$, $B = 0.5$ και $C = 0.5$. [316].....	51
Σχήμα 6.3: Αριστερά: Φάση x_1x_2 του συστήματος Lorenz. Δεξιά: Φάση x_1x_3 του συστήματος Lorenz [260]	51
Σχήμα 6.4: Lorenz ελκυστής που εμφανίζει χαοτικές συμπεριφορές κάτω από τις παραμέτρους $c_1=10$, $c_2=28$, $c_3=8/3$ [330].....	52
Σχήμα 6.5: 3D Chen και Ueta ελκυστής που εμφανίζει πλούσια χαοτική συμπεριφορά με τις παραμέτρους $a=35$, $b=3$, $c=28$ [1].....	53
Σχήμα 6.6: 3D Chen και Lü ελκυστής που εμφανίζει πλούσια χαοτική συμπεριφορά με τις παραμέτρους $a=36$, $b=3$, $c=20$ [1].....	53
Σχήμα 6.7. Συμπεριφορά του συστήματος Chua [160].....	54
Σχήμα 6.8: Ο 3D ελκυστής του κυκλώματος Chua δείχνει χαοτικές συμπεριφορές κάτω από τις παραμέτρους $\alpha=10$, $\beta=14.87$, $a=-1.27$, $b=-0.68$, $c=1$ [1].....	55
Σχήμα 6.9: Ελκυστής συστήματος Hénon map με παραμέτρους $a=1.4$, $b=0.3$ [1].....	56
Σχήμα 6.10. Αριστερά: Συμπεριφορά της τροχιάς του ρομπότ χρησιμοποιώντας το double-scroll χαοτικό σύστημα. Δεξιά: Συμπεριφορά της τροχιάς του ρομπότ χρησιμοποιώντας το χαοτικό σύστημα multi-scroll [160].....	58
Σχήμα 6.11: Περιγραφή κελιών [160].....	59
Σχήμα 6.12: Αριστερά: Το κινούμενο ρομπότ Khepera [165], Δεξιά: Το ίδιο ρομπότ της προσομοίωσης [260].....	60
Σχήμα 6.13: Αριστερά: Γεωμετρική απεικόνιση της στρατηγικής αποφυγής εμποδίων [260]. Μέση: Η ίδια απεικόνιση σε καθορισμένο πεδίο εργασίας [160]. Δεξιά: Ομοίως (Mirror mapping) [349].....	62
Σχήμα 6.14: Αποφυγή εμποδίων με τεχνική mirror mapping (συμπαγής κύκλος: ρομπότ, διακεκομμένος κύκλος: εύρος ρομποτικών αισθητήρων) [1].....	63

Σχήμα 6.15: Η περιγραφή της κίνησης του ρομπότ στο επίπεδο [165].....	63
Σχήμα 6.16: Διανομή τροχιάς του Chebyshev map με $k=6$ που δείχνει: (α) άνιση κατανομή και στα δύο άκρα, (β) μετασχηματισμός τόξου ημιτόνου με πιο διάσπαρτη διανομή, (γ) μετασχηματισμός τόξου συνημιτόνου με πιο διάσπαρτη διανομή [1].....	65
Σχήμα 6.17: α) Lorenz και Chen σύστημα που παρακολουθούν δύο σημεία σε ένα περιβάλλον με εμπόδια από την. Τα εμπόδια στο περιβάλλον παρουσιάζονται ως ορθογώνια μπλοκ με POI που σημειώνονται από τους μαύρους κύκλους που τοποθετούνται στο $(-5,0)$ και $(5, 0)$, β) Η χαοτική τροχιά Lorenz μετατράπηκε σε περιοδική. Τα εμπόδια στο περιβάλλον παρουσιάζονται ως ορθογώνια μπλοκ με POI που σημειώνονται από τους μαύρους κύκλους που τοποθετούνται στο $(-5,0)$ και $(5, 0)$ [332].....	67
Σχήμα 6.18: Arnold με όλες τις τρεις χαοτικές τεχνικές ελέγχου από την [328] σε ρομπότ με αισθητήρα εύρους (α) 4 μέτρα και (β) 1 μέτρο. Τα μαύρα τετράγωνα είναι εμπόδια και οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν τα μεσαία σημεία της ζώνης.....	69
Σχήμα 7.1: Αριστερά: Εμφανίζεται ο αριθμός των επισκέψεων ανά κελί στο πλέγμα, όταν σε κάθε κελί έχει γίνει επίσκεψη τουλάχιστον μία φορά. Δεξιά: Οι αντίστοιχες τροχιές για τις διάφορες στρατηγικές. Για τυχαίες στρατηγικές μόνο ένα μέρος της τροχιάς σχεδιάζεται για να γίνουν τα χαρακτηριστικά της κίνησης ορατά [256].....	72
Σχήμα 7.2: Το μήκος της τροχιάς P μέχρι ολόκληρος ο χώρος της αποστολής να καλυφθεί για τις τυχαίες κινήσεις και για την τροχιά Lorenz. Η το μήκος τροχιάς P μέχρι να ελεγχθεί τουλάχιστον μία φορά κάθε κελί με μέγεθος κελιού \in [256].....	73
Σχήμα 7.3. Αριστερά: Διαδρομή κάλυψης του ρομπότ χρησιμοποιώντας το χαοτικό σύστημα double-scroll Chua σε χώρο εργασίας $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. Δεξιά: Διαδρομή κάλυψης του ρομπότ χρησιμοποιώντας το σύστημα multi-scroll Chua σε χώρο εργασίας $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ [160].....	76

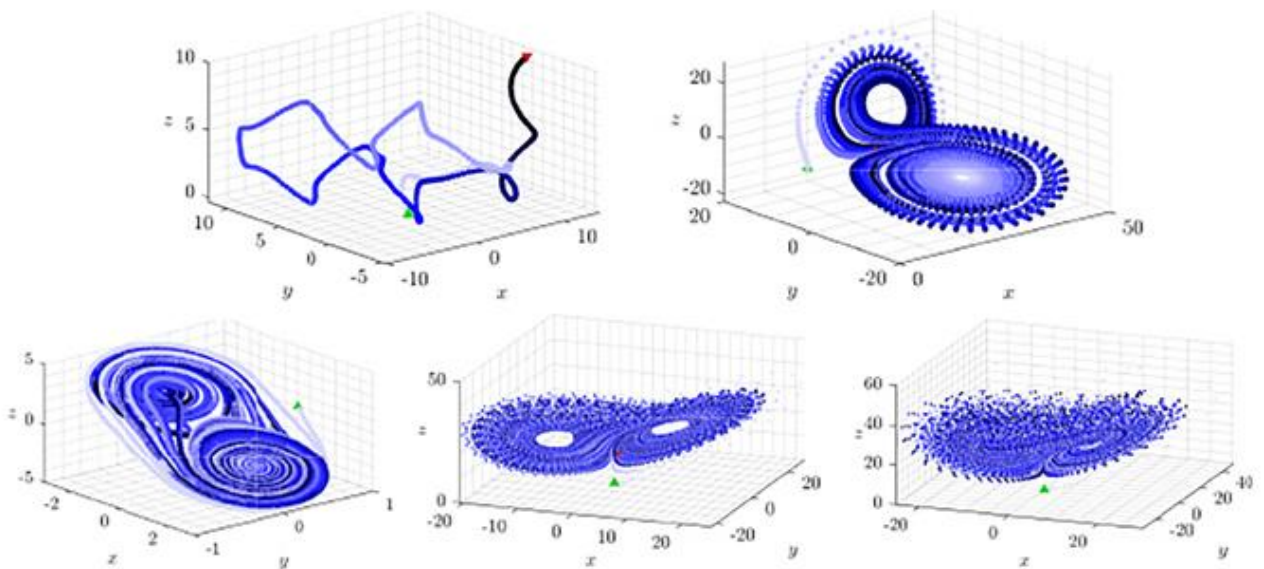
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1. Ποσοστό κάλυψης διαφορετικών συστημάτων [261-262].....	31
Πίνακας 7.1: Ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων χαοτικών συστημάτων και οι ληφθείσες τροχιές [349].....	75
Πίνακας 7.2. Ποσοστό κάλυψης για κάθε σύστημα [160].....	76

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Στη νέα πραγματικότητα της αυτονομημένης μηχανικής υποστήριξης των ανθρώπινων εργασιών εν μέρει ή της εξ ολοκλήρου υποκατάστασης του ανθρώπου από τη μηχανή, όπου τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση παντρεύονται με τη ρομποτική χωρίς επίβλεψη, όλα πρέπει να ξεκινήσουν από κάποιους αλγορίθμους, οι οποίοι θα πρέπει να δίνουν όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα. Σε αυτήν την εργασία αναζητείται η καλύτερη δυνατή λύση με χρήση χαοτικών συστημάτων τα οποία μπορούν να τροφοδοτούν τις κινήσεις των ρομπότ και να παρέχουν τις απαιτούμενες στατηγικές ελέγχου.

Οι χαοτικοί σχεδιαστές μονοπατιού που χρησιμοποιούνται για κάλυψη μιας περιοχής (coverage path planners-CPP) είναι ένα υποσύνολο αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομών που χρησιμοποιούν χαοτικά δυναμικά συστήματα για να δημιουργήσουν τροχιές σε ένα περιβάλλον. Αυτοί οι σχεδιαστές μονοπατιού είναι αναγκαίοι σε εργασίες παρακολούθησης παρουσία πρακτόρων που απαιτούν οι διαδρομές να είναι απρόβλεπτες ενώ ταυτόχρονα εγγώνονται πλήρη κάλυψη του περιβάλλοντος. Στην άμεση κάλυψη αγνώστου εδάφους, οι αλγόριθμοι σχεδιασμού χαοτικών μονοπατιών μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς την ανάγκη χάρτη του χώρου εργασίας και ο σχεδιαστής έχει πρόσθετο έλεγχο πάνω στις δημιουργημένες διαδρομές σε σύγκριση με άλλους προγραμματιστές διαδρομών ευρετικής κάλυψης, όπως αλγορίθμους τυχαίας βάδισης. Οι χαοτικοί σχεδιαστές μονοπατιού έχουν μελετηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών. Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια ανασκόπηση παρέχοντας μια εισαγωγή των κοινώς χρησιμοποιούμενων χαοτικών συστημάτων και μεθόδων για την κίνηση των ρομπότ, μια επισκόπηση των μέτρων αποφυγής εμποδίων που χρησιμοποιούνται από τους σχεδιαστές χαοτικής διαδρομής και μια συζήτηση σχετικά με άλλες εφαρμογές, προκλήσεις και ερευνητικά κενά.



Σχήμα 1.1: Διάφορα μη γραμμικά δυναμικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για χαοτικό σχεδιασμό διαδρομής [1]

Το χάος είναι παντού γύρω μας. Από τον καιρό [2-4] μέχρι την αύξηση του πληθυσμού [5-6], η απρόβλεπτη φύση του χάους εμποδίζει την πρόβλεψη οποιουδήποτε φαινομένου που σχετίζεται με αυτό. Το χάος μπορεί να οριστεί ως εξαιρετικά απρόβλεπτη συμπεριφορά που προκαλείται από την εξαιρετικά ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες [7]. Σε ορισμένα μη γραμμικά συστήματα, αυτή η ευαίσθητη εξάρτηση δημιουργεί ένα σύνολο πλούσιων δυναμικών συμπεριφορών που είναι κρίσιμες σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της Βιοϊατρικής Μηχανικής [8], της Νοσηλευτικής [9] και της Ψυχολογίας [10]. Η ρομποτική μηχανική είναι επίσης ένας τομέας που έχει επηρεαστεί από τη θεωρία του χάους. Η εφαρμογή της θεωρίας του χάους στον σχεδιασμό ρομποτικών διαδρομών έχει μελετηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών.

Ο σχεδιασμός διαδρομής είναι η προσπάθεια κατασκευής μιας διαδρομής χωρίς σύγκρουση μεταξύ δύο σημείων σε ένα χώρο εργασίας [11-12]. Οι μέθοδοι σχεδιασμού διαδρομών μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως σε δύο κατηγορίες: σχεδιασμός διαδρομής από σημείο σε σημείο [13-43] και σχεδιασμός διαδρομής για κάλυψη περιοχής [44-62]. Το πρόβλημα σχεδιασμού διαδρομής από σημείο σε σημείο περιλαμβάνει την εξεύρεση μιας τροχιάς χωρίς σύγκρουση από κάποια αρχική θέση σε ένα στόχο ή τελική θέση. Ο προγραμματισμός βάσει δειγματοληψίας [63-69], ο κινητοδυναμικός σχεδιασμός [70-74] και ο σχεδιασμός χειρισμού [75-79] συγκαταλέγονται στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στις μελέτες για την εξεύρεση μιας άμεσης διαδρομής που συνδέει δύο σημεία στο χώρο.

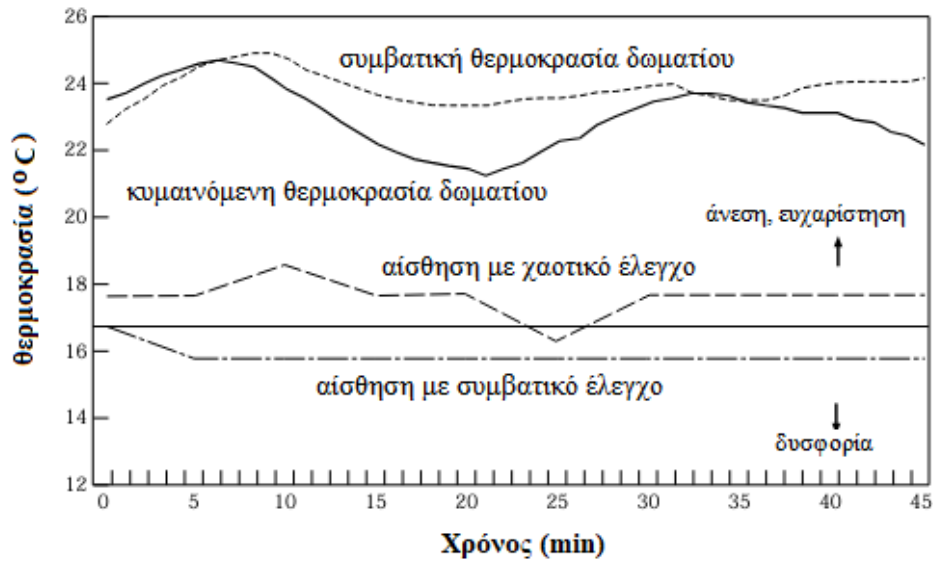
Ο σχεδιασμός διαδρομής για κάλυψη περιοχής [80-90], όπως υπονοείται από το όνομα, συνεπάγεται την εξεύρεση διαδρομής που περνά μέσα από όλα τα σημεία σε μια περιοχή. Τα ρομπότ πρέπει να καλύπτουν πλήρως την περιοχή αποφεύγοντας ταυτόχρονα τυχόν εμπόδια και ελαχιστοποιώντας την επικάλυψη ή την επανάληψη διαδρομών με τον βέλτιστο τρόπο [91]. Το πρόβλημα κάλυψης είναι ένα NP δυσκολίας πρόβλημα, καθώς περιλαμβάνει την εξεύρεση μιας διαδρομής χωρίς σύγκρουση, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει ότι κάθε χώρος έχει καλυφθεί, κατά προτίμηση μόνο μία φορά. Από την άποψη της προσαρμοστικότητας σε άγνωστα περιβάλλοντα, οι αλγόριθμοι CPP ταξινομούνται σε offline αλγόριθμους και σε άμεσους αλγόριθμους (online algorithms: είναι αλγόριθμοι που πραγματοποιούν υπολογισμούς χωρίς να ξέρουν ολόκληρη την ακολουθία εισόδου εκ των πρότερων). Οι offline αλγόριθμοι [91-107] χρειάζονται πλήρη γνώση του χάρτη και τυχόν εμπόδια στο χώρο πρέπει να είναι σταθερά. Η υπόθεση των εκ των προτέρων γνωστών περιβαλλόντων θα οδηγήσει συνήθως σε πιο αποτελεσματική κάλυψη, αλλά αυτή η υπόθεση δεν ισχύει για πολλές δυναμικές καταστάσεις του πραγματικού κόσμου. Αντίθετα, οι άμεσοι αλγόριθμοι [108], [109-121] δεν απαιτούν πλήρη γνώση του χάρτη εκ των προτέρων. Χρησιμοποιούν τα δεδομένα των ανιχνευτών συγκρούσεων και των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο για να εξασφαλίσουν πλήρη κάλυψη του προσβάσιμου χώρου [91]. Οι άμεσοι αλγόριθμοι CPP είναι κατάλληλοι για αυτοματοποιημένα κινούμενα ρομπότ και τις πολυάριθμες εφαρμογές τους. Από την άποψη της πολυπλοκότητας των αλγορίθμων και των αισθητηριακών αναγκών, οι άμεσοι αλγόριθμοι CPP μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: πλήρεις και ευρετικοί [81]. Σύμφωνα με την [81], οι πλήρεις αλγόριθμοι CPP χρησιμοποιούν κυρίως μεθόδους τμηματικού διαχωρισμού, είτε άμεσα είτε έμμεσα, για να δημιουργήσουν ντετερμινιστικές απλές διαδρομές που καλύπτουν το περιβάλλον-στόχο για να επιτύχουν πλήρη κάλυψη. Τόσο οι άμεσοι όσο και οι έμμεσοι πλήρεις αλγόριθμοι CPP απαιτούν ένα ρομπότ με δυνατότητες εντοπισμού. Εναλλακτικά, οι ευρετικοί αλγόριθμοι CPP, όπως ο τυχαίος CPP ή ο χαοτικός CPP μπορούν να δημιουργήσουν απρόβλεπτες διαδρομές για να καλύψουν εντελώς άγνωστους χώρους χωρίς δυνατότητες εντοπισμού. Σε σύγκριση με τις μεθόδους τμηματικού διαχωρισμού, ο τυχαίος και χαοτικός CPP χρησιμοποιεί αλγόριθμους με λιγότερο άμεσο προγραμματισμό, οδηγώντας σε μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής δύναμης και πολυπλοκότητας. Ωστόσο, τόσο οι τυχαίοι όσο και οι

χαοτικοί αλγόριθμοι δεν μπορούν να εγγυηθούν πλήρη κάλυψη εάν δεν είναι σωστά προσαρμοσμένοι στο περιβάλλον στο οποίο γίνεται η χρήση τους. Αυτό το ζήτημα μπορεί να διορθωθεί σε περίπτωση χαοτικών σχεδιαστών. Σε αντίθεση με τους τυχαίους σχεδιαστές, οι χαοτικοί σχεδιαστές δημιουργούν απρόβλεπτες αλλά ντετερμινιστικές διαδρομές. Αυτός ο ντετερμινισμός επιτρέπει στον σχεδιαστή του συστήματος να ελέγχει τις χαοτικές διαδρομές και να αναπτύσσει προσεγγίσεις για να εγγυηθεί την πλήρη κάλυψη ενός άγνωστου χώρου.

Το πρώτο έγγραφο για τον χαοτικό σχεδιασμό της διαδρομής δημοσιεύθηκε το 2001 από τους Nakamura και Sekiguchi [122]. Αργότερα, οι χαοτικοί σχεδιαστές διαδρομών έγιναν αντικείμενο ενδιαφέροντος λόγω της πλούσιας γκάμας εφαρμογών τους που κυμαίνονται από οικιακές χρήσεις, π.χ. ρομπότ καθαρισμού, σε στρατιωτικές εφαρμογές, παραδείγματος χάριν, αυτόνομα ρομπότ παρακολούθησης. Για να ταξινομηθεί ως χαοτικός ένας αλγόριθμος σχεδιασμού διαδρομής, πρέπει να βασίζεται σε ένα χαοτικό δυναμικό σύστημα (CDS) ή σε χάρτες για τη δημιουργία ρομποτικών τροχιών στο περιβάλλον. Ένα δυναμικό σύστημα είναι χαοτικό αν εμφανίζει ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες [123-124] και τοπολογική μεταβατικότητα. Η ευαίσθητη εξάρτηση συνεπάγεται ότι μια μικρή αλλαγή στις αρχικές συνθήκες του δυναμικού συστήματος οδηγεί σε δραστικές αλλαγές στις τροχιές του. Το χαρακτηριστικό της τοπολογικής μεταβατικότητας συνεπάγεται ότι ο τομέας του δυναμικού συστήματος δεν μπορεί να υποδιαιρεθεί σε απομονωμένες περιοχές. Οποιαδήποτε τροχιά στο δυναμικό σύστημα που ξεκινά σε μια περιοχή του τομέα θα καταλήγει πάντα σε μια διαφορετική περιοχή του. Οι σχεδιαστές χαοτικών διαδρομών θα χρησιμοποιήσουν με κάποιο τρόπο δυναμικά συστήματα με αυτά τα δύο χαρακτηριστικά για να δημιουργήσουν τροχιές στο λειτουργικό περιβάλλον του ρομπότ, για παράδειγμα, προβάλλοντας ένα τρισδιάστατο χαοτικό δυναμικό σύστημα σε ένα δισδιάστατο δωμάτιο που εξερευνά ένα ρομπότ. Ενώ η ιδιότητα της τοπολογικής μεταβατικότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εγγυηθεί την πλήρη κάλυψη ολόκληρου του περιβάλλοντος με την πάροδο του χρόνου από κάποιον χαοτικό CPP, συνήθως δεν εξασφαλίζει την ομοιομορφία και την αποτελεσματικότητα της κάλυψης από το ρομπότ. Ελλείψει ελέγχου των χαοτικών διαδρομών, οι δημιουργημένες διαδρομές μπορεί να οδηγήσουν σε επαναλαμβανόμενη κάλυψη που θα αυξήσει σημαντικά τον χρόνο κάλυψης. Αυτή η εργασία θα διερευνήσει διάφορες μεθόδους χειρισμού που αποσκοπούν στη βελτίωση της ομοιομορφίας και της αποτελεσματικότητας των χαοτικών διαδρομών.

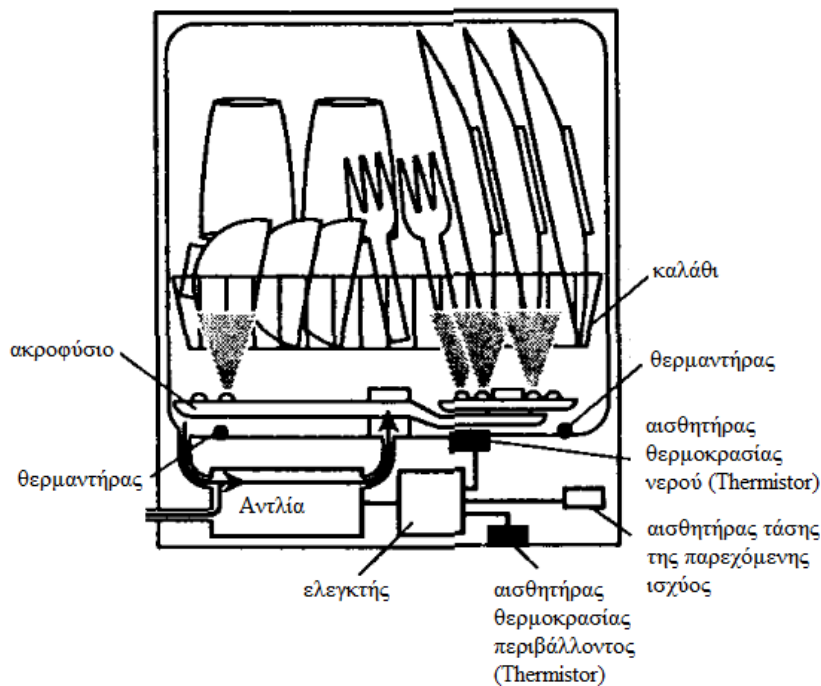
Ο χαοτικός σχεδιασμός της διαδρομής έχει τη δυνατότητα να αναζωογονήσει τον τομέα της ρομποτικής για την άμεση (online) κάλυψη άγνωστων περιβαλλόντων. Ωστόσο, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός μελετών διερευνά πτυχές των χαοτικών σχεδιαστών διαδρομών για αυτές τις εργασίες, όπως η [125] που έκανε ανασκόπηση διαφόρων εφαρμογών του χάους στη ρομποτική και μόνο εν συντομία αναφέρει τον χαοτικό σχεδιασμό διαδρομής.

Το ντετερμινιστικό χάος έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη καταναλωτικών ηλεκτρονικών προϊόντων και ευφυών βιομηχανικών συστημάτων. Ο Aihara περιέγραψε τη χαοτική μηχανική ως ευρείες τεχνικές εφαρμογές του χάους [126-128]. Δύο από τις πρώτες αυτές εφαρμογές φαίνονται στα σχήματα 1.2 και 1.3. Το σχήμα 1.2 δείχνει ότι η άνεση που παρέχεται από τον κατάλληλο χαοτικό έλεγχο κάνοντας χρήση ενός χαοτικού αερόθερμου κηροζίνης, της πρώτης ηλεκτρικής συσκευής στον κόσμο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το χάος, είναι μεγαλύτερη από αυτή που προσφέρεται από τις συμβατικές τεχνικές ελέγχου [126].



Σχήμα 1.2: Αίσθηση θερμότητας σε σύγκριση με τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας [126]

Στο σχήμα 1.3 ένα πλυντήριο πιάτων με διπλά συνδεδεμένο ακροφύσιο αντιπροσωπεύει μια άλλη εφαρμογή της θεωρίας του χάους στις οικιακές συσκευές. Μια βασική ιδιότητα του χάους είναι ότι απλά δυναμικά συστήματα μπορούν συχνά να δημιουργήσουν πολύπλοκες δυναμικές. Αυτά τα συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν χρησιμοποιώντας απλά αναλογικά εξαρτήματα (hardware) [129].



Σχήμα 1.3: Μηχανισμός πλυντηρίου πιάτων [130]

Το χάος και τα fractals είναι εγγενή χαρακτηριστικά και συμπεριφορές στη φύση. Η κοινότητα της ρομποτικής προσπαθεί να μιμηθεί αυτές τις φυσικές συμπεριφορές με την έρευνα ανθρωποειδών, βιο-ρομπότ και συστημάτων εμπνευσμένων από τη βιολογία, όπως τα σμήνη. Αυτά τα συστήματα αντιμετωπίζουν πολύπλοκα προβλήματα όπως η αίσθηση θορύβου, οι δονήσεις και οι αλληλεπιδράσεις ρομπότ-περιβάλλοντος που οδηγούν σε χάος. Ομοίως, κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών, τα ρομπότ αναζήτησης και διάσωσης πρέπει να πλοηγηθούν σε ένα εξαιρετικά ακανόνιστο και ασταθές περιβάλλον προκειμένου να αντιμετωπίσουν ένα πρόβλημα σχεδιασμού κίνησης [125], [131]. Τέτοιες μη γραμμικές ιδιότητες οδήγησαν τους ερευνητές στη χρησιμοποίηση χαοτικών τεχνικών προγραμματισμού κίνησης για κινούμενα ρομπότ ώστε να εξασφαλίσουν μια γρήγορη αναζήτηση ολόκληρου του χώρου εργασίας [132].

Οι εφαρμογές του χάους στη ρομποτική ταξινομούνται σε δύο τύπους: ανάλυση χάους και σύνθεση χάους. Η ανάλυση του χάους προϋποθέτει την παρατήρηση της χαοτικής συμπεριφοράς στα ρομπότ, ενώ η σύνθεση του χάους συνεπάγεται την παραγωγή τεχνητού χάους ώστε τα ρομπότ να εκτελέσουν συγκεκριμένες εργασίες [128]. Προκειμένου να διερευνηθούν οι εφαρμογές του χάους στη ρομποτική, αυτή η εργασία είναι οργανωμένη ως εξής: το κεφάλαιο 2 παρέχει μια επισκόπηση των δυναμικών συστημάτων, της θεωρίας του χάους και της ρομποτικής. Το κεφάλαιο 3 παρουσιάζει μια επισκόπηση των μη χαοτικών σχεδιαστών για να υπάρχει μέτρο σύγκρισης με τους χαοτικούς. Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει την ανάλυση του χάους στη ρομποτική. Η σύνθεση του χάους στη ρομποτική παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5 ως η εφαρμογή των χαοτικών συστημάτων για τον προγραμματισμό της κίνησης των αυτόνομα κινούμενων ρομπότ και της απόδρασης από τα τοπικά ελάχιστα σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Η μίξη αλγορίθμων και χάους οδηγεί σε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα, ξεπερνώντας το ταβάνι της επίδοσης των απλών χαοτικών αλγορίθμων. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι διάφορες στρατηγικές για έλεγχο της κίνησης με σκοπό την αντιμετώπιση προβλημάτων που ανακύπτουν είτε από το περιβάλλον εργασίας είτε από την ίδια τη χαοτική κίνηση του ρομπότ. Στο 7ο κεφάλαιο γίνεται μία σύγκριση χαοτικών και τυχαίων αλγορίθμων ως προς την επίδοσή τους, καθώς και χαοτικών αλγορίθμων μεταξύ τους. Διαπιστώνεται μια υπεροχή των χαοτικών έναντι των τυχαίων αλγορίθμων, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις όταν αυτοί προσεγγίζουν το μέγιστο της επίδοσής τους. Το κεφάλαιο 8 παρουσιάζει την συζήτηση γύρω από τις πραγματικές συνθήκες εργασίας των ρομπότ και την κατεύθυνση των μελλοντικών εργασιών. Το κεφάλαιο 9 παρουσιάζει τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2^ο: Θεωρητικό μέρος

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές έννοιες που αφορούν γενικά τα δυναμικά συστήματα, ειδικά τα γραμμικά και ιδιαίτερα τα μη γραμμικά. Παρουσιάζεται η θεωρία του Χάους, αναπτύσσονται γενικές έννοιες της ρομποτικής και περιγράφεται το αυτόνομο κινούμενο ρομπότ, οι εφαρμογές του και η θέση του στην καθημερινότητα του ανθρώπου.

2.2 Δυναμικά συστήματα

Τα δυναμικά συστήματα αναφέρονται σε συστήματα των οποίων η συμπεριφορά εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή οι καταστάσεις τους ή οι μεταβλητές τους αλλάζουν σε σχέση με το χρόνο. Σε ένα δυναμικό σύστημα, οι καταστάσεις του μπορεί να επηρεάζονται από εσωτερικούς και εξωτερικούς παράγοντες. Επίσης, συχνά χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη αλληλεπιδράσεων μεταξύ των στοιχείων τους, οι οποίες επίσης επηρεάζουν την εξέλιξή τους. Ένα δυναμικό σύστημα μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά μέσω διαφορικών εξισώσεων ή αλγορίθμων που περιγράφουν την εξέλιξη των καταστάσεών του με την πάροδο του χρόνου. Παραδείγματα δυναμικών συστημάτων περιλαμβάνουν την κίνηση ενός σώματος κάτω από τη δράση δυνάμεων, τη διάδοση μιας ασθένειας σε μια ανθρώπινη κοινότητα, την εξέλιξη της ατμόσφαιρας και την κίνηση των πλανητών στο ηλιακό σύστημα [133].

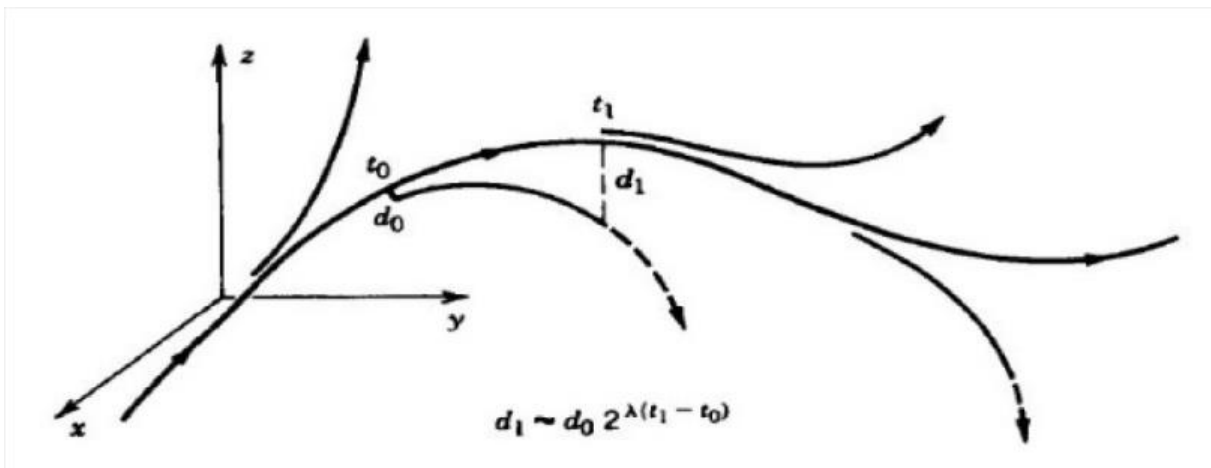
Τα δυναμικά συστήματα μπορούν να είναι τόσο γραμμικά όσο και μη γραμμικά, ανάλογα με τη φύση των εξισώσεων που τα περιγράφουν και τη σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου. Σε ένα γραμμικό δυναμικό σύστημα, η σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου είναι γραμμική. Αυτό σημαίνει ότι η εξασθένιση, η ενίσχυση ή η συνέλιξη της εισόδου θα έχει γραμμική επίδραση στην έξοδο [134]. Στα μη γραμμικά δυναμικά συστήματα, η σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου δεν είναι γραμμική. Αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να είναι πιο πολύπλοκη, με μη γραμμικές επιπτώσεις της εισόδου στην έξοδο.

Τα μη γραμμικά δυναμικά συστήματα αποτελούν ένα είδος δυναμικών συστημάτων όπου η σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου δεν είναι γραμμική. Αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά τους δεν μπορεί να περιγραφεί από την απλή γραμμική συνάρτηση που χαρακτηρίζει τα γραμμικά συστήματα. Οι μη γραμμικές δυναμικές περιλαμβάνουν συχνά πολύπλοκες συμπεριφορές, όπως η μη-προβλεψιμότητα, η ύπαρξη μη-ασταθών σημείων ισορροπίας (όπου η κατάσταση του συστήματος μπορεί να είναι είτε σταθερή είτε εκτοπισμένη) και η εμφάνιση χαοτικών διακυμάνσεων. Για τη μελέτη των μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων χρησιμοποιούνται διάφορες μαθηματικές τεχνικές, όπως η ανάλυση των φάσεων, η δυναμική συστήματος σε πολλές διαστάσεις, η θεωρία του χάους και η μέθοδος των χαρτών Poincaré [135]. Οι εφαρμογές των μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων είναι ευρείες και καλύπτουν πολλούς τομείς, όπως η φυσική, η βιολογία, η οικονομία, η μηχανική, η επιστήμη των υπολογιστών και η ρομποτική.

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά αποτέλεσαν το σημείο εκκίνησης για τη χρήση μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων στην ανάπτυξη αυτόνομα κινούμενων ρομπότ. Είναι γνωστό ότι η πλούσια δυναμική συμπεριφορά των μη γραμμικών συστημάτων και ιδιαίτερα τα χαοτικά φαινόμενα έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές μηχανικής όπως οι επικοινωνίες [136], η κρυπτογραφία [137], [138], οι γεννήτριες τυχαίου bit [139] και τα νευρωνικά δίκτυα [140]. Επιπλέον, η πρόθεση να εφαρμοστεί χαοτική συμπεριφορά στα ρομποτικά συστήματα είναι επίσης ένα πολύ ενδιαφέρον έργο των τελευταίων ετών [141-144].

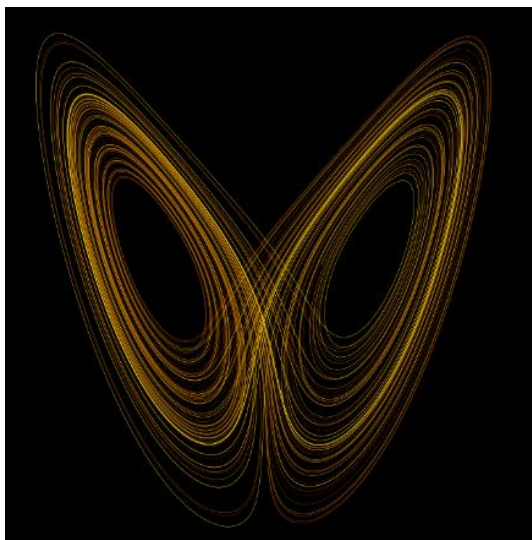
2.3 Θεωρία του Χάους

Κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα, έλαβαν χώρα τρεις μεγάλες επαναστάσεις: η σχετικότητα, η κβαντική μηχανική και το χάος. Όπως και οι άλλες δύο επαναστάσεις, το χάος κατέρριψε την ιδεολογία της Νευτώνειας Φυσικής [145]. Η θεωρία του χάους, που ονομάζεται επίσης θεωρία δυναμικών συστημάτων ή θεωρία μη γραμμικών ταλαντώσεων, είναι η μελέτη της ασταθούς απεριοδικής συμπεριφοράς σε αιτιοκρατικά δυναμικά συστήματα, τα οποία δείχνουν ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες. Ωστόσο, ένας αιτιοκρατικός νόμος διέπει τη μη γραμμική συμπεριφορά τους [146-147]. Η θεωρία αυτή αποτελεί ένα πεδίο της μαθηματικής φυσικής και επιστήμης των υπολογιστών που ασχολείται με τη μελέτη των δυνατοτήτων πρόβλεψης και αναγνώρισης μοτίβων σε δυναμικά συστήματα που εκδηλώνουν μη-γραμμική και απρόβλεπτη συμπεριφορά, γνωστή ως χάος. Αυτά τα συστήματα εκδηλώνουν ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες, δηλαδή μικρές αλλαγές στις αρχικές συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες αλλαγές στη συμπεριφορά τους. Αυτή η ευαισθησία καθιστά τα συστήματα χαοτικά και δυσκολεύει την πρόβλεψη της μελλοντικής τους συμπεριφοράς με ακρίβεια. Τα συστήματα που παρουσιάζουν μαθηματικό χάος είναι ντετερμινιστικά και επομένως εύτακτα υπό μια έννοια. Αυτή η τεχνική χρήση του όρου «χάος» διαφωνεί με την καθομιλουμένη, στην οποία το χάος υποδηλώνει την παντελή έλλειψη τάξης. Το χάος βρίσκεται μέσα σε μια καλά οργανωμένη διάταξη: δεν είναι διαταραχή με τη συνήθη έννοια. Η ευαίσθητη εξάρτηση συνεπάγεται ότι τροχιές με αυθαίρετα κοντινές αρχικές συνθήκες απομακρύνονται μεταξύ τους μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Δύο τροχιές που ξεκινούν η μια κοντά στην άλλη αλλά αποκλίνουν μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα [148]

Κύριοι παράγοντες της θεωρίας του χάους είναι οι ελκυστές (attractors), τα διαδοχικά διασπαστικά σημεία, και η μη-περιοδική συμπεριφορά. Παρόλο που το χάος φαίνεται αταξινόμητο, η θεωρία του χάους αναγνωρίζει ότι υπάρχουν μοτίβα και δομές που μπορούν να αναλυθούν και να κατανοηθούν. Ο χαοτικός ελκυστής που παράγεται από τον Lorenz στο χώρο των φάσεων μοιάζει με μια πεταλούδα [2]. Το φαινόμενο της πεταλούδας έχει γίνει το έμβλημα της θεωρίας του χάους (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Η πλοκή του ελκυστή Lorenz [149]

Εφαρμογές της θεωρίας του χάους μπορούν να βρεθούν σε πολλούς τομείς, η μετεωρολογία (πρόβλεψη του καιρού) [150-151], η χρηματοοικονομική (ανάλυση των χρηματοοικονομικών αγορών) [152] και η φυσική (δυναμικά συστήματα) [153]. Οι έννοιες της θεωρίας του χάους έχουν εφαρμογές στους τομείς των τεχνητών νευρωνικών δικτύων [154] και της μηχανικής μάθησης [155], όπου χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση μοτίβων και την αντιμετώπιση προβλημάτων μεγάλης πολυπλοκότητας.

Για να ορίσουμε με αυστηρό και συγκεκριμένο τρόπο την έννοια του χάους, είναι απαραίτητο να εισάγουμε πρώτα δύο ιδιότητες που μπορεί να εμφανίζει μια απεικόνιση και γενικά ένα δυναμικό σύστημα. Μια απεικόνιση ονομάζεται *χαοτική* σε ένα αναλλοίωτο σύνολο, αν στο σύνολο αυτό έχει ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες και είναι τοπολογικά μεταβατική. Για πληρότητα εισάγουμε και μία τρίτη. Οι χαοτικές τροχιές του πρέπει να είναι επαναλαμβανόμενες και πυκνές. Εξετάζοντας την γενικότερη περίπτωση των πολυδιάστατων απεικονίσεων, που ορίζονται γενικά σε ένα μετρικό χώρο X , η απόσταση δύο σημείων \mathbf{x} και $\tilde{\mathbf{x}}$ δίνεται από μια συνάρτηση $d(\mathbf{x}, \tilde{\mathbf{x}})$, η οποία ονομάζεται μετρική, π.χ. στον \mathbb{R}^k είναι η Ευκλείδεια απόσταση. Ένα σύνολο $S \subset X$ ονομάζεται αναλλοίωτο σύνολο μιας απεικόνισης f αν $f(S)=S$ [156].

Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να ενσωματώσουν τα κύρια χαρακτηριστικά των χαοτικών συστημάτων στα κινούμενα ρομπότ, δηλαδή τη μεγάλη ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες, προκειμένου να οδηγηθούν σε απρόβλεπτες τροχιές. Ένα δυναμικό μη γραμμικό σύστημα θα ονομάζεται *χαοτικό* αν εκπληρώνει της ακόλουθες τρεις ιδιότητες [157],[158-159]:

- (i) Πολύ ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες.
- (ii) Τοπολογική μεταβατικότητα.
- (iii) Οι χαοτικές τροχιές του πρέπει να είναι επαναλαμβανόμενες και πυκνές

(i) Ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες

Τα χαοτικά συστήματα χαρακτηρίζονται από την ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι μια απλή μεταβολή στις αρχικές συνθήκες μπορεί γρήγορα να προκαλέσει τεράστιες διαφορές σε μια χαοτική τροχιά. Μία απεικόνιση f γενικά σε έναν μετρικό χώρο X λέμε ότι έχει ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες, αν υπάρχει $\delta > 0$ έτσι ώστε για κάθε σημείο \mathbf{x}_0 του X και $\varepsilon > 0$

υπάρχει $\bar{x}_0 \in X$ με $d(x_0, \bar{x}_0) < \varepsilon$ και $n \geq 0$ τέτοιος ώστε $d(x_n, \bar{x}_n) > \delta$. Αυτό σημαίνει ότι μια περιοχή οποιουδήποτε σημείου x_0 περιέχει τουλάχιστον ένα άλλο σημείο \bar{x}_0 , του οποίου η τροχιά κάτω από την απεικόνιση μετά από έναν πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων θα απέχει από την τροχιά του x_0 απόσταση μεγαλύτερη από ένα σταθερό αριθμό. Έτσι, όσο κοντά και αν ξεκινήσουν δύο τροχιές θα απομακρυνθούν τελικά ή μια από την άλλη εκθετικά. Το γεγονός αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία στην αριθμητική επίλυση της προβλήματος. Ο αριθμητικός υπολογισμός μιας τροχιάς, όσο ακριβής και αν είναι, μπορεί να διαφέρει αρκετά από την πραγματική τροχιά, μέσα στο όριο του υπολογιστικού σφάλματος [156]. Αυτή είναι η ιδιότητα που συνεισφέρει στην επιθυμητή απρόβλεπτη τροχιά των κινούμενων ρομπότ και καθιστά την μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της τροχιάς του ρομπότ αδύνατη.

(ii) Τοπολογική μεταβατικότητα

Μια απεικόνιση f σε ένα αναλλοίωτο σύνολο S ονομάζεται τοπολογικά μεταβατική αν για δύο οποιαδήποτε ανοιχτά υποσύνολα U και V του S υπάρχει $n \geq 0$, τέτοιος ώστε $f^n(U) \cap V \neq \emptyset$. Στην περίπτωση αυτή από κάθε περιοχή του S ξεκινάει τουλάχιστον μία τροχιά της f που περνάει από κάθε περιοχή του συνόλου S και πλησιάζει αυθαίρετα κοντά σε κάθε σημείο του S . Μια τέτοια τροχιά ονομάζεται πυκνή στο S . Ως συνέπεια, το αναλλοίωτο σύνολο στο οποίο δρα μια τοπολογικά μεταβατική απεικόνιση δεν μπορεί να διαχωριστεί από πλευράς δυναμικής, με την έννοια ότι οι ανοιχτές περιοχές του «αναμειγνύονται» κάτω από την απεικόνιση. Αν μάλιστα ο n δεν είναι μοναδικός, αλλά η προηγούμενη ιδιότητα ισχύει για κάθε $n \geq n_0$, τότε ονομάζεται τοπολογική ανάμιξη (mixing) [156]. Η ιδιότητα της τοπολογικής ανάμιξης σημαίνει ότι το δυναμικό σύστημα, ειδικά το χαοτικό ρομπότ, θα κινείται στον χρόνο, έτσι ώστε κάθε τροχιακή περιοχή να καλύπτει ένα μέρος οποιασδήποτε συγκεκριμένης περιοχής. Αυτό το χαρακτηριστικό των δυναμικών χαοτικών συστημάτων εγγυάται την πλήρη κάλυψη ολόκληρου του περιβάλλοντος χώρου εργασίας [160].

(iii) Οι χαοτικές τροχιές του πρέπει να είναι επαναλαμβανόμενες και πυκνές

Η τρίτη ιδιότητα των χαοτικών συστημάτων σημαίνει ότι η τροχιά του δυναμικού χαοτικού συστήματος θα είναι πυκνή αν έρθει αυθαίρετα κοντά σε οποιοδήποτε σημείο στον χώρο, έτσι ώστε οι χαοτικές τροχιές να είναι επαναλαμβανόμενες και πυκνές. Πολλοί συγγραφείς στον ορισμό των χαοτικών απεικονίσεων προσθέτουν αυτήν την τρίτη ιδιότητα, που σημαίνει ότι τα περιοδικά σημεία της απεικόνισης θα είναι πυκνά στο S . Πρόσφατα εξάλλου αποδείχθηκε ότι κάθε συνεχής απεικόνιση σε έναν μετρικό χώρο, που είναι τοπολογικά μεταβατική και έχει ένα πυκνό σύνολο περιοδικών τροχιών, θα έχει και ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες. Λίγο αργότερα αποδείχθηκε ακόμα ότι οι πραγματικές συνεχείς μονοδιάστατες απεικονίσεις σε ένα κλειστό υποσύνολο του πραγματικού άξονα που είναι τοπολογικά μεταβατικές διαθέτουν ένα πυκνό σύνολο περιοδικών σημείων. Στην περίπτωση αυτή, δηλαδή, η τοπολογική μεταβατικότητα, συνεπάγεται χάος. [156]

Η χαοτική δυναμική εισέρχεται όλο και περισσότερο στη μηχανική και συνεπώς στην πρακτική εφαρμογή. Τις περισσότερες περιπτώσεις, η χαοτική συμπεριφορά αναλύεται με διαφορετικές παραμέτρους και θέλουμε να αποφευχθεί ή να κατασταλεί λόγω της αναξιόπιστης και απρόβλεπτης συμπεριφοράς των χαοτικών συστημάτων. Διάφορες στρατηγικές έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση διαφορετικών μη γραμμικών συμπεριφορών και για τον έλεγχο της προκύπτουσας χαοτικής συμπεριφοράς [161-162].

Τα χαοτικά συστήματα είναι μη γραμμικά δυναμικά συστήματα των οποίων οι φαινομενικά τυχαίες καταστάσεις διαταραχής διέπονται από υποκείμενα πρότυπα και αιτιοκρατικούς νόμους [163-164]. Χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό της διαδρομής για να παράγουν μια διαδρομή που παρουσιάζει ευαισθησίες στις αρχικές συνθήκες και τοπολογική μεταβατικότητα [165]. Η ευαισθησία στις αρχικές

συνθήκες σημαίνει ότι αλλάζοντας ελαφρώς την αρχική τιμή του συστήματος, η πορεία του θα είναι εντελώς διαφορετική [166]. Επομένως, αποφεύγει την αναπαραγωγή της κίνησης δύο φορές. Τοπολογική μεταβατικότητα σημαίνει ότι αυξάνοντας τον αριθμό των βημάτων, το ρομπότ θα εξερευνήσει το πλήρες πλέγμα.

2.4 Ρομποτική

Η ρομποτική είναι τομέας της τεχνολογίας που ασχολείται με τη διεπιστημονική μελέτη και εφαρμογή του σχεδιασμού, της κατασκευής, της λειτουργίας και της χρήσης ρομπότ. [167]. Ο κλάδος της ρομποτικής μελετά της μηχανές εκείνες που μπορούν να αντικαταστήσουν τον άνθρωπο στην εκτέλεση μιας εργασίας, η οποία συνδυάζει τη σωματική δραστηριότητα με τη διαδικασία λήψης αποφάσεων [168]. Τα ρομπότ είναι μηχανικά ή ηλεκτρονικά συστήματα που μπορούν να εκτελούν εργασίες με αυτοματισμό ή αυτόνομα, είτε είναι σε βιομηχανικά περιβάλλοντα είτε σε άλλες εφαρμογές. Μπορούν να αναλάβουν αποστολές που είναι επικίνδυνες ή δύσκολες για τον άνθρωπο και να εκτελέσουν καθήκοντα σε περιβάλλοντα όπου η πρόσβαση ή η εργασία είναι δύσκολη, επικίνδυνη ή αδύνατη για ανθρώπους.

2.4.1 Αυτόνομα κινούμενα ρομπότ

Σήμερα, ο κόσμος στοχεύει στην αυτοματοποίηση των πάντων. Η αυτοματοποίηση είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα ώστε αυτό να συμπεριφέρεται χωρίς ανθρώπινη επίβλεψη [169]. Ένα από τα παραδείγματα αυτοματισμού είναι το αυτόνομο κινούμενο ρομπότ [165], το οποίο μπορεί να εκτελέσει πληθώρα διεργασιών χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Ο σχεδιασμός της διαδρομής είναι απαραίτητος για το αυτόνομο κινούμενο ρομπότ, καθώς του επιτρέπει να βρει την πορεία του μεταξύ δύο σημείων.

Ο σχεδιασμός της διαδρομής έχει διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με την εργασία που απαιτείται από το ρομπότ. Μία από αυτές τις κατηγορίες στοχεύει στην εξεύρεση της βέλτιστης διαδρομής από την τρέχουσα θέση του σε έναν νέο προορισμό. Μια άλλη κατηγορία είναι η γρήγορη σάρωση, η οποία είναι ιδιαίτερα απαιτητική για τα ρομπότ επιτήρησης. Το ρομπότ θα πρέπει να σαρώνει γρήγορα ολόκληρο το έδαφος χωρίς να έχει συγκεκριμένο προορισμό ή τελικό σημείο. Η χάραξη πορείας χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές όπως ρομπότ καθαρισμού, κοπτήρες γκαζόν, εξερεύνηση υποβρύχιων πηγών [170], βιομηχανικές μεταφορές, πυροσβεστικές συσκευές και στρατιωτικές εφαρμογές [171]. Η επιτήρηση του εδάφους κατά εισβολέων απαιτεί τυχαία κίνηση του ρομπότ και υψηλή μη προβλεψιμότητα της πορείας του. Επομένως, τα χαοτικά συστήματα είναι κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές.

Η θεωρία του χάους εμφανίστηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1960 [172] και ο πρώτος χαοτικός σχεδιασμός διαδρομών έγινε το 1999 χρησιμοποιώντας το σύστημα Arnold. Στη συνέχεια, πολλά χαοτικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για την ίδια εφαρμογή, συμπεριλαμβανομένων των discrete map [173], των standard map [174] και των συνεχών συστημάτων όπως τα συστήματα Chua [175] και Lorenz [176]. Επιπλέον, χαοτικές γεννήτριες τυχαίου bit [165] χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό μονοπατιών, όπου τα παραχθέντα bit αποκωδικοποιούνται σε κατευθύνσεις.

Τα αυτόνομα κινούμενα ρομπότ, μετά από είκοσι χρόνια συνεχόμενης έρευνας, έχουν αποτελέσει ένα θέμα με μεγάλο ενδιαφέρον λόγω των συνεχώς αυξανόμενων εφαρμογών σε βιομηχανικές, πολιτικές και στρατιωτικές δραστηριότητες. Έχουν αναπτυχθεί ενδιαφέρουσες εφαρμογές που αφορούν κινούμενα ρομπότ, τις βιομηχανικές μεταφορές [177], συσκευές καθαρισμού δαπέδων [178-179] και συσκευές καταπολέμησης της φωτιάς [180]. Ειδικά, η χρήση αυτόνομα κινούμενων ρομπότ για στρατιωτικές εφαρμογές, η επιτήρηση εδαφών [181-182], η εξερεύνηση εδάφους για αναζήτηση επικίνδυνων ή άλλων υλικών [183] ή για περιπολία (σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις) [184-186],

αποτελούν ένα ενδιαφέρον πεδίο μελέτης. Αυτές οι στρατιωτικές αποστολές απαιτούν έξυπνα ρομποτικά συστήματα, τα οποία ανά περίπτωση επικεντρώνονται σε ορισμένα χαρακτηριστικά όπως η αντίληψη και η ταυτοποίηση του στόχου, η τοποθέτηση του ρομπότ στην περιοχή και η ενημέρωση του χάρτη της περιοχής. Ωστόσο, το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό, που καθορίζει την επιτυχία αυτών των ρομποτικών συστημάτων, είναι ο σχεδιασμός της διαδρομής. Σε αυτή τη διαδικασία οι ερευνητές προσπαθούν να βρουν τον τρόπο για να δημιουργήσουν μια τροχιά, η οποία θα εγγυηθεί την παρακολούθηση ολόκληρης της περιοχής, την εύρεση των εκρηκτικών ή του εισβολέα. Επιπλέον, η διαδρομή του ρομπότ πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο δύσκολο να προβλεφθεί από τον εισβολέα. Ως εκ τούτου, το πρόβλημα της περιπολίας μιας περιοχής με ένα κινούμενο ρομπότ είναι ένα ζήτημα που έχει να κάνει με την εξεύρεση σχεδίου για την παραγωγή όχι μόνο των απρόβλεπτων τροχιών, αλλά και έναν τρόπο για να σαρώσει γρήγορα ολόκληρη την προβλεπόμενη περιοχή. Έτσι, αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα θέματα μελέτης μεταξύ των ερευνητών για την επιλογή του πιο κατάλληλου αυτόνομου ρομποτικού συστήματος.

Τα χαοτικά ρομποτικά συστήματα, τα οποία αναπτύσσονται σήμερα, βασίζονται κυρίως σε μικροελεγκτές ή CPU για τον έλεγχο της χαοτικής τους κίνησης [187]. Η παραγωγή της τροχιάς του ρομπότ βασίζεται στη μεγάλη ευαισθησία του συστήματος στις αρχικές συνθήκες, η οποία είναι το γνωστό χαρακτηριστικό της χαοτικής συμπεριφοράς. Η ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες σημαίνει, ότι μια μικρή απόκλιση από τις αρχικές συνθήκες του συστήματος θα παράγει μια εντελώς διαφορετική χαοτική τροχιά. Αυτό είναι το χαρακτηριστικό, το οποίο συμβάλλει στον απρόβλεπτο σχεδιασμό διαδρομής του επιθυμητού ρομπότ και καθιστά την μακροπρόθεσμη πρόβλεψη μιας χαοτικής τροχιάς, με βάση της μετρήσεις σε πεπερασμένο χρόνο, πρακτικά αδύνατη. Η τοπολογική μεταβατικότητα εξασφαλίζει ότι το χαοτικά κινούμενο ρομπότ θα κινηθεί με την πάροδο του χρόνου, έτσι ώστε κάθε καθορισμένη περιοχή της τροχιάς θα καλύψει τελικά μέρος οποιασδήποτε συγκεκριμένης περιοχής. Αυτή η ιδιότητα των χαοτικών συστημάτων **εγγυάται μια πλήρη σάρωση ολόκληρου του εδάφους**. Τέλος, όπως έχει αναφερθεί, το τρίτο σημαντικό χαρακτηριστικό του χαοτικού συστήματος είναι ότι οι χαοτικές τροχιές του πρέπει να είναι πυκνές. Αυτό σημαίνει ότι η τροχιά του δυναμικού συστήματος είναι πυκνή, αν έρχεται αυθαίρετα κοντά σε οποιοδήποτε σημείο στον τομέα. Έτσι, βάσει των προαναφερθέντων συνθηκών, μια χαοτική τροχιά, από την άποψη του εισβολέα, παρουσιάζει μια περίπλοκη συμπεριφορά, η οποία δεν παρουσιάζει κανένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο και φαίνεται να είναι εντελώς τυχαία. Αλλά ακόμα και αν η κάλυψη του εδάφους είναι παρόμοια σε αυτές τις δύο προσεγγίσεις, χαοτική και τυχαία, η χαοτική έχει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα επειδή βασίζεται στην αιτιοκρατία. Αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά του ρομπότ μπορεί να προβλεφθεί εκ των προτέρων από τον σχεδιαστή του συστήματος, εάν και μόνο αν η τροχιά του χαοτικού ρομπότ υπολογίζεται αριθμητικά. Αλλά στην περίπτωση που οι τροχιές παράγονται από οποιοδήποτε χαοτικό ηλεκτρονικό κύκλωμα αποδεικνύεται ότι ακόμη και για τον σχεδιαστή η τροχιά είναι απρόβλεπτη [165]. Ως εκ τούτου, ένα αυτόνομο κινούμενο ρομπότ, με τέτοιου είδους χαρακτηριστικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ειδικά ως ρομπότ περιπολίας ή ως συσκευή εξόρυξης.

2.4.2 Ρομπότ αντί για τον άνθρωπο

Η ρομποτική έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των παρακάτω:

Βιομηχανική Ρομποτική: Χρησιμοποιείται σε εργοστάσια για την αυτοματοποίηση και τη βελτίωση της παραγωγής. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η πυκνότητα ρομπότ από το 2013 έως το 2022, όπως παρουσιάστηκε από τη Διεθνή Ομοσπονδία Ρομποτικής (International Federation of Robotics (IFR)). Η πυκνότητα ρομπότ είναι ο αριθμός των λειτουργικών βιομηχανικών ρομπότ προς τον αριθμό των εργαζομένων. Μπορεί να καλύπτει ολόκληρη τη μεταποιητική βιομηχανία ή μόνο συγκεκριμένους

βιομηχανικούς κλάδους. Ο αριθμός των εργαζομένων χρησιμεύει ως μέτρο οικονομικού μεγέθους, με αποτέλεσμα ο συντελεστής του λειτουργικού αποθέματος ως προς τους εργαζόμενους να θέτει το λειτουργικό απόθεμα σε ομοιόμορφη βάση [188].



Σχήμα 2.3: Πυκνότητα ρομπότ (2013-2022) [188]

Σύμφωνα με την Marina Bill [188], πρόεδρου της Διεθνούς Ομοσπονδίας Ρομποτικής, τα δεδομένα της πυκνότητας ρομπότ αποκαλύπτουν την κατάσταση της αυτοματοποίησης παγκοσμίως και μας επιτρέπουν να συγκρίνουμε περιοχές και χώρες. Η ταχύτητα υιοθέτησης της ρομποτικής σε εργοστάσια σε όλο τον κόσμο είναι εντυπωσιακή: η νέα παγκόσμια μέση πυκνότητα ρομπότ έφτασε στο υψηλότερο επίπεδο όλων των εποχών το 2022 με 151 ρομπότ ανά 10.000 εργαζόμενους – περισσότερο από το διπλάσιο του αριθμού που μετρήθηκε μόλις πριν από έξι χρόνια, το 2017. Η Δημοκρατία της Κορέας (1.012 ρομπότ ανά 10.000 εργαζόμενους) είναι η πιο αυτοματοποιημένη χώρα, ακολουθούμενη από τη Σιγκαπούρη (730 μονάδες) και τη Γερμανία (415 μονάδες), όπως προκύπτει από την έκθεση World Robotics 2023 που παρουσιάστηκε από την IFR. Η Ασία έχει πυκνότητα ρομπότ 168 μονάδες ανά 10.000 εργαζόμενους στη μεταποιητική βιομηχανία. Σε παγκόσμια κλίμακα, οι οικονομίες της Κορέας, της Σιγκαπούρης, της Ιαπωνίας, της ηπειρωτικής Κίνας, του Χονγκ Κονγκ και της κινεζικής Ταϊπέι κατατάσσονται στις δέκα πιο αυτοματοποιημένες χώρες. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει πυκνότητα ρομπότ 208 μονάδες ανά 10.000 εργαζόμενους με τη Γερμανία, τη Σουηδία και την Ελβετία να κατατάσσονται στην ομάδα των δέκα παγκοσμίως πρώτων. Η πυκνότητα ρομπότ της Βόρειας Αμερικής είναι 188 μονάδες ανά 10.000 εργαζόμενους. Οι Ηνωμένες Πολιτείες είναι μεταξύ των δέκα πιο αυτοματοποιημένων χωρών στη μεταποιητική βιομηχανία. Η νέα παγκόσμια μέση πυκνότητα ρομπότ έφτασε στο υψηλότερο επίπεδο όλων των εποχών, όπως φάνηκε στο σχήμα 2.3 και αναλύεται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Πυκνότητα ρομπότ ανά χώρα και μέσοι όροι [188]

Η Δημοκρατία της Κορέας είναι πρώτη στη χρήση βιομηχανικών ρομπότ παγκοσμίως. Η πυκνότητα των ρομπότ αυξάνεται κατά 6% κατά μέσο όρο κάθε χρόνο από το 2017. Η κορεατική οικονομία επωφελείται από δύο μεγάλους πελάτες – μια ισχυρή βιομηχανία ηλεκτρονικών και μια εξέχουσα αυτοκινητοβιομηχανία. Η Σιγκαπούρη ακολουθεί με 730 ρομπότ ανά 10.000 εργαζομένους. Η Σιγκαπούρη είναι μια μικρή χώρα με πολύ χαμηλό αριθμό εργαζομένων στη μεταποιητική βιομηχανία. Η Γερμανία (415 ρομπότ ανά 10.000 εργαζόμενους) κατατάσσεται τρίτη. Η πυκνότητα ρομπότ της μεγαλύτερης οικονομίας της Ευρώπης έχει αυξηθεί κατά 5% CAGR (Compound Annual Growth Rate (Ετήσιος Ρυθμός Ανάπτυξης)) από το 2017 ως το 2022. Η Ιαπωνία βρίσκεται στην τέταρτη θέση (397 μονάδες). Η πυκνότητα των ρομπότ της κυρίαρχης χώρας κατασκευής ρομπότ παγκοσμίως αυξανόταν κατά 7% κατά μέσο όρο κάθε χρόνο (2017-2022). Η Κίνα έφτασε στην πέμπτη θέση το 2021 και διατήρησε αυτή τη θέση το 2022. Η τεράστια επένδυση της χώρας στην τεχνολογία αυτοματισμού αποφέρει υψηλή πυκνότητα ρομπότ των 392 ρομπότ ανά 10.000 εργαζομένους – παρά το τεράστιο εργατικό δυναμικό περίπου 38 εκατομμυρίων ανθρώπων στη μεταποιητική βιομηχανία. Η πυκνότητα των ρομπότ στις Ηνωμένες Πολιτείες αυξήθηκε από 274 μονάδες το 2021 σε 285 το 2022. Η χώρα κατατάσσεται δέκατη στον κόσμο [188].

Ιατρική Ρομποτική: Χρησιμοποιείται σε επεμβάσεις χειρουργικής, ακριβείς διαδικασίες και αντιμετώπιση αναπηριών. Λίγο περισσότερο από τρεις δεκαετίες πριν, οι πρώτοι επιστήμονες ρομποτικής (roboticists) άρχισαν να διερευνούν τη χρήση ρομπότ χειριστών για τη διεξαγωγή χειρουργικών επεμβάσεων. Πριν από δύο δεκαετίες, τα πρώτα εμπορικά συστήματα εγκαταστάθηκαν σε νοσοκομεία. Κατά την τελευταία δεκαετία, ο τομέας της ιατρικής ρομποτικής έχει κερδίσει έδαφος καθώς χιλιάδες ρομποτικά χειρουργικά συστήματα είναι τώρα εγκατεστημένα σε κλινικές σε όλο τον κόσμο και πολλά εκατομμύρια επεμβάσεων έχουν εκτελεστεί. Καθώς τα χειρουργικά ρομπότ έχουν γίνει πλέον αποδεκτά από τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης, οι ερευνητές της ρομποτικής επικεντρώνουν όλο και περισσότερο την προσοχή τους στο πώς θα μπορούσε να μοιάζει η επόμενη

γενιά ιατρικών ρομπότ. Η προσοχή τους δεν περιορίζεται μόνο σε χειρουργικά ρομπότ, καθώς και άλλοι τομείς της ιατρικής διερευνώνται, συμπεριλαμβανομένων των ρομπότ για τη διεξαγωγή φυσικής αποκατάστασης, των τηλεπικοινωνιακών ρομπότ για την αλληλεπίδραση των ασθενών με τους υπαλλήλους της υγειονομικής περίθαλψης από απόσταση, των αυτοματοποιημένων φαρμακείων, των ρομπότ για απολύμανση κλινικών κ.α. [189].

Εξωτερική Ρομποτική – Εξερεύνηση Διαστήματος: Χρησιμοποιείται σε αυτόνομα οχήματα, ρομπότ εξερεύνησης διαστημικού χώρου και στις εφαρμογές εξερεύνησης. Τα ρομποτικά συστήματα ξεκίνησαν την εποχή της εξερεύνησης του διαστήματος με σειρές διαστημόπλοιων, όπως τα Mariner, Ranger, Surveyor και Lunakhod. Η ρομποτική επιτρέπει τις τρέχουσες αποστολές στις επιφάνειες των πλανητών, στην τροχιά γύρω τους και στο βαθύ διάστημα και είναι απαραίτητη σε μελλοντικές εξερευνητικές του διαστήματος. Ρομπότ αναλαμβάνουν αποστολές εξερεύνησης σε άγνωστα περιβάλλοντα, όπως οι πλανήτες, οι δορυφόροι ή άλλα αστεροειδή, όπου οι συνθήκες είναι εξαιρετικά εχθρικές για τον άνθρωπο, όπως η έλλειψη ατμόσφαιρας, οι υψηλές θερμοκρασίες ή η ραδιενέργεια. Η εξερεύνηση του διαστήματος με ρομπότ είναι μια σημαντική και συναρπαστική πρόκληση που έχει τραβήξει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για δεκαετίες. Η εξερεύνηση του διαστήματος με ρομπότ μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους και μέσα και έχει σημαντικές εφαρμογές στην ανάπτυξη της γνώσης και της τεχνολογίας. Οι κύριοι τρόποι εξερεύνησης του διαστήματος με ρομπότ περιλαμβάνουν τα διαστημικά ρομπότ τα οποία σχεδιάζονται ειδικά για αποστολές διαστημικής εξερεύνησης. Μπορεί να περιλαμβάνουν ρομπότ που είναι σχεδιασμένα για την εξερεύνηση πλανητών, δορυφόρων ή ακόμη και κομητών, καθώς και ρομπότ που χρησιμοποιούνται για την αναζήτηση ενδείξεων ζωής ή την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας και των γεωλογικών συνθηκών. Στις δορυφορικές αποστολές οι δορυφόροι μπορούν να εξερευνησουν το διάστημα από την τροχιά τους γύρω από έναν πλανήτη, δορυφόρο ή ακόμη και τον ήλιο. Μπορούν να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ατμόσφαιρα, την επιφάνεια και τις καταστάσεις στο διάστημα. Τα αυτόνομα εξερευνητικά ρομπότ μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα στην επιφάνεια ενός πλανήτη ή ενός δορυφόρου, χωρίς ανθρώπινη επίβλεψη. Μπορούν να εκτελούν εργασίες όπως η δειγματοληψία, η αναζήτηση, η μέτρηση, και η ανάλυση υλικών. Τα αυτόνομα διαστημικά οχήματα μπορούν να εκτελέσουν αποστολές εξερεύνησης σε διαφορετικά μέρη του διαστήματος με βάση προκαθορισμένους στόχους και αλγόριθμους αυτόνομης πλοήγησης. Η εξερεύνηση του διαστήματος με ρομπότ έχει συμβάλει σημαντικά στην αύξηση της γνώσης μας για το σύμπαν και έχει ανοίξει νέες προοπτικές για την ανθρώπινη εξερεύνηση και την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Η αξιολόγηση της τρέχουσας τεχνολογίας και η πρόβλεψη των τεχνολογικών εξελίξεων σε σύντομο χρονικό διάστημα είναι ζωτικής σημασίας για τον προγραμματισμό των αποστολών και την καθοδήγηση της απαιτούμενης ανάπτυξης της τεχνολογίας [190].



Σχήμα 2.5: Ρομποτική στο διάστημα [190]

Υποβρύχια Ρομποτική – Εξόρυξη και Εξερεύνηση Υποβρύχιων Περιοχών: Χρησιμοποιείται για την εξερεύνηση του βυθού της θάλασσας ή την επισκευή υποβρύχιων περιοχών και πετρελαιοφόρων. Ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξερεύνηση και την εκτέλεση αποστολών σε βαθιά υδάτινα περιβάλλοντα ή υποβρύχια αρχαιολογικά ευρήματα, όπου η πίεση του νερού και οι συνθήκες μπορεί να καθιστούν την εργασία απαιτητική ή επικίνδυνη για τον άνθρωπο. Τα υποβρύχια ρομπότ ή μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα (Unmanned Underwater Vehicles – UUV) έχουν την ικανότητα να πλοηγούνται ελεύθερα, χωρίς να υπάρχει χειριστής στο εσωτερικό του οχήματος [191]. Αυτός ο τύπος ρομπότ χρησιμοποιεί τη δική του παροχή ενέργειας την οποία μεταφέρει στο εσωτερικό του οχήματος και επικοινωνεί μόνο με ασύρματη επικοινωνία, γνωστή ως ακουστικά σήματα (sonar signals). Η χρήση της συνήθως αφορά την εξερεύνηση επικίνδυνων και ανεξερεύνητων τμημάτων του ωκεανού και περιλαμβάνουν αισθητήρες για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών αυτών των περιοχών, την αλμυρότητα, θερμοκρασία και την κατεύθυνση ή την ταχύτητα των ρευμάτων [192].

Κατά την τελευταία δεκαετία, υπήρξε σημαντικό ενδιαφέρον για την ασφάλεια των λιμανιών και των θαλάσσιων υποδομών λόγω των αυξανόμενων απειλών κατά πολιτικών στόχων. Η τεράστια κλίμακα της ευρωπαϊκής θαλάσσιας περιοχής και η πολυπλοκότητα των προκλήσεων που συνδέονται με τη διασφάλιση της επιτυχούς ναυτιλιακής επιτήρησης απαιτούν μια παγκόσμια προσέγγιση στην ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Ως αποτέλεσμα, δημιουργήθηκαν έργα που αφορούν διάφορες χώρες σε ευρωπαϊκό και επίπεδο NATO για να καλύψουν το τεχνολογικό κενό που εντοπίστηκε σε αυτόν τον κλάδο και να παράσχουν νέες μεθοδολογίες. Η υποβρύχια επιτήρηση έχει παραδοσιακά πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια ανθρώπινων λύσεων. Οι νέες υποθαλάσσιες δυνατότητες που περιλαμβάνουν τον τρόπο διεξαγωγής επιτήρησης και προστασίας των λιμανιών και των παράκτιων

υδάτων αντιμετωπίζονται στο πλαίσιο του έργου Harbour & Maritime Surveillance and Protection (HARMPRO) [193], το οποίο εφαρμόζεται στο πλαίσιο της Permanent Structured Cooperation (PESCO). Στο πλαίσιο του ίδιου προγράμματος, το έργο θαλάσσιου μη επανδρωμένου αντι-υποβρυχίου συστήματος (MUSAS) θα έχει ως στόχο την ανάπτυξη του καινοτόμου συστήματος που θα βασίζεται στην τεχνητή νοημοσύνη για τον πόλεμο ενάντια στα υποβρύχια, το οποίο θα ενισχύσει την ασφάλεια των υποβρυχίων υποδομών, παρέχοντας μια ταχεία αντίδραση επαρκών μέτρων εναντίων των εισβολών. Το Πρόγραμμα Έρευνας για την Άμυνα κατά της Τρομοκρατίας (DAT) προβλέπει μέτρα για την ενίσχυση της οργάνωσης και του συντονισμού των δράσεων για την αντιμετώπιση τρομοκρατικών συμβάντων [194]. Αυτή η πρωτοβουλία περιλαμβάνει προγράμματα που αποσκοπούν στη μείωση της ευπάθειας του προσωπικού και των εγκαταστάσεων σε κάποιες περιστάσεις. Οι λιμενικές επιχειρήσεις είναι ζωτικής σημασίας για την παγκόσμια οικονομία και πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ασφαλέστερες. Για το λόγο αυτό, τα παγκόσμια θεσμικά όργανα διερευνούν διάφορες τεχνολογίες για τη βελτίωση της ασφάλειας στη θάλασσα [195].

Εκπαιδευτική Ρομποτική: Χρησιμοποιείται για τη διδασκαλία σχετικών επιστημών και τεχνολογιών. Εδώ μπορούμε να προσθέσουμε και την ρομποτική εκπαίδευση, η οποία είναι κομμάτι της εκπαίδευσης STEM (Επιστήμη, Τεχνολογία, Μηχανική και Μαθηματικά (Science, Technology, Engineering, and Mathematics)) [196]. Υπάρχει σταθερή αύξηση του αριθμού των μελετών που διερευνούν την εκπαιδευτική ρομποτική και τον αντίκτυπό της στις ακαδημαϊκές και κοινωνικές δεξιότητες των νέων μαθητών. Τα εκπαιδευτικά ρομπότ χρησιμοποιούνται τόσο εντός όσο και εκτός του σχολικού περιβάλλοντος για την ενίσχυση του ενδιαφέροντος, της συμμετοχής και των ακαδημαϊκών επιτευγμάτων των μαθητών από το νηπιαγωγείο, το δημοτικό και γενικά την δευτεροβάθμια εκπαίδευση σε διάφορους τομείς της εκπαίδευσης STEM. Χάρη στην αποτελεσματικότητα της εκπαιδευτικής ρομποτικής αναπτύσσονται δεξιότητες μάθησης, παρατηρείται δημιουργικότητα και διεύρυνση της συμμετοχής από τους μαθητές και δίνονται κίνητρα για μάθηση, ενώ επιτυγχάνεται και επαγγελματική ανάπτυξη των εκπαιδευτικών [197].

Αναζήτηση και Διάσωση- Εξερεύνηση και Εκτέλεση Επικίνδυνων Καταστάσεων: Ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναζήτηση και τον εντοπισμό ανθρώπων σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, όπως σε ερείπια μετά από φυσικές καταστροφές ή σε επικίνδυνες αποστολές διάσωσης. Μπορούν να αναλάβουν αποστολές σε περιβάλλοντα όπου η παρουσία ανθρώπων θα μπορούσε να είναι επικίνδυνη, όπως σε πυρκαγιές, χημικές εγκαταστάσεις ή πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Εργασίες Κατά τον Πόλεμο: Ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εχθρικά περιβάλλοντα για εκτέλεση διαφορετικών αποστολών, όπως αναγνώριση εχθρικών στόχων, εύρεση εκρηκτικών μηχανισμών ή στρατηγικές επιθέσεις. Ο συνηθισμένος τύπος ρομπότ για τέτοιες αποστολές είναι το εναέριο ρομπότ, το οποίο αποτελείται από κινητά συστήματα (mobile systems) που έχουν την ικανότητα να πετάξουν σε εναέριους χώρους. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται και τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles – UAV) ή αλλιώς drone, τα οποία αποτελούν αεροσκάφη που κατά την πλοήγησή τους δεν απαιτούν πιλότο. Τα πιο εξελιγμένα drone έχουν την ικανότητα να απογειώνονται και να προσγειώνονται αυτόνομα χωρίς την παρέμβαση του χειριστή τους. Κατά την πρωτοεμφάνιση των UAVs, η χρήση τους προοριζόταν αποκλειστικά για στρατιωτικές εφαρμογές, αλλά η χρήση τους διευρύνθηκε μετά την αναγνώριση της χρηστικότητάς τους σε διάφορους κλάδους, όπως εκείνων της επιστήμης, της γεωργίας, των logistics, κλπ.

2.5 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η θεωρία του χάους και η εφαρμογή του στη ρομποτική. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνητή νοημοσύνη και στη μηχανική μάθηση έχουν επιτρέψει τη δημιουργία πιο ευέλικτων και αυτοματοποιημένων ρομπότ που μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορα περιβάλλοντα και καθήκοντα. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται μία επισκόπηση των μη χαοτικών σχεδιαστών. Αυτή η ενότητα δεν προορίζεται να αποτελέσει μια εξαντλητική επισκόπηση των προόδων που έγιναν σε αυτόν τον τομέα. Είναι μάλλον μια σύντομη επισκόπηση ορισμένων από τις σημαντικές μεθόδους για να καταστεί δυνατή η σύγκριση με χαοτικούς αλγόριθμους.

Κεφάλαιο 3^ο: Επισκόπηση των μη χαοτικών σχεδιαστών

3.1 Εισαγωγή

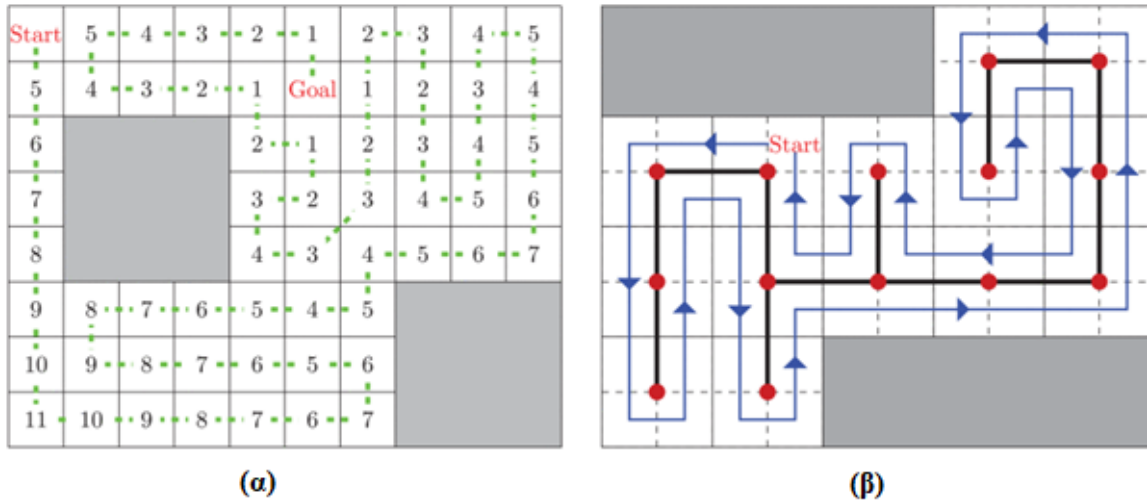
Αυτή η ενότητα δίνει μια σύντομη επισκόπηση των δημοφιλών μη χαοτικών αλγορίθμων CPP ως μια εισαγωγή στο έργο κάλυψης και την περιπλοκότητά της. Τόσο οι πλήρεις όσο και οι ευρετικοί CPP εξετάζονται στην ακόλουθη ενότητα.

3.2 Πλήρεις CPP – Μέθοδοι τμηματικού διαχωρισμού

Οι πλήρεις αλγόριθμοι CPP είναι συντονισμένες μεθοδολογικές προσπάθειες για την κάλυψη μιας περιοχής. Χρησιμοποιούν κυρίως μεθόδους τμηματικού διαχωρισμού που αποσυνθέτουν τον ελεύθερο χώρο σε μη επικαλυπτόμενα κελιά. Αυτά τα κελιά θεωρείται εύκολο να καλυφθούν δεδομένου ότι δεν περιέχουν κανένα εμπόδιο. Η πλήρης κάλυψη επιτυγχάνεται μόλις το ρομπότ επισκεφθεί όλα τα κελιά. Οι προηγούμενες εργασίες [81], [91] παρουσιάζουν μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των μελετών για τις μεθόδους τμηματικού διαχωρισμού. Οι προσεγγίσεις τμηματικού διαχωρισμού μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες [81]: 1) κατά προσέγγιση διαχωρισμός 2) κατά προσέγγιση ημιδιαχωρισμός και 3) ακριβής διαχωρισμός.

1) Κατά προσέγγιση τμηματικός διαχωρισμός

Οι κατά προσέγγιση μέθοδοι διαχωρίζουν τον χώρο-στόχο σε λεπτά και ομοιόμορφα κελιά πλέγματος, έτσι ώστε το σύνολο αυτών των κελιών να προσεγγίζει το σχήμα του χώρου-στόχου. Τα κελιά είναι του ίδιου μεγέθους με το φυσικό αποτύπωμα του ρομπότ, έτσι ώστε, όταν ένα ρομπότ εισέρχεται σε ένα κελί, να μπορεί να θεωρηθεί ότι το έχει επισκεφθεί. Οι πιο δημοφιλείς αλγόριθμοι που προτείνονται σε αυτή την κατηγορία είναι οι εξής: 1) ο αλγόριθμος μετώπου κύματος (wavefront algorithm) [95], [198], 2) η κάλυψη εκτεινόμενων δέντρων (spanning tree covering:STC) [109], [111], [199-200] και 3) το νευρωνικό δίκτυο [112-113], [201-204]. Σε αυτές τις μεθόδους, ο αλγόριθμος καλείται αναδρομικά για να επιλέξει ένα γειτονικό κελί που δεν έχει επισκεφθεί το ρομπότ. Η κύρια διαφορά τους έγκειται στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την προτεραιότητα και την κατάταξη των γειτονικών κελιών από τα οποία δεν έχει περάσει το ρομπότ. Η θέσπιση προτεραιοτήτων επιδιώκει τη βελτίωση της ενεργειακής και χρονικής αποδοτικότητας μειώνοντας το μήκος της διαδρομής ή/και τον αριθμό των στροφών. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος wavefront εξαπλώνει ένα εμπρόσθιο κύμα, μέσω του ελεύθερου χώρου, σε ένα αυθαίρετο σημείο στο χώρο που ονομάζεται «στόχος». Το εμπρόσθιο κύμα ταξιδεύει γύρω από τα εμπόδια και εκχωρεί έναν αριθμό σε κάθε κελί, ανάλογο με την απόστασή του από το στόχο. Το ρομπότ δίνει προτεραιότητα στα γειτονικά κελιά που βρίσκονται πιο μακριά από τον στόχο, της φαίνεται στο σχήμα 3.1α.

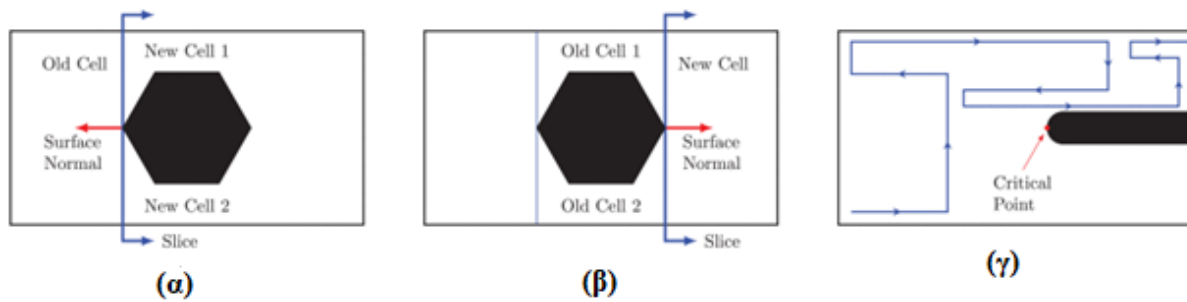


Σχήμα 3.1: κάλυψη ενός χώρου χρησιμοποιώντας κατά προσέγγιση τμηματικό διαχωρισμό με τα εμπόδια που εμφανίζονται ως γεμάτα ορθογώνια. (α) Αλγόριθμος wavefront με το μονοπάτι που εμφανίζεται ως διαχωρισμένη γραμμή. Β) STC με διαδρομή που εμφανίζεται ως σταθερή μπλε γραμμή [1].

Εναλλακτικά, ο STC επιλέγει το επόμενο γειτονικό κελί μετακινώντας και τις δύο πλευρές του εκτεινόμενου δέντρου. Δύο διαφορετικά μεγέθη κελιών χρησιμοποιούνται, ένα μεγάλο και ένα μικρό μέγεθος κελιού αν και τα μεγάλα κελιά αναφέρονται πολλές φορές ως μέγα κελιά. Τα μικρά κελιά λαμβάνονται με τη διαίρεση των μεγάλων κελιών σε τέσσερα μέρη, με κάθε μικρό κελί να έχει το μέγεθος του αποτυπώματος του ρομπότ. Το δέντρο που εκτείνεται κατασκευάζεται σταδιακά χρησιμοποιώντας τους ενσωματωμένους αισθητήρες και συνδέοντας τα κέντρα των γειτονικών ελεύθερων μέγα κελιών. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον αλγόριθμο, το ρομπότ δεν επισκέπτεται ποτέ κανένα από τα μικρά κελιά δύο φορές εκτός από το κελί εκκίνησης όπως μπορεί να δει κανείς στο σχήμα 3.1β. Τέλος, ο αλγόριθμος του νευρωνικού δικτύου επιλέγει το επόμενο κελί για επίσκεψη με βάση τη σύγκριση της «νευρικής» δραστηριότητας του τρέχοντος κελιού, δηλαδή του νεύρου και εκείνου των γειτόνων. Οι γείτονες με τη μεγαλύτερη νευρική δραστηριότητα επιλέγονται ως το επόμενο κελί για επίσκεψη. Στο πλαίσιο του ρομπότ καθαρισμού, τα βρώμικα κελιά, δηλαδή τα μη επισκεπτόμενα, έχουν την υψηλότερη νευρική δραστηριότητα, ενώ τα εμπόδια έχουν τη χαμηλότερη. Αυτή η υψηλή νευρική δραστηριότητα θα προσελκύσει το ρομπότ, οδηγώντας στην πλήρη κάλυψη του χώρου.

2) Κατά προσέγγιση τμηματικός ημιδιαχωρισμός

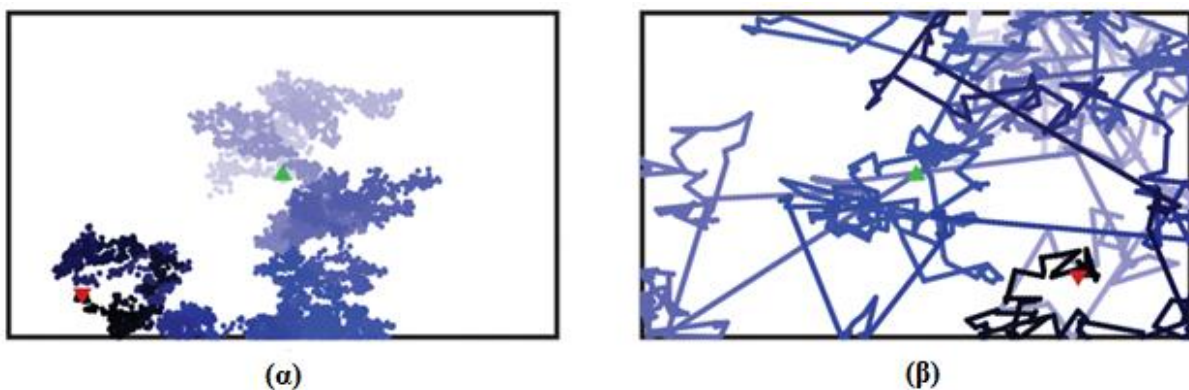
Οι αλγόριθμοι του κατά προσέγγιση τμηματικού ημιδιαχωρισμού διαφέρουν από τους αλγορίθμους του κατά προσέγγιση τμηματικού διαχωρισμού στο γεγονός ότι οι πρώτοι δε χρειάζονται προηγούμενη πληροφόρηση για το περιβάλλον [114], [205-206]. Αυτοί οι σχεδιαστές διαδρομών θα διαχωρίσουν το χώρο σε κάθετες φέτες του ίδιου πλάτους με τα άνω και κάτω όρια αυτών των φετών, ή κελιών, έχοντας οποιοδήποτε σχήμα. Το ρομπότ ξεκινά από ένα αυθαίρετο σημείο στο χώρο και κινείται πέρα δώθε κατά μήκος των γραμμών πλέγματος που δημιουργούνται από τα κελιά για να καλύψουν την περιοχή. Αυτό το πέρα δώθε μπορεί να αποτύχει να καλύψει τις μικρότερες περιοχές, που ονομάζονται εισόδοι (inlets), ή να τις καλύψει δύο φορές. Ο αλγόριθμος θα ανιχνεύσει αυτές τις εισόδους, καθώς και εισόδους εντός των εισόδων και θα τις καλύψει μέσα από την κλήση της διαδικασίας πέρα δώθε αναδρομικά. Το σχήμα 3.2 δείχνει τη διαδρομή του ρομπότ όταν χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο του



Σχήμα 3.4: (α, β) Ο τμηματικός διαχωρισμός χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Morse και (γ) οι ορθογώνιοι κύκλοι εντός της διαδρομής επιτρέπουν την ανίχνευση κρίσιμων σημείων [1].

3.3 Ευρετικοί CPP – Τυχαίοι

Οι αλγόριθμοι CPP που συζητούνται στο 3.2 χρησιμοποιούν ντετερμινιστικούς αλγόριθμους οι οποίοι έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν είτε ένα είδος offline διαδρομής είτε μεγάλη ποσότητα μνήμης για την αποθήκευση μεγάλων διαδρομών σε τεράστια περιβάλλοντα. Αντίθετα, το ρομπότ μπορεί να καλύψει ευρετικά μια περιοχή απλά επιλέγοντας τυχαίες κατευθύνσεις για να ταξιδέψει εντός του χώρου αναζήτησης σε καθορισμένα βήματα ή αποστάσεις. Αυτή η έννοια αποτελεί τη βάση των τυχαίων μεθόδων αναζήτησης (γνωστών ως τυχαία βάδιση), που δεν απαιτούν τους πόρους μνήμης για την αποθήκευση της προηγούμενης τροχιάς του ρομπότ. Οι μέθοδοι τυχαίας βάδισης (random-walk :RW) μπορούν είτε να είναι άσχετες διαδρομές όπου η κατεύθυνση της κίνησης επιλέγεται ανεξάρτητα από τις προηγούμενες κατευθύνσεις ή συσχετισμένες διαδρομές με την κατευθυντήρια γραμμή της βάδισης προκαθορισμένη προς μια προτιμώμενη κατεύθυνση ή ένα δεδομένο στόχο [213]. Στις εφαρμογές της ρομποτικής, χρησιμοποιούνται συνήθως μη συσχετισμένες μέθοδοι RW, η κίνηση Brownian (BM) και η πτήση Lévy (LF) [214-215]. Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους, η μέθοδος BM κάνει μικρά βήματα τα οποία είναι πιο αποτελεσματικά για τοπική αναζήτηση όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5α, ενώ η μεθοδολογία LF είναι πιο επιτυχημένη στη γενική αναζήτηση, καθώς επιτρέπει στον πράκτορα να κάνει περιστασιακά μεγάλα βήματα και να επισκεφθεί απομακρυσμένες περιοχές όπως δείχνει το σχήμα 3.5β. Σε οικολογικά παραδείγματα, η περίπτωση των ζώων που αναζητούν την τροφή τους σε φτωχά περιβάλλοντα μοιάζει με τις μεθόδους LF [216], αλλά όταν η τροφή είναι άφθονη, η απλή μέθοδος BM αποδεικνύεται επαρκής [217-218].



Σχήμα 3.5: Διαδρομές που παράγονται χρησιμοποιώντας (α) Brownian κίνηση και (β) πτήση Lévy για την εξερεύνηση ενός κλειστού χώρου σε ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Οι διαδρομές έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης (πράσινο χρώμα) αλλά διαφορετικά σημεία λήξης (κόκκινο χρώμα) [1].

Σε αντίθεση με τις μεθόδους τμηματικού διαχωρισμού, οι στρατηγικές τυχαίας αναζήτησης δεν εγγυώνται πλήρη κάλυψη, αν και οι τυχαίες αναζητήσεις δεν χρειάζονται αισθητήρες εντοπισμού ή τόσο υψηλή υπολογιστική ικανότητα. Το κόστος της παροχής εξελιγμένων δυνατοτήτων πλοήγησης για τους πράκτορες με συντονισμένη αναζήτηση μπορεί να είναι απαγορευτικό, ιδίως για τις ρομποτικές ομάδες σε απομακρυσμένα και/ή αντιμαχόμενα περιβάλλοντα όπου υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα απώλειας ρομποτικών πρακτόρων. Οι αναφορές [218-219] υποστηρίζουν ότι εάν το κόστος της κατασκευής πρακτόρων με προηγμένες δυνατότητες πλοήγησης είναι υψηλότερο από το τίμημα που πληρώνεται για τη μειωμένη τους απόδοση, τότε μπορεί να είναι επωφελές να χρησιμοποιηθούν οι στρατηγικές τυχαίας αναζήτησης.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της τυχαίας αναζήτησης είναι η έλλειψη συνέχειας στην κίνηση του ρομπότ. Οι διαδρομές που δημιουργούνται συχνά οδηγούν σε απότομες στροφές και άνιση πυκνότητα κάλυψης σε όλο το χώρο. Ενώ η χρήση ομάδων ρομπότ μπορεί να βοηθήσει στην ανακούφιση του προβλήματος της πυκνότητας κάλυψης, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στρατηγικές για την ομοιόμορφη κατανομή των πρακτόρων σε όλο το χώρο και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας αναζήτησης των μεθόδων RW. Μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει ποικίλες προσεγγίσεις για την υλοποίηση της κίνησης, όπως: 1) χρήση φερομονών για να επικοινωνούν οι πράκτορες μεταξύ τους [220-221] 2) συνδυασμός του RW με ένα τεχνητό πεδίο δυναμικού για να διασκορπιστούν τα γειτονικά ρομπότ [222] και 3) προσαρμοστική εναλλαγή μεταξύ LF και BM [223] για να καλυφθεί η περιοχή τόσο τοπικά όσο και καθολικά. Ανεξάρτητα από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της πυκνότητας κάλυψης, ο μη συνεχής χαρακτήρας του RW κατά τον προσδιορισμό των κατευθύνσεων σημαίνει ότι οι απότομες γωνιακές στροφές δεν μπορούν να αποφευχθούν. Οι χασοκοί σχεδιαστές πορείας μπορούν να παρουσιάσουν μια απλή λύση σε αυτό το ζήτημα. Τα συνεχή χασοκοί συστήματα έχουν την ικανότητα να παράγουν τροχιές με ομαλές στροφές και πιο ομοιόμορφη κάλυψη σε σύγκριση με τις μεθόδους RW. Επιπλέον, η χασοκή αναζήτηση μπορεί να εφαρμοστεί σε χαμηλού κόστους ρομπότ σε περίπτωση περιορισμένων αισθητηριακών και υπολογιστικών πόρων με τον ίδιο τρόπο με τον τυχαίο CPP.

Κεφάλαιο 4ο: Ανάλυση Χάους στην ρομποτική

4.1. Έρευνες χαοτικής δυναμικής σε χειριστές και ρομπότ

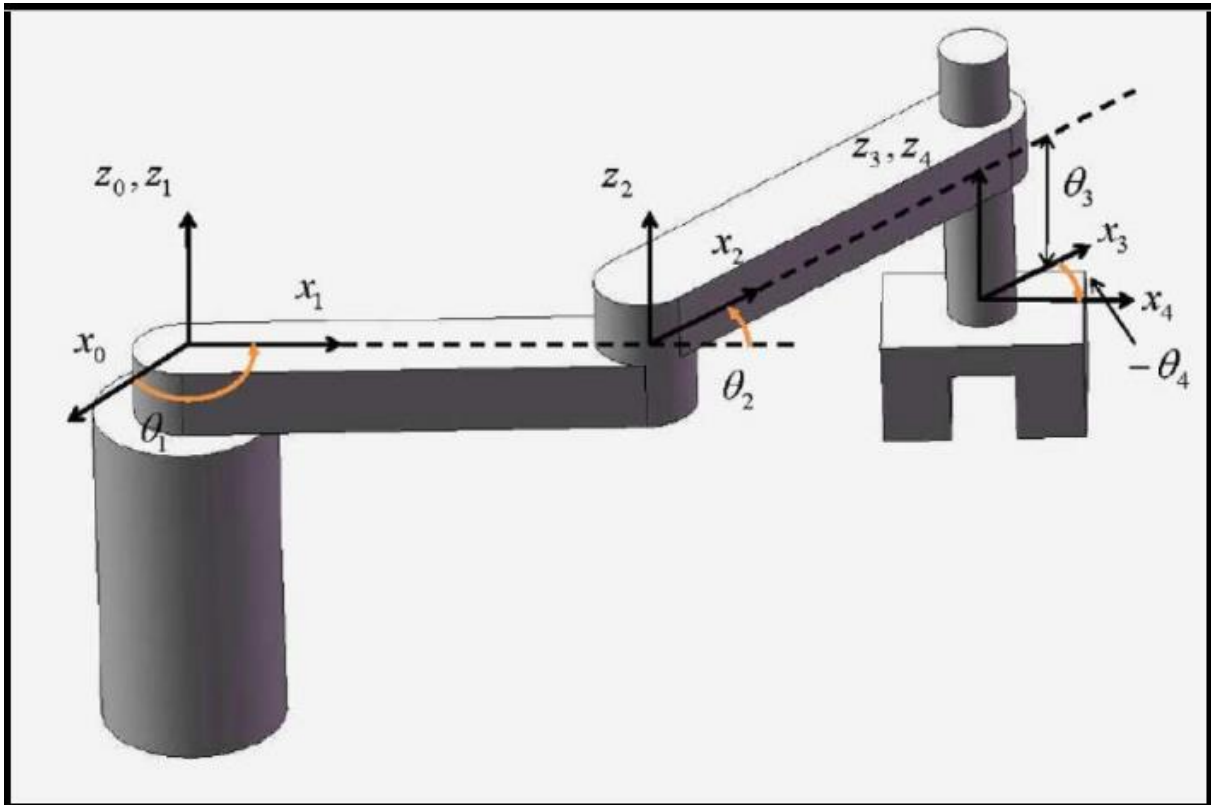
Η έρευνα του χάους στα ρομποτικά συστήματα είναι η μελέτη των μη γραμμικών συνήθων διαφορικών εξισώσεων (ODEs) που μοντελοποιούν το σύστημα. Στη ρομποτική, η έρευνα της χαοτικής δυναμικής δεν είναι νέα. Ο Βακάκης κ.α. ερεύνησαν τη μη γραμμική δυναμική του ρομπότ που αναπηδάει, η οποία εξαρτάται από τις παθητικές ταλαντώσεις για τη δημιουργία κίνησης [224-225]. Το πόδι του ρομπότ μοντελοποιήθηκε ως μια μη γραμμική πηγή. Οι McCloskey και Burdick εξέλιξαν αυτό το ρομπότ σε ένα σύστημα δύο βαθμών ελευθερίας (DOF) με την προσθήκη κίνησης προς τα εμπρός [226].

Οι Lankalapalli και Ghosal έδειξαν ότι οι μη γραμμικές συνήθεις διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες περιγράφουν την κίνηση του περιστροφικού ρομπότ, η οποία ελέγχεται μέσω ανατροφοδότησης, θα μπορούσαν να εμφανίσουν χάος. Παρουσίασαν διαγράμματα διακλάδωσης και χρησιμοποίησαν εκθέτες Lyapunov για να διαπιστώσουν την ύπαρξη χάους [227-228]. Οι Buhler και Koditschek εξέτασαν ένα ρομπότ ζογκλέρ (planar juggling robot). Η κίνησή του περιελάμβανε αλληλεπιδράσεις ρομπότ-περιβάλλοντος, οι οποίες παρήγαγαν μη γραμμικότητες [229-230]. Ο Mahout κ.α. απέδειξαν ότι ένας χειριστής περιστροφικής άρθρωσης που ελέγχεται με τον νόμο PD (έλεγχος με βάση τον ρυθμό μεταβολής του σήματος σφάλματος) παρουσίασε χαοτική δυναμική για ορισμένες τιμές των στατικών μεταβλητών [231].

Οι Ravishankar και Ghosal διερεύνησαν το χάος σε ρομπότ δύο και τριών βαθμών ελευθερίας που χρησιμοποιούν ανατροφοδότηση για να ελέγξουν αν το ρομπότ κινείται σύμφωνα με τις εντολές και να διορθώσουν τυχόν αποκλίσεις. Οι μη γραμμικές συνήθεις διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες απεικόνιζαν τη δυναμική του ρομπότ του οποίου η κίνηση ελέγχεται με ανατροφοδότηση, έδειξαν χάος για ένα ορισμένο εύρος παραμέτρων [232]. Αυτές οι αναλύσεις σημαίνουν ότι το χάος είναι εγγενές στη δυναμική των ρομπότ.

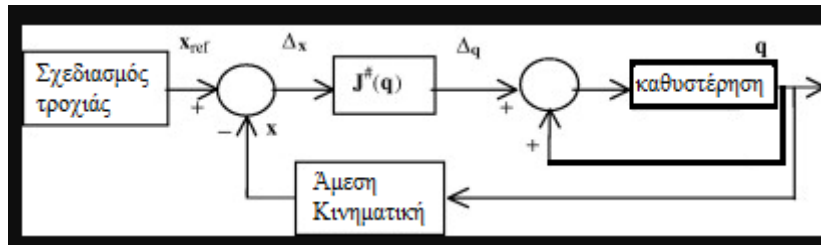
Το πολυωνυμικό χάος του Wiener (PC) παρουσίασε ένα πλαίσιο για τον διαχωρισμό των στοχαστικών στοιχείων του συστήματος από τα αιτιοκρατικά. Σύμφωνα με τη θεωρία του πολυωνυμικού χάους, κάθε στοχαστικό πεδίο εκφράζεται ως ένα πολυωνυμικό ανάπτυγμα με ορθογώνια πολυώνυμα, τα οποία εξαρτώνται από τη στοχαστική μεταβλητή που ακολουθεί γνωστή κατανομή. Η αβεβαιότητα του στοχαστικού πεδίου ποσοτικοποιείται με άγνωστο πεδίο ντετερμινιστικών συντελεστών στο ανάπτυγμα πολυωνυμικού χάους. Η θεωρία αυτή ορίζεται ως μια τεχνική που βασίζεται σε μη δειγματοληψία για την καθιέρωση της ανάπτυξης της αβεβαιότητας σε ένα δυναμικό σύστημα, όταν οι παράμετροι του συστήματος έχουν πιθανοτική αβεβαιότητα [233]. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στατιστική ανάλυση δυναμικών συστημάτων, καθώς επιτρέπει την πιθανοτική περιγραφή των επιπτώσεων αβεβαιότητας. Λόγω του χαμηλού υπολογιστικού κόστους, είναι μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση για προσομοιώσεις Monte-Carlo [234].

Ο σχεδιασμός ενός μηχανικού συστήματος που παράγεται για εμπορική χρήση επηρεάζεται από τις κατασκευαστικές του διαφορές που επηρεάζουν την απόδοσή του. Απαιτούνται κατάλληλα εργαλεία ανάλυσης για να προσομοιωθούν και να προβλεφθούν οι εν δυνάμει δυναμικές που δημιουργούνται από αυτές τις διαφορές. Για τη διεξαγωγή τέτοιων αβέβαιων δυναμικών και στατικών αναλύσεων για ένα ρομποτικό βραχίονα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, το πολυωνυμικό χάος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα ενοποιητικό πλαίσιο [235-236].



Σχήμα 4.1: Πολυωνυμικό χάος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόδοσης του ρομποτικού βραχίονα SCARA [236]

Ο έλεγχος της τροχιάς των ρομποτικών βραχιόνων που έχουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας από όσους απαιτούνται για να εκτελέσουν μια συγκεκριμένη εργασία είναι ένας σημαντικός τομέας έρευνας που προσβλέπει σε αποτελεσματικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν περισσότερες δυνατότητες κίνησης από ό,τι χρειάζεται για την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης εργασίας. Η ύπαρξη της περίσσειας ελευθερίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, για παράδειγμα, με την ελαχιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης ή την αποφυγή εμποδίων. Ο Varghese κ.α. έδειξαν ότι ένα ρομπότ με πλεονάζοντες βαθμούς ελευθερίας που ελέγχεται από μια μέθοδο γραμμικοποίησης με ανάδραση μπορεί να επιδείξει ημιπεριοδικότητα και χάος [237]. Η τεχνική της γραμμικοποίησης είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται στα μαθηματικά και στη μηχανική για να μετατρέψει ένα μη γραμμικό σύστημα σε γραμμικό, προκειμένου να είναι πιο εύκολο να αναλυθεί ή να ελεγχθεί. Στην πράξη, η γραμμικοποίηση περιλαμβάνει την προσέγγιση του μη γραμμικού συστήματος γύρω από ένα σημείο λειτουργίας, συνήθως μιας κατάστασης ισορροπίας ή του σημείου λειτουργίας, με ένα γραμμικό μοντέλο. Η κλασική τεχνική (π.χ. με ψευδοαντίστροφο έλεγχο κλειστού βρόχου, σχήμα. 4.2) που προτάθηκε για την επίλυση της κινηματικής των αρθρώσεων, οδήγησε σε χαοτικές κινήσεις του βραχίονα [238-240].



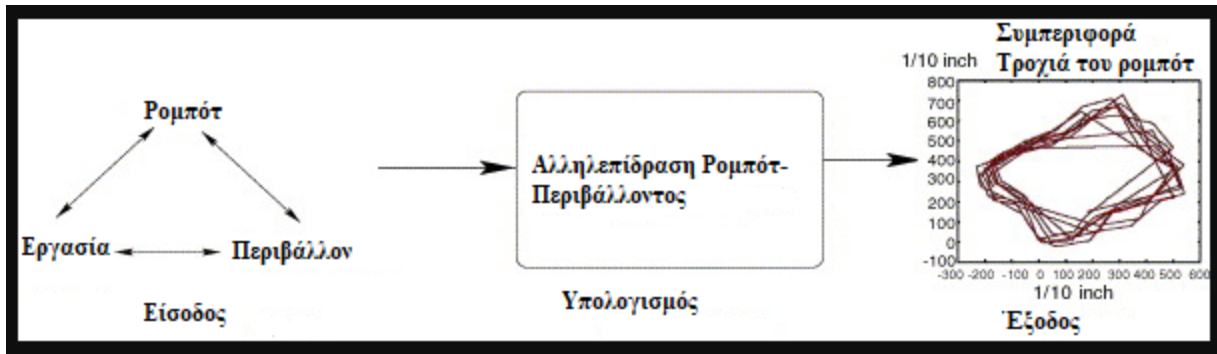
Σχήμα 4.2: Μπλοκ διάγραμμα του αλγόριθμου [238-240]

4.2 Χαοτική συμπεριφορά αλληλεπίδρασης ρομπότ-περιβάλλοντος (REI)

Η κινητική ρομποτική, όπως και άλλες επιστήμες, θα πρέπει να προχωρήσει από μη επαληθευμένα ερευνητικά αποτελέσματα σε μια ερευνητική κουλτούρα αντικειμενικής επανάληψης και επιβεβαίωσης των πειραματικών αποτελεσμάτων. Η μεγάλη πρόκληση είναι να γίνει μια πιο ακριβής επιστήμη. Για την προώθηση του τομέα της κινητικής ρομποτικής, θα πρέπει να αναπτυχθεί μια ποσοτική μέθοδος για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης ρομπότ και περιβάλλοντος. Ένα κινούμενο ρομπότ είναι ένας ενσωματωμένος πράκτορας. Στη ρομποτική, ο όρος «πράκτορας» (agent) αναφέρεται σε μια οντότητα ή σύστημα που εκτελεί δράσεις αυτόνομα ή ημιαυτόνομα σε ένα περιβάλλον, με σκοπό να επιτύχει κάποιου είδους στόχο. Ο πράκτορας μπορεί να είναι ένα ρομπότ, ένα λογισμικό ή μια συνδυασμένη λύση από υλικό και λογισμικό. Συχνά, οι πράκτορες σε ρομποτικά συστήματα έχουν αισθητήρες για να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους, καθώς και ενσωματωμένη νοημοσύνη για τη λήψη αποφάσεων και την εκτέλεση δράσεων με βάση αυτήν την αντίληψη. Η συμπεριφορά τους δεν εξαρτάται μόνο από τον προγραμματισμό, αλλά εξελίσσεται μέσα από την αλληλεπίδραση του ρομποτικού συστήματος, της εργασίας που πρέπει να εκτελέσει και του περιβάλλοντος [241-242].

Ο Schoner κ.α. ήταν οι πρόδρομοι που υπογράμμισαν την έννοια μιας ενοποιημένης θεωρητικής γλώσσας -της θεωρίας των δυναμικών συστημάτων- για το σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής των αυτόνομων ρομπότ. Συζήτησαν τις βασικές ιδέες, π.χ., χώρο φάσης, σταθερό σημείο, ελκυστής κλπ. σε μορφή διδασκαλίας [243]. Ο Smithers έκανε λόγο επίσης για τη χρήση ποσοτικών μέτρων απόδοσης για τη συμπεριφορά των ενσωματωμένων πρακτόρων [244]. Ισχυρίστηκε ότι η συμπεριφορά δεν είναι μια ιδιότητα ενός πράκτορα, αλλά είναι μια δυναμική διαδικασία που δημιουργείται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός πράκτορα και του περιβάλλοντός του.

Ο Nehmzow και ο Walker υποστήριξαν ότι, αντί να βασίζονται μόνο σε μεθόδους δοκιμής και σφάλματος, η αλληλεπίδραση ρομπότ και περιβάλλοντός του θα πρέπει να ενσωματώσει τη θεωρία του χάους, η οποία θα επιτρέψει στους ερευνητές να περιγράψουν ποσοτικά τη συμπεριφορά ενός ρομπότ. Ένας κινούμενος πράκτορας που αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του εκτελεί μια σύνθετη λειτουργία που ελέγχεται από αισθητήρες, ενεργοποιητές (actuators) και το περιβάλλον. Λόγω του θορύβου που παράγεται από τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές αυτή η αλληλεπίδραση δεν είναι πάντα προβλέψιμη. Η συμπεριφορά ενός ρομπότ είναι μη γραμμική διότι οι δυναμικές του είναι το σύνθετο αποτέλεσμα του ίδιου, του περιβάλλοντός του και του προγράμματος ελέγχου (εργασίας) που εκτελείται από τον πράκτορα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Η τροχιά του ρομπότ μπορεί να προβλεφθεί μόνο για σύντομες χρονικές περιόδους [245-246].

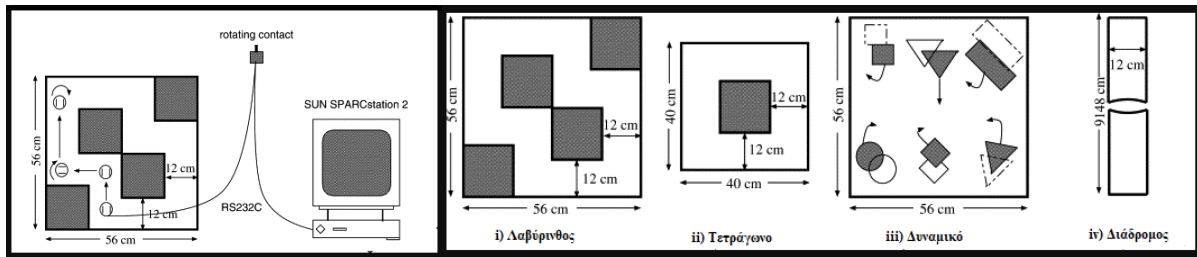


Σχήμα 4.3: Η αλληλεπίδραση ρομπότ- περιβάλλοντος μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αναλογικός υπολογιστής που λαμβάνει περιβαλλοντικά, μορφολογικά και δεδομένα που σχετίζονται με την εκτέλεση εργασίας ως είσοδο και την υπολογισμένη συμπεριφορά του ρομπότ ως έξοδο [247]

Ο Nehmzow και ο Walker αναδημιουργούσαν τους χώρους φάσης που καθορίζουν τη συμπεριφορά των ρομπότ και τους διερεύνησαν χρησιμοποιώντας τα εργαλεία της θεωρίας του χάους. Η τροχιά ενός ρομπότ ενσωματώνει σημαντικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του. Διεξήγαγαν πειράματα με διάφορα κινούμενα ρομπότ που εφαρμόζουν συμπεριφορές αποφυγής εμποδίων και κίνησης σε περιορισμένο χώρο (wall-following). Ανακατασκεύασαν τους ελκυστές τους από τις χρονοσειρές και υπολογίστηκαν οι εκθέτες Lyapunov και τα fractal των ελκυστών που θεμελιώνουν τη συμπεριφορά των πρακτόρων [247-248]. Οι εκθέτες Lyapunov και τα fractal είναι δύο κύριοι ποσοτικοποιητές για το χάος. Η ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες είναι η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα ενός χαοτικού συστήματος. Δύο τροχιές στο χώρο φάσης κοντά η μία στην άλλη αποκλίνουν καθώς ο χρόνος αυξάνεται. Ο εκθέτης Lyapunov υπολογίζει αυτήν την απόκλιση και ένας θετικός εκθέτης Lyapunov αντιπροσωπεύει το χάος. Ομοίως, η διάσταση συσχέτισης ενός ελκυστή είναι ένα μέτρο της περιοδικότητάς του στο χώρο φάσης. Οι περιοδικοί ελκυστές έχουν μια μηδενική διάσταση συσχέτισης και οι χαοτικοί ελκυστές έχουν περισσότερες διαστάσεις. Αυτές οι ποσοτικές μετρήσεις αποδεικνύουν ότι η αλληλεπίδραση ρομπότ- περιβάλλοντος παρουσιάζει ντετερμινιστικό χάος.

Ο Nehmzow κ.α. ανέλυσαν αυτήν την αλληλεπίδραση ποσοτικά. Καθιέρωσαν ζωτικούς κανόνες για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του κινούμενου πράκτορα, της εργασίας που εκτελεί και του περιβάλλοντός του. Μια τέτοια ανάλυση επιτρέπει την αναπαραγωγή και επαλήθευση των αποτελεσμάτων.

Όπως και τα ζωντανά όντα, οι αισθητηριακές πληροφορίες που αντιλαμβάνονται τα αυτόνομα ρομπότ εκδηλώνουν δυναμική συμπεριφορά, καθώς αυτά τα δεδομένα είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του ρομπότ και του περιβάλλοντός του. Ο Odagiri κ.α. διερεύνησαν το ερώτημα αν η εσωτερική δομή του πράκτορα διέπει τη δυναμική των αισθητηριακών πληροφοριών ή αν το εξελισσόμενο περιβάλλον το καθορίζει. Συγκέντρωσαν τα αισθητηριακά δεδομένα από ένα μικροσκοπικό κινούμενο ρομπότ, το Khepera, κατά τη διάρκεια απρόσκοπτης πλοήγησης και μελέτησαν τη δυναμική συμπεριφορά των αυτόνομων πρακτόρων αναλύοντας αυτές τις πληροφορίες [249-250]. Το σχήμα 4.4 (α) εξηγεί την πειραματική διάταξη. Σε τέσσερις διαφορετικές ρυθμίσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.4 (β), χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά ρομπότ και συλλέχθηκαν τα αισθητηριακά δεδομένα.



Σχήμα 4.4: α) Πειραματική διάταξη β) Δοκιμασμένα περιβάλλοντα i) λαβύρινθος ii) τετράγωνο iii) δυναμικό iv) διάδρομος (σε ευθεία) [250]

Οι αισθητηριακές πληροφορίες που αποκτήθηκαν από τους πράκτορες είχαν τυχαία στοιχεία. Το φάσμα ισχύος για τις χρονοσειρές είχε ένα συνεχές συστατικό, ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov ήταν θετικός, η διάσταση ήταν fractal, η συνάρτηση αυτόματης συσχέτισης σύγκλιε στο μηδέν στον άπειρο χρόνο και τα σημεία στους χάρτες Poincare ήταν περιορισμένα μέσα σε ένα συγκεκριμένο σταθερό χώρο. Αυτές οι ποσοτικές μετρήσεις από τα αισθητηριακά δεδομένα των κινούμενων ρομπότ επιβεβαίωσαν την ύπαρξη αιτιοκρατικού χάους. Αυτά τα πειράματα αποκάλυψαν επίσης ότι η ροή των αισθητηριακών πληροφοριών από τους πράκτορες εξαρτάται σαφώς από την εσωτερική διαμόρφωση των ρομπότ.

Ο Rold χρησιμοποίησε χαοτική δυναμική σε αυτόνομους πράκτορες που ελέγχονται από νευρωνικά δίκτυα. Έδειξε ότι οι χαοτικές αναλλοίωτες μεταβλητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίηση της συμπεριφοράς των πρακτόρων [251].

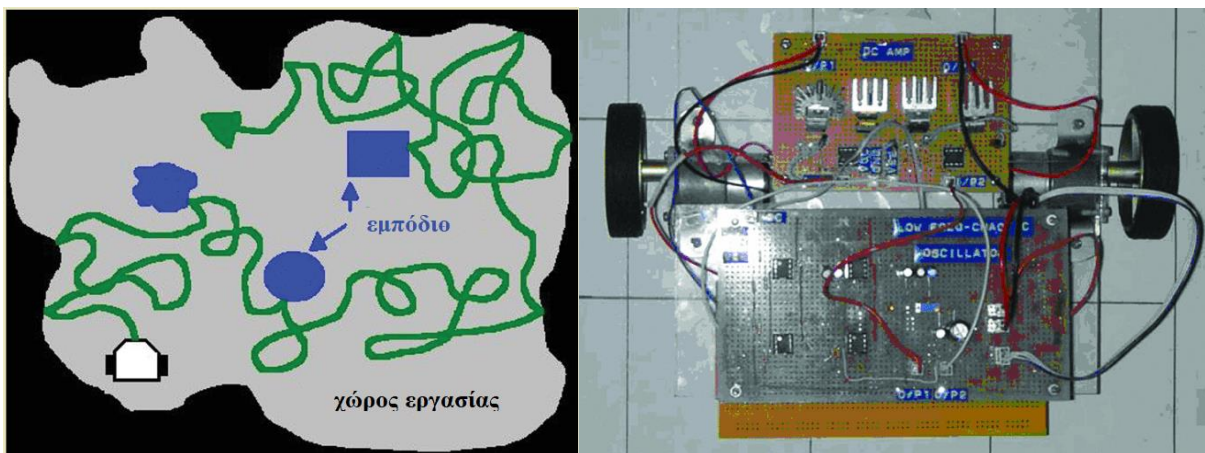
Κεφάλαιο 5^ο: Σύνθεση Χάους στη Ρομποτική

5.1 Εισαγωγή

Ο προγραμματισμός κίνησης ή ο σχεδιασμός διαδρομής των κινούμενων ρομπότ διερευνά μια κατά προσέγγιση διαδρομή, κατά την οποία θα αποφευχθούν οι συγκρούσεις, σύμφωνα με έναν συγκεκριμένο στόχο απόδοσης. Αυτό το θέμα έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια στη ρομποτική. Χωρίς χαρτογράφηση, ο σχεδιασμός της διαδρομής είναι ένα δύσκολο έργο για τα κινούμενα ρομπότ. Ο χαοτικός σχεδιασμός της διαδρομής μπορεί να είναι μια λύση σε αυτή την κατάσταση – το αιτιοκρατικό χάος χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό της κίνησης των αυτόνομα κινούμενων ρομπότ σε ένα εντελώς άγνωστο περιβάλλον. Το κύριο όφελος του προτεινόμενου χαοτικού σχεδιασμού κινήσεων έγκειται στον αιτιοκρατικό χαρακτήρα της χαοτικής δυναμικής. Ο ελεγκτής κίνησης για την παραγωγή χαοτικών τροχιών σχεδιάζεται χρησιμοποιώντας ένα χαοτικό δυναμικό σύστημα.

5.2 Χαοτικά κινούμενο ρομπότ

Οι Nakamura και Sekiguchi πρότειναν το πρώτο χαοτικά κινούμενο ρομπότ που μπορεί να πλοηγηθεί ακολουθώντας ένα χαοτικό μοτίβο. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, πρότειναν το σχεδιασμό ενός ελεγκτή που παράγει χαοτική κίνηση χρησιμοποιώντας την εξίσωση Arnold σε ένα κινούμενο ρομπότ [122], [252]. Αυτό το σχέδιο δεν απαιτεί σχεδιασμό τροχιάς ή χαρτογράφηση χώρου εργασίας. Λόγω της τοπολογικής μεταβατικότητας, το χαοτικά κινούμενο ρομπότ ψάχνει ολόκληρο τον χώρο εργασίας και η ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες καθιστά το ρομπότ εξαιρετικά απρόβλεπτο. Η τυχαία βάδιση είναι μια εναλλακτική μέθοδος για τη σάρωση ενός χώρου εργασίας χωρίς χαρτογράφηση, αλλά το προτεινόμενο σχέδιο είναι καλύτερο από την τυχαία βάδιση.

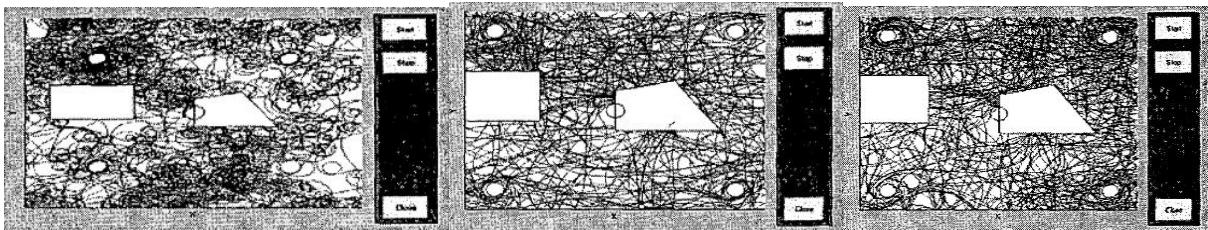


Σχήμα 5.1: α) Αναζήτηση στόχου μέσα από ένα χαοτικό μονοπάτι β) Ένα πρωτότυπο χαοτικά κινούμενο ρομπότ [183]

Ο Jansgi κ.α. απέδειξαν πειραματικά ότι η μέθοδος του συνδυασμού χαοτικών ελκυστών είναι αποτελεσματική για τον προγραμματισμό της κίνησης των κινούμενων ρομπότ [183], [253-255]. Πειραματίστηκαν με τροχιές ρομπότ χρησιμοποιώντας διάφορα είδη χαοτικών μοτίβων, όπως για παράδειγμα τους ελκυστές Chua, Lorenz και Rossler. Ο στόχος της χρήσης αυτών των χαοτικών σημάτων είναι να διευρυνθεί η περιοχή κάλυψης από το ρομπότ. Το σχήμα 5.1 δείχνει ένα προτεινόμενο χαοτικό ρομπότ το οποίο ελέγχεται άμεσα από ένα απλό αυτόνομο χαοτικό κύκλωμα. Οι προσομοιώσεις υπολογιστών επιβεβαίωσαν ότι το κύκλωμα του Chua παρήγαγε τη μεγαλύτερη δυνατή κάλυψη της περιοχής [183].

Συνήθως, οι δυναμικές μεταβλητές των χαοτικών ελκυστών χρησιμοποιούνται για να οδηγήσουν τους τροχούς των διαφορικών ρομπότ ανεξάρτητα μεταξύ τους. Ο Hackbarth μεταμόρφωσε τις χαοτικές τροχιές σε χώρο αποστολής (εργασίας) αυτόνομων πρακτόρων [256].

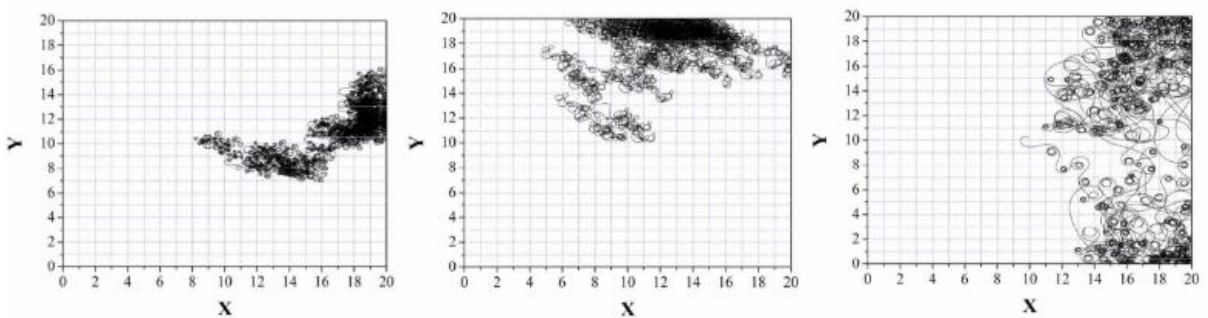
Ομοίως, χρησιμοποιώντας εξισώσεις Lorenz, Hamilton και υπερχάους, ο Youngchul κ.α. πρότειναν κινήσεις για την αποφυγή εμποδίων και την αναζήτηση στόχων για έναν κινούμενο πράκτορα. Το σχήμα 5.2 δείχνει τις τροχιές ενός χαοτικού ρομπότ στις οποίες εφαρμόστηκαν οι παραπάνω εξισώσεις και mirror mapping στον εξωτερικό τοίχο και στα εσωτερικά εμπόδια, τα οποία μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι κατάφερε να αποφύγει επαρκώς. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαίωσαν ότι αυτή η τεχνική δημιούργησε εξαιρετικές χαοτικές τροχιές [257–259].



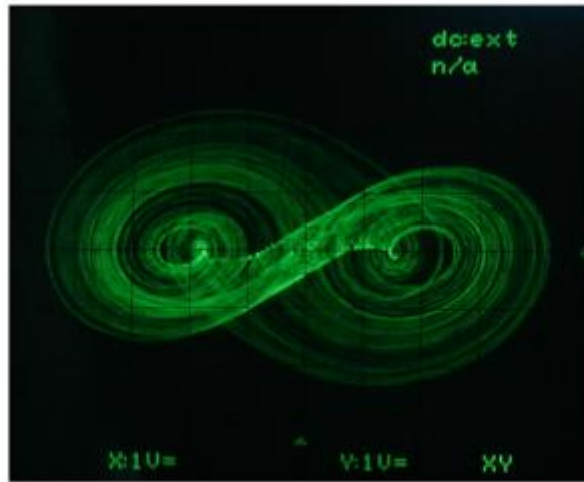
Σχήμα 5.2. Αριστερά: Τροχιές εξισώσεων Lorenz. Μέση: Τροχιές εξισώσεων Hamilton. Δεξιά: Τροχιές εξισώσεων υπερχάους. Όλες με ύπαρξη σταθερών εμποδίων [257].

Ένα σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου προτάθηκε από τον Martins-Filho κ.α. για να παραχθούν κινήσεις τέτοιες, στις οποίες οι δυναμικές μεταβλητές του συστήματος Lorenz χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργήσουν τις εντολές ενεργοποίησης για το μίνι-ρομπότ Khepera [260]. Αυτή η μέθοδος οδήγησε σε μια ακραία χαοτική κίνηση και τη γρήγορη σάρωση ολόκληρου του χώρου εργασίας από το ρομπότ. Παρομοίως, εφαρμόστηκαν τροχιές κίνησης για έναν κινούμενο πράκτορα, χρησιμοποιώντας το Standard map, ένα δυναμικό σύστημα [260].

Ομοίως, ο Volos κ.α. υλοποίησαν μια χαοτική γεννήτρια σχεδιασμού διαδρομής για ένα κινούμενο ρομπότ για να καλύψει έναν ολόκληρο χώρο εργασίας με γρήγορο τρόπο. Τρία διαφορετικά χαοτικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν στη χαοτική γεννήτρια όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3, η οποία παρήγαγε έναν double-scroll χαοτικό ελκυστή όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4 [261–262].



Σχήμα 5.3. Η διαδρομή του κινούμενου ρομπότ με Chua, Lorenz και VKS από αριστερά προς τα δεξιά [261]



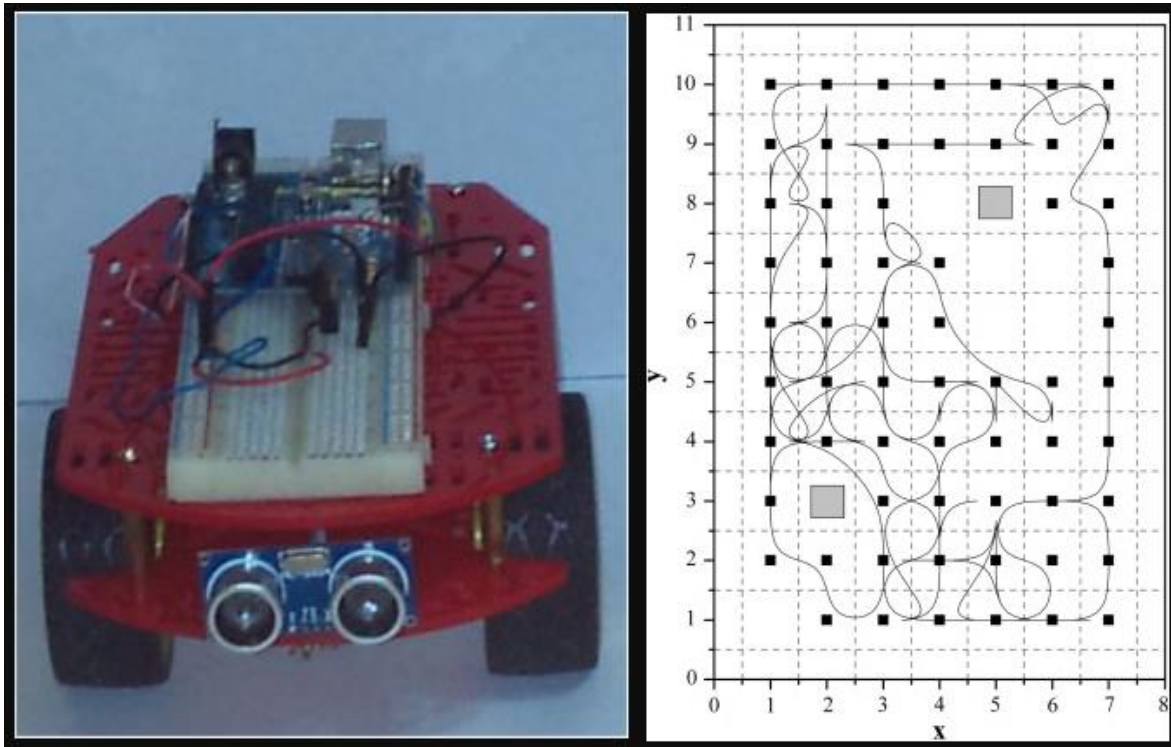
Σχήμα 5.4. Πειραματικός double- scroll χαοτικός ελκυστής [261]

Ο πίνακας 5.1 επισημαίνει τη σύγκριση μεταξύ των ποσοστών κάλυψης για αυτά τα συστήματα.

Πίνακας 5.1. Ποσοστό κάλυψης διαφορετικών συστημάτων [261-262].

System	Coverage Rate
Chua	11.5%
Lorenz	23.0%
VKS	40.0%

Ο Volos κ.α. παρουσίασαν επίσης μια στρατηγική ελέγχου κίνησης για κινούμενα και ανθρωποειδή ρομπότ που χρησιμοποιούν μια χαοτική γεννήτρια τυχαίου bit [165], [263]. Χρησιμοποιώντας αυτή τη γεννήτρια, ένα αυτόνομο ρομπότ υλοποιήθηκε σε μια πειραματική πλατφόρμα, το «Μαγικό Σασί» (Magician Chassis), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5. Αυτή η τεχνική εξασφάλισε εξαιρετικά απρόβλεπτες τροχιές, οι οποίες εμφανίζονται τυχαίες από την σκοπιά ενός παρατηρητή [264–266]. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα αυτής της στρατηγικής και οι στατιστικές δοκιμές εξασφάλισαν επίσης την τυχαιότητα των σχεδιασμένων κινήσεων.

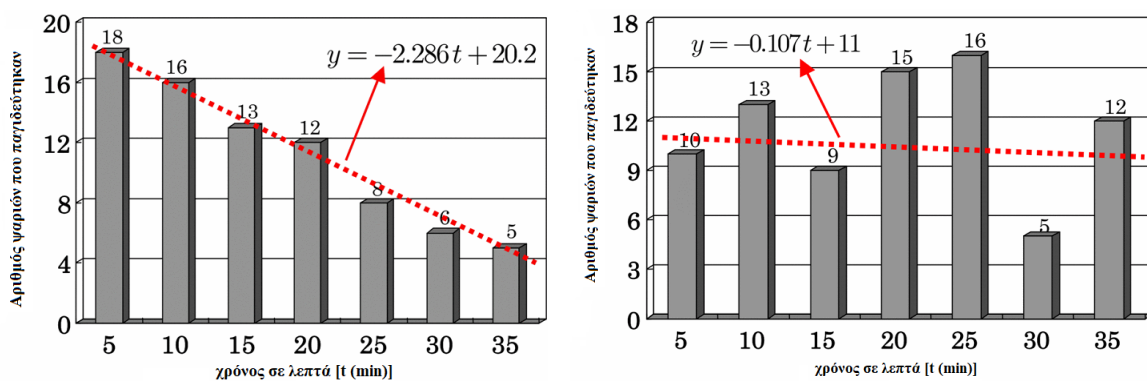


Σχήμα 5.5. Αριστερά: Το αυτόνομο κινούμενο ρομπότ που χρησιμοποιεί την πλατφόρμα “Magic Chassis”. Δεξιά: Η κάλυψη του εδάφους από το ρομπότ με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων [265].

Ο Caihong κ.α. πρότειναν ένα χαοτικό σχεδιαστή διαδρομής που βασίζεται σε μια συνάρτηση logistic map. Αυτό το απλό ντετερμινιστικό σύστημα συμπεριφέρθηκε με τυχαιότητα και διέσχισε μεγάλο μέρος του χώρου εργασίας [173]. Παρουσιάστηκε επίσης μια στρατηγική συγχώνευσης βασισμένη στον Standard map για την ανάπτυξη ενός χαοτικού σχεδιαστή διαδρομών για κινούμενα ρομπότ [267]. Οι Curias και Volosencu σχεδίασαν μια βελτιωμένη χαοτική τεχνική σχεδιασμού διαδρομών για κινούμενα ρομπότ για την εκτέλεση αποστολών επιτήρησης σε οριοθετημένες περιοχές [268]. Η αναφορά [268] προτείνει μια μεθοδολογία σχεδιασμού διαδρομών που χρησιμοποιεί το διακριτό σύστημα Hénon για να επικεντρωθεί στην επιτήρηση των συνόρων. Ο στόχος είναι να σχεδιάσει ένα υπολογιστικά απλό χαοτικό σύστημα που παρουσιάζει χαοτικές τροχιές όταν βρίσκεται κοντά σε οποιοδήποτε αυθαίρετα επιλεγμένο κλειστό περίγραμμα. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει πρώτα την επιλογή ενός κλειστού περιγράμματος και την επιλογή της εγγύτητας του ρομπότ σε ένα 2D χώρο και στη συνέχεια χρήση συγγενικών μετασχηματισμών για να δώσει το χαοτικό σύστημα Hénon στο επιλεγμένο μονοπάτι και να κατασκευάσει τη νέα χαοτική τροχιά. Αυτή η νέα τροχιά ακολουθεί κατά προσέγγιση τα όρια που ερευνώνται, αλλά οποιοσδήποτε αντίπαλος πράκτορας που ελπίζει να κρυφτεί πέρα από το ρομπότ περιπολίας θα βρει δυσκολία στην πρόβλεψη της θέσης και της πορείας του δεύτερου. Χαοτικά συστήματα επίσης χρησιμοποιήθηκαν από τον Curias κ.α. στον σχεδιασμό διαδρομών για πιο προσαρμοσμένους σκοπούς κατά την επιτήρηση των συνόρων [269].

Ο Minami κ.α. ενσωμάτωσαν χαοτική κίνηση σε δίκτυο αλιείας και έδειξαν ότι η χαοτική κίνηση του δικτύου μπορεί να ξεπεράσει τις στρατηγικές διαφυγής των ψαριών [270]. Πρόκειται για ένα ζήτημα που σχετίζεται με φυσική συμπεριφορά. Όταν αλιεύονται ψάρια με δίκτυο, τα ψάρια προσαρμόζονται στην αλιευτική ρουτίνα, έτσι ώστε το κόστος της απόδρασης να ελαχιστοποιείται. Όταν η αλιευτική ρουτίνα εκτελείται σε ένα κανονικό πρότυπο, η προσαρμογή είναι πολύ γρήγορη και η απόδοση είναι χαμηλή. Για να γίνει έλεγχος της αξιοπιστίας του συστήματος στην διαδικασία εντοπισμού και

πιασίματος, γινόταν αλίευση ψαριών συνεχόμενα για 35 λεπτά. Αφέθηκαν 8 ψάρια (μήκους περίπου 40mm) σε μια μικρή πισίνα (το μέγεθος της πισίνας νερού είναι 300 (πλάτος) × 400 (μήκος) × 100 (βάθος) mm) και μόλις κάποιο από αυτά πιανόταν στο δίχτυ (80×100 mm), αφηνόταν αμέσως πάλι πίσω στην ίδια πισίνα. Η αλίευση του ψαριού εκτελείται ανυψώνοντας το δίχτυ όταν το ψάρι βρίσκεται μέσα σε μια περιοχή (86×66 mm) στο κέντρο του δικτυού που συνδέεται με τον βραχίονα ενός ρομπότ και ανιχνεύεται από μια κάμερα CCD χειρός-οφθαλμού στο κέντρο της προβολής εικόνας (η απόσταση από κάμερα σε ψάρι είναι 450 mm). Οι ερευνητές περίμεναν ότι η λειτουργία αλιείας θα γινόταν πιο ομαλή όσο περνούσε ο χρόνος, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ψάρια μπορεί να κουραστούν. Ωστόσο, προς έκπληξή τους, ο αριθμός των αλιευμάτων μειώθηκε σταδιακά. Τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος φαίνονται αριστερά στο σχήμα 5.6, όπου ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ψαριών που πιάστηκαν στο δίχτυ σε διαδοχικά πεντάλεπτα και ο οριζόντιος τον χρόνο αλίευσης.

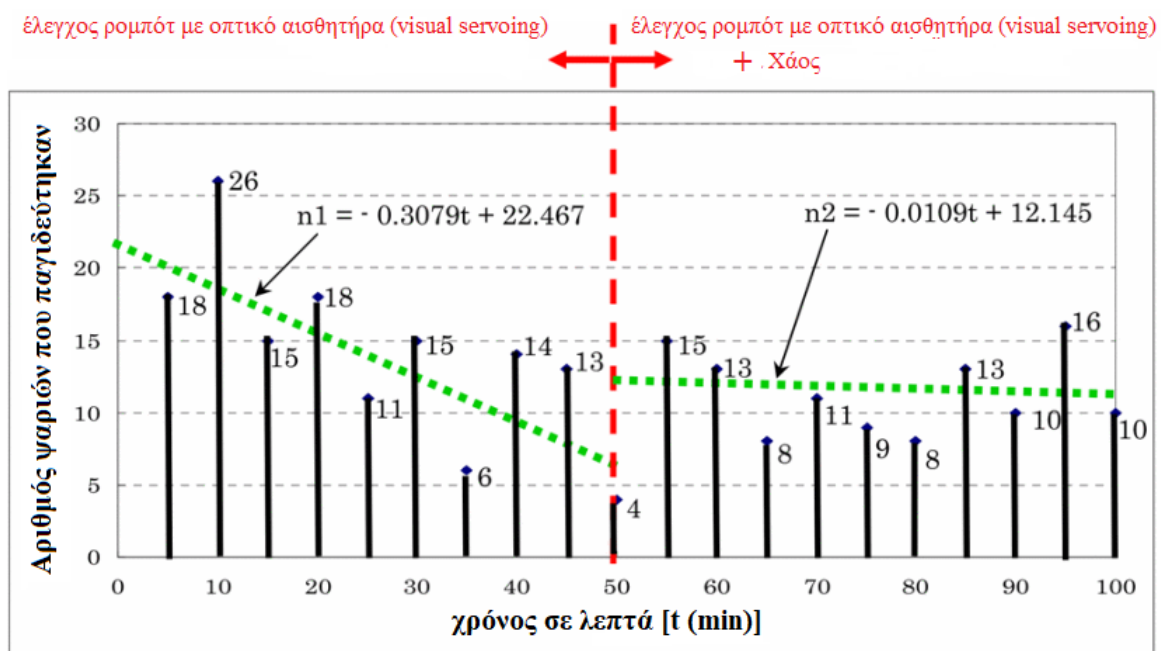


Σχήμα 5.6. Αριστερά: Αποτελέσματα ψαριών που πιάστηκαν στο δίχτυ με την πάροδο του χρόνου πριν την ενσωμάτωση της χαοτικής κίνησης. Δεξιά: Αποτελέσματα ψαριών που πιάστηκαν στο δίχτυ με την πάροδο του χρόνου μετά την ενσωμάτωση της χαοτικής κίνησης [271].

Αν αντίθετα μια χαοτική κίνηση είναι ενσωματωμένη στην τροχιά αλιείας η χαοτική κίνηση του δικτυού μπορεί να ξεπεράσει τις στρατηγικές διαφυγής των ψαριών [270-271]. Για να ελεγχθεί αν το νέο προτεινόμενο σύστημα αλιείας είναι πιο αποτελεσματικό από το αρχικό, οι ερευνητές συνέχισαν την προσπάθεια αλίευσης 8 ψαριών σε πισίνα συνεχόμενα υπό τις ίδιες συνθήκες με το αρχικό πείραμα και κατέγραφαν τον αριθμό των αλιευμάτων κάθε 5 λεπτά. Στο αρχικό πείραμα, ο αριθμός των αλιευμάτων μειωνόταν συνεχώς, όπως παρουσιάζεται στα αριστερά του σχήματος 5.6. Αλλά μετά την ενσωμάτωση της χαοτικής κίνησης στην κίνηση του δικτυού, ο αριθμός των αλιευμάτων των ψαριών δεν μειώνεται όπως φαίνεται δεξιά στο σχήμα 5.6. Αν και ο αριθμός των αλιευμάτων είναι κάπως αβέβαιος με την πάροδο του χρόνου, ο μέσος αριθμός είναι περίπου 11 και η τάση μείωσης έχει σταματήσει. Η πρώτη σκέψη είναι ότι ο αριθμός θα μειωθεί προφανώς λόγω της έμφυτης νοημοσύνης των ψαριών, αλλά το αποτέλεσμα του πειράματος που φαίνεται δεξιά στο σχήμα 5.6 δείχνει ότι ο αριθμός δεν θα μειωθεί, λόγω της χαοτικής κίνησης. Με άλλα λόγια, η χαοτική κίνηση έχει αντισταθμίσει το πρόβλημα της ικανότητας των ψαριών να ξεφύγουν από το δίχτυ.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν το ψάρι έχει τελικά συνηθίσει στην κίνηση του δικτυού, θα είναι σε θέση να μάθει κάποια στρατηγική διαφυγής για να το αποφύγει, όπως το κολύμπι στην γωνία της πισίνας όπου απαγορεύεται η είσοδος του δικτυού. Έτσι ο αριθμός των αλιευμάτων μπορεί να μειωθεί με την πάροδο του χρόνου. Κατόπιν πραγματοποιήθηκε ένα άλλο πείραμα για να εξεταστεί αν

η υιοθέτηση του χάους μπορεί να αποτρέψει τη μείωση του αριθμού των ψαριών που αλιεύονται και χρησιμοποιήθηκε μια διαφορετική ομάδα 8 ψαριών σε σύγκριση με τα προηγούμενα πειράματα, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο σχήμα 5.6. Σε αυτό το πείραμα απελευθερώθηκαν επίσης 8 ψάρια στην πισίνα και συνεχίστηκε η παρακολούθηση, η αλιείωση και η απελευθέρωση συνεχώς για 100 λεπτά, χωρίς υιοθέτηση χάους κατά τα πρώτα 50 λεπτά και με χάος που χρησιμοποιήθηκε τα υπόλοιπα 50 λεπτά. Το αποτέλεσμα απεικονίζεται στο σχήμα 5.7, όπου ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει το χρόνο και ο κάθετος άξονος τον αριθμό αλιείας των ψαριών σε κάθε χρονικό διάστημα 5 λεπτών. Για να κατασταθεί προφανής η διαφορά, έγιναν ξεχωριστές αναλύσεις για τις πρώτες και τις τελευταίες περιόδους 50 λεπτών. Από τις δύο κατά προσέγγιση καμπύλες που επισημαίνονται ως n_1 και n_2 που παράγονται από τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Least-Squares), μπορούμε να δούμε τον αριθμό αλιευμάτων των ψαριών να μειώνεται σταδιακά χωρίς να χρησιμοποιείται χαοτική κίνηση, αλλά μετά από 50 λεπτά λειτουργίας αλιείας μπορεί γενικά να διατηρηθεί πάνω από το επίπεδο των 11 ψαριών με την υιοθέτηση του χάους. Συνολικά, τα πειράματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.6 και το σχήμα 5.7 έχουν δείξει ότι η χαοτική κίνηση που ενσωματώνεται στο δίκτυ αλιευμάτων είναι αποτελεσματική και μπορεί να κάνει τη λειτουργία αλιείας να συνεχιστεί ομαλά ακόμα και αν τα ψάρια συνηθίσουν σταδιακά στο μοτίβο της κίνησης ή μάθουν κάποιες στρατηγικές διαφυγής. Από το σχήμα 5.7, μπορούμε να δούμε ότι το ρομπότ με χαοτική κίνηση που χρησιμοποιήθηκε έχει κρατήσει αποτελεσματικά κάτω την ικανότητα εκμάθησης των ψαριών στη μακροχρόνια διαδικασία ανταγωνισμού νοημοσύνης μεταξύ τους. Ο FIQ (Συντελεστής Νοημοσύνης των Ψαριών (Fish's Intelligence Quotient (FIQ)) έχει μειωθεί από -0.3079 σε -0.0109. Ο μειούμενος συντελεστής αντιπροσωπεύει την ταχύτητα προσαρμογής ή εκμάθησης των ψαριών ως ομάδας όταν η νοημοσύνη των ψαριών αξιολογείται βάσει της ρομποτικής απόδοσης που δίνεται ως δεδομένη. Η μεγαλύτερη τιμή μείον σημαίνει υψηλό συντελεστή νοημοσύνης, το μηδέν είναι ίσο και το συν είναι λιγότερο έξυπνο από το ρομπότ. Ως εκ τούτου, η χαοτική τροποποίηση μπορεί να ξεπεράσει την ευφυΐα των ψαριών και να συμβάλλει στη δημιουργία της ρομποτικής νοημοσύνης.



Σχήμα 5.7: Ανάλυση δεδομένων του αριθμού των ψαριών που παγιδεύτηκαν [271]

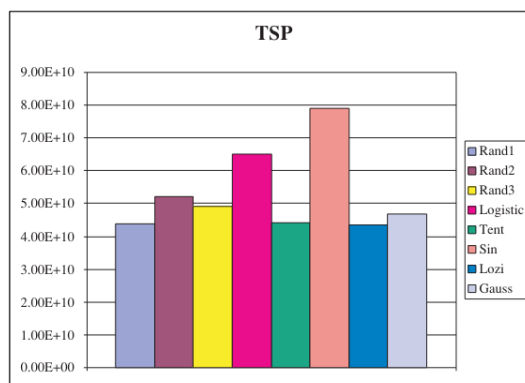
5.3 Ενσωμάτωση χάους σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης

Οι μέθοδοι καθολικής βελτιστοποίησης με μετα-ευρετικό ή στοχαστικό χαρακτήρα ονομάζονται «εξελικτικές υπολογιστικές τεχνικές», όπως ο γενετικός αλγόριθμος (genetic algorithm (GA)), η νοημοσύνη σμήνους (swarm intelligence (SI)), η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (ACO), ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών (artificial bee colony algorithm (ABC)), η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization (PSO)) και ούτω καθεξής. Στη φύση, τα σμήνη επιλύουν τα προβλήματά τους με την ομαδική νοημοσύνη. Τα πιο γνωστά παραδείγματα είναι οι αποικίες κοινωνικών εντόμων όπως τα μυρμήγκια, οι μέλισσες και οι τερμίτες. Τα συστήματα SI συνήθως αποτελούνται από έναν πληθυσμό απλών πρακτόρων που αλληλεπιδρούν τοπικά μεταξύ τους και με το περιβάλλον τους. Η ρομποτική σμήνους είναι η εφαρμογή των αρχών SI σε ρομπότ.

5.3.1 Χαοτικός γενετικός αλγόριθμος (CGA)

Ο GA είναι ένας ευρετικός αλγόριθμος αναζήτησης γενικού σκοπού, ο οποίος εμπνέεται από τη γενετική και τη διαδικασία επιλογής του Δαρβίνου. Αυτός ο μετα-ευρετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για τη δημιουργία λύσεων σε προβλήματα βελτιστοποίησης και αναζήτησης. Πολλά σημαντικά θεωρητικά και πρακτικά προβλήματα σχετίζονται με την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου. Οι κοινοί αλγόριθμοι σπάνια επιλύουν τέτοια προβλήματα [272]. Από την ανακάλυψή τους, έχουν λάβει πολλή προσοχή λόγω της δυνατότητάς τους ως αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για σύνθετα προβλήματα του πραγματικού κόσμου. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνική στη βελτιστοποίηση μηχανικού σχεδιασμού (engineering design optimization (EDO)) είναι ο GA.

Δεδομένου ότι τα δυναμικά συστήματα που περιέχουν ανατροφοδότηση συχνά παράγουν χάος, εικάζεται ότι το χάος είναι επίσης ένα συστατικό της φυσικής εξέλιξης. Οι Determan και Foster ενσωμάτωσαν ένα απλό χαοτικό σύστημα, τη λογιστική συνάρτηση (logistic equation), σε έναν τυπικό GA. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι η προσεκτική χρήση του χάους στην προσομοίωση είναι σε πλεονεκτική θέση [273]. Οι GA και το χάος είναι τεχνικές που παρακινούνται από τη φύση. Οι Yang και Chen παρουσίασαν επίσης μια νέα στρατηγική χαοτικής μετάλλαξης συνδυάζοντας το χάος και τους GA [274]. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση των GA, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα χαοτικά συστήματα, τα οποία εφαρμόστηκαν σε αυτούς τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Το σχήμα 5.8 συγκρίνει την απόδοση χρησιμοποιώντας διάφορες τυχαίες και χαοτικές γεννήτριες για το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (Travelling Salesman Problem (TSP)) [275]. Είναι σαφές από τα αποτελέσματα ότι τα χαοτικά δυναμικά συστήματα αποδίδουν τις καλύτερες επιδόσεις.



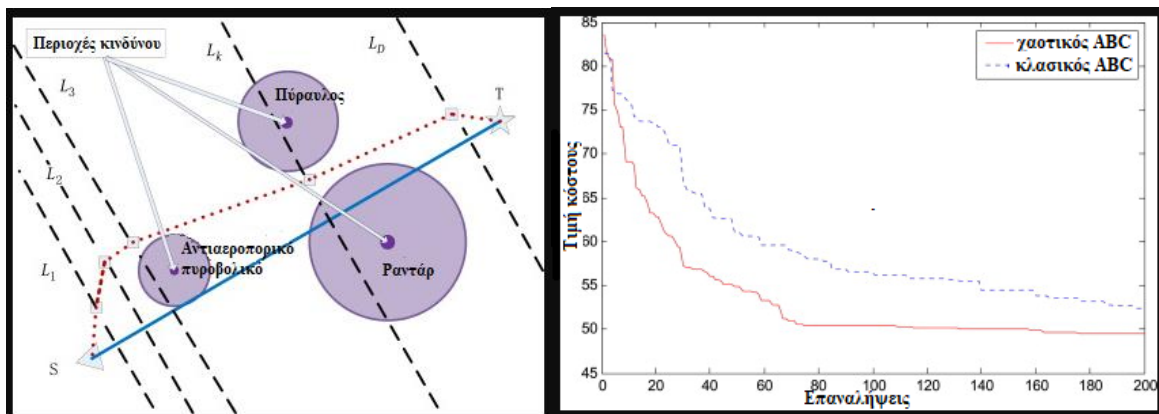
Σχήμα 5.8. Σύγκριση της απόδοσης για διάφορες τυχαίες και χαοτικές γεννήτριες [275]

Οι Jia και Wang πρότειναν ένα χαοτικό γενετικό αλγόριθμο (CGA) βασισμένο στον αλγόριθμο διάδοσης από απόσταση (distance-propagation algorithm) με χάοτικό έλεγχο και αποτελεσματική πρόβλεψη της κίνησης του ρομπότ. Σε ένα δυναμικό περιβάλλον, αυτή η στρατηγική έλυσε το πρόβλημα του σχεδιασμού διαδρομής για τα κινούμενα ρομπότ [276]. Ο Gao κ.α. πρότειναν επίσης έναν CGA για τον σχεδιασμό κινήσεων [277]. Σε σύγκριση με τους τυπικούς GA, ο CGA είναι απλός, αποτελεσματικός και γρήγορος.

5.3.2 Χαοτικός αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών (CABC)

Πολλές πτυχές των συλλογικών δραστηριοτήτων των κοινωνικών ζώων, όπως το πέταγμα των πτηνών σε σμήνη, η αναζήτηση τροφής από τα μυρμήγκια και το κοπάδιασμα των ψαριών, είναι αυτοοργανωμένες. Η σύνθετη ομαδική συμπεριφορά εξελίσσεται από τις αλληλεπιδράσεις των μεμονωμένων μελών, τα οποία συμπεριφέρονται με τακτικό τρόπο. Ο αλγόριθμος ABC προσομοιώνει τη συμπεριφορά κατά την αναζήτηση τροφής των μελισσών. Αυτός ο μετα-ευρετικός αλγόριθμος έχει μια ισορροπημένη ικανότητα αναζήτησης και χειρισμού.

Οι Lin και Huang πρότειναν μια νέα στρατηγική που βασίζεται στον αλγόριθμο ABC υβριδοποιημένο με το χάος [278]. Αυτή η μέθοδος συνδυάζει την ικανότητα αναζήτησης του ABC, που γίνεται με βάση τον πληθυσμό, με τη συμπεριφορά αναζήτησης όταν χρησιμοποιείται αιτιοκρατικό χάος. Παρομοίως, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους περιορισμούς σε ένα πολύπλοκο περιβάλλον πεδίου μάχης, ο σχεδιασμός της διαδρομής ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους μάχης (UCAV) είναι ένα περίτεχνο παζλ καθολικού βέλτιστου [279]. Ο Xu κ.α. υλοποίησαν τον αλγόριθμο ABC για ένα UCAV, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Αυτή η μέθοδος έχει προσελκύσει την προσοχή των ερευνητών λόγω της ευελιξίας, της χρηστικότητας και της ανθεκτικότητας στην αποκρυπτογράφηση των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ωστόσο, έχει αποκλίσεις, όπως η τάση να συγκλίνει πρόωρα και η ανάγκη πολλών επαναλήψεων για την εύρεση καθολικού βέλτιστου. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων και την επιτάχυνση της διαδικασίας αναζήτησης των βέλτιστων παραμέτρων, χρησιμοποιείται η χαοτική μεταβλητή. Το σχήμα 5.9 συγκρίνει τον κλασικό αλγόριθμο ABC και τον CABC, επαληθεύοντας την αποτελεσματικότητα της νέας σύνθετης χαοτικής τεχνικής.



Σχήμα 5.9. Αριστερά: Τυπικό μοντέλο πεδίου μάχης του UCAV. Δεξιά: Οι καμπύλες εξέλιξης των δύο αλγορίθμων [279]

Για ένα τετράποδο ρομπότ, οι Luo και Duan πρότειναν μια χαοτική προσέγγιση ABC για την επίλυση του προβλήματος ανάκτησης ώθησης. Τα πειραματικά αποτελέσματα επίσης επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου [280].

5.3.3 Χαοτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης (COA)

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών, οι επιστήμονες έχουν δείξει μεγάλο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη τεχνικών βελτιστοποίησης που βασίζονται σε χαοτικές ρουτίνες αναζήτησης, π.χ. χαοτικό νευρωνικό δίκτυο, χαοτική προσομοιωμένη απόπτωση (simulated annealing) και χαοτική αναζήτηση. Αυτές οι τεχνικές που βασίζονται στο χάος είναι πιο αποτελεσματικές από την τυχαία αναζήτηση και μπορούν να ξεφύγουν από τα τοπικά ελάχιστα. Οι Bing και ο Weisun παρουσίασαν έναν χαοτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης (COA), ο οποίος χρησιμοποιεί τις ιδιότητες της εργοδικότητας, της κανονικότητας και τις στοχαστικές ιδιότητες του χάους [281]. Ο COA μπορεί να λύσει περίπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης και είναι ταχύτερος από τους προαναφερθέντες αλγόριθμους. Ο Hongyan κ.α. πρότειναν έναν βελτιωμένο COA για τον σχεδιασμό της κίνησης των κινούμενων ρομπότ και η προσομοίωση απέδειξε ότι αυτή η μέθοδος ήταν γρήγορη και ακριβής [282]. Στην αναφορά [282] προτείνεται επίσης να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός του Logistic map και του Ulam-von Neumann map για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης μη γραμμικών περιορισμών για την εξεύρεση μιας βέλτιστης διαδρομής για ένα κινούμενο ρομπότ.

5.3.4 Χαοτικός αλγόριθμος IPSO-GWO

Ο αλγόριθμος της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO) είναι ένας μετα-ευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που εμπνέεται από τη συμπεριφορά ομάδων σωματιδίων στη φύση. Ο αλγόριθμος αυτός αναπτύχθηκε από τον Dr. James Kennedy και τον Dr. Russell Eberhart το 1995 [283]. Η λειτουργία του PSO βασίζεται σε ένα σύνολο από «σωματίδια» που κινούνται στον χώρο αναζήτησης λύσεων. Κάθε σωματίδιο αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Καθώς ο PSO εκτελείται, τα σωματίδια κινούνται μέσα στον χώρο αναζήτησης με βάση την προηγούμενη τους κίνηση και την καλύτερη λύση που έχουν εντοπίσει μέχρι εκείνη τη στιγμή. Ο PSO διαθέτει δύο κύριες παραμέτρους: την ταχύτητα των σωματιδίων και το αδρανές βάρος (inertial weight). Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων επηρεάζει τη σύγκλιση του αλγορίθμου και την απόδοσή του. Ο PSO έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική, η οικονομία και η βιολογία, και χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση προβλημάτων που δεν είναι εύκολο να επιλυθούν με παραδοσιακές μεθόδους.

Ο Gray Wolf Optimization (GWO) είναι ένας μετα-ευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που εμπνέεται από τη συμπεριφορά των γκρι λύκων κατά την αναζήτηση τροφής. Αναπτύχθηκε από τους Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. το 2014 [284]. Στον αλγόριθμο GWO, κάθε λύκος αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος λειτουργεί μέσω της προσομοίωσης της συμπεριφοράς των γκρι λύκων κατά την αναζήτηση θήραματος. Κάθε λύκος ακολουθεί τρεις βασικές κινήσεις: Αναζήτηση θηράματος (prey): Οι λύκοι προσπαθούν να εντοπίσουν τη θέση του θήραματος (βέλτιστη λύση) στον χώρο αναζήτησης. Αναζήτηση της βέλτιστης περιοχής: Αν ένας λύκος δεν εντοπίσει θήραμα, αυξάνει την αναζήτησή του προς τη γενική περιοχή όπου υποθέτει ότι βρίσκεται η βέλτιστη λύση. Παρακολούθηση άλλων λύκων: Οι λύκοι παρακολουθούν και επηρεάζονται από τις κινήσεις άλλων λύκων στον χώρο αναζήτησης. Ο GWO προσαρμόζει δυναμικά τις θέσεις των λύκων στο χώρο αναζήτησης μέσω μιας διαδικασίας ενημέρωσης, προσπαθώντας να συγκλίνει σε βέλτιστες λύσεις. Ο αλγόριθμος GWO έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως η μηχανική, η οικονομία, η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη. Χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση προβλημάτων που αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως η μη γραμμικότητα.

Ο παραδοσιακός αλγόριθμος της βελτιστοποίησης με σωματίδια (PSO) για τη σχεδίαση μονοπατιού αντιπροσωπεύει κάθε σωματίδιο ως μονοπάτι και ακολουθεί τα σωματίδια για να βρει μια βέλτιστη διαδρομή. Ωστόσο, υπάρχουν προβλήματα στην πρόωρη σύγκλιση, ισχνή γενική ικανότητα αναζήτησης και στην ευκολία στην οποία τα σωματίδια πέφτουν στο τοπικό βέλτιστο, το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει στην αποτυχία της γρήγορης εύρεσης βέλτιστης διαδρομής. Προκειμένου να επιλυθούν αυτά τα προβλήματα, προτείνεται ένας βελτιωμένος αλγόριθμος PSO, ο συνδυασμός του gray wolf optimization (IPSO-GWO) με χάος και ένα νέο προσαρμοζόμενο αδρανές βάρος. Ο βελτιστοποιητής γκριζών λύκων (GWO) μπορεί να ταξινομήσει τα σωματίδια στην πορεία για να βρει τα σωματίδια με τη βέλτιστη τιμή fitness και να οδηγήσει άλλα σωματίδια για να αναζητήσουν τη θέση του σωματιδίου με τη βέλτιστη τιμή fitness, η οποία δίνει στον αλγόριθμο PSO υψηλότερη δυνατότητα γενικής αναζήτησης. Το χάος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αρχικοποιήσει την ταχύτητα και τη θέση των σωματιδίων, γεγονός που μπορεί να μειώσει την προωρότητα και να αυξήσει την ποικιλομορφία τους.

Το νέο προσαρμοζόμενο αδρανές βάρος έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει τη γενική ικανότητα αναζήτησης και την ταχύτητα σύγκλισης. Επιπλέον, όταν ο αλγόριθμος πέφτει σε ένα τοπικό βέλτιστο, η θέση του σωματιδίου με την ιστορικά καλύτερη fitness μπορεί να βρεθεί μέσω της χαοτικής αλληλουχίας, η οποία μπορεί να αντικαταστήσει τυχαία ένα σωματίδιο για να το κάνει να πηδήξει έξω από το τοπικό βέλτιστο. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος IPSO-GWO έχει δοκιμαστεί πρώτα με τη βελτιστοποίηση συναρτήσεων χρησιμοποιώντας δέκα συναρτήσεις αναφοράς και στη συνέχεια εφαρμόστηκε για τον βέλτιστο σχεδιασμό διαδρομής ενός ρομπότ σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος IPSO-GWO **είναι σε θέση να βρει μια βέλτιστη διαδρομή πολύ πιο γρήγορα από τις παραδοσιακές μεθόδους** που βασίζονται στον PSO και GWO. Η παραπάνω εργασία [285] αποτελεί μία πολύτιμη συνεισφορά στη βελτίωση του αλγορίθμου PSO στον σχεδιασμό διαδρομής ενός ρομπότ με βάση την ταχύτητα σύγκλισης και την απαίτηση της συντομότερης διαδρομής. Συνδυάζοντας τον παραδοσιακό PSO με τον GWO, το χάος και ένα νέο προσαρμοζόμενο αδρανές βάρος, **μπορεί να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλισης και της φτωχής συνολικής ικανότητας αναζήτησης και να βελτιωθεί η ταχύτητα σύγκλισης για ταχύτερη αναζήτηση μονοπατιών**. Ο προτεινόμενος IPSO-GWO αλγόριθμος έχει δοκιμαστεί απέναντι στον παραδοσιακό PSO με δέκα συναρτήσεις benchmark και τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης δείχνουν ότι ο IPSO-GWO **συγκλίνει γρηγορότερα χωρίς πρόωρη σύγκλιση**. Συγκρίνοντας τον IPSO-GWO με τον PSO και δύο άλλους αλγορίθμους για σχεδιασμό διαδρομής, ο IPSO-GWO **μπορεί να βρει ένα βέλτιστο μονοπάτι με γρηγορότερη ταχύτητα**. Συνοψίζοντας, ο προτεινόμενος αλγόριθμος IPSO-GWO **παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση στη σχεδίαση διαδρομής με τον συνδυασμό του χάους για αποφυγή πρόωρης σύγκλισης**. Στο μέλλον, μπορούν να συνεχίσουν να εφαρμόζονται οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι IPSO-GWO σε πιο πρακτικές εφαρμογές.

5.3.5 Ένα multi-scroll χαοτικό σύστημα

Σε αυτήν την εργασία [160] παρουσιάστηκε μια μελέτη για πληρέστερη κάλυψη στον σχεδιασμό διαδρομής ενός κινούμενου ρομπότ, ειδικότερα απευθυνόμενη σε περιπτώσεις κινούμενων ρομπότ που εκτελούν ειδικές εργασίες κάνοντας χρήση ελεγκτή επιπεδότητας (flatness controller) με βάση τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός multi-scroll χαοτικού συστήματος. Ένας flatness controller σε ένα κινούμενο ρομπότ είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση του ρομπότ σε σταθερό επίπεδο κατά τη διάρκεια της κίνησής του. Ο βασικός στόχος ενός ελεγκτή επιπεδότητας είναι να εξασφαλίσει ότι το ρομπότ παραμένει ισορροπημένο και δεν ανατρέπεται ή δεν πέφτει κατά την κίνησή του. Ο ελεγκτής επιπεδότητας συνήθως χρησιμοποιεί αισθητήρες, όπως επιταχυνσιόμετρα

ή γυροσκόπια, για να ανιχνεύσει την κλίση ή την αλλαγή της γωνίας του ρομπότ. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, ο ελεγκτής λαμβάνει αποφάσεις για το πώς θα ρυθμιστούν οι κινητήρες ή οι άλλοι μηχανισμοί κίνησης προκειμένου να διατηρηθεί η επιθυμητή θέση ή ισορροπία του ρομπότ. Ο ελεγκτής επιπεδότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε ρομπότ που πρέπει να λειτουργούν σε ανώμαλα ή απροσδόκητα περιβάλλοντα, όπως σε ρομπότ που χρησιμοποιούνται σε ανθρωπιστικές αποστολές ή σε βιομηχανικά περιβάλλοντα με ανώμαλο έδαφος.

Στις οριακές συνθήκες, για να μη βγούμε από τον χώρο εργασίας, χρησιμοποιείται μία μέθοδος mirror mapping, που περιορίζει όλες τις θέσεις του κινούμενου ρομπότ στον χώρο εργασίας και που μπορεί να το επαναφέρει όταν υπάρχουν σημεία που βγαίνουν εκτός διαδρομής. Το μεγαλύτερο πρόβλημα τέτοιου είδους χαοτικών διαδρομών είναι ο καθορισμός του νόμου (control law) που εγγυάται την αξιοπιστία του συστήματος (system commendability). Ο νόμος ελέγχου είναι ένας μαθηματικός ή αλγοριθμικός τύπος που καθορίζει πώς ένα σύστημα ελέγχου θα αντιδράσει σε εισόδους ή καταστάσεις. Συγκεκριμένα, ο νόμος ελέγχου καθορίζει πώς οι ελεγκτές ή οι ελεγκτές επιπέδου θα αντιδράσουν σε δεδομένες εισόδους ή παρατηρήσεις για να επιτύχουν τους στόχους ελέγχου του συστήματος. Είναι κρίσιμοι για τη λειτουργία των συστημάτων ελέγχου, καθώς καθορίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Επίσης, μπορεί να είναι απλοί ή πολύπλοκοι ανάλογα με το πρόβλημα ελέγχου που αντιμετωπίζουν. Συχνά, ανάλογα με το είδος του συστήματος και τους στόχους ελέγχου, μπορεί να προκύπτουν από μεθόδους σχεδίασης ελέγχου, όπως η μέθοδος PID (Proportional-Integral-Derivative) ή άλλες προχωρημένες τεχνικές ελέγχου. Παρόλα αυτά, ένας ελεγκτής επιπεδότητας, που προσφέρει μεγάλα πλεονεκτήματα παρέχοντας μία ενσωματωμένη δομή για σχεδιασμό και έλεγχο χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει την αξιοπιστία του χαοτικού ρομπότ. Συγκρίνοντας την απλή χρήση ενός double-scroll χαοτικού συστήματος σε ολόκληρο τον χώρο εργασίας, το προτεινόμενο νέο multi-scroll χαοτικό σύστημα σε συνδυασμό με τη μέθοδο mirror mapping δίνει καλά αποτελέσματα που **μπορούν να επιτύχουν μια πληρέστερη κάλυψη για έναν μεγαλύτερο χώρο εργασίας του κινούμενου ρομπότ.**

5.3.6 Χαοτικός αλγόριθμος IC-VAINDIWPSO

Για τον ασφαλή σχεδιασμό της διαδρομής των μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs) σε ένα τρισδιάστατο (3D) περιβάλλον με πολλαπλές απειλές, πρώτα, εισάγεται μια συνάρτηση κόστους σύμφωνα με τους περιορισμούς του χώρου και τους συνολικούς περιορισμούς επίδοσης των UAV του προβλήματος σχεδιασμού διαδρομής. Στη συνέχεια, βελτιωμένα μη γραμμικά δυναμικά βάρη αδράνειας (INDIW) εισάγονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) και όταν τα σωματίδια πέφτουν σε τοπικό βέλτιστο, η ταχύτητα διαταράσσεται και παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ταχύτητας και βελτιωμένου μη γραμμικού δυναμικού βάρους αδράνειας PSO (VAINDIWPSO). Ο αλγόριθμος βελτιώνει την ταχύτητα της σύγκλισης και την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness) του αλγορίθμου PSO. Ωστόσο, ο αντίκτυπος της βελτιστοποίησης της πτητικής διαδρομής δεν είναι εμφανής. Ως εκ τούτου, για να ενισχυθεί περαιτέρω η συνολική απόδοση του αλγορίθμου VAINDIWPSO, εισάγεται η προσαρμοστική ρύθμιση της ταχύτητας, πραγματοποιείται χαοτική αρχικοποίηση, εισέρχεται ο βελτιωμένος λογιστικός χαοτικός χάρτης (logistic chaotic map) στον αλγόριθμο και αποκτάται ένα βελτιωμένος χαοτικός αλγόριθμος (IC-VAINDIWPSO). Στη συνέχεια, η σχέση μεταξύ του αλγορίθμου και των περιορισμών χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική αναζήτηση περίπλοκων περιβαλλόντων και την εύρεση ασφαλών διαδρομών με μικρή συνάρτηση κόστους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι σε ένα περίπλοκο περιβάλλον ο αλγόριθμος IC-VAINDIWPSO **βελτιώνει σημαντικά την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου, μειώνει την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness) και τον**

χρόνο εκκίνησης του, ενώ η διανυθείσα διαδρομή είναι επιπρόσθετα ομαλότερη, ώστε να επιτυγχάνεται μια σχεδόν βέλτιστη λύση.

Σε αυτή την έρευνα [286], χρησιμοποιείται πρώτα ένας αλγόριθμος PSO για να βρεθούν εφικτές διαδρομές. Ωστόσο, η ταχύτητα σύγκλισης και οι βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τις σύγχρονες απαιτήσεις. Έτσι, το κύριο ερευνητικό κίνητρο είναι η περαιτέρω επιτάχυνση της ταχύτητας σύγκλισης και η απόκτηση της καλύτερης συνάρτησης καταλληλότητας (fitness). Ως εκ τούτου, ο αλγόριθμος PSO βελτιώνεται και ένα μη γραμμικό δυναμικό βάρος αδράνειας εισάγεται σε αυτόν. Το μη γραμμικό δυναμικό βάρος αδράνειας (nonlinear inertia weight) είναι ένα χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται στους αλγορίθμους βελτιστοποίησης όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και οι σωματιδιακοί αλγόριθμοι. Αυτό το βάρος χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την επίδραση της ταχύτητας των σωματιδίων ή των ατόμων στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου, το μη γραμμικό δυναμικό βάρος αδράνειας αλλάζει τιμή, συνήθως με μια συγκεκριμένη συνάρτηση. Αυτό βοηθά στο να περιοριστεί η εξερεύνηση του χώρου λύσεων στις αρχικές φάσεις της αναζήτησης και να ενθαρρυνθεί η εκμετάλλευση πιο κοντινών λύσεων κατά τις τελικές φάσεις. Οι τιμές του μη γραμμικού δυναμικού βάρους αδράνειας ποικίλλουν ανάλογα με το συγκεκριμένο πρόβλημα και τις προτιμήσεις του χρήστη. Όταν τα σωματίδια πέφτουν σε τοπικό βέλτιστο, η ταχύτητα διαταράσσεται ελαφρώς, και ένας βελτιωμένος αλγόριθμος μη γραμμικού δυναμικού βάρους αδράνειας PSO (VAINDIWPSO [velocity and improved nonlinear dynamic inertia weight PSO]) προτείνεται. Αυτός ο αλγόριθμος επιταχύνει την ταχύτητα σύγκλισης και μειώνει την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness). Ωστόσο, ο αντίκτυπος της βελτιστοποίησης δεν είναι εμφανής. Ως εκ τούτου, με βάση τον αλγόριθμο VAINDIWPSO, η ενημέρωση ταχύτητας του αλγορίθμου ρυθμίζεται προσαρμοστικά. Δεδομένου ότι τα σωματίδια με μια πιο ομοιόμορφη αρχική κατανομή έχουν λιγότερες δυσκολίες στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, πραγματοποιείται χαοτική αρχικοποίηση και εισάγεται ο λογιστικός χαοτικός χάρτης (logistic chaotic map) για να επιτευχθεί ο βελτιωμένος χαοτικός αλγόριθμος VAINDIWPSO (IC-VAINDIWPSO). Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, ο αλγόριθμος IC-VAINDIWPSO επιλύει τα προβλήματα του αλγορίθμου PSO, όπως η σταδιακή ταχύτητα σύγκλισης, ο μακρύς χρόνος εκκίνησης, η άκαμπτη διαδρομή και η εύκολη πτώση στο τοπικό βέλτιστο.

Για να ληφθεί μια κατά προσέγγιση βέλτιστη διαδρομή για γρήγορη ένωση δύο σημείων, προτείνονται δύο παραλλαγές του αλγορίθμου σμήνους σωματιδίων και στη συνέχεια ο αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων και οι δύο παραλλαγές υποβάλλονται σε πειράματα σχεδιασμού διαδρομής. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι αν και ο αλγόριθμος VAINDIWPSO βελτιώνει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου και μειώνει την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητάς (fitness) του, η βελτιστοποίηση της διαδρομής δεν είναι προφανής. Ο αλγόριθμος IC-VAINDIWPSO **βελτιώνει σημαντικά την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου, μειώνει την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness) και τον χρόνο εκκίνησης, ενώ η προκύπτουσα διαδρομή είναι ομαλότερη.** Στη συνέχεια, για να επαληθευτεί ότι ο αλγόριθμος λαμβάνει διαδρομές κάτω από διαφορετικούς αριθμούς απειλών, πραγματοποιούνται επτά ομάδες πειραμάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τους τρεις αλγορίθμους σε ένα απλό περιβάλλον είναι σχεδόν τα ίδια και με την αύξηση της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος ο αλγόριθμος IC-VAINDIWPSO επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα με πλήρη αποκάλυψη των πλεονεκτημάτων. Για να μειωθεί η τυχαιότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων, πραγματοποιούνται 10 ομάδες πειραμάτων με την αλλαγή των παραμέτρων της απειλής. Τέλος, όταν συγκρίνεται με άλλους αλγορίθμους στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, επαληθεύεται πλήρως η ανωτερότητα του αλγορίθμου IC-VAINDIWPSO [286].

Ο ευρέως διαδεδομένος αλγόριθμος PSO ξεκινά τυχαία τον πληθυσμό. Αν και η τεχνική είναι απλή, είναι εύκολο να γίνει η αρχική κατανομή σωματιδίων άνιση ή ακόμη και να βρίσκεται μακριά από τη βέλτιστη λύση, γεγονός το οποίο μειώνει σημαντικά την απόδοση εκτέλεσης. Ως εκ τούτου, η εργοδυναμία και η τυχαιότητα της θεωρίας του χάους εισάγονται για να παρέμβουν στην αρχικοποίηση του πληθυσμού. Το αρχικό σμήνος σωματιδίων σχηματίζεται χρησιμοποιώντας μια χαοτική ακολουθία για να κάνει μια ορισμένη ομοιόμορφη κατανομή. Για να βελτιωθεί η ποιότητα των αρχικοποιημένων σωματιδίων, διπλασιάζονται τα σωματίδια που παράγονται σε κάποιο σημείο κατά τη διάρκεια της αρχικοποίησης και στη συνέχεια επιλέγονται τα μισά από αυτά με τη χαμηλότερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness). Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο τα αρχικά σωματίδια γίνονται ομοιόμορφα κατανεμημένα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Επίσης, φέρνει το προκύπτον αρχικό σύνολο (σμήνος) σωματιδίων πιο κοντά στη βέλτιστη λύση, γεγονός που **βελτιώνει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου**.

Η χαοτική αλληλουχία μπορεί να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας πέντε είδη χαοτικών χαρτών, όπως ο logistic map, ο χάρτης Lorenz, ο piecewise linear χαοτικός χάρτης, ο tent map και ο χάρτης Henon. Στη θεωρία των δυναμικών συστημάτων, ένας χάρτης υποδηλώνει μια συνάρτηση εξέλιξης που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία διακριτών δυναμικών συστημάτων. Μεταξύ αυτών, το logistic mapping είναι μια σχετικά εύκολη τεχνική χαρτογράφησης όσον αφορά το μαθηματικό σχήμα του και χρησιμοποιείται ευρέως. Εδώ [286] εφαρμόζεται ο βελτιωμένος logistic map για να επιτευχθεί το βέλτιστο στα σωματίδια του πληθυσμού.

5.3.7 Χαοτικός αλγόριθμος Aquila

Ο σχεδιασμός της διαδρομής των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs) είναι ένα από τα κρίσιμα ζητήματα όσον αφορά τη διασφάλιση καλών επιδόσεων σε πραγματικές εφαρμογές. Βασικά, είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό και τη διασφάλιση μιας σύντομης, ομαλής και χωρίς σύγκρουση διαδρομής μεταξύ δύο θέσεων από μια πηγή σε ένα σημείο προορισμού. Σε αυτήν την εργασία [287] παρουσιάζεται ένα υβριδικό σχήμα βελτιστοποίησης που βασίζεται στην υβριδοποίηση, του Chaotic Aquila Optimization με τον Simulated Annealing για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού διαδρομής των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων. Η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου αξιολογείται χρησιμοποιώντας τρεις χάρτες αναφοράς με διαφορετικό αριθμό απειλών. Σε σύγκριση με εννέα γνωστούς μετα-ευρετικούς αλγόριθμους, τα αποτελέσματα των προσομοιωμένων πειραμάτων δείχνουν ότι ο προτεινόμενος λειτουργεί καλύτερα στην πλειονότητα των σεναρίων, επιτυγχάνοντας σημαντική βελτίωση στην ελαχιστοποίηση της τιμής fitness και του κόστους διαδρομής έως 36% και 19% αντίστοιχα.

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs), επίσης γνωστά ως drones, έχουν δει πραγματικές εξελίξεις κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας και έχουν αποδείξει την επιτυχία τους και την ικανότητά τους να φέρνουν εις πέρας σύνθετες αποστολές λόγω των πλεονεκτημάτων τους, όπως η προσβασιμότητα, η κινητικότητα, το κόστος, η modularity, κ.α. Καθώς τα drones γίνονται πιο διαδεδομένα, οι κατασκευαστές φροντίζουν να ενσωματώσουν ένα ευρύτερο φάσμα τεχνολογιών στα προϊόντα τους, συμπεριλαμβανομένης της τεχνολογίας WiFi [288] και των συστημάτων ανίχνευσης της ανθρώπινης συμπεριφοράς [289]. Για αυτούς τους λόγους, τα UAVs είναι σήμερα παρόντα σε διάφορους τομείς όπως η παρακολούθηση [290], η ανίχνευση [291], η ασφάλεια και η επιτήρηση [292], η έρευνα και η διάσωση [293], η γεωργία [294] και η μετεωρολογία [295].

Οι περισσότερες αποστολές UAV απαιτούν την αυτονομία λήψης αποφάσεων που βασίζονται σε δυναμικές και πραγματικού χρόνου αλλαγές. Μεταξύ αυτών των αποφάσεων, μπορούμε να εξετάσουμε την επιλογή της τροχιάς ή το σχεδιασμό της διαδρομής. Ο σχεδιασμός διαδρομής ενός

UAV είναι η διαδικασία προσδιορισμού μιας εφικτής και βέλτιστης οδού χωρίς σύγκρουση μεταξύ των κόμβων πηγής και προορισμού λαμβάνοντας υπόψη διάφορους περιορισμούς και απαιτήσεις που σχετίζονται με τα UAV και το περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια της ολοκλήρωσης των καθηκόντων, το UAV συναντά γενικά πολλά είδη εμποδίων, είτε στατικά είτε δυναμικά. Και στις δύο περιπτώσεις, η μη αντιμετώπιση αυτών των εμποδίων θα οδηγήσει σε βλάβη. Ως εκ τούτου, η αποφυγή των εμποδίων και των απειλών είναι μια κρίσιμη απαίτηση στον σχεδιασμό της διαδρομής. Στην πραγματικότητα, σε αντίθεση με τα κινούμενα ρομπότ, τα UAV πλοηγούνται σε περιβάλλοντα τριών διαστάσεων. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός της διαδρομής για τα UAV είναι πιο περίπλοκος και πολύπλοκος από τον σχεδιασμό της πορείας στην περίπτωση των περιβαλλόντων δύο διαστάσεων και απαιτεί περισσότερη επεξεργασία. Η πολυπλοκότητα του 3D περιβάλλοντος για UAV βρίσκεται σε επίπεδα πάνω από το έδαφος. Εκτός από τα εμπόδια εδάφους, οποιοδήποτε αντικείμενο που διασταυρώνεται με το UAV μπορεί να είναι μια πηγή απειλής. Τις περισσότερες φορές, το μεγάλο υψόμετρο είναι λιγότερο επικίνδυνο, καθώς τα εμπόδια και οι απειλές μειώνονται, αν και η πτήση σε μεγάλα υψόμετρα απαιτεί περισσότερη ενέργεια για την ανύψωση. Εκτός από τα εμπόδια και το υψόμετρο, τα UAV διατηρούν επίσης τους δικούς τους περιορισμούς που είναι η ανύψωση και οι γωνίες στροφής. Αυτές οι γωνίες σχετίζονται άμεσα με την κίνηση του UAV. Εμφανίζονται όταν απειλείται η ασφάλεια ενός κινούμενου UAV και γίνεται αλλαγή κατεύθυνσης για την αποφυγή ατυχημάτων.

Ο σχεδιασμός της διαδρομής ενός UAV είναι ένα δύσκολο και πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης στη ρομποτική. Είναι γνωστό ότι είναι ένα NP-hard πρόβλημα και απαιτεί αποτελεσματικούς και ευφυείς αλγόριθμους (ευρετικούς και μετα-ευρετικούς) για την επίλυσή του. Για αρκετά χρόνια, οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι επιβεβαίωσαν την ικανότητά τους να λύνουν πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης με αποτελεσματικότητα [296]. Μεταξύ των υφιστάμενων αλγορίθμων, οι ευφυείς αλγόριθμοι σμήνους (swarm intelligence algorithms) χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση του προβλήματος σχεδιασμού διαδρομής των UAV [297]. Σε αυτό το πλαίσιο, οι αλγόριθμοι Swarm Intelligence προσφέρουν υψηλή απόδοση όσον αφορά τη σύγκλιση τους και την ποιότητα της δημιουργούμενης διαδρομής [297].

Ο αλγόριθμος Aquila Optimization (AO) είναι ένας από τους πρόσφατους μετα-ευρετικούς αλγόριθμους σμήνους που εισήχθησαν από τον Abualigah το 2021 [298]. Προσομοιώνει διαφορετικές μεθόδους κυνηγιού του Ακίλα για διαφορετικούς τύπους θηραμάτων. Το ταχέως κινούμενο θήραμα αντικατοπτρίζει την γενική ικανότητα εξερεύνησης του αλγορίθμου, ενώ ο αργά κινούμενος στόχος ερμηνεύει τις τοπικές ικανότητες εκμετάλλευσης. Όπως πολλοί μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι, η λύση του αλγορίθμου Aquila εξαρτάται από τυχαίες παραμέτρους, οι οποίες γεννιούνται βασικά χωρίς καμία συγκεκριμένη κατανομή. Ο αλγόριθμος Aquila διατηρεί μια αποτελεσματική ικανότητα γενικής εξερεύνησης, αλλά κακή τοπική δυνατότητα εκμετάλλευσης. Έτσι, μπορεί εύκολα να πέσει στο τοπικό βέλτιστο. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, προτάθηκαν διάφορες υβριδοποιήσεις. Από την άλλη πλευρά, ο SA είναι ένας από τους δημοφιλείς single-based μετα-ευρετικούς αλγόριθμους που έχει την ικανότητα να ξεφύγει από το τοπικό βέλτιστο. Επιπλέον, διατηρεί καλές ικανότητες εκμετάλλευσης και τοπικές ιδιότητες αναζήτησης.

Με βάση τα πλεονεκτήματα τόσο του αλγορίθμου Aquila όσο και του Simulated Annealing, προτείνεται [287] ένας υβριδικός αλγόριθμος που βασίζεται στον συνδυασμό του χαοτικού Aquila Optimization και του Simulated Annealing, που ονομάζεται CAOSA για την επίλυση του σχεδιασμού της διαδρομής UAV σε ένα σύνθετο περιβάλλον τριών διαστάσεων. Δύο σημαντικές βελτιώσεις εισάγονται στον αρχικό αλγόριθμο Aquila Optimization. Πρώτον, ο Singer map χρησιμοποιείται για την αύξηση της πληθυσμιακής ποικιλομορφίας του Aquila και την αποτελεσματική εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης. Δεύτερον, ο SA χρησιμοποιείται στην τοπική αναζήτηση για να ενισχύσει την

εκμετάλλευση του χαοτικού αλγορίθμου Aquila αναζητώντας στη γειτονιά του την καλύτερη λύση που θα έχει βρεθεί μέχρι κάποια στιγμή. Ο προτεινόμενος CAOSA αξιολογείται σε διάφορα σενάρια κάτω από διαφορετικές ρυθμίσεις σε σύγκριση με άλλους μετα-ευρετικούς αλγόριθμους. Τα αποτελέσματα απέδειξαν την ανωτερότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου CAOSA σε σύγκριση με τους αλγόριθμους τελευταίας τεχνολογίας. Οι κύριες συνεισφορές της παρούσας εργασίας μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

Η διατύπωση του ζητήματος σχεδιασμού της διαδρομής UAV ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους που σχετίζεται με το μήκος διαδρομών, τους άξονες των UAV, την αποφυγή εμποδίων και το υψόμετρο.

Πρόταση ενός νέου υβριδικού αλγορίθμου που ονομάζεται αλγόριθμος Chaotic Aquila Optimization Simulated Annealing (CAOSA) για την εξεύρεση βέλτιστου σχεδιασμού διαδρομής για UAV.

Εφαρμογή του προτεινόμενου CAOSA και εννέα γνωστών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, όπως το Particle Swarm Optimization (PSO), το Simulated Annealing (SA), το Bat Algorithm (BA), το Firefly Algorithm (FA), το Grey Wolf Optimization (GWO), το Sine Cosine Algorithm (SCA), το Whale Optimization Algorithm (WOA), το Dragonfly Algorithm (DA), και το Aquila Optimization (AO).

Αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου CAOSA σε σύγκριση με εννέα γνωστούς αλγόριθμους τελευταίας τεχνολογίας σε τρεις διαφορετικούς χάρτες αναφοράς όσον αφορά την τιμή fitness, το κόστος διαδρομής και τον χρόνο εκτέλεσης.

Πολλοί μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν στη ρουτίνα τους τυχαίες τιμές που πρέπει να προσαρμοστούν. Σε γενικές γραμμές, αυτές οι αυθαίρετες τιμές δημιουργούνται τυχαία χωρίς μια συγκεκριμένη κατανομή. Η κύρια ιδέα είναι να αντικατασταθούν αυτές οι τυχαίες μεταβλητές αρχικοποίησης με χαοτικές συναρτήσεις. Αυτό μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα αναζήτησης και να αυξήσει το ποσοστό σύγκλισης. Επιπλέον, το χάος παρουσιάζει ιδιαίτερα και σημαντικά χαρακτηριστικά όπως η κανονικότητα, η μη περιοδικότητα και η μη προβλεψιμότητα [299]. Αρκετοί χαοτικοί χάρτες είναι διαθέσιμοι στη βιβλιογραφία. Οι δέκα γνωστοί χαοτικοί χάρτες είναι οι Logistic map, Tent map, Sine map, Gauss map, Sinusoidal map, Chebyshev map, Piecewise map, Iterative map, Circle map, και Singer map. [299]. Ο χάρτης Singer είναι μία από τις πιο αντιπροσωπευτικές χαοτικές συναρτήσεις που παράγουν μια πιο ομοιόμορφη αρχική τιμή μεταξύ [0, 1]. Έτσι, οι ερευνητές για αυτήν την εργασία υιοθέτησαν τον χάρτη Singer για να αντικαταστήσουν την τυχαία μεταβλητή που ελέγχει τη θέση του Aquila [287].

Συμπερασματικά σε αυτή την εργασία [287], παρουσιάζεται μια αποτελεσματική λύση για τον σχεδιασμό της διαδρομής ενός UAV σε χώρο τριών διαστάσεων, που συνδυάζει τον CAO με τον SA. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο CAOSA, ο χαοτικός χάρτης singer προστίθεται στον αλγόριθμο AO. Για την ενίσχυση της εκμετάλλευσης του αλγορίθμου CAO, ο SA εφαρμόζεται ως τοπικός φορέας αναζήτησης. Μια συνάρτηση κόστους μοντελοποιείται λαμβάνοντας υπόψη το μήκος μονοπατιού, τους άξονες του UAV, την αποφυγή εμποδίων και το υψόμετρο. Αξιολογείται ο αλγόριθμος CAOSA χρησιμοποιώντας τρία σενάρια αναφοράς και συγκρίνεται η απόδοσή του με εννέα γνωστούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης όπως SA, PSO, BA, FA, GWO, SCA, WOA, DA και AO με βάση την ποιότητα της λύσης (τιμή fitness), το κόστος διαδρομής και τον χρόνο εκτέλεσης. Αποδεικνύεται ότι ο αλγόριθμος CAOSA είναι σε θέση να βρει μια βέλτιστη διαδρομή μεταξύ της πηγής και του προορισμού, επιτυγχάνοντας σημαντική βελτίωση έως και 36% και 19% για την τιμή fitness και το κόστος διαδρομής, αντίστοιχα. Υπάρχουν αρκετά ζητήματα σχετικά με το σχεδιασμό των διαδρομών ενός UAV σε τρισδιάστατους χώρους που πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω. Είναι δυνατόν να

επεκταθεί η τρέχουσα έρευνα με διάφορους τρόπους. Ο σχεδιασμός διαδρομής ενός UAV μπορεί να αντιμετωπιστεί σε πιο σύνθετα περιβάλλοντα προσθέτοντας δυναμικά εμπόδια και απειλές. Τελικά, μπορεί να συντονιστεί ο σχεδιασμός πολλαπλών διαδρομών των UAV. Το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας του UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης είναι επίσης ένα ενδιαφέρον και δύσκολο σημείο.

5.3.8 Χαοτικός αλγόριθμος με βάση τη βιογεωγραφία (BBO)

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης με βάση τη βιογεωγραφία (BBO) είναι ένας καινοτόμος εξελικτικός αλγόριθμος εμπνευσμένος από τη βιογεωγραφία. Ομοίως με άλλους εξελικτικούς αλγόριθμους, η παγίδευση στο τοπικό βέλτιστο και η αργή ταχύτητα σύγκλισης είναι δύο πιθανά προβλήματα που συναντά στην επίλυση προκλητικών πραγματικών προβλημάτων. Λόγω της καινοτομίας αυτού του αλγορίθμου, ωστόσο, υπάρχουν λίγα στη βιβλιογραφία σχετικά με την επίλυση αυτών των δύο προβλημάτων. Οι χαοτικοί χάρτες είναι μία από τις καλύτερες μεθόδους για τη βελτίωση της απόδοσης των εξελικτικών αλγορίθμων όσον αφορά τόσο την αποφυγή του τοπικού βέλτιστου όσο και την ταχύτητα σύγκλισης. Σε αυτή τη μελέτη [299], χρησιμοποιήθηκαν δέκα χαοτικοί χάρτες για να βελτιωθεί η απόδοση του αλγορίθμου BBO. Οι χαοτικοί χάρτες χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις πιθανότητες επιλογής, μετανάστευσης και μετάλλαξης. Οι προτεινόμενοι χαοτικοί αλγόριθμοι BBO αξιολογούνται συγκρινόμενοι με δέκα δοκιμαστικές συναρτήσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι χαοτικοί χάρτες (ειδικά ο χάρτης Gauss / mouse map) είναι σε θέση να ενισχύσουν σημαντικά την απόδοση του BBO. Επιπλέον, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο συνδυασμός της χαοτικής επιλογής και της μετανάστευσης έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη απόδοση.

Μία από τις μεθόδους βελτίωσης της απόδοσης του εξελικτικού αλγορίθμου (EA) είναι η χρήση της θεωρίας του χάους. Το 2013, ο Saremi κ.α. ενσωμάτωσαν τρεις χαοτικούς χάρτες με τον BBO και τον σύγκριναν με τέσσερις δοκιμαστικές συναρτήσεις [300]. Έδειξαν ότι οι χαοτικοί χάρτες μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του BBO. Ωστόσο, ενσωμάτωσαν μόνο χαοτικούς χάρτες με μερικά από τα συστατικά του αλγορίθμου BBO. Στην παραπάνω εργασία τους [299], οι ερευνητές ενσωμάτωσαν δέκα χαοτικούς χάρτες σε αυτόν τον αλγόριθμο προκειμένου να διερευνηθεί εκτενώς η αποτελεσματικότητα της θεωρίας του χάους για τη βελτίωση της εξερεύνησης και/ή της εκμετάλλευσης του αλγορίθμου BBO. Το κύριο κίνητρο για να χρησιμοποιηθούν χαοτικοί χάρτες για τον καθορισμό της πιθανότητας μετανάστευσης είναι η βελτίωση του σταδίου εξερεύνησης του BBO. Αντίθετα, οι χειριστές χαοτικών μεταλλάξεων έχουν σχεδιαστεί για να προωθήσουν το στάδιο της εκμετάλλευσης του αλγορίθμου BBO.

5.3.9 Χαοτικός αλγόριθμος OLTC-MFO

Η εργασία [301] εισάγει έναν βελτιωμένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης Moth-Flame που ονομάζεται Opposition-Based Learning και Cauchy Mutation Moth-Flame Optimization (OLTC-MFO), σχεδιασμένο για έξυπνο σχεδιασμό διαδρομής από σημείο σε σημείο για UAVs. Ενώ ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Moth-Flame (MFO) δείχνει πολλά υποσχόμενος στον τομέα της έξυπνης βελτίωσης για τον σχεδιασμό διαδρομών, αγωνίζεται να χειριστεί τις πραγματικές διαταραχές, οι οποίες μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ακρίβεια της προκύπτουσας διαδρομής. Στο τοπίο της βελτιστοποίησης, οι τεχνικές χαοτικής χαρτογράφησης έχουν γίνει όλο και πιο δημοφιλείς σε ευφυείς αλγόριθμους, λόγω των μοναδικών τους χαρακτηριστικών, όπως η εργοδυναμία, η τυχαιότητα και η μη γραμμικότητα. Η εργασία χρησιμοποίησε δύο γνωστές παραλλαγές των χαοτικών χαρτών, και συγκεκριμένα, τον Logistic map και τον Tent map. Ο πρώτος υπερέρχει στην καθολική εργοδυναμία, αλλά δεν ανταποκρίνεται στις τοπικές αναζητήσεις, ενώ ο τελευταίος αντισταθμίζει αυτούς τους περιορισμούς με τις ισχυρές δυνατότητές του διαταραχής. Το έγγραφο προτείνει μια συγχώνευση αυτών των χαρτών, που ονομάζεται Logistic-Tent Chaos Mapping (LT), για να ενισχύσει τις καθολικές δυνατότητες αναζήτησης του αλγορίθμου MFO αξιοποιώντας τις δυνατότητες των Logistic map και

Tent map στη δημιουργία διαταραχών που οδηγούνται από το χάος στη θέση της φλόγας. Επίσης, ενσωματώνει έναν χειριστή μετάλλαξης Cauchy και έναν φορέα πιθανότητας για να διαταράξει τη βέλτιστη θέση της φλόγας. Αυτές οι τροποποιήσεις επιτρέπουν στον αλγόριθμο να αποδεχθεί την τρέχουσα βέλτιστη λύση με μια ορισμένη πιθανότητα, ενώ παράλληλα παρέχει έναν μηχανισμό για να ξεφύγει από το τοπικό βέλτιστο.

5.3.10 Χαοτικός γενετικός αλγόριθμος με Logistic map

Η αναφορά [12] χρησιμοποίησε ένα γενετικό αλγόριθμο (GA) για να βρει μια βέλτιστη διαδρομή για την αποστολή αγαθών από μια αποθήκη σε έναν πελάτη αποφεύγοντας ταυτόχρονα στατικά εμπόδια στο περιβάλλον. Η βέλτιστη διαδρομή σε αυτή την εργασία υπολογίζεται με την εξεύρεση της μικρότερης απόστασης μεταξύ της ακολουθίας των σημείων ενός αφηρημένου 3D μοντέλου του περιβάλλοντος. Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη θεωρία της γενετικής και της εξέλιξης για να βρει βέλτιστες λύσεις στον σχεδιασμό της διαδρομής, διαφοροποιώντας και διορθώνοντας τις καλύτερες διαδρομές από μια συλλογή υποψηφίων διαδρομών. Ωστόσο, όταν ο GA εφαρμόζεται σε μη γραμμικά συστήματα, ο αλγόριθμος παρουσιάζει διάφορες ελλείψεις, όπως η έλλειψη εγγύησης καθολικής σύγκλισης. Ένα χαοτικό δυναμικό σύστημα, ένας Logistic map στην [12], συνδυάζεται με τον GA επειδή η εργοδική του τάση βοηθά τον GA να αποφύγει την αναζήτηση διαδρομής από την έλξη προς τις τοπικά βέλτιστες διαδρομές και όχι την αληθινή καθολική βέλτιστη διαδρομή. Ο βελτιωμένος χαοτικός GA έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικός σε μεγάλα περιβάλλοντα που απαιτούν τόσο μια καθολική όσο και μια τοπική αναζήτηση.

5.3.11 Χαοτικό νευρωνικό μοντέλο

Ένα άλλο παράδειγμα χρήσης του χάους για να βρεθεί μια διαδρομή χωρίς εμπόδια μεταξύ δύο σημείων είναι η [302] που εισήγαγε μια εξίσωση σχεδιασμού διαδρομής. Αυτή η διαφορική εξίσωση συνεχούς χρόνου χρησιμοποιεί το χάος και την εικονική μέθοδο δύναμης πεδίου (VFF) για να βρει μια διαδρομή χωρίς σύγκρουση, ενώ εξετάζει τη δυναμική του ρομπότ,

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + d_1 \sin \omega t \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + d_2 \begin{bmatrix} \dot{x}^3 \\ \dot{y}^3 \end{bmatrix} = F_t + F_a + F_r \quad (5.1)$$

όπου m είναι η μάζα, d_1 και d_2 είναι παράμετροι που επηρεάζουν το μέγιστο μέγεθος των σημείων ισορροπίας που ποικίλλουν στο χρόνο, το F_t είναι η συνολική εικονική δύναμη, το F_a είναι μια εικονική ελκτική δύναμη και το F_r είναι η προκύπτουσα απωθητική δύναμη όλων των εικονικών απωθητικών δυνάμεων στο κυκλικό ενεργό παράθυρο. Η ελκυστική δύναμη τραβάει το ρομπότ προς το στόχο, ενώ η απωθητική δύναμη το τραβά μακριά από τα εμπόδια και τα όρια στο περιβάλλον. Αυτή η δύναμη μπορεί να γίνει μηδενική και να παραμείνει μηδέν εάν το ρομπότ είναι παγιδευμένο στα τοπικά ελάχιστα. Αυτό οδηγεί σε μηδενική ταχύτητα για το ρομπότ και το εμποδίζει από το να φτάσει στη θέση του στόχου. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, μια μη γραμμική τριβή, το δεύτερο και το τρίτο συστατικό στη δεξιά πλευρά της (5.1), εισάγεται σε ένα χαοτικό νευρώνα. Η προκύπτουσα αστάθεια στο σημείο ισορροπίας της μηδενικής ταχύτητας επιτρέπει στο ρομπότ να ξεφύγει από τα τοπικά ελάχιστα και να συνεχίσει το μονοπάτι του προς το στόχο.

5.4 Επίλογος

Αρκετά άλλα παραδείγματα χαοτικών δυναμικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση υφιστάμενων αλγορίθμων εύρεσης συντομότερης διαδρομής είναι διαδεδομένα στη βιβλιογραφία: 1) τεχνητό δυναμικό πεδίο βελτιστοποιημένο με χάος [303] 2) χαοτική βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων [304-306] 3) χαοτική βελτιστοποίηση τεχνητής αποικίας μελισσών [307] και 4)

χαοτικές μέθοδοι αναζήτησης κούκου [302]. Αυτά τα τροποποιημένα δυναμικά συστήματα χρησιμοποιούν στρατηγικές ελέγχου της κίνησής τους, που βασίζονται στα χαοτικά συστήματα και παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 6^ο: Αντιμετώπιση προβλημάτων – Στρατηγικές ελέγχου κίνησης

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται κάποια συνήθη προβλήματα που συναντάει κατά την κίνησή του ένα αυτόνομο κινούμενο ρομπότ που κάνει χρήση χαοτικών αλγορίθμων και τρόποι που έχουν προταθεί από ερευνητές για την αντιμετώπισή τους. Αρχικά παρουσιάζονται τα χαοτικά συστήματα που απαντώνται πιο συχνά στην βιβλιογραφία, τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την χρήση τους και χειρισμοί για την αντιμετώπισή τους.

6.2 Κλασικά χαοτικά συστήματα

Σε πολλές εργασίες οι ερευνητές δείχνουν ενδιαφέρον για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, αυτό της εξερεύνησης κάποιου συγκεκριμένου εδαφικού χώρου για λόγους είτε παρακολούθησης είτε καθαρισμού του. Τα κύρια χαρακτηριστικά εδώ είναι η απαίτηση για γρήγορη σάρωση όλου του χώρου εργασίας από το ρομπότ και το γεγονός ότι δεν μπορεί να προβλεφθεί η τροχιά κίνησης. Μέχρι στιγμής δεν έχει βρεθεί ένας γενικός αλγόριθμος, ο οποίος θα χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Άλλες, για παράδειγμα, είναι οι απαιτήσεις στην περίπτωση όπου χρειάζεται να εντοπίσει εκρηκτικά ένα ρομπότ, όπου εκεί πρέπει να ακολουθήσει μία τροχιά που θα καλύψει όλο τον χώρο και τελείως διαφορετικές σε μία περίπτωση όπου χρησιμοποιείται για στρατιωτικούς σκοπούς και πρέπει να διεισδύσει στην περιοχή του αντιπάλου, όπου εδώ πρέπει να ακολουθήσει μία όσο το δυνατόν πιο απρόβλεπτη διαδρομή, ώστε να μην γίνει αντιληπτή η κίνησή του από τον εχθρό. Για τον καθαρισμό πατωμάτων ο σχεδιασμός της διαδρομής που θα ακολουθήσει το ρομπότ μπορεί να γίνει πολύ πιο απαιτητικός όταν ο χώρος στον οποίο θα κινηθεί είναι άγνωστος. Μια ενδιαφέρουσα λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι μια κίνηση που δεν είναι σχεδιασμένη από πριν.

Τα χαοτικά συστήματα χάρη στην ευαισθησία τους στις αρχικές συνθήκες, της λειτουργικότητάς τους (functionality) και της τοπολογικής τους μεταβατικότητας (topological transitivity) παρέχουν το απαραίτητο πλαίσιο για να επιτευχθούν οι παραπάνω εργασίες. Χάρη στην τοπολογική μεταβατικότητα, το χαοτικά κινούμενο ρομπότ μπορεί να αναλύσει όλο τον συνδεδεμένο χώρο εργασίας. Η ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες θα δώσει μία τελείως διαφορετική χαοτική διαδρομή και θα κάνει τις μακροπρόθεσμες προβλέψεις αδύνατες. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα έρχεται με τον σχεδιασμό ελεγκτών που εξασφαλίζουν τη χαοτική κίνηση του κινούμενου ρομπότ. Πολλά χαοτικά δυναμικά συστήματα στη βιβλιογραφία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν χαοτική κίνηση για το ρομπότ όπως ο ελκυστής Lorenz [308], το χαοτικό σύστημα Rossler [309], το σύστημα Arneodo [310] και άλλα δυναμικά χαοτικά συστήματα που έχουν ανακαλυφθεί τα τελευταία χρόνια, όπως τα συστήματα Sundarapandian [311] και Vaidyanathan [312]. Το βασικό πρόβλημα τώρα είναι ο τρόπος με τον οποίο θα μεταδοθεί η χαοτική συμπεριφορά στην κίνηση ενός αυτόνομα κινούμενου ρομπότ και πώς θα εξασφαλιστεί η μεγαλύτερη δυνατή κάλυψη της περιοχής. Οι Nakamura και Sekiguchi προσπάθησαν να λύσουν αυτό το πρόβλημα βασισμένοι σε χαοτικά συστήματα [122], [252]. Στην εργασία τους πρότειναν την ενσωμάτωση ανάμεσα στο χαοτικό υποσύστημα Arnold και στο υποσύστημα της κίνησης του ρομπότ, έτσι ώστε ένα δυναμικό σύστημα που ένωνε τις εξισώσεις των δύο υποσυστημάτων χρησιμοποιήθηκε για να μεταδώσει τη χαοτική συμπεριφορά στο ρομπότ, όπου οι μεταβλητές ελέγχου του ρομπότ ήταν συναρτήσεις των μεταβλητών του συστήματος Arnold. Οι Martins- Filho και Macao πρότειναν έναν μηχανισμό σχεδίασης τροχιάς όπου η σειρά των θέσεων αποκτήθηκε κάνοντας χρήση του διάσημου Chirikov-Taylor standard map [313]. Το πρόβλημα αυτού του τύπου χαοτικών συστημάτων είναι η πυκνότητα αυτών των τροχιών που εμφανίζονται στην διαδρομή του ρομπότ, που γεννά μια απώλεια ενέργειας και χρόνου.

Λύσεις που προτείνονται περιέχουν οριοθετημένες στρατηγικές που κάνουν μίξη αλγορίθμων και χαοτικών συστημάτων. Μία αντιπροσωπευτική περίπτωση περιλαμβάνει τη χρήση ενός νέου συστήματος, του συστήματος multi-scroll Chua, σε συνδυασμό με μία οριοθετημένη στρατηγική που θα μπορούσε να περιορίσει όλες τις θέσεις του ρομπότ μέσα στον χώρο εργασίας μέσω μιας mirror mapping μεθόδου ικανής να επαναφέρει το ρομπότ στα σημεία υπερχειλίσης. Αυτή η στρατηγική, που προστίθεται στα οριοθετημένα σημεία, χρησιμοποιείται με σκοπό να αυξηθεί η κάλυψη της περιοχής κατά την κίνηση του ρομπότ και επειδή μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τη μη οριοθετημένη κλασική μέθοδο. Συγκρινόμενο με άλλα συστήματα, το σύστημα multi-scroll Chua έχει μια σχετικά απλή δομή καθώς και καλά χαοτικά χαρακτηριστικά, πράγμα το οποίο **μπορεί να επιφέρει πληρέστερη κάλυψη για έναν συγκεκριμένο και μεγαλύτερο χώρο εργασίας**. Σε αυτή την εργασία [160] το σύστημα χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση μιας χαοτικής διαδρομής για να εξασφαλιστεί η κάλυψη της περιοχής σε ειδικές αποστολές και για να επιλυθούν τα προαναφερόμενα προβλήματα.

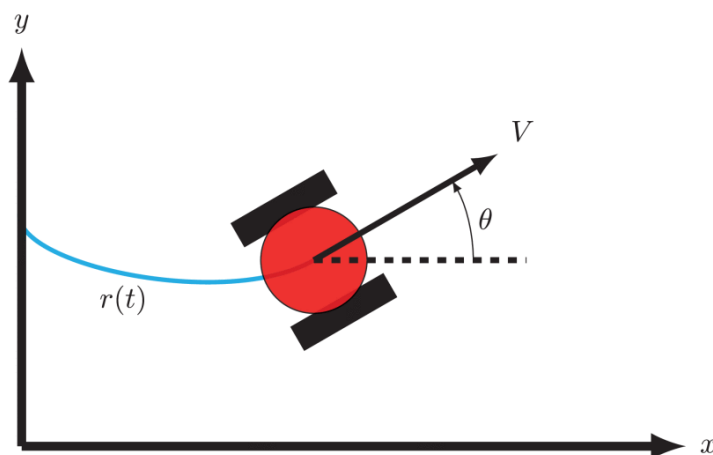
Από την άλλη μεριά, έως τώρα δεν έχει χρησιμοποιηθεί το σύστημα Chua σαν γεννήτρια χαοτικού path planning. Το πρόβλημα είναι στον καθορισμό του νόμου ελέγχου, που βοηθάει να εξασφαλιστεί η commendability του συστήματος. Μια διαδεδομένη ιδέα ανάμεσα στους ερευνητές είναι ο έλεγχος με differential flatness, που έχει χρησιμοποιηθεί και για κινούμενα ρομπότ. Το differential flatness είναι γνωστό ότι ταιριάζει στην επίλυση του προβλήματος της δημιουργίας και ελέγχου μιας τροχιάς. Έτσι, εδώ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ελέγχου επιπεδότητας για να σχεδιαστεί η τροχιά που θα καλύψει όλο τον χώρο εργασίας και θα εξασφαλίσει ότι το ρομπότ θα την ακολουθήσει.

Σε σύγκριση με τα κλασικά ή double-scroll χαοτικά συστήματα, ένα multi-scroll δυναμικό χαοτικό σύστημα έχει πιο πολύπλοκες δυναμικές δομές και ιδιότητες [314]. Συνεπώς, η δημιουργία multi-scroll χαοτικών συστημάτων [315] για την ικανοποίηση της ανάγκης εφαρμογών, όπως οι ασφαλείς επικοινωνίες, τα συστήματα ελέγχου, η συγχρονική πρόβλεψη [316] και οι ρομποτικές εφαρμογές, είναι από καιρό ένας ενεργός τομέας έρευνας. Με αυτόν τον τρόπο, προκειμένου να δημιουργηθεί ένας πιο περίπλοκος αριθμός scroll, δίνεται βάση σε ένα νέο χαοτικό σύστημα multi-scroll εμπνευσμένο από το σύστημα Chua με ένα μεταβλητό αριθμό scroll [317].

Σε τέτοιου είδους προσεγγίσεις δίνεται μία βελτιωμένη λύση βασισμένη σε χαοτικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση της κάλυψης του σχεδιασμού του μονοπατιού για ένα κινούμενο ρομπότ. Ένα καινούριο multi-scroll χαοτικό σύστημα Chua που προστέθηκε στη στρατηγική περιορισμού των ορίων χρησιμοποιήθηκε για να **βελτιώσει την κάλυψη για τον σχεδιασμό της διαδρομής του ρομπότ**. Αυτό το σύστημα έδωσε **καλύτερα αποτελέσματα και πληρέστερη κάλυψη** του καθορισμένου χώρου εργασίας συγκρινόμενο με το double-scroll χαοτικό σύστημα. Επιπρόσθετα, το δεύτερο ζητούμενο της απόδοσης της προτεινόμενης κάλυψης, που είναι η υλοποίηση της κάλυψης της χαοτικής διαδρομής κάνοντας χρήση του νόμου ελέγχου της επιπεδότητας, μελετήθηκε παρέχοντας πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτά τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την εφαρμοσιμότητα των χαοτικών συστημάτων σε στρατηγικές ελέγχου κινούμενων ρομπότ. Στην πραγματικότητα, η χρήση ρομπότ θα ήταν εφικτή σε διάφορες πολιτικές και στρατιωτικές εργασίες, όπως εξερεύνηση πεδίου για αναζήτηση εκρηκτικών, επιτήρηση πεδίων, αποστολές εξερεύνησης και διάσωσης, συσκευές καθαρισμού πατώματος κ.τ.λ. Αυτή η μελέτη αποδεικνύει ότι η εφαρμογή των συμπεριφορών των μη γραμμικών χαοτικών συστημάτων στις λύσεις για προβλήματα ελέγχου της διαδρομής του ρομπότ αντιπροσωπεύει μία πολύ ενδιαφέρουσα διεπιστημονική διεπαφή για πολλούς ερευνητές τόσο του τομέα της ρομποτικής, όσο και κάθε σχετικού επιστημονικού τομέα. Αυτό ανοίγει ενδιαφέρουσες προοπτικές για μελλοντική ερευνητική εργασία συμπεριλαμβανομένων και των πειραματικών υλοποιήσεων.

Σε αυτό το τμήμα, προτείνεται η επίλυση του προβλήματος κάλυψης του χώρου εργασίας με βάση τα χαοτικά συστήματα και τη στρατηγική *mirror mapping*. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους σχεδιασμού διαδρομών κάλυψης [199], [318], ο χαοτικός σχεδιασμός διαδρομής με τη μέθοδο *mirror mapping* δεν απαιτεί χάρτη του εδάφους και είναι πιο αποτελεσματικός από τον αλγόριθμο τυχαίας βάδισης (*random walk*). Με διάφορες δυναμικές χαοτικές εξισώσεις, ένα ρομπότ μπορεί να επιδείξει μια σειρά από μονοπάτια κίνησης. Οι χαοτικές τροχιές δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές κατάστασης των δυναμικών συστημάτων, οι οποίες ενσωματώνονται στο δυναμικό μοντέλο του ρομπότ.

Από τις πρώτες εφαρμογές των χαοτικών δυναμικών συστημάτων στις εργασίες σχεδιασμού διαδρομών, έχουν διερευνηθεί αρκετά δυναμικά συστήματα με χαοτικές συμπεριφορές. Μερικά από αυτά τα συστήματα, όπως θα διερευνηθεί σε αυτή την ενότητα, εμφανίζουν χαοτικές ιδιότητες αποκλειστικά κάτω από ένα συγκεκριμένο υποσύνολο παραμέτρων. Αυτά τα συστήματα δοκιμάζονται για χάος χρησιμοποιώντας διαγράμματα διχοτόμησης ή το μέγιστο εκθέτη Lyapunov του συστήματος (MLE). Το διάγραμμα διχοτόμησης παρουσιάζει τις ποιοτικές αλλαγές στη δυναμική του συστήματος καθώς οι παράμετροι ποικίλλουν [319] ενώ το MLE μετρά την ευαισθησία του δυναμικού συστήματος στις αρχικές συνθήκες. Ένα δυναμικό σύστημα θεωρείται χαοτικό εάν εμπίπτει στις χαοτικές περιοχές του διαστήματος παραμέτρων στα διαγράμματα διχοτόμησης ή εάν το MLE του συστήματος είναι θετικό [7]. Μόλις επιλεγεί ένα δυναμικό σύστημα με τις κατάλληλες παραμέτρους, αυτό το χαοτικό δυναμικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει χάος είτε στη συμπεριφορά του ελεγκτή του ρομπότ είτε στην τροχιά του ρομπότ μέσα στο περιβάλλον. Το πρότυπο κινούμενο ρομπότ που χρησιμοποιείται για προσομοίωση στις περισσότερες προηγούμενες μελέτες είναι ένα κινούμενο ρομπότ με διαφορική κίνηση δύο τροχών. Ενώ αυτή η επιλογή πλατφόρμας συχνά περιορίζει το περιβάλλον σε δύο διαστάσεις, έχουν υπάρξει μελέτες που αφορούν την εφαρμογή χαοτικών δυναμικών συστημάτων σε τρισδιάστατα περιβάλλοντα [320]. Το σχήμα 6.1 απεικονίζει ένα τέτοιο ρομπότ διαφορικής κίνησης δύο τροχών που αποτελείται από δύο ενεργούς σταθερούς τροχούς και ένα παθητικό. Η κινηματική του ρομπότ με δύο τροχούς υπόκειται σε έναν μη ολονομικό περιορισμό που εμποδίζει την εγκάρσια κίνηση. Για να προκαλέσει άμεσα χάος στη δυναμική του επιλεγμένου ρομπότ, μία ή περισσότερες συντεταγμένες του δυναμικού συστήματος χρησιμοποιούνται συχνά για να διαταράξουν ή να ελέγξουν τον προσανατολισμό της ταχύτητας του ρομπότ. Το αποτέλεσμα είναι ότι το ρομπότ οδηγείται σε μια απρόβλεπτη κίνηση, διασχίζοντας τον περιβάλλοντα χώρο.



Σχήμα 6.1: Το πρότυπο κινούμενο ρομπότ δύο τροχών που ταξιδεύει σε ένα επίπεδο κατά μήκος μιας διαδρομής $r(t)$ με ταχύτητα οχήματος V και κλίση ταχύτητας θ [316].

Τα χαοτικά συστήματα που μελετώνται συνήθως για χρήση στο CPP που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν: 1) το σύστημα Arnold [321] 2) το σύστημα Lorenz [322] 3) το σύστημα Chen και Ueta [124], [323] και το σύστημα Chen και Lü [324] 4) το ηλεκτρικό κύκλωμα του Chua [325-326] και 5) το Logistic map [7]. Μια πρόσφατη μελέτη [327] πρότεινε επίσης ένα νέο χαοτικό σύστημα, αν και η εργασία επικεντρώθηκε περισσότερο στην περιγραφή δυναμικών ιδιοτήτων αυτού του συστήματος παρά στην απόδοση CPP. Στις παρακάτω ενότητες, θα περιγράψουμε τα προαναφερθέντα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα χαοτικά συστήματα δίνοντας τις εξισώσεις που διέπουν τα δυναμικά συστήματα, μερικές παραμέτρους που παράγουν χαοτικές συμπεριφορές και στο επόμενο κεφάλαιο μια σύγκριση μεταξύ μερικών από τα συστήματα. Σε όλη την ενότητα, θα υπάρχουν διάφορα διαγράμματα ελκυστών όπου το σύστημα προσομοιώνεται με μια αριθμητική μέθοδο από μια αρχική κατάσταση για να δημιουργηθούν σημεία της τροχιάς με το τελικό σημείο που σημειώνεται στο διάγραμμα.

6.2.1 Σύστημα Arnold

Μία από τις πιο ερευνημένες και δοκιμασμένες χαοτικές εξισώσεις, το σύστημα Arnold είναι ένα μη γραμμικό συνεχές δυναμικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην [122] για να πραγματοποιήσει χαοτικό σχεδιασμό διαδρομής. Κατά συνέπεια, η [122] ανέπτυξε μια μέθοδο χορήγησης επιθυμητής χαοτικής κίνησης στον ελεγκτή ενός κινούμενου ρομπότ χρησιμοποιώντας απευθείας μία από τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος Arnold ως ρυθμό στροφής γωνίας κατεύθυνσης. Το σύστημα Arnold ορίζεται με τις παραμέτρους A, B, και C που είναι σταθερές στο (6.1).

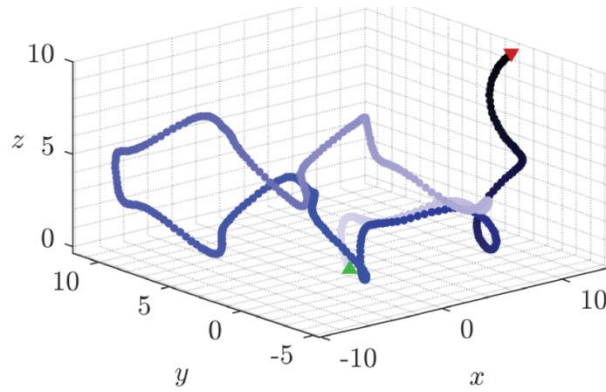
$$\begin{cases} \dot{x} = A \sin z + C \cos y \\ \dot{y} = B \sin x + A \cos z \\ \dot{z} = C \sin y + B \cos x \end{cases} \quad (6.1)$$

Η τελεία στο (6.1), καθώς και στις ακόλουθες εξισώσεις, υποδηλώνει τη διαφορικότητα των καταστάσεων x, y, και z σε σχέση με το χρόνο. Η εξίσωση Arnold περιγράφει μια σταθερή λύση σε 3D Euler συναρτήσεις (6.2) και (6.3) που εκφράζουν τη συμπεριφορά των μη συμπιεστικών τέλειων υγρών σε ένα 3D χώρο τόρου:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i \quad (6.2)$$

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6.3)$$

όπου x_i και u_i υποδηλώνουν τη θέση και ταχύτητα των συστατικών ενός σωματιδίου, p , f_i και ρ δηλώνουν την πίεση, την εξωτερική δύναμη και την πυκνότητα, αντίστοιχα. Έχει παρατηρηθεί στη βιβλιογραφία ότι το σύστημα Arnold εμφανίζει περιοδική συμπεριφορά όταν η C ή οποιοσδήποτε άλλες σταθερές τείνουν προς το 0 και εμφανίζει χαοτική συμπεριφορά όταν η C είναι μεγάλη. Ένα παράδειγμα χαοτικής τροχιάς του συστήματος Arnold παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2. Εκτός από την [122], άλλες μελέτες έχουν επίσης χρησιμοποιήσει το σύστημα Arnold για το σχεδιασμό διαδρομών σε 2D [328-329] και 3D [320], [329] περιβάλλοντα.



Σχήμα 6.2: Χαοτική Arnold 3D ροή χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους $A = 1$, $B = 0.5$ και $C = 0.5$. [316]

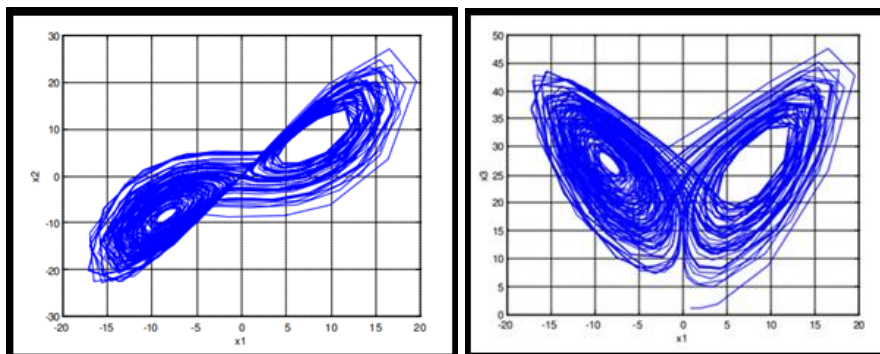
6.2.2 Δυναμικό σύστημα Lorenz

Το δυναμικό σύστημα Lorenz είναι το μαθηματικό μοντέλο ενός θερμοδυναμικού συστήματος [2]. Αποτελείται από τρεις μη γραμμικές συνηθισμένες διαφορικές εξισώσεις που εξαρτώνται από τρεις θετικές πραγματικές παραμέτρους, και μοντελοποιεί ένα πρόβλημα ατμοσφαιρικής ρευστότητας, όπου ένα επίπεδο στρώμα ρέει καθώς θερμαίνεται από κάτω και ψύχεται από πάνω. Ένα τέτοιο σύστημα θεωρείται ως ο πρώτος κανονικός χαοτικός ελκυστής σε ένα απλό τρισδιάστατο αυτόνομο σύστημα, το οποίο επιβεβαιώθηκε μαθηματικά ότι υπάρχει. Το σύστημα Lorenz μπορεί να περιγραφεί όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = c_1[x_2(t) - x_1(t)] \\ \dot{x}_2(t) = [c_2 - x_3(t)]x_1(t) - x_2(t) \\ \dot{x}_3(t) = x_1(t)x_2(t) - c_3x_3(t) \end{cases} \quad (6.4)$$

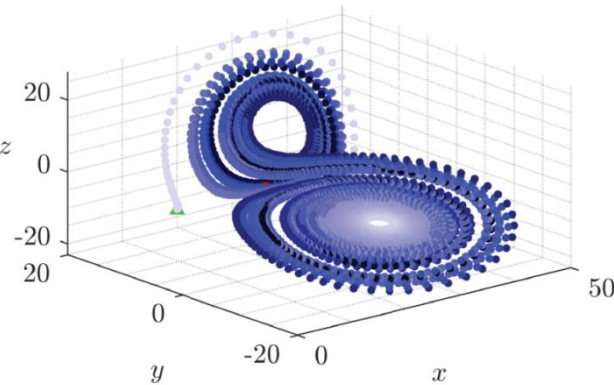
όπου x_1 , x_2 και x_3 είναι οι μεταβλητές κατάστασης και c_1 , c_2 και c_3 είναι θετικές σταθερές που λειτουργούν ως παράμετροι της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Για να αναλυθεί η τυπική δυναμική του συστήματος, γίνεται αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς του ξεκινώντας από ένα σημείο κοντά στην αρχή του τρισδιάστατου καρτεσιανού χώρου, χρησιμοποιώντας τις κλασικές τιμές για τις παραμέτρους, $c_1=10$, $c_2=28$ και $c_3=8/3$, τιμές που επιλέχθηκαν με βάση τις προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων. Στο σχήμα 6.3 μπορούν να φανούν οι φάσεις x_1x_2 και x_1x_3 , αντίστοιχα. Η χαοτική συμπεριφορά απεικονίζεται εδώ με σαφήνεια, και η παρουσία δύο παράξενων ελκυστών μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί [2], [260].



Σχήμα 6.3: Αριστερά: Φάση x_1x_2 του συστήματος Lorenz. Δεξιά: Φάση x_1x_3 του συστήματος Lorenz [260]

Οι εξισώσεις περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός δισδιάστατου υγρού στρώματος, που υπόκειται σε ομοιόμορφη θέρμανση από κάτω και ψύξη από πάνω. Λεπτομερώς περιγράφουν την χρονική εξέλιξη τριών διαφορετικών ιδιοτήτων: το x αντιστοιχεί στην ταχύτητα σύγκλισης, το y αντιπροσωπεύει την οριζόντια διακύμανση της θερμοκρασίας και το z σχετίζεται με την κάθετη μεταβολή της. Οι σταθερές c_1 , c_2 , και c_3 είναι παράμετροι του συστήματος που είναι ανάλογες με τον αριθμό Prandtl, τον αριθμό Rayleigh και συγκεκριμένες φυσικές διαστάσεις του στρώματος. Όπως παρατηρείται στο σχήμα 6.4, ο Lorenz παρουσιάζει double-scroll ελκυστές. Ο Edward Lorenz συνειδητοποίησε ότι για $c_1=10$, $c_3=8/3$, το σύστημα συμπεριφέρεται χαοτικά όποτε ο αριθμός Rayleigh c_2 υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή του 24.74, πράγμα που σημαίνει ότι σχεδόν όλες οι λύσεις φαίνεται να είναι ευαίσθητες στις αρχικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό, οι μελέτες [176], [330] ενδιαφέρονται για τη χρήση του συστήματος Lorenz για τον χαοτικό σχεδιασμό της διαδρομής, δεδομένης της πλειάδας παραμέτρων που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του σχήματος 6.4. Για τις τιμές παραμέτρων $c_2 < 1$, όλες οι λύσεις του συστήματος θα προσεγγίσουν το σημείο ισορροπίας που βρίσκεται στην αρχή των αξόνων. Ωστόσο, καθώς το c_2 αυξάνεται σταδιακά μέσω του 1, η ιδιοτιμή που βρίσκεται στην αρχή των αξόνων γίνεται θετική, προκαλώντας την αρχή των αξόνων να μετατραπεί σε μια σέλα με μια σταθερή επιφάνεια που εκτείνεται σε δύο διαστάσεις και μια ασταθή καμπύλη. Όταν $c_2=1$, δύο ισορροπίες γεννιούνται και αποκλίνουν από την αρχή των αξόνων καθώς αυξάνεται το c_2 . Όταν $c_2 > 1$, δεν συγκλίνουν όλες οι λύσεις προς την αρχή των αξόνων. Ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί ότι αυτές οι αρχικές λύσεις, οι οποίες βρίσκονται σε σημαντική απόσταση από την αρχή των αξόνων, σταδιακά βρίσκονται πιο κοντά σε αυτή με την πάροδο του χρόνου [331].



Σχήμα 6.4: Lorenz ελκυστής που εμφανίζει χαοτικές συμπεριφορές κάτω από τις παραμέτρους $c_1=10$, $c_2=28$, $c_3=8/3$ [330].

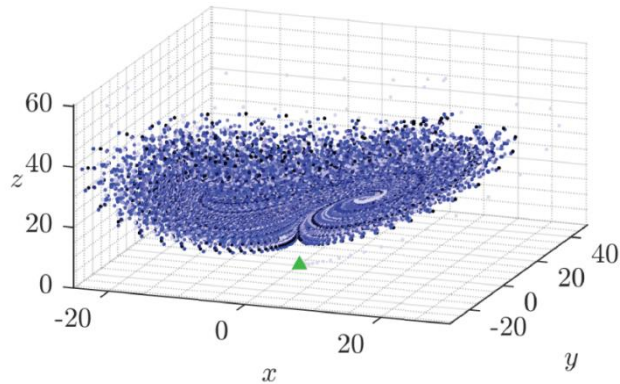
6.2.3 Συστήματα Chen

Το σύστημα Chen, το οποίο είναι ένα άλλο μη γραμμικό συνεχές δυναμικό σύστημα πρώτης τάξης, έχει δύο παραλλαγές που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία του CPP: τα Chen και Ueta [323] και Chen και Lü [324] συστήματα που εκφράζονται από τις (6.5) και (6.6), αντίστοιχα.

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha(-x + y) \\ \dot{y} = (c - \alpha)x - xz - cy \\ \dot{z} = -bz + xy \end{cases} \quad (6.5)$$

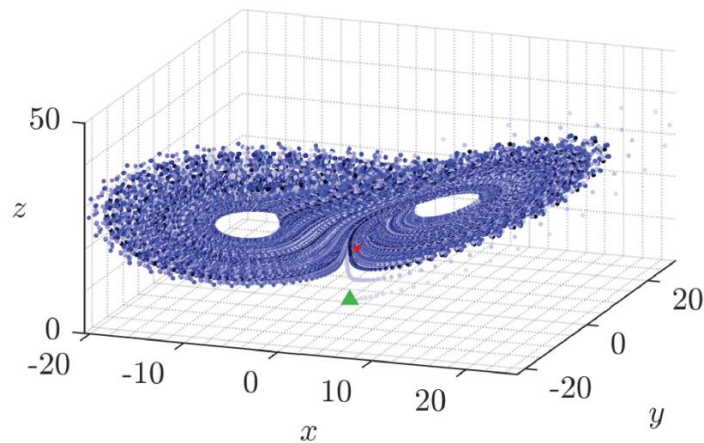
$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha(y - x) \\ \dot{y} = -xz + cy \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases} \quad (6.6)$$

Στις εξισώσεις, x , y , και z είναι οι μεταβλητές κατάστασης και a , b , και c είναι οι παράμετροι που ελέγχουν τη συμπεριφορά των συστημάτων. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να προσαρμοστούν για να παράγουν διαφορετικούς τύπους συμπεριφοράς, όπως περιοδικές ή χαοτικές. Στην τυποποιημένη διατύπωση του συστήματος Chen και Ueta, αυτές οι τιμές ορίζονται σε $a=35$, $b=3$, και $c=28$, οι οποίες παράγουν χαοτική συμπεριφορά που εμφανίζεται στο σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: 3D Chen και Ueta ελκυστής που εμφανίζει πλούσια χαοτική συμπεριφορά με τις παραμέτρους $a=35$, $b=3$, $c=28$ [1].

Οι τιμές των παραμέτρων $a=36$, $b=3$, και $c=20$ στο σύστημα Chen και Lü θα παράγουν παρόμοια χαοτικές συμπεριφορές που εμφανίζονται στο σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6: 3D Chen και Lü ελκυστής που εμφανίζει πλούσια χαοτική συμπεριφορά με τις παραμέτρους $a=36$, $b=3$, $c=20$ [1].

Παρόμοια με το σύστημα Lorenz, το σύστημα Chen και Ueta και το σύστημα Lü και Chen έχουν δύο ελκυστές που θα προσελκύσουν τροχιές πριν από την εκδίωξή τους, αν και οι ελκυστές δεν είναι τόσο ομοεπίπεδοι όπως στο σύστημα Lorenz.

Η μόνη μελέτη που χρησιμοποίησε τον Chen και Ueta για τον χαοτικό σχεδιασμό της διαδρομής ήταν η [332] η οποία συνδυάζει τον Chen και Lorenz για να επιτρέψει την παρακολούθηση αυθαίρετων σημείων ενδιαφέροντος χρησιμοποιώντας χαοτικές τροχιές. Μια πρόσφατη μελέτη [333] χρησιμοποίησε το σύστημα Lü και Chen για τα καθήκοντα του CPP. Η μελέτη επικεντρώνεται στην

εξακρίβωση της βέλτιστης εμβέλειας για την παράμετρο c διατηρώντας παράλληλα τις άλλες δύο παραμέτρους σταθερές σε $a=36$ και $b=3$. Μελετώντας τις χαοτικές ιδιότητες του συστήματος χρησιμοποιώντας διαγράμματα διακλάδωσης και μετρήσεις όπως εκθέτες Lyapunov, καθόρισαν το βέλτιστο εύρος για την c [21], [29]. Μέσα σε αυτό το εύρος, το $c=24$ αντιστοιχούσε στην υψηλότερη τυχαιότητα και ταυτόχρονα παρείχε το υψηλότερο ποσοστό κάλυψης.

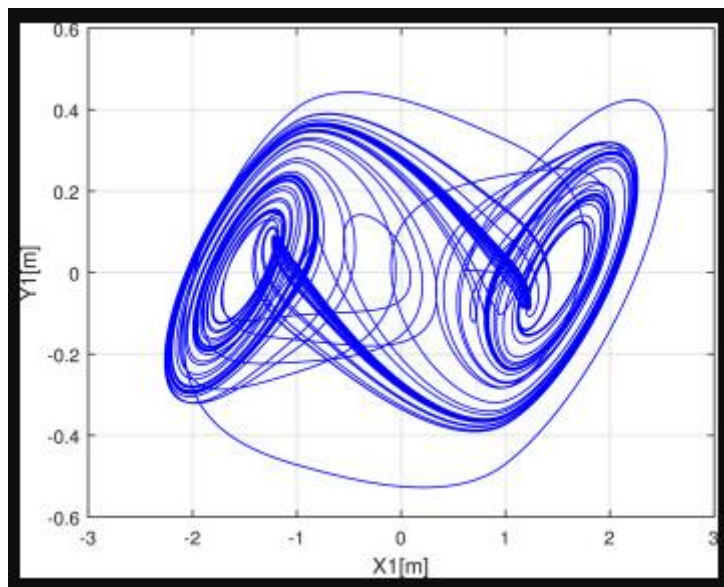
6.2.4 Σύστημα Chua και multi-scroll

Το σύστημα Chua, το οποίο εισήχθη από τους Chua και Szeto [334], είναι ένα από τα απλούστερα ηλεκτρονικά και φυσικά μοντέλα που έχουν ερευνηθεί με μαθηματικές και πειραματικές μεθόδους. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του χαοτικού κυκλώματος του Chua, το οποίο τού έχει προσδώσει την ονομασία «η γεννήτρια χάους του φτωχού», είναι ότι μπορεί εύκολα να κατασκευαστεί με λίγα τυποποιημένα εξαρτήματα. Δεδομένου ότι το χαοτικό κύκλωμα του Chua είναι προικισμένο με ένα ασυνήθιστα πλούσιο ρεπερτόριο μη γραμμικών δυναμικών φαινομένων, έχει γίνει ένα σημαντικό παγκόσμιο πρότυπο για το χάος. Διάφορα δυναμικά συστήματα έχουν εμπνευστεί από το σύστημα Chua, όπως το παρακάτω:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \alpha(y_1 - f(x_1)) \\ \dot{y}_1 = x_1 - y_1 + z_1 \\ \dot{z}_1 = -\beta y_1 \end{cases} \quad (6.7\alpha)$$

όπου $f(x_1) = bx_1 + \frac{1}{2}(a-b)(|x_1+1| - |x_1-1|)$, $\alpha=9$, $\beta=100/7$, $a = -8/7$, $b = -5/7$

Η χαοτική συμπεριφορά αυτού του συστήματος απεικονίζεται στο σχήμα 6.7.

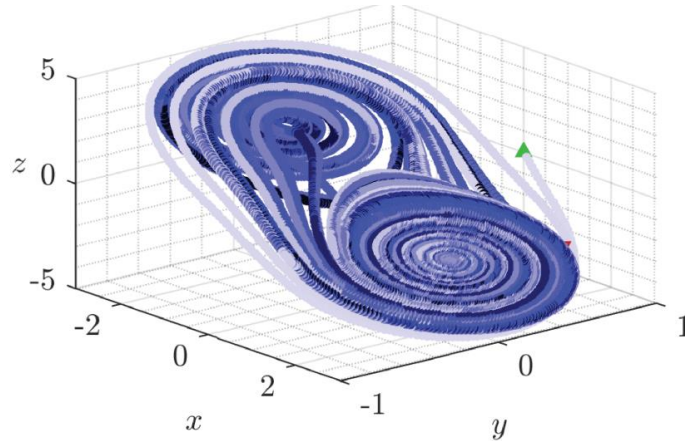


Σχήμα 6.7. Συμπεριφορά του συστήματος Chua [160].

Χρησιμοποιώντας τους νόμους κυκλωμάτων του Kirchhoff για τη μελέτη του κυκλώματος, είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά του κυκλώματος του Chua μέσω ενός συνόλου τριών μη γραμμικών συνηθισμένων διαφορικών εξισώσεων (με μεταβλητές κατάστασης x , y , και z) που περιγράφουν τις τάσεις μεταξύ των πυκνωτών, καθώς και το ηλεκτρικό ρεύμα στον επαγωγέα. Παρόμοια με το σύστημα Lorenz, το κύκλωμα Chua παρουσιάζει double-scroll χαοτικούς ελκυστές

και διακλάδωση που διπλασιάζει την περίοδο της σε μια χαοτική διαδρομή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.8. Οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το σύστημα παρατίθενται ισοδύναμα στο (6.7β).

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha(y - x - f(x)) \\ \dot{y} = x - y + z \\ \dot{z} = -\beta y \\ f(x) = bx + (a - b)(|x + c| - |x - c|)/2 \end{cases} \quad (6.7\beta)$$



Σχήμα 6.8: Ο 3D ελκυστής του κυκλώματος Chua δείχνει χαοτικές συμπεριφορές κάτω από τις παραμέτρους $\alpha=10$, $\beta=14.87$, $a=-1.27$, $b=-0.68$, $c=1$ [1].

Τα μη γραμμικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της αντίστασης απεικονίζονται με τη συνάρτηση $f(x)$, όπου a , b και c είναι γεωμετρικοί παράγοντες. Οι τιμές των συνιστωσών του κυκλώματος καθορίζουν τις παραμέτρους α και β . Αρκετές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει είτε το σύστημα Chua [261], [335] ή τα συστήματα multi-scroll εμπνευσμένα από το σύστημα του κυκλώματος Chua [160] για να δημιουργήσουν χαοτικές διαδρομές. Τα multi-scroll συστήματα χάους με βάση το Chua οδήγησαν σε υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με το σύστημα double-scroll Chua. Σε αντίθεση με τα συστήματα double-scroll, οι σχεδιαστές διαδρομών που χρησιμοποιούν το σύστημα multi-scroll δεν δημιουργούν περιττά πυκνές τροχιές [160]. Εκτός από τα συστήματα που βασίζονται σε Chua, μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει χαοτικά συστήματα double-scroll και multi-scroll είτε για να δημιουργήσουν άμεσα ντετερμινιστικές αλλά απρόβλεπτες διαδρομές [336] είτε για να δημιουργήσουν γεννήτριες τυχαίων αριθμών (RNG) που μπορούν να παράγουν τροχιές με τις στατιστικές ιδιότητες μιας τυχαίας ακολουθίας [165], [335]. Η αναφορά [337] χρησιμοποίησε έναν συνδυασμό του hyperjerk (jerk: ρυθμός μεταβολής της επιτάχυνσης) χαοτικού συστήματος και ενός χειριστή modulo για να καθορίσει την επόμενη κατεύθυνση για το ρομπότ. Η είσοδος στον χειριστή modulo είναι το σημείο που παράγεται από το σύστημα hyperjerk και η έξοδος είναι η επόμενη κατεύθυνση του ρομπότ που επιλέγεται από τις 4 ή 8 πιθανές επιλογές.

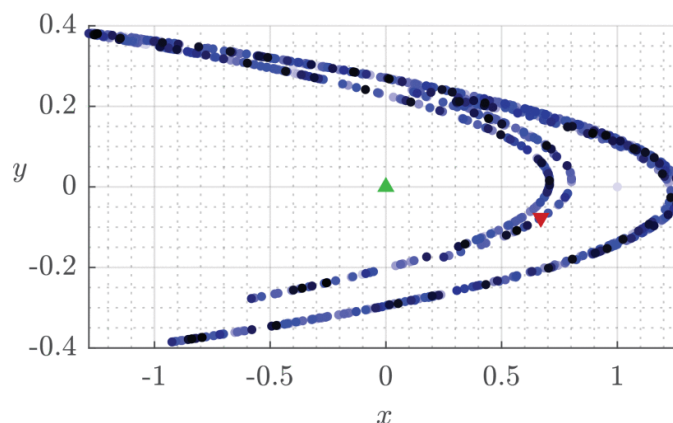
6.2.5 Διακριτά Συστήματα

Ενώ τα συνεχόμενα συστήματα που συζητήθηκαν προηγουμένως ορίζονται από μια διαφορική εξίσωση, διακριτά συστήματα χρησιμοποιούν επαναλαμβανόμενο συναρτησοειδές mapping για να δημιουργήσουν τις καταστάσεις του συστήματος σε κάθε χρονικό δείκτη. Ο Logistic map που εμφανίζεται στην (6.8) και ο Hénon map που φαίνεται στην (6.9) είναι τα δύο δημοφιλή συστήματα που χρησιμοποιούνται σε χαοτικούς σχεδιαστές διαδρομών. Ο Logistic map είναι μια πολυωνυμική συνάρτηση δεύτερου βαθμού που συχνά αναφέρεται ως ένα κλασικό παράδειγμα του πώς οι

φαινομενικά απλές μη γραμμικές δυναμικές εξισώσεις μπορούν να προκαλέσουν περίπλοκη χαοτική συμπεριφορά. Ο βιολόγος Robert May έφερε τον logistic map στην προσοχή του κοινού μέσω της μελέτης [338] η οποία παρουσίασε τον χάρτη ως ένα διακριτού-χρόνου δημογραφικό μοντέλο. Στην εξίσωση (6.8), $x_n \in [0, 1]$ είναι η αναλογία του υφιστάμενου πληθυσμού προς τον μέγιστο δυνατό. Η μη γραμμική διαφορική εξίσωση αντικατοπτρίζει δύο βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη δυναμική του πληθυσμού: την αναπαραγωγή και την πείνα. Σε χαμηλά μεγέθη πληθυσμού, η αναπαραγωγή προκαλεί την αύξηση του πληθυσμού με ρυθμό ανάλογο με τον τρέχοντα πληθυσμό. Ωστόσο, σε υψηλότερες πυκνότητες, ο ρυθμός ανάπτυξης μειώνεται ως απάντηση στην έννοια της ικανότητας μεταφοράς, η οποία αντιπροσωπεύει τον μέγιστο πληθυσμό που μπορεί να υποστηρίξει το περιβάλλον. Αυτή η μείωση του ρυθμού ανάπτυξης είναι ανάλογη με τη διαφορά μεταξύ της ικανότητας μεταφοράς και του τρέχοντος πληθυσμού και συχνά αναφέρεται ως θνησιμότητα που εξαρτάται από την πυκνότητα ή πείνα. Η παράμετρος $r \in [0, 4]$ και οι παραλλαγές της μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος. Όταν $r \approx 3.56995$, το σύστημα αρχίζει να επιδεικνύει χαοτική συμπεριφορά, ωστόσο νησιά σταθερότητας εξακολουθούν να υπάρχουν όπου το σύστημα δείχνει μη χαοτική συμπεριφορά. Ενώ ο ελκυστής χάους για τον μονοδιάστατο Logistic map δεν υπάρχει λόγω της εγγενούς μονοδιαστατικής φύσης του, μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε τον ελκυστή χάους για το διδιάστατο σύστημα Hénon map στο σχήμα 6.9. Παρόμοια με τον Logistic map, ο Hénon map λειτουργεί σε διακριτό χρόνο, πράγμα που σημαίνει ότι προχωρά μέσα από μια σειρά διακριτών βημάτων. Σε πρακτικούς όρους, ο Hénon map παίρνει ένα σημείο που βρίσκεται στο επίπεδο, που προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες του (x_n, y_n) και το μετατρέπει σε ένα νέο σημείο. Η συμπεριφορά του Hénon map καθορίζεται από δύο συγκεκριμένες παραμέτρους, γνωστές ως a και b . Στην τυποποιημένη διατύπωση του Hénon map, αυτές οι τιμές ορίζονται σε $a=1.4$ και $b=0.3$, οι οποίες παράγουν την χαοτική συμπεριφορά. Ωστόσο, τροποποιώντας τις τιμές των a και b , ο χάρτης μπορεί να εμφανίσει διάφορους τύπους συμπεριφοράς όπως διαλείπουσα δυναμική ή σύγκλιση σε περιοδική τροχιά. Για να αποκτήσει μια κατανόηση των διαφόρων τύπων συμπεριφοράς που εκτίθενται από τον χάρτη σε διάφορες τιμές παραμέτρων, μπορεί κανείς να εξετάσει το διάγραμμα τροχιάς του.

$$X_{n+1} = rX_n(1-X_n) \quad (6.8)$$

$$\begin{cases} x_{n+1} = y_n + 1 - ax_n^2 \\ y_{n+1} = bx_n \end{cases} \quad (6.9)$$



Σχήμα 6.9: Ελκυστής συστήματος Hénon map με παραμέτρους $a=1.4$, $b=0.3$ [1].

Όταν ενσωματώνονται στον ελεγκτή κατεύθυνσης του διαφορικού ρομπότ και τα δύο συστήματα τείνουν να οδηγούν το ρομπότ σε μία μόνο κατεύθυνση, η οποία μπορεί να είναι προβληματική σε εφαρμογές που σχετίζονται με την κάλυψη περιορισμένων περιβαλλόντων. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εφαρμόζοντας μια μετατόπιση φάσης στη γωνία του ρομπότ και κατευθύνοντάς το να κινηθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση όταν πλησιάζει σε οποιοδήποτε όριο στο χώρο. Ως εναλλακτική λύση του ελεγκτή κατεύθυνσης του ρομπότ, αρκετές μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει τα σημεία που παράγονται από τον Logistic map για την άμεση ή έμμεση κάλυψη του περιβάλλοντος. Στην άμεση μέθοδο, τα σημεία που παράγονται από το χαοτικό σύστημα χρησιμοποιούνται αμετάβλητα για να καλύψουν το περιβάλλον [173]. Αντίθετα, η έμμεση μέθοδος θα εφαρμόσει έναν απλό χειριστή modulo στην ακολουθία σημείων του Logistic map για να καθορίσει την επόμενη κατεύθυνση για το ρομπότ να κινηθεί από ένα σύνολο 4 ή περισσότερων πιθανών επιλογών. Οι αναφορές [172] και [339-342] χρησιμοποιούν αυτή την έμμεση προσέγγιση σε συνδυασμό με μια τεχνική μνήμης για να βελτιώσουν την ομοιομορφία της κάλυψης σε σχέση με την άμεση. Η τεχνική μνήμης επιτρέπει στο ρομπότ να θυμάται τα τελευταία μέρη που επισκέφθηκε και να αποφεύγει την επανεπίσκεψη αυτών των τόπων στο εγγύς μέλλον. Εκτός από τα καθήκοντα κάλυψης, αυτά τα διακριτά συστήματα είναι χρήσιμα για τη δημιουργία άμεσων χαοτικών διαδρομών για κίνηση μεταξύ δύο συγκεκριμένων σημείων όπως εφαρμόστηκαν στα [328] και [330]. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή απρόβλεπτων διαδρομών κοντά σε ένα κλειστό χώρο για αποστολές επιτήρησης των συνόρων. Η μελέτη [268] κατέδειξε τη χρήση του συστήματος Hénon map για τη δημιουργία τέτοιων διαδρομών.

Το τελευταίο διακριτό χαοτικό δυναμικό σύστημα που συζητείται σε αυτό το τμήμα είναι το Taylor-Chirikov, γνωστό και ως standard map. Αυτός ο χάρτης χρησιμοποιείται από την [282] για την άμεση δημιουργία σημείων τροχιάς για την εργασία κάλυψης. Τα αποτελέσματα έδειξαν παρόμοια επιθυμητή απόδοση με τα αποτελέσματα ενός σχεδιαστή διαδρομής RW, αν και τα αποτελέσματά του ποικίλλουν σε διάφορες προσομοιώσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και άλλα διακριτά δυναμικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό διαδρομών, όπως ο Chebyshev map ή ο Memristive map [343], αλλά οι Logistic map και Hénon map είναι οι πιο διαδεδομένοι στη βιβλιογραφία.

Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα δούμε ένα χαρακτηριστικό πρόβλημα των χαοτικών συστημάτων που μελετήθηκαν παραπάνω, αυτό του πλεονασμού των τροχιών και αργότερα στο 6.4 μία λύση αυτού του προβλήματος.

6.3 Πλεονασμός τροχιών

Η χάραξη της τροχιάς είναι απαραίτητη σε αποστολές εξερεύνησης πεδίου ή σε έρευνες όπου απαιτείται γρήγορη σάρωση του συνολικού χώρου εργασίας από το ρομπότ. Για αυτού του είδους τις εφαρμογές ή αποστολές, οι ερευνητές επιλέγουν να χρησιμοποιήσουν χαοτική τροχιά. Τα χαοτικά συστήματα τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται, όπως είδαμε στο 6.2, είναι: το σύστημα Lorenz, το Standard-map, το σύστημα Arnold και παρόμοια. Το πρόβλημα για τέτοιου είδους χαοτικά συστήματα είναι η πυκνότητα αυτών των τροχιών που εμφανίζονται στην διαδρομή του ρομπότ, που γεννά απώλεια ενέργειας και χρόνου. Για αυτό, ο Nasr κ.α. πρότειναν ένα **multi-scroll χαοτικό σύστημα ώστε να αποφευχθεί ο πλεονασμός των τροχιών** [160].

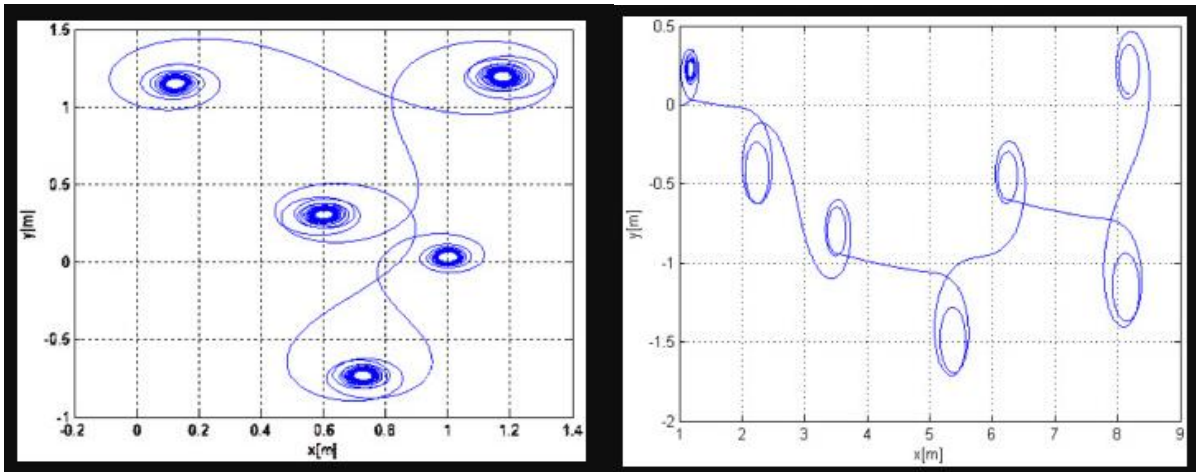
Χρησιμοποιώντας τη δυναμική εξίσωση του συστήματος Chua που εισάγεται στην (6.7), ενσωματώνουμε το χαοτικό σύστημα στο θεωρητικό μοντέλο του ρομπότ για να κατασκευάσουμε χαοτικές κινήσεις και κατόπιν, δημιουργούμε μια τροχιά. Ως εκ τούτου, μια χαοτική γεννήτρια

επιτυγχάνεται ως εξής:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \alpha(y_1 - f(x_1)) \\ \dot{y}_1 = x_1 - y_1 + z_1 \\ \dot{z}_1 = -\beta y_1 \\ \dot{x} = u \cos(x_1) \\ \dot{y} = u \sin(x_1) \end{cases} \quad (6.10)$$

Το δυναμικό σύστημα που δίνεται από το σύστημα εξισώσεων (6.10) παρουσιάζει τρεις μεταβλητές κατάστασης του χαοτικού συστήματος και τη δυναμική του ρομπότ. Ως εκ τούτου, για να αποκτήσουμε μια χαοτική τροχιά, χρησιμοποιούμε τη χαοτική μεταβλητή κατάστασης x_1 αντί του προσανατολισμού θ . Η δυναμική του ρομπότ αλλάζει ανάλογα με το x_1 . Η ταχύτητα u θεωρείται συνήθως ως σταθερή τιμή [160].

Από το σχήμα 6.10, διαπιστώνουμε ότι η χαοτική τροχιά παρουσιάζει πλεονασματικές τροχιές. Κατά συνέπεια, ο χρόνος εκτέλεσης θα επηρεαστεί μαζί με το ποσοστό κάλυψης. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιείται το multi-scroll χαοτικό σύστημα του Chua.



Σχήμα 6.10. Αριστερά: Συμπεριφορά της τροχιάς του ρομπότ χρησιμοποιώντας το double-scroll χαοτικό σύστημα. Δεξιά: Συμπεριφορά της τροχιάς του ρομπότ χρησιμοποιώντας το χαοτικό σύστημα multi-scroll [160].

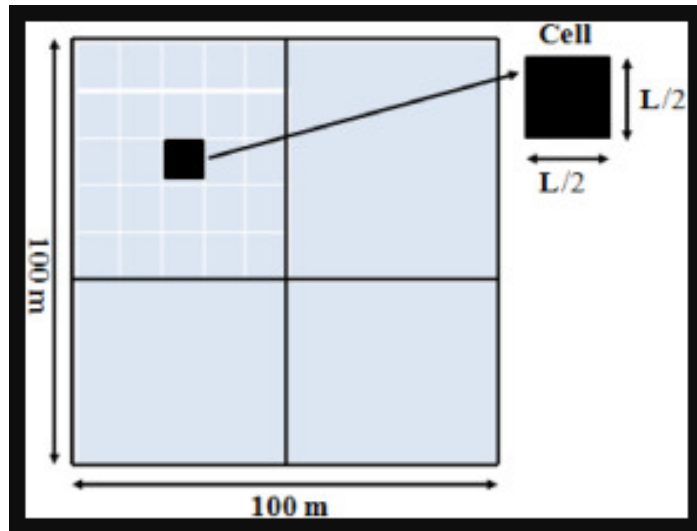
Χρησιμοποιώντας τη δυναμική εξίσωση του συστήματος multi-scroll Chua, παράγονται οι χαοτικές κινήσεις του ρομπότ χρησιμοποιώντας τον ίδιο τρόπο με το double-scroll χαοτικό σύστημα. Ως εκ τούτου, μια χαοτική γεννήτρια λαμβάνεται ως εξής:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \alpha(y_1 - f(x_1)) \\ \dot{y}_1 = ((x_1 - y_1 + z_1) - g(y_1)) \\ \dot{z}_1 = -\beta y_1 \\ \dot{x} = u \cos(x_1) \\ \dot{y} = u \sin(x_1) \end{cases} \quad (6.11)$$

Στο σχήμα 6.10, δίνεται έμφαση στη συμπεριφορά της τροχιάς του ρομπότ σε σχέση με το σύστημα multi-scroll Chua. Ως εκ τούτου, επιβεβαιώνεται ότι **ο αριθμός των τροχιών στη διαδρομή του ρομπότ μειώνεται**. Αυτό αποδεικνύει ότι αυτό το σύστημα μπορεί να είναι μια **επαρκής λύση για την παραγωγή τροχιάς για να εγγυηθεί τη χαοτική κίνηση του ρομπότ με ένα ελάχιστο αριθμό τροχιών**. Ο ρυθμός κάλυψης θα βελτιωθεί αναλόγως **καθιστώντας το ρομπότ πολύ πιο γρήγορο**.

6.4 Ποσοστό Κάλυψης

Για να δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητα της εκάστοτε στρατηγικής ελέγχου του κινούμενου ρομπότ, χρησιμοποιείται το γνωστό ποσοστό κάλυψης (C), το οποίο ορίζει την αποδοτικότητα ως το μέγεθος της καλυπτόμενης επιφάνειας από το ρομπότ που εκτελεί τον αλγόριθμο. Για τον υπολογισμό του ποσοστού κάλυψης, χρησιμοποιούμε έναν κατά προσέγγιση διαχωρισμό σε κελιά. Αυτός ο διαχωρισμός είναι μια απεικόνιση του ελεύθερου χώρου σαν πλέγμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.11. Έστω ότι τα κελιά του χώρου έχουν το ίδιο μέγεθος. Υποθέτουμε ότι το κελί καλύπτεται μόλις το ρομπότ το επισκεφθεί.



Σχήμα 6.11. Περιγραφή κελιών [160].

Η κάλυψη εδάφους ή το ποσοστό κάλυψης (C) εκφράζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$C = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M I(i), \quad (6.12)$$

όπου το $I(i)$ αντιπροσωπεύει την κατάσταση κάλυψης για κάθε κελί στο οποίο ο χώρος εργασίας έχει διαιρεθεί από το ρομπότ και δίνεται ως εξής:

$$I(i) = \begin{pmatrix} 1 \text{ αν το κελί } i \text{ έχει καλυφθεί,} \\ 0 \text{ αν το κελί } i \text{ δεν έχει καλυφθεί} \end{pmatrix} \quad (6.13)$$

Ο συνολικός αριθμός των κελιών M δίνεται όπως παρακάτω:

$$M = \frac{\text{διάστάσεις του χώρου}}{\text{μέγεθος κελιού}} \quad (6.14)$$

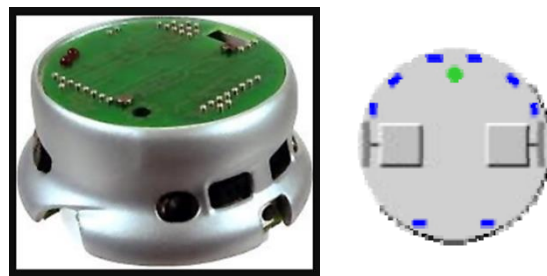
Το ποσοστό κάλυψης αντιπροσωπεύει την αποτελεσματικότητα, που ορίζεται ως η ποσότητα των κελιών που καλύπτονται από το ρομπότ έναντι του συνολικού αριθμού κελιών. Για έναν ακριβή

υπολογισμό του ποσοστού κάλυψης, όταν ένα κελί καλύπτεται από το ρομπότ δεν θα εξεταστεί για δεύτερη επίσκεψη. Έστω ότι ο χώρος εργασίας του ρομπότ ορίζεται ως τετράγωνο έδαφος με διάσταση $100\text{ m} \times 100\text{ m}$. Για τον υπολογισμό του ποσοστού κάλυψης, θεωρούμε ότι κάθε κελί αυτού του χώρου εργασίας έχει ένα μέγεθος ίσο με $L/2\text{ cm} \times L/2\text{ cm}$, όπου L είναι το μήκος του άξονα του ρομπότ.

6.5 Στρατηγική ελέγχου κίνησης για αυτόνομα ρομπότ

Στον τομέα των κινούμενων ρομπότ, δίνεται μια συγκεκριμένη μεθοδολογία ελέγχου της κίνησης του ρομπότ είτε σε άγνωστο, είτε σε γνωστό περιβάλλον. Η προσέγγιση που υιοθετείται συνίσταται στην εφαρμογή μιας χαοτικής συμπεριφοράς σε μια προσομοιωμένη έκδοση (πχ. του μίνι-ρομπότ KHEPERA). **Η υψηλή μη προβλεψιμότητα των χαοτικών τροχιών κίνησης και η γρήγορη σάρωση ολόκληρου του χώρου εργασίας από το ρομπότ καθιστούν αυτή τη στρατηγική ελέγχου ιδιαίτερα καλή** για προβλήματα εξερεύνησης εδάφους, όπου το ρομπότ πρέπει να εκτελέσει περιπολίες, αναζητήσεις ή εργασίες καθαρισμού. Οι χαοτικές τροχιές έχουν ληφθεί χρησιμοποιώντας μεταβλητές κατάστασης του γνωστού συστήματος Lorenz ως είσοδο του προσομοιωμένου ρομπότ, που ελέγχεται από δύο ανεξάρτητους ενεργούς τροχούς. Τέτοιες τιμές εισόδου ορίζονται σε πολλές αριθμητικές προσομοιώσεις του συστήματος Lorenz και αποθηκεύονται για χρήση από τον ελεγκτή ανοικτού βρόχου. Η στρατηγική ελέγχου του κινούμενου ρομπότ λαμβάνει τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης του συστήματος για να παράσχει την εντολή κίνησης και, κατά συνέπεια, να δώσει μια χαοτική δυναμική συμπεριφορά στην τροχιά του ρομπότ.

Το κινούμενο ρομπότ που χρησιμοποιείται στις στρατηγικές ελέγχου είναι μια προσομοιωμένη έκδοση ρομπότ (πχ το μίνι-ρομπότ KHEPERA, ένα λογισμικό προσομοίωσης μιας πειραματικής πλατφόρμας που εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό για τις έρευνες κινητικής ρομποτικής [344-346]). Ο προσομοιωτής ρομπότ, διαθέσιμος στην ιστοσελίδα του KHEPERA Simulator Homepage, λειτουργεί σε περιβάλλον LINUX και τα προγράμματα χρησιμοποιούν τη γλώσσα C. Αυτός ο προσομοιωτής KHEPERA έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε έρευνες κινούμενων ρομπότ [347]). Αυτή η προσομοίωση κινούμενου ρομπότ υιοθετείται επειδή προσφέρει την προσομοίωση των βασικών χαρακτηριστικών του πραγματικού ρομπότ και επιτρέπει την ανάλυση των ιδιοτήτων της ελεγχόμενης κίνησης του ρομπότ. Το ρομπότ αποτελείται βασικά από δύο τροχούς και οκτώ αισθητήρες εγγύτητας. Οι τροχοί ελέγχονται όσον αφορά την ταχύτητά τους και την απόκρισή τους να στρίβουν. Οι αισθητήρες παρέχουν δεδομένα για πιθανά εμπόδια σε μικρή απόσταση. Αυτό το μοντέλο εμφανίζεται στο σχήμα 6.12. Έξι αισθητήρες βρίσκονται στην μπροστινή πλευρά του ρομπότ, και δύο άλλοι βρίσκονται στην αντίθετη πλευρά για να επιτρέψουν πίσω ελιγμούς.



Σχήμα 6.12: Αριστερά: Το κινούμενο ρομπότ Khepera [165],

Δεξιά: Το ίδιο ρομπότ της προσομοίωσης [260]

Η στρατηγική ελέγχου κίνησης για αυτόνομα ρομπότ είναι ένας σημαντικός τομέας στη ρομποτική, καθώς απαιτεί την ανάπτυξη αλγορίθμων και συστημάτων που επιτρέπουν στα ρομπότ να κινούνται αποτελεσματικά και ασφαλώς στο περιβάλλον τους.

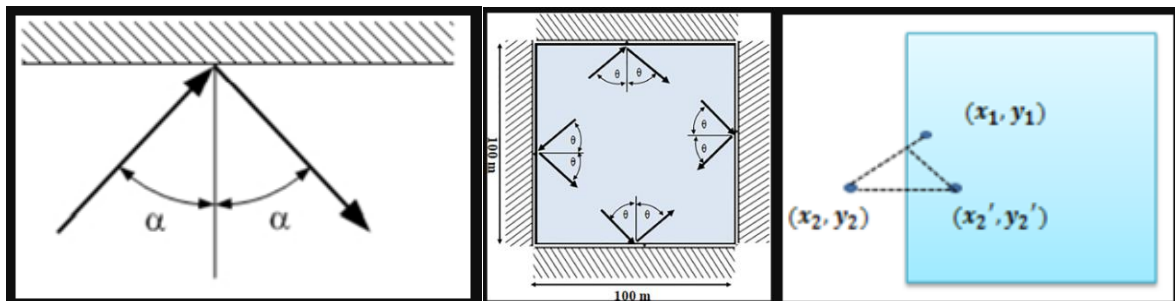
Μερικές από τις κύριες στρατηγικές ελέγχου κίνησης περιλαμβάνουν:

Μοντέλα Κίνησης: Αναπτύσσονται μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τη δυναμική και την κινηματική του ρομπότ. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των κινηματικών εντολών που απαιτούνται για την επίτευξη επιθυμητής κίνησης. Ένα χαοτικό σύστημα μπορεί να οριστεί ως ένα μη γραμμικό αιτιοκρατικό σύστημα που έχει πολύπλοκη και απρόβλεπτη συμπεριφορά. Τα σήματα, τα οποία παράγονται από χαοτικά συστήματα ή κυκλώματα, χρησιμοποιούνται για να καθοδηγήσουν τα αυτόνομα ρομπότ κατά την εξερεύνηση μιας περιοχής για εργασίες περιφρούρησης, αναζήτησης ή εξόρυξης. Η υψηλή μη προβλεψιμότητα, η οποία είναι το κύριο χαρακτηριστικό των χαοτικών συστημάτων, είναι μια απαραίτητη προϋπόθεση για τις προαναφερθείσες εργασίες. Τέτοια συστήματα έχουν ευαίσθητη εξάρτηση από την αρχική κατάσταση και από την παραλλαγή των παραμέτρων του συστήματος, δύο κύρια χαρακτηριστικά της χαοτικής συμπεριφοράς. Πολλά χαοτικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί και αναλυθεί διεξοδικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών όπως το δυναμικό σύστημα Arnold [183], [254], [348], το Standard ή Taylor-Chirikov map [174], [313], [349] και το κύκλωμα Chua [183], ωστόσο το σύστημα Lorenz [260], [350] παραμένει ένα από τα πιο κλασικά παραδείγματα αυτόνομου συστήματος με χαοτική συμπεριφορά. Ένα σημαντικό παράδειγμα εφαρμογής του συστήματος Lorenz είναι ο συγχρονισμός των χαοτικών κυκλωμάτων για σκοπούς επικοινωνίας [351].

Αισθητήρες και Εκτίμηση Κατάστασης: Η αποφυγή των εμποδίων αποτελεί σημαντικό μέρος της βιβλιογραφίας που αφορά τον σχεδιασμό διαδρομής ως συμπλήρωμα για την εξεύρεση μιας διαδρομής από το σημείο εκκίνησης σε ένα σημείο λήξης. Είναι επίσης σημαντικό για το ρομπότ να αποφύγει τη σύγκρουση με τυχόν εμπόδια ή όρια στο χώρο. Αρκετές μέθοδοι αποφυγής εμποδίων έχουν διερευνηθεί για διάφορους αλγόριθμους σχεδιασμού διαδρομών και μερικές από αυτές τις μεθόδους περιλαμβάνουν τη χρήση σχετικά μεγάλου αριθμού αισθητήρων [108], [123]. Εκτός από τον εντοπισμό του τόπου ή του στόχου, οι πολυλειτουργικοί αισθητήρες μπορούν επίσης να ειδοποιήσουν το όχημα ή το ρομπότ για την εγγύτητά του σε οποιοδήποτε αντικείμενο, ενημερώνοντας έτσι το οχήμα ή το ρομπότ για την ανάγκη αλλαγής της κατεύθυνσης για να αποφευχθούν τα εμπόδια.

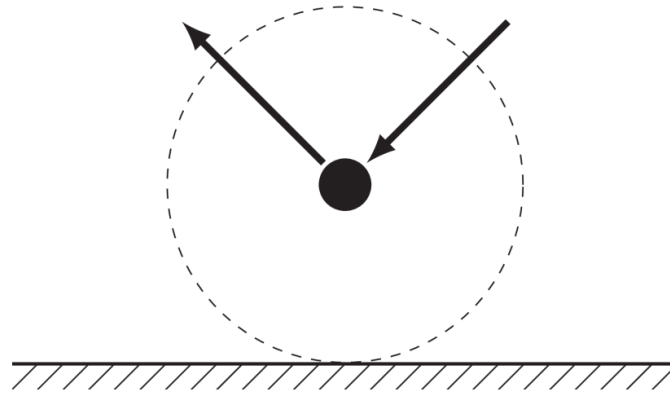
Τα ρομπότ χρησιμοποιούν αισθητήρες για την ανίχνευση του περιβάλλοντος και την εκτίμηση της κατάστασής τους (όπως η θέση, η ταχύτητα, η κατεύθυνση κλπ.). Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για τον προσανατολισμό και τον έλεγχο της κίνησης. Το ρομπότ πρέπει να αλλάξει την τροχιά του όταν εισέρχεται σε ένα φυσικό εμπόδιο ή ένα όριο του χώρου εργασίας. Σε αυτή την περίπτωση, ο κύκλος ελέγχου υιοθετεί μια αντανakλαστική κίνηση. Οι αισθητήρες για την αποφυγή εμποδίων χρησιμοποιούνται σε χαοτικούς σχεδιαστές διαδρομών. Η ρύθμιση των αισθητήρων του ρομπότ καθορίζει τις ενέργειες που λαμβάνει το ρομποτικό σύστημα μετά την ανίχνευση ενός εμποδίου στο μονοπάτι του. Αυτές οι ενέργειες αποφυγής έχουν σημαντική σημασία καθώς δείχνουν το επίπεδο αυτονομίας του ρομπότ. Τα ρομπότ με περιορισμένη αυτονομία μπορεί να αναγκαστούν να σταματήσουν και να περιμένουν την κατεύθυνση από έναν ανθρώπινο χειριστή όταν βρεθούν στην εμβέλεια οποιουδήποτε αντικείμενου, ενώ τα πιο αυτόνομα ρομπότ θα συνειδητοποιήσουν την παρουσία ενός εμποδίου και θα αποφασίσουν ανεξάρτητα για την κατάλληλη αντιμετώπιση. Στην [265], αυτές οι δύο προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται ως μέσο αποφυγής εμποδίων για ένα ρομπότ εξοπλισμένο με αισθητήρες. Μόλις το ρομπότ είναι λιγότερο από 20 εκατοστά μακριά από ένα εμπόδιο, είτε σταματά και απαιτεί μια εντολή είτε στρίβει δεξιά και συνεχίζει την κίνηση. Αν και η

τελευταία επιλογή αυξάνει την πολυπλοκότητα της κίνησης του ρομπότ, η πρώτη επιλογή δείχνει ένα ελαφρώς καλύτερο ποσοστό κάλυψης. Η αναφορά [332] χρησιμοποιεί επίσης μια παρόμοια μέθοδο για την αποφυγή των εμποδίων, με την οποία το ρομπότ χρησιμοποιεί υπερηχητικούς αισθητήρες για να ανιχνεύσει την απόσταση από ένα εμπόδιο. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με τη μέθοδο στην [265] όπου το ρομπότ θα περιστρέφεται αριστερά μέχρι το εμπόδιο να είναι εκτός θέασης πριν από τη συνέχιση στο χαοτικό μονοπάτι, αν το εμπόδιο βρέθηκε να είναι πολύ κοντά στη χαοτική διαδρομή. Όταν οι αισθητήρες βάθους του ρομπότ ανιχνεύουν μια προσέγγιση σε κάποιο εμπόδιο, αλλάζει η κατεύθυνση της κίνησης με βάση τη στρατηγική που περιγράφεται από το σχήμα 6.13, δηλαδή ακολουθεί μια αντανάκλαστική τροχιά που απαιτεί τη μέτρηση της καθέτου στο εμπόδιο όταν αισθάνεται ότι πλησιάζει. Ο αισθητήρας βάθους στην πλοήγηση ρομπότ είναι ένας τύπος αισθητήρα που χρησιμοποιείται για να μετρήσει την απόσταση από το ρομπότ ή το όχημα έως το πλησιέστερο εμπόδιο ή την επιφάνεια. Συνήθως λειτουργεί με τη χρήση ήχου, φωτός, ή άλλων μορφών ενέργειας για να ανιχνεύσει το περιβάλλον του ρομπότ και να παράγει μια αναπαράσταση του χώρου με βάση τις αποστάσεις. Οι αισθητήρες βάθους είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε ρομποτικές εφαρμογές όπου η αυτόνομη πλοήγηση είναι απαραίτητη, όπως σε ρομπότ καθαρισμού οικιακών χώρων, ρομπότ αυτόνομης οδήγησης, ή ακόμα και σε υποβρύχια ρομπότ για την αποφυγή σύγκρουσης με βυθισμένα εμπόδια. Η πληροφορία που παρέχουν οι αισθητήρες βάθους είναι κρίσιμη για τη λήψη αποφάσεων και την ασφαλή λειτουργία του ρομπότ [160], [260], [349].



Σχήμα 6.13: Αριστερά: Γεωμετρική απεικόνιση της στρατηγικής αποφυγής εμποδίων [260]. Μέση: Η ίδια απεικόνιση σε καθορισμένο (εδώ τετραγωνικό) πεδίο εργασίας [160]. Δεξιά: Ομοίως (Mirror mapping) [349].

Γενικεύοντας την περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 6.13, υποθέτουμε ότι η συντεταγμένη (x_{n-1}, y_{n-1}) είναι η $(n-1)$ οστή θέση του ρομπότ και ότι (x_n, y_n) είναι η επόμενη συντεταγμένη του, που είναι ένα σημείο υπερχειλίσης. Σαν σημείο υπερχειλίσης ορίζεται ένα σημείο που βρίσκεται εκτός του χώρου εργασίας. Μετά από αυτό, γίνεται προσπάθεια να βρεθεί το σημείο αντανάκλασης (x_n', y_n') , δηλαδή ακολουθείται μια αντανάκλαστική διαδρομή που απαιτεί τον εντοπισμό των ορίων του χώρου εργασίας όταν οι αισθητήρες του ρομπότ αισθάνονται ότι πλησιάζει στα όρια αυτά ή σε κάποιο εμπόδιο [160]. Η mirror mapping είναι μια δημοφιλής μέθοδος που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία. Σε αυτή τη μέθοδο [166], [352-353] το αντικείμενο απομακρύνεται από ένα όριο με την γωνία αντανάκλασης ίση με την προσπίπτουσα γωνία σαν να αντανάκλαται από το όριο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.14. Η mirror mapping επιτρέπει μια αυθαίρετη γωνία στροφής από τα εμπόδια παρά τις προδιαγεγραμμένες μεθόδους γωνίας στροφής των [265] και [332].

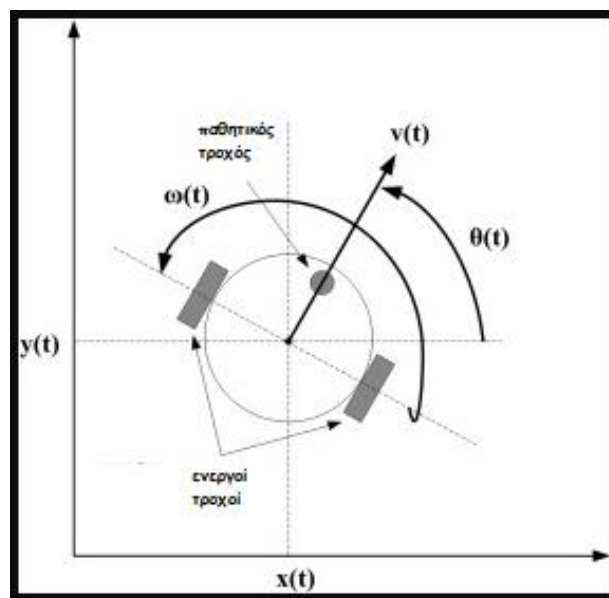


Σχήμα 6.14: Αποφυγή εμποδίων με τεχνική mirror mapping (συμπαγής κύκλος: ρομπότ, διακεκομμένος κύκλος: εύρος ρομποτικών αισθητήρων) [1].

Σχεδιασμός Κίνησης: Αναπτύσσονται αλγόριθμοι που επιτρέπουν στα ρομπότ να σχεδιάζουν αποτελεσματικές διαδρομές ή κινήσεις για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων, λαμβάνοντας υπόψη το περιβάλλον και τους περιορισμούς του ρομπότ.

Αντισταθμιστές και Ελεγκτές: Χρησιμοποιούνται ελεγκτές και αντισταθμιστές για την εξασφάλιση σταθερής και ακριβούς κίνησης, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα του περιβάλλοντος και τις δυναμικές του ρομπότ.

Συντονισμός Κινήσεων: Ο συντονισμός διαφορετικών μερών του ρομπότ (όπως μπροστά και πίσω τροχοί ή άκρα ρομπότ με βραχίονες) είναι σημαντικός για την εξασφάλιση ομαλής και συντονισμένης κίνησης. Η κίνηση του ρομπότ επιτυγχάνεται με την οδήγηση των ανεξάρτητων ενεργών τροχών [160], [165], [260], [349], [354]. Η προκύπτουσα κίνηση περιγράφεται από τη γραμμική ταχύτητα $v(t)$ και την κατεύθυνση $\theta(t)$, παρέχοντας μια στιγμιαία γραμμική κίνηση του μεσαίου σημείου του άξονα του τροχού, και μια περιστροφική κίνηση (ταχύτητα περιστροφής $\omega(t)$) του σώματος του ρομπότ πάνω από αυτό το ίδιο σημείο. Το σχήμα 6.15 δείχνει αυτό το σχέδιο κίνησης σε επίπεδο δύο διαστάσεων.



Σχήμα 6.15: Η περιγραφή της κίνησης του ρομπότ στο επίπεδο [165]

Ο έλεγχος της κίνησης του ρομπότ μπορεί να γίνει παρέχοντας τις δύο ανεξάρτητες ταχύτητες τροχών, $\omega_1(t)$ και $\omega_2(t)$, ή την γραμμική και γωνιακή ταχύτητα του σώματος του ρομπότ, $v(t)$ και $\omega(t)$, οι οποίες μπορούν να μετατραπούν σε όρους κάθε ταχύτητας τροχού και αντίστροφα.

Λαμβάνοντας ένα μαθηματικό μοντέλο για αυτή την κίνηση, μπορούμε να εξετάσουμε δύο μεταβλητές εισόδου: $v(t)$ και $\omega(t)$, και τρεις μεταβλητές κατάστασης: τη θέση και τον προσανατολισμό του ρομπότ ($x(t)$, $y(t)$, $\theta(t)$):

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta(t) & 0 \\ \sin\theta(t) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{pmatrix} \quad (6.15)$$

Οι μεταβλητές εισόδου ονομάζονται επίσης μεταβλητές ελέγχου, και αποτελούν τον τρόπο εντολής του ρομπότ για την παροχή της επιθυμητής κίνησης. Το ιστορικό κίνησης του ρομπότ, δηλαδή η εκτελούμενη τροχιά, καταγράφεται για να σχεδιάσει γραφικά, κάτι που επιτρέπει την ευκολότερη απεικόνιση των τοπολογικών ιδιοτήτων.

Το σχήμα ελέγχου μπορεί να περιγραφεί ως νόμος ελέγχου ανοικτού βρόχου, όπου οι μεταβλητές εισόδου είναι προκαθορισμένες και διαθέσιμες με τη μορφή ενός διανύσματος που περιέχει τις διακριτού χρόνου σταθερές τιμές ελέγχου. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ανεξάρτητων ταχυτήτων των τροχών. Αυτός ο νόμος ελέγχου μπορεί, ωστόσο, να κατευθύνει το ρομπότ προς ένα φυσικό εμπόδιο. Ως εκ τούτου, ο ελεγκτής εξακολουθεί να πρέπει να λύσει το πρόβλημα των εμποδίων και της αποφυγής των ορίων του χώρου εργασίας.

Οι τροχιές κίνησης που λαμβάνονται χρησιμοποιούν χασοτικές μεταβλητές, δηλαδή χρονοσειρές που προκύπτουν από ένα χασοτικό δυναμικό σύστημα, καθώς οι τιμές ταχύτητας που δίνονται μπορεί να θεωρηθεί ότι συμφωνούν με τους στόχους της στρατηγικής ελέγχου. Το κινούμενο ρομπότ έχει επιτύχει μια πλήρη σάρωση εδάφους που επιτρέπει την εκπλήρωση των καθηκόντων περιπολίας, αναζήτησης ή καθαρισμού.

Μια άλλη πιθανή λύση για τον έλεγχο του ρομπότ σε μια πλήρη σάρωση εδάφους με απρόβλεπτες τροχιές είναι να παρέχονται οι δύο ανεξάρτητες ταχύτητες των τροχών από ομοιόμορφα καταναμημένους τυχαίους αριθμούς. Μια τέτοια εναλλακτική προσέγγιση έχει κάποιες ανεπιθύμητες ιδιότητες όπως οι διακοπές των τροχιών, οι οποίες είναι υπερβολικά συχνές. Λαμβάνοντας υπόψη ένα πρόβλημα για πραγματικό ρομπότ, αυτές οι αλλαγές τροχιάς σημαίνουν δυσκολίες στην οδήγηση του κινητήρα. Επιπλέον, η ενέργεια που απαιτείται για την κίνηση του ρομπότ αυξάνεται για να καλύψει την ίδια περιοχή.

Τα αποτελέσματα ελέγχου του κινούμενου ρομπότ δείχνουν ότι μια τέτοια στρατηγική μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικό έλεγχο του ρομπότ για την εκπλήρωση συγκεκριμένων τύπων εργασιών. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να καθοριστούν οι προοπτικές των μελλοντικών εργασιών σε αυτόν τον τομέα, προκειμένου να επιτευχθεί μια πειραματική υλοποίηση και να διερευνηθούν οι δυνατότητες αυτής της στρατηγικής ελέγχου για τη μελέτη δυναμικών συστημάτων. Οι τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες δείχνουν προς την υλοποίηση ενός πρωτότυπου κινούμενου ρομπότ και ενός απλουστευμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος που μιμείται το σύστημα Lorenz [260].

Ο συνδυασμός αυτών των στρατηγικών επιτρέπει στα αυτόνομα ρομπότ να κινούνται αποτελεσματικά και ασφαλώς στο περιβάλλον τους, αναπτύσσοντας παράλληλα την ικανότητά τους να αντιδρούν σε αλλαγές και απρόβλεπτες καταστάσεις.

6.6 Χειρισμός Χάους

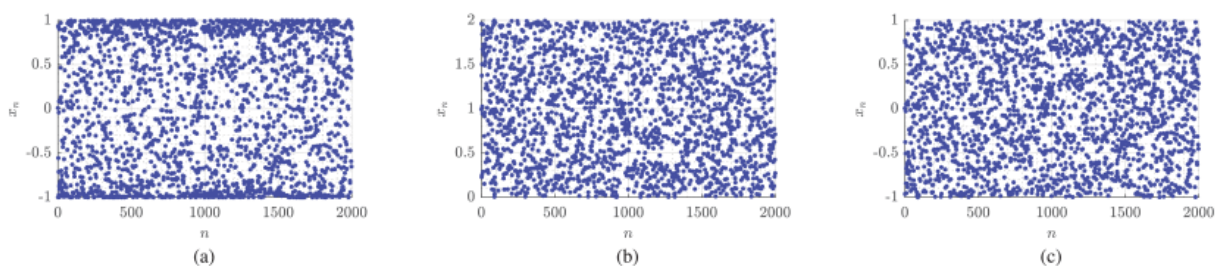
Αν και οι εξισώσεις που περιγράφονται στο 6.2 έχουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της χαοτικής κίνησης, είναι κυρίως περιορισμένες στη λειτουργικότητα λόγω της κακής κάλυψης του περιβάλλοντος αναζήτησης. Κατά συνέπεια, πολλά έργα στη βιβλιογραφία [160], [166], [171], [173], [267], [278] [328], [330], [332] και [355] έχουν καινοτομήσει πολυάριθμα μέσα για τη βελτίωση της λειτουργικότητας και των χαοτικών ιδιοτήτων σε διαδικασίες συλλογικά γνωστές ως χειρισμός του χάους. Ο χειρισμός του χάους περιλαμβάνει τις προσαρμογές των χαοτικών αλγορίθμων με μεθόδους όπως: 1) συνδυασμός δύο ή περισσότερων εξισώσεων χάους 2) μετασχηματισμοί της χαοτικής και/ή περιβαλλοντικής κατάστασης και 3) προσθήκη σημείων ενδιαφέροντος ή διαχωρισμό του περιβάλλοντος αναζήτησης ρομπότ. Αυτοί οι χειρισμοί γίνονται για να αυξήσουν την απόδοση του χαοτικού CPP όσον αφορά τον χρόνο κάλυψης και την πυκνότητα διαδρομής. Διάφορες μέθοδοι χειρισμού του χάους περιγράφονται στις ακόλουθες υποενότητες.

6.6.1 Μετασχηματισμός τόξου συνημιτόνου και τόξου ημιτόνου

Η αναφορά [171] περιγράφει τη χρήση τριγωνομετρικών μετασχηματισμών όπως μετασχηματισμών τόξου συνημιτόνου και τόξου ημιτόνου για να αυξηθεί το ποσοστό κάλυψης και την κατανομή κάλυψης του Chebyshev map για ειδικές αποστολές. Ο Chebyshev map (6.16) είναι ένα απλό δυναμικό σύστημα που οριοθετεί την χαοτική κατάσταση x_n στην περιοχή -1 έως 1 .

$$X_{n+1} = f(x_n) = \cos(k \cdot \arccos x_n) \quad (6.16)$$

όπου k υποδηλώνει τη σειρά του χάρτη. Ο Chebyshev map δείχνει άνιση κατανομή στις ακραίες τιμές συνεπώς υποδηλώνει φτωχά διασκορπισμένη κάλυψη. Η αναφορά [171] χρησιμοποιεί μετασχηματισμούς τόξου συνημιτόνου και τόξου ημιτόνου για να προκαλέσει υψηλότερη τοπολογική μεταβατικότητα για πιο ομοιόμορφη κάλυψη της περιοχής. Οι μετασχηματισμοί των Chebyshev map και τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στο σχήμα 6.16. Η αναφορά [173] χρησιμοποιεί επίσης αυτούς τους μετασχηματισμούς για να λύσει ένα παρόμοιο πρόβλημα της συγκεντρωτικής κάλυψης στα σύνορα όταν χρησιμοποιεί το σύστημα Logistic map για την εργασία κάλυψης. Ωστόσο, συνδυάζει τον μετασχηματισμό τόξου συνημιτόνου και τόξου ημιτόνου για να δημιουργήσει έναν βελτιωμένο σχεδιαστή διαδρομών με καλύτερη ομοιομορφία και τυχαιότητα κάνοντας χρήση λιγότερων επαναλήψεων από το μη μετασχηματισμένο σύστημα Logistic map.

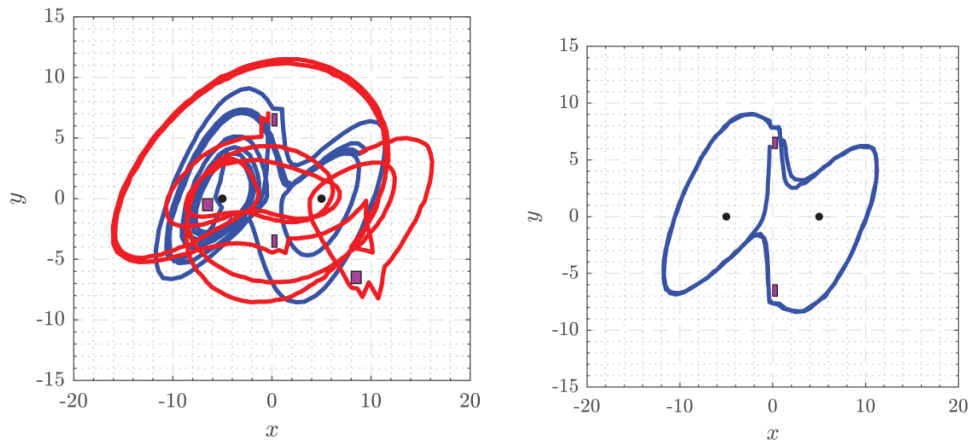


Σχήμα 6.16: Διανομή τροχιάς του Chebyshev map με $k=6$ που δείχνει: (α) άνιση κατανομή και στα δύο άκρα, (β) μετασχηματισμός τόξου ημιτόνου με πιο διάσπαρτη διανομή, (γ) μετασχηματισμός τόξου συνημιτόνου με πιο διάσπαρτη διανομή [1].

6.6.2 Σχεδιασμένοι Υπο-Στόχοι, Σημεία Ενδιαφέροντος (POIs) και Συγγενικοί (Affine) Μετασχηματισμοί

Μια άλλη μέθοδος χειρισμού του χάους περιλαμβάνει τη χρήση σχεδιασμένων υπο-στόχων ή σημείων ενδιαφέροντος. Η αναφορά [267] προτείνει μια στρατηγική επανάληψης που χρησιμοποιεί συγγενικούς μετασχηματισμούς για να δώσει τον τυπικό χαοτικό αλγόριθμο στον ελεγκτή του ρομπότ. Η χαοτική τροχιά που παράγεται από τον ελεγκτή του ρομπότ σε αυτή τη στρατηγική έχει ενδιάμεσα γειτονικά σημεία με μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, οι οποίες είναι επομένως δύσκολο για το ρομπότ να εντοπίσει. Κατά συνέπεια, δημιούργησαν έναν αλγόριθμο που ενισχύει την πλοήγηση του ρομπότ. Ο αλγόριθμος δημιουργεί υπο-στόχους μεταξύ γειτονικών σημείων, χωρίζει το περιβάλλον σε μεγάλες περιοχές και περαιτέρω χωρίζει αυτές τις περιοχές σε μικρά πλέγματα. Για την υλοποίηση της στρατηγικής επανάληψης, ο κώδικας χρησιμοποιεί συναρτήσεις για να κρίνει εάν κάθε μικρό πλέγμα έχει καλυφθεί πλήρως και, αν όχι, ξεκινά τους κύκλους επανάληψης του μικρού πλέγματος μέχρι να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη του πλέγματος, πριν προχωρήσει σε ένα γειτονικό μικρό πλέγμα χρησιμοποιώντας τον μεγάλο κύκλο επανάληψης. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο χειρισμού, ο αλγόριθμος είναι σε θέση να μειώσει την απόσταση μεταξύ των γειτονικών σημείων. Ωστόσο, το ποσοστό και ο χρόνος κάλυψης του ελεγχόμενου χαοτικού CPP δεν αναφέρονται στο [267].

Η αναφορά [332] συζητά μια άλλη στρατηγική βελτίωσης της ρομποτικής πλοήγησης χρησιμοποιώντας σημεία ενδιαφέροντος (POIs) και όχι σχεδιασμένους υπο-στόχους. Σε ορισμένες εξειδικευμένες εφαρμογές σχεδιασμού χαοτικών διαδρομών, υπάρχει ανάγκη παρακολούθησης συγκεκριμένων POI. Ως εκ τούτου, ο στόχος του [332] είναι η δημιουργία ενός χαοτικού συστήματος για την παρατήρηση ενός αυθαίρετου αριθμού καθορισμένων τοποθεσιών, προτείνοντας συνεπώς μια μεθοδολογία για την παροχή τόσο πραγματικών όσο και συνθετικών POIs στον ελεγκτή του ρομπότ. Τα πραγματικά POI επιλέγονται ως στόχοι που θα παρακολουθούνται από το ρομπότ και τα συνθετικά POI επιλέγονται αυστηρά για να προκαλέσουν μεγαλύτερη μη προβλεψιμότητα στην πορεία. Μετά την καθιέρωση των POI, το επόμενο βήμα περιλαμβάνει το σχηματισμό των κελιών που περιέχουν τα σημεία ενδιαφέροντος. Κατά συνέπεια, δημιουργείται ένα χρονοδιάγραμμα για να δοθεί στα ρομπότ ο προγραμματισμένος χρόνος σε κάθε κελί και στη συνέχεια καθορίζεται το τοπικό σύστημα Καρτεσιανών συντεταγμένων μέσα σε κάθε κελί. Τέλος, τα τμήματα τροχιάς δημιουργούνται μέσα σε κάθε κελί. Η χαοτική τροχιά που χρησιμοποιείται από αυτή τη μελέτη προέρχεται από έναν συνδυασμό των εξισώσεων Lorenz και Chen. Η μελέτη χρησιμοποίησε συγγενικούς μετασχηματισμούς για τη μεταφορά των δίδυμων σημείων ισορροπίας του Lorenz και του Chen στα POI και με αυτόν τον τρόπο μεταφέρει και διαμορφώνει τις τροχιές των χαοτικών συστημάτων γύρω από αυτά τα σημεία. Ο συγγενικός μετασχηματισμός περιλαμβάνει μια περιστροφή και έναν κλιμακωτό μετασχηματισμό. Η προσομοίωση του παραγόμενου συστήματος δείχνει πυκνές τροχιές γύρω από τα σημεία ενδιαφέροντος, επιτυγχάνοντας έτσι τον στόχο αυτής της μελέτης που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.17α. Ωστόσο, σε αντίθεση με άλλες μελέτες όπως [176], [328] και [330], αυτή η εργασία δεν χρησιμοποίησε ένα δυναμικό σύστημα συντεταγμένων για να διαταράξει τον προσανατολισμό του ρομπότ και να μεταδώσει χάος στον ελεγκτή του ρομπότ. Αντ' αυτού, οι δύο συντεταγμένες του κινούμενου ρομπότ είναι ένας απλός μετασχηματισμός των συντεταγμένων του δυναμικού συστήματος. Ως αποτέλεσμα, η εμφάνιση εμποδίων στο μονοπάτι μπορεί να υποβαθμίσει τις χαοτικές τροχιές και να τις μετατρέψει σε περιοδικές διαδρομές όπως απεικονίζεται στο σχήμα 6.17β. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, η [332] χρησιμοποίησε συνθετικά POI για να αποκαταστήσει την χαοτική συμπεριφορά της εξίσωσης Lorenz όταν υπάρχουν εμπόδια στην τροχιά.



Σχήμα 6.17: α) Lorenz και Chen σύστημα που παρακολουθούν δύο σημεία σε ένα περιβάλλον με εμπόδια από την. Τα εμπόδια στο περιβάλλον παρουσιάζονται ως ορθογώνια μπλοκ με POI που σημειώνονται από τους μαύρους κύκλους που τοποθετούνται στο $(-5,0)$ και $(5, 0)$, β) Η χαοτική τροχιά Lorenz μετατράπηκε σε περιοδική. Τα εμπόδια στο περιβάλλον παρουσιάζονται ως ορθογώνια μπλοκ με POI που σημειώνονται από τους μαύρους κύκλους που τοποθετούνται στο $(-5,0)$ και $(5, 0)$ [332].

6.6.3 Συγχρονισμός χάους

Η επόμενη μέθοδος χειρισμού του χάους που θα διερευνηθεί είναι η χρήση του συγχρονισμού χάους για την ανάπτυξη πιο πολύπλοκων χαοτικών συστημάτων σε μια εφαρμογή πολλών ρομπότ. Ο συγχρονισμός του χάους χρησιμοποιείται για την εναρμόνιση και τη δημιουργία πανομοιότυπων τροχιών για την επίτευξη αποτελεσματικής συνεργασίας σε ένα χαοτικό σύστημα πολλών ρομπότ. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τον εξαναγκασμό δύο ή περισσότερων χαοτικών συστημάτων να ακολουθήσουν πανομοιότυπες διαδρομές «κλειδώνοντας» όλα τα συστήματα σε ένα σύστημα δηλαδή το σύστημα καθοδήγησης. Τα χαοτικά συστήματα είναι γνωστό ότι αντιστέκονται στον συγχρονισμό λόγω των θετικών εκθετών τους Lyapunov. Ωστόσο, όταν και τα δύο συστήματα μοιράζονται πληροφορίες με έναν πολύ συγκεκριμένο τρόπο, ο συγχρονισμός είναι δυνατός [355-356]. Αυτό απεικονίζεται στην [166] και [357], όπου οι χαοτικές κινήσεις του ρομπότ υλοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει ένας ηγέτης ρομπότ που χρησιμοποιεί τις εξισώσεις του χάους και τα άλλα ρομπότ συγχρονίζονται με αυτό. Τα τέσσερα ρομπότ που χρησιμοποιούνται στην [166] έχουν όλες τις ίδιες κινηματικές συνθήκες αλλά διαφορετικές αρχικές θέσεις, διασκορπισμένες και στις τέσσερις άκρες του χώρου εργασίας. Τα ρομπότ διασχίζουν τον χώρο εργασίας για να επιτύχουν σημαντικούς στόχους που είχαν προηγουμένως ανατεθεί στον ελεγκτή, ενώ η λογική ελέγχου συγχρονισμού και αποφυγής εμποδίων αποτρέπει τις συγκρούσεις μεταξύ τους ή με τα όρια του χώρου εργασίας. Η μέθοδος συγχρονισμού που χρησιμοποιείται από την [166] δείχνει ότι ο συγχρονισμός του χάους επιτυγχάνει καλύτερη κάλυψη σε ένα σύστημα πολλών ρομπότ από τα μη συγχρονισμένα ρομπότ ή τα ρομπότ τυχαίας βάρδισης. Η μελέτη έδειξε επίσης ότι μετά από 200 επαναλήψεις, το συγχρονισμένο σύστημα επιτυγχάνει κάλυψη 48,35% σε σύγκριση με το 41,55% και το 42,10% σε ένα μη συγχρονισμένο και ένα τυχαίας βάρδισης σχεδιασμό κάλυψης αντίστοιχα, υπό τις ίδιες κινηματικές και εργασιακές συνθήκες.

6.6.4 Διαχωρισμός, έλεγχος προσανατολισμού και κλιμάκωση

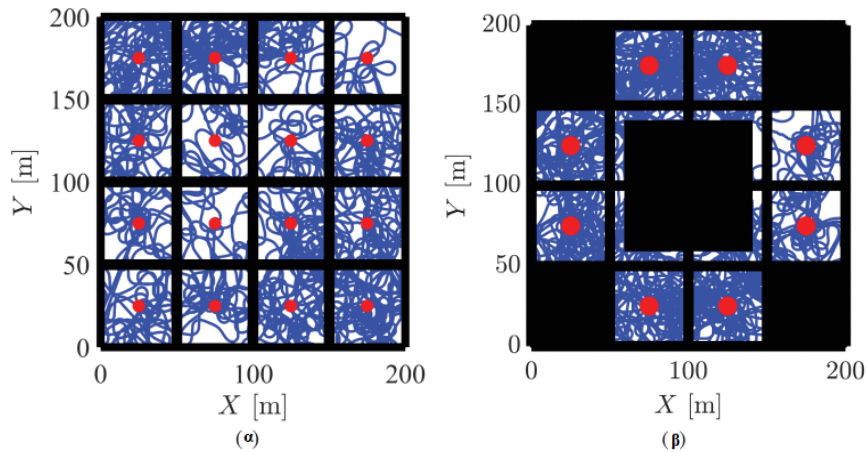
Η μέθοδος διαχωρισμού χάρτη (map partitioning), γνωστή ως map zoning, που προτάθηκε για πρώτη φορά από τις [328] και [330], είχε ως στόχο να αυξήσει την ομοιομορφία και να μειώσει την επαναληπτικότητα της διαδρομής του ρομπότ, μειώνοντας έτσι τον χρόνο κάλυψης. Για την επίτευξη

αυτών των στόχων, οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη διαίρεση του περιβάλλοντος σε μικρά και μεγάλα κελιά για την παρακολούθηση της κάλυψης σε δύο διαφορετικά επίπεδα. Τα μικρά κελιά, που αντιστοιχούν σε μια περιοχή που δεν είναι μεγαλύτερη από την περιοχή ανίχνευσης (SR) του ρομπότ, παρακολουθούν την κατάσταση κάλυψης αυτών των μικρών περιοχών για να εξασφαλίσουν την επιθυμητή κάλυψη περιβάλλοντος. Τα μεγάλα κελιά πλέγματος, ή διαχωρισμοί χάρτη, στοχεύουν στην παρακολούθηση της κατάστασης κάλυψης μεγάλων τμημάτων του περιβάλλοντος. Αυτή η χρήση μικρών και μεγάλων κελιών θυμίζει τις μεθόδους, ιδιαίτερα τις STC. Οι μέθοδοι [328] και [330] χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό ενός συνεχούς και ενός διακριτού χαοτικού συστήματος για τον χαοτικό σχεδιαστή διαδρομών. Το συνεχές σύστημα χρησιμοποιείται για να καλύψει τα μικρότερα κελιά με μια δυναμική κατάσταση που χρησιμοποιούνται για τον άμεσο έλεγχο της γωνίας οδήγησης του ρομπότ. Το διακριτό σύστημα χρησιμοποιείται για να μετακινήσει το ρομπότ σε ένα νέο μεγάλο κελί μόλις ανιχνευθεί επαναλαμβανόμενη κάλυψη. Συνολικά, η μέθοδος βοηθά το ρομπότ να επεκτείνει τις τροχιές σε απομακρυσμένες περιοχές.

Ο έλεγχος προσανατολισμού είναι μια άλλη τεχνική χειρισμού που προτάθηκε από τις [328] και [330]. Η μέθοδος επιτρέπει να αλλάξει δραματικά την κατεύθυνση του ρομπότ και να το οδηγήσει να καλύψει περισσότερα από τα γειτονικά κελιά πλέγματος, αποτρέποντας έτσι πυκνές τοπικές τροχιές. Αυτό γίνεται με την αλλαγή των συντεταγμένων του δυναμικού συστήματος που καθορίζει ή διαταράσσει τη γωνία κατεύθυνσης του ρομπότ. Τέλος, η τελευταία μέθοδος που πρότεινε η [328] ήταν η κλιμάκωση του συστήματος. Η τεχνική εφαρμόζει έναν παράγοντα για να κλιμακώσει τις τροχιές του ρομπότ, επιτρέποντας στον αλγόριθμο να ρυθμίσει την πυκνότητα κάλυψης με βάση την περιοχή ανίχνευσης του ρομπότ. Ταυτόχρονα, η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα να ποικίλλει η έκταση κάλυψης με βάση το μέγεθος του περιβάλλοντος. Συνολικά, η τεχνική αυξάνει την προσαρμοστικότητα των χαοτικών συστημάτων στις αλλαγές στην περιοχή ανίχνευσης και το μέγεθος του περιβάλλοντος. Η έλλειψη προσαρμοστικότητας σε διαφορετικές συνθήκες ρομπότ/περιβάλλοντος υπήρξε ένας πρακτικός περιορισμός των χαοτικών σχεδιαστών διαδρομών. Ο συνδυασμός των προαναφερθέντων τριών τεχνικών συνέβαλε στη σημαντική μείωση της επαναλαμβανόμενης κάλυψης και του χρόνου κάλυψης, καθιστώντας την απόδοση συγκρίσιμη με εκείνη των βέλτιστων μεθόδων CPP. Ωστόσο, το ρομπότ απαιτεί δυνατότητες εντοπισμού για την επιτυχή εφαρμογή των τεχνικών map zoning και τον έλεγχο προσανατολισμού που αποκλίνουν από καθαρά χαοτικές τροχιές στην [122] ή τις μεθόδους τυχαίας βάδισης.

6.7 Επίλογος

Ένα περιβάλλον με εμπόδια, τα οποία μπορεί να αποφευχθούν με τη χρήση mirror mapping [160], [260], [349], ύστερα από εκτίμηση καταστάσεων με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων, εξετάστηκε σε κάποιες εργασίες. Μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση του πλεονασμού των χαοτικών τροχιών [160]. Επιπλέον, πιο σύνθετοι και απρόβλεπτοι ελεγκτές σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας την υβριδοποίηση διαφορετικών χαοτικών συστημάτων [160], [283], [286-287]. Όλες οι μέθοδοι που συζητούνται σε αυτό το τμήμα βασίζονται σε σχετικά απλές εφαρμογές εντός των χαοτικών σχεδιαστών διαδρομών που επιτρέπουν ελάχιστες αλλαγές στους αρχικούς αλγόριθμους CPP (σχήμα 6.18).



Σχήμα 6.18: Arnold με όλες τις τρεις χαοτικές τεχνικές ελέγχου από την [328] σε ρομπότ με αισθητήρα εύρους (α) 4 μέτρα και (β) 1 μέτρο. Τα μαύρα τετράγωνα είναι εμπόδια και οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν τα μεσαία σημεία της ζώνης.

Ωστόσο, δεν αντιστοιχούν απαραίτητα σε ομαλές τροχιές και συχνά οδηγούν σε πολλές περιπτώσεις απότομων στροφών. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, μια πρόσφατη μελέτη [329] πρότεινε μια νέα τεχνική αποφυγής εμποδίων που χρησιμοποιεί ένα quadtree και μια συνάρτηση κόστους για να δημιουργήσει ομαλές και συνεχείς τροχιές γύρω από τα εμπόδια σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Το quadtree δημιουργείται από τα διακριτοποιημένα δεδομένα χάρτη, επιτρέποντας την ταχεία ανάκτηση των συντεταγμένων μέσα στο πλέγμα του χάρτη που αντιπροσωπεύουν τον ελεύθερο χώρο. Η συνάρτηση κόστους χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να βρεθεί μια ευνοϊκή συντεταγμένη αντικατάστασης για μη βιώσιμα σημεία τροχιάς, χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που παρέχονται από το quadtree. Αυτά τα χαοτικά μοντέλα κίνησης, που βοηθούν στον συντονισμό και στον σχεδιασμό, σε συνδυασμό με τις παραπάνω στρατηγικές ελέγχου δείχνουν να οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα. Στο επόμενο κεφάλαιο συγκρίνονται αυτά τα αποτελέσματα μεταξύ χαοτικών και τυχαίων αλγορίθμων, αλλά και χαοτικών αλγορίθμων μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 7^ο: Συγκρίσεις αλγορίθμων

7.1 Εισαγωγή

Έστω ότι δίνεται ένα σενάριο επιτήρησης μιας περιοχής. Οι αναλογίες αυτής της περιοχής, η οποία από εδώ και πέρα για αυτό το σενάριο θα αναφέρεται ως χώρος αποστολής, θα είναι γνωστές. Έστω ότι υπάρχουν αρκετά πανομοιότυπα ρομπότ που προορίζονται για την αυτόνομη παρατήρηση αυτής της περιοχής [256]. Αρκετές λύσεις για αυτό το έργο υπάρχουν, η καθεμιά από τις οποίες διαφέρει στην ποσότητα και το εύρος της επικοινωνίας. Για να ξεκινήσουμε, όλα τα ρομπότ θα μπορούσαν να συντονιστούν και να επιβλέπονται για να οδηγηθούν σε ένα βέλτιστο μοτίβο που θα καλύψει ολόκληρο τον χώρο της αποστολής. Αυτή η λύση όμως εξαρτάται από κάποιον επόπτη που θα αναλάβει το έργο του συντονισμού και έχει μεγάλη ποσότητα πληροφοριών. Οι πληροφορίες πρέπει να διαβιβαστούν στα ρομπότ και πίσω στον επόπτη, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να αντιδράσει σε περίπτωση δυσλειτουργίας του ρομπότ.

Ομοίως, ο συντονισμός θα μπορούσε επίσης να γίνει τοπικά πάνω στα ίδια τα ρομπότ, έτσι ώστε ολόκληρο το σύστημα να είναι πιο ανθεκτικό, αλλά η ποσότητα των πληροφοριών που πρέπει να μεταδοθεί παραμένει υψηλή. Παρόμοια προσέγγιση έχει γίνει και σε μικτό έργο αποστολής αναζήτησης και διάσωσης που ελέγχεται από αυτοματοποιημένους πράκτορες και ανθρώπινη παρέμβαση. Γενικά, έχουν εξεταστεί παρόμοιες αποστολές, συμπεριλαμβανομένων και αποστολών που βασίζονται σε πλήρως αυτοματοποιημένη παραγωγή τροχιάς [358].

Συνήθως η επικοινωνία σε αυτές τις περιπτώσεις είναι περιορισμένη και όσο μικρότερο είναι το εύρος επικοινωνίας και οι πληροφορίες τόσο λιγότερο ανθεκτικό γίνεται το σύστημα. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν να περιοριστεί η πληροφορία ή η εμβέλεια, έτσι ώστε τα ρομπότ να μπορούν να επικοινωνούν μόνο με γειτονικά ρομπότ. Εκτός από την επικοινωνία, ένα άλλο αντίστοιχο ζήτημα είναι η πολυπλοκότητα μιας τέτοιας αποστολής. Όσο πιο σύνθετη είναι μια αποστολή, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα της επικοινωνίας και αντίστροφα. Έστω μια αποστολή παρακολούθησης στην οποία δεν υπάρχει καμία επικοινωνία. Αυτό είναι στην πραγματικότητα μόνο θεωρητικά δυνατό, διότι χωρίς την επικοινωνία η αποφυγή σύγκρουσης δεν θα ήταν δυνατή. Από αυτό το σενάριο όμως μπορούν να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες για να χρησιμοποιηθούν τα προκύπτοντα οφέλη στις αποστολές με πρόσθετες πληροφορίες. Εν ολίγοις, οι περιορισμοί για το περιγραφόμενο σενάριο είναι: περιοχή με γνωστές αναλογίες, ισχυρή επίβλεψη με αρκετά ρομπότ, καμία επικοινωνία και καμία αποφυγή σύγκρουσης. Κατά την επίβλεψη υπονοείται ότι οι διανυόμενες τροχιές δεν είναι προβλέψιμες μακροπρόθεσμα από έναν εξωτερικό παρατηρητή.

Το έργο της μετακίνησης των ρομπότ σε διαδρομές, οι οποίες δημιουργούνται με τη χρήση ενός χαοτικού ελκυστή, έχει δοκιμαστεί αρκετές φορές. Έχουν χρησιμοποιηθεί ρομπότ με δύο τροχούς, οι τροχοί των οποίων κινούνταν κυρίως ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο από τις μεταβλητές κατάστασης του χαοτικού ελκυστή [122], [255], [260]. Το χαοτικό σύστημα χρησιμοποιείται ως πηγή για μια συγκεκριμένη τυχαία απόφαση για αυτές τις προσεγγίσεις. Αυτή η απόφαση είναι η ταχύτητα των δύο τροχών. Έστω ότι γίνεται μία προσέγγιση που περιλαμβάνει την άμεση χαρτογράφηση του χώρου αποστολής και έτσι μπορούμε να επωφεληθούμε από τις ειδικές ιδιότητες του χαοτικού ελκυστή. Με αυτό τον τρόπο οι ντετερμινιστικές τροχιές των ρομπότ είναι προβλέψιμες μέχρι το άπειρο από το εσωτερικό του συστήματος. Οι προηγούμενες προσεγγίσεις δεν μπορούν να προβλεφθούν πολύ στο μέλλον, όταν η διανυόμενη τροχιά διαταράσσεται από μικρές ανακρίβειες του ρομπότ. Η ουσία είναι η μετατροπή των τροχιών σε ένα χαοτικό ελκυστή στον χώρο αποστολής των αυτόνομων ρομπότ. Οι βασικές ιδιότητες των χαοτικών συστημάτων που οδηγούν σε αυτήν την προσέγγιση είναι η εκθετική απόκλιση και ο χωρικά περιορισμένος ελκυστής. Όταν εφαρμόζεται σε

φορητά ρομπότ, αυτό σημαίνει ότι τα ρομπότ θα εξαπλωθούν εκθετικά μέχρι να διανεμηθούν σε ολόκληρο τον χώρο της αποστολής και στη συνέχεια να συνεχίσουν να κινούνται ενώ παραμένουν διατεταγμένα στον χώρο αποστολής.

7.2 Σύγκριση χαοτικού και τυχαίων αλγορίθμων

Όπως διατυπώθηκε [256] η μη γραμμική χαοτική συμπεριφορά για την παραγωγή τροχιάς για κινούμενα ρομπότ είναι ευεργετική σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις λόγω της **μη προβλεψιμότητας από έναν εξωτερικό παρατηρητή**. Ταυτόχρονα, είναι **προβλέψιμη για το ίδιο το σύστημα**, επειδή η κατάσταση του συστήματος είναι γνωστή με ακρίβεια. Αυτή η μη προβλεψιμότητα προέρχεται από τη χαοτική, μη γραμμική φύση του συστήματος. Εναλλακτικά, μια παρόμοια ή χαμηλότερη προβλεψιμότητα μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τυχαίες στρατηγικές. Ως εκ τούτου, επιλέχθηκαν μόνο τυχαίες κινήσεις. Οι σχεδιασμένες διαδρομές δεν επιλέχθηκαν σκόπιμα επειδή, εκτός από το ότι είναι πιο προβλέψιμες, θα ήταν επίσης λιγότερο ανθεκτικές για πολλά ρομπότ λόγω της έλλειψης επικοινωνίας.

Για να αξιολογηθεί η παραπάνω προσέγγιση, δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικές απλές τυχαίες στρατηγικές για τις τροχιές.

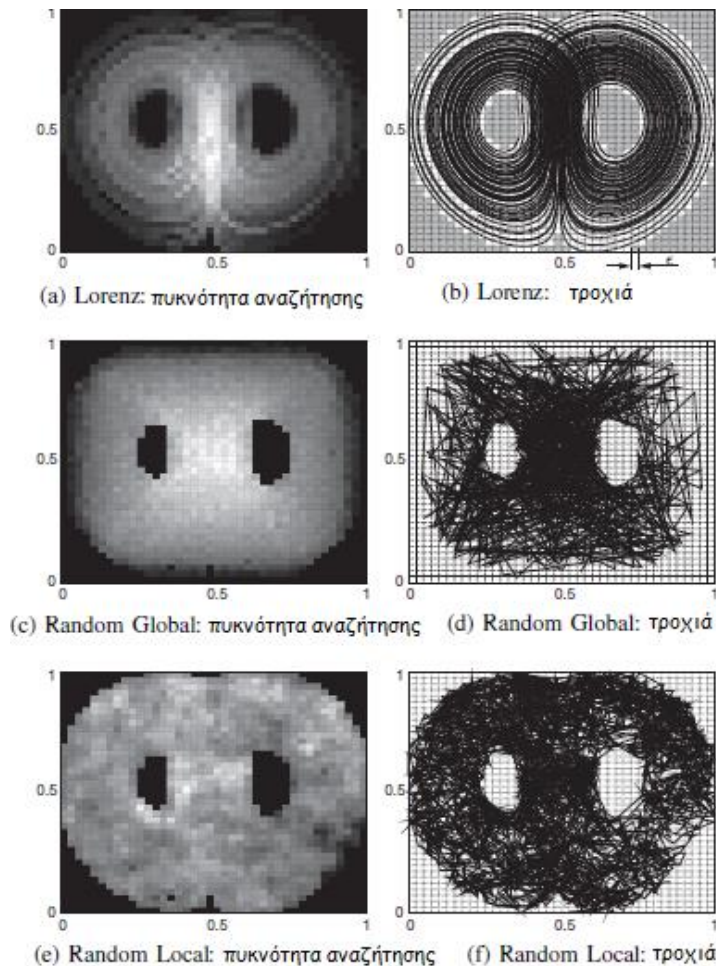
1) global random κίνηση: Τυχαία δημιουργημένα σημεία στο χώρο της αποστολής αποδίδονται σε κάθε ένα από τα ρομπότ. Σε κάθε ρομπότ που φτάνει σε αυτό το σημείο, ανατίθεται το επόμενο τυχαίο σημείο στο χώρο της αποστολής [256].

2) local random κίνηση: Κάθε ρομπότ κινείται κατά ένα βήμα σε μια αυθαίρετη κατεύθυνση, στη συνέχεια η κατεύθυνση τυχαιοποιείται και το ρομπότ ξανά κινείται κατά ένα βήμα [256].

Αυτοί οι δύο αλγόριθμοι επαναλαμβάνονται συνεχώς. Εάν η υπολογισμένη τροχιά διασχίζει το όριο του χώρου της αποστολής σε ένα βήμα, ο αλγόριθμος δημιουργεί ένα νέο σημείο προορισμού ή μια κατεύθυνση και συνεχίζει.

Η local random κίνηση απλοποιήθηκε [256] σε σύγκριση με τις προαναφερθείσες προηγούμενες χαοτικές στρατηγικές. Στις προηγούμενες στρατηγικές η μελλοντική κατεύθυνση αναζήτησης καθορίζεται από τη διαφορά των ταχυτήτων των τροχών. Η αλλαγή κατεύθυνσης δεν είναι τόσο μεγάλη όσο στην απλοποιημένη έκδοση, επειδή στη local random κίνηση σε κάθε βήμα η επόμενη κατεύθυνση είναι τυχαία. Έτσι, για τις προηγούμενες προσεγγίσεις, οι συνεχείς αλλαγές ταχύτητας οδηγούν σε ομαλές τροχιές.

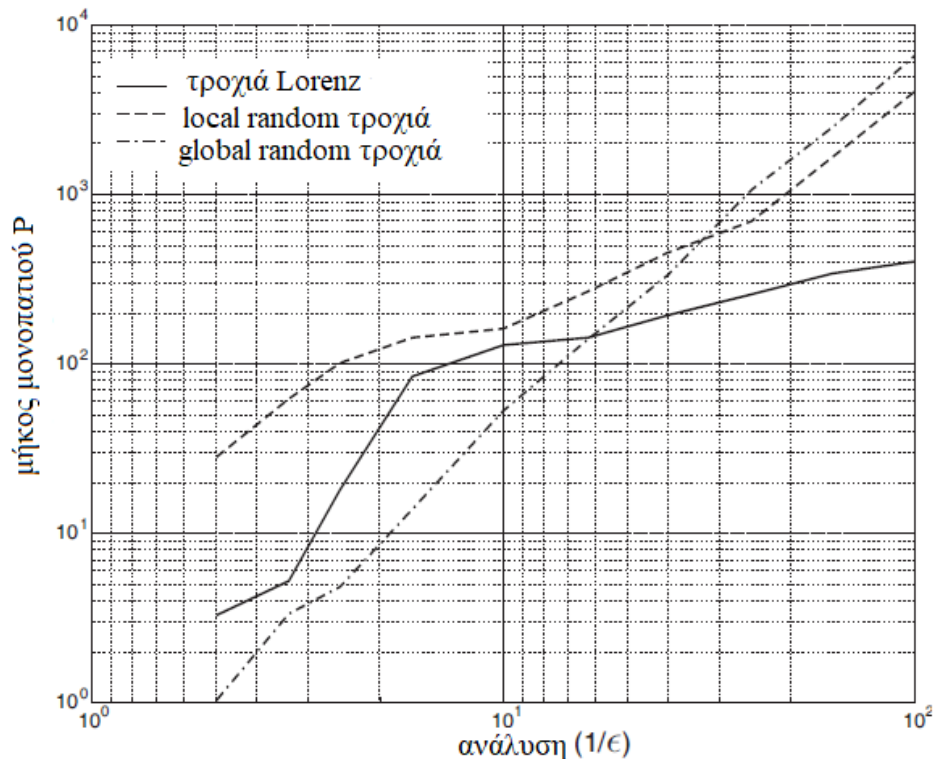
Σκοπός μιας αποστολής παρακολούθησης είναι να αναζητά συνεχώς στον χώρο της αποστολής για τυχόν αλλαγές. Έτσι, κάθε περιοχή του χώρου της αποστολής θα πρέπει να σαρώνεται κατά τη διάρκεια ενός περιορισμένου χρόνου T . Για να καθοριστεί εάν μια περιοχή έχει σαρωθεί, ο χώρος αποστολής διαχωρίζεται σε ένα πλέγμα με μέγεθος κελιού ϵ . Ένα κελί έχει σαρωθεί εάν η τροχιά εισέρχεται στο κελί [256]. Ο χώρος αποστολής για συγκεκριμένη διακριτοποίηση εμφανίζεται στο σχήμα 7.1. Όλα εκτός από την γκριζα περιοχή αντιπροσωπεύουν τον χώρο αποστολής. Στους υπολογισμούς για τον προσδιορισμό του χώρου αποστολής, το χαοτικό σύστημα πρέπει να προσομοιωθεί για επαρκή χρονική περίοδο για να επιβεβαιωθεί ότι βρίσκονται τα όρια του ελκυστή. Ο χώρος αποστολής κανονικοποιείται με ύψος και πλάτος 1. Το μέγεθος βήματος της local random στρατηγικής είναι 0.05.



Σχήμα 7.1: Αριστερά: Εμφανίζεται ο αριθμός των επισκέψεων ανά κελί στο πλέγμα, όταν σε κάθε κελί έχει γίνει επίσκεψη τουλάχιστον μία φορά. Δεξιά: Οι αντίστοιχες τροχιές για τις διάφορες στρατηγικές. Για τυχαίες στρατηγικές μόνο ένα μέρος της τροχιάς σχεδιάζεται για να γίνουν τα χαρακτηριστικά της κίνησης ορατά [256].

Για τους χαοτικούς ελκυστές, η διάσταση χρόνου ή χρόνος κάλυψης του ελκυστή [359] εφαρμόζεται υποδειγματικά στον λογιστικό χάρτη. Παρόμοια με τη διάσταση συσχέτισης, ο χρόνος κάλυψης του ελκυστή είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό ενός χαοτικού ελκυστή. Μπορεί να ληφθεί για να αξιολογήσει διαφορετικούς ελκυστές ή διαφορετικές παραμέτρους ενός ελκυστή έναντι του άλλου. Με τον χρόνο κάλυψης του ελκυστή, ο χρόνος T που απαιτείται για την τροχιά για να φτάσει σε κάθε κελί της διακριτοποιημένης περιοχής του ελκυστή μετριέται ανάλογα με το μέγεθος του κελιού ϵ . Επειδή υποθέτουμε μια σταθερή ταχύτητα για τις τροχιές ενός ελκυστή χρησιμοποιείται, όχι ο χρόνος T , αλλά το μήκος διαδρομής P της τροχιάς: $T \sim P$. Για τη σύγκριση αυτών των τριών αλγορίθμων (global random, local random και κίνηση Lorenz) για ένα δεδομένο μέγεθος κελιού ϵ ένας μέσος όρος του διανύμενου μήκους μονοπατιού P υπολογίζεται για κάθε αλγόριθμο. Ένας μέσος όρος προέρχεται από 20 τροχιές με διαφορετικές αρχικές συνθήκες στον χώρο της αποστολής και στον χαοτικό ελκυστή αντίστοιχα. Ο χώρος αποστολής έχει ένα κανονικοποιημένο μέγεθος 1×1 και το μέγεθος των κελιών ποικίλλει από 0.5 έως 0.01. Οι τροχιές δημιουργούνται σε ένα συνεχή χώρο αποστολής για τις τυχαίες στρατηγικές και σε έναν συνεχή χώρο κατάστασης για την τροχιά Lorenz. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης χαοτικών συστημάτων όπως η κίνηση του Lorenz απεικονίζεται στο σχήμα 7.2, το οποίο αποκαλύπτει σαφώς ότι ένα ρομπότ αναζητά τον χώρο εργασίας

χρησιμοποιώντας αιτιοκρατικό χάος πιο γρήγορα από ό,τι όταν χρησιμοποιεί τυχαία κίνηση. Το μέσο μήκος της διανύμενης διαδρομής P για μια αυξανόμενη ανάλυση $1/\epsilon$ υποδεικνύεται για κάθε στρατηγική. Όσο πιο χαμηλή είναι η καμπύλη, τόσο καλύτερη είναι η στρατηγική, δηλαδή τόσο νωρίτερα καλύπτεται ολόκληρος ο χώρος της αποστολής. Στα δεξιά η ανάλυση αυξάνεται – το μέγεθος του κελιού ϵ μειώνεται. Για την υψηλότερη ανάλυση το μήκος της διαδρομής της χαοτικής κίνησης ισοδυναμεί με περίπου 400. Σε σύγκριση με το μήκος μονοπατιού της local random προσέγγισης, που ισοδυναμεί με περίπου 4000, αυτό είναι ένα **τεράστιο πλεονέκτημα για τη χαοτική προσέγγιση**.



Σχήμα 7.2: Το μήκος της τροχιάς P μέχρι ολόκληρος ο χώρος της αποστολής να καλυφθεί για τις τυχαίες κινήσεις και για την τροχιά Lorenz. Η το μήκος τροχιάς P μέχρι να ελεγχθεί τουλάχιστον μία φορά κάθε κελί με μέγεθος κελιού $\epsilon \in [256]$.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2, για μεγαλύτερα μεγέθη κελιών περίπου του ενός δεκάτου του χώρου της αποστολής, ο local random και η κίνηση Lorenz δείχνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την πολύ μεγάλη διαφορά στις λύσεις ως αποτέλεσμα της υψηλής εξάρτησης από το μέγεθος του πλέγματος. Σκεφτείτε, για παράδειγμα, την περίπτωση ενός πλέγματος δύο επί δύο και μιας τροχιάς local random: Από τη μία πλευρά η τροχιά μπορεί να παραμείνει πολύ καιρό σε ένα μόνο κελί και από την άλλη μπορεί να επισκεφθεί και τα τέσσερα κελιά οδηγώντας ένα μικρό τρίγωνο στο κέντρο του χώρου της αποστολής. Για ένα μεγάλο μέγεθος κελιού η global random κίνηση δείχνει τα καλύτερα αποτελέσματα, επειδή ο χώρος αποστολής καλύπτεται πιο γρήγορα.

Το αποτέλεσμα της local random κίνησης είναι αρκετά καλό και για ένα μέσο μέγεθος κελιού, λόγω της διαφοράς, μπορεί να είναι ακόμη καλύτερη από την κίνηση Lorenz. **Για πολύ μικρά μεγέθη κελιών η κίνηση Lorenz είναι καλύτερη από τις τυχαίες στρατηγικές. Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του πλέγματος, τόσο ισχυρότερα αυτό το διάγραμμα αντιπροσωπεύει τις δομικές**

δυνατότητες κάθε στρατηγικής. Με το $T \sim P$ η κλίση του P πάνω στο E από την τροχιά του Lorenz αντιστοιχεί στη χρονική διάσταση για μικρότερα μεγέθη κελιών. Από ένα μέγεθος κελιών 0.06 σε μικρότερα μεγέθη κελιών, **η κίνηση Lorenz κυριαρχεί στην κάλυψη** και οι κλίσεις και των τριών στρατηγικών διαφέρουν λιγότερο από ότι για τις χαμηλές αναλύσεις.

Οι στρατηγικές που παρουσιάζονται δεν είναι οι καλύτερες του είδους τους [256]. Για την local random κίνηση, για παράδειγμα, η λύση εξαρτάται από το μέγεθος του βήματος. Με ένα μεγάλο μέγεθος βήματος ο χώρος της αποστολής είναι γρήγορος αλλά κατά προσέγγιση καλυμμένος οδηγώντας σε μια μακρά τροχιά μέχρι να έχει γίνει επίσκεψη σε κάθε κελί. Αντίθετα, ένα μικρό μέγεθος βημάτων οδηγεί σε καλή κάλυψη, αλλά η πρόοδος είναι πολύ χαμηλή. Το μέγεθος βήματος που επιλέγεται εδώ είναι ένα μέσο μέγεθος βήματος και οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα.

7.3 Σύγκριση χαοτικών αλγορίθμων

Η διαφορά μεταξύ των χαοτικών συστημάτων μπορεί να συνοψιστεί στην πυκνότητα κάλυψής τους και την έκταση κάλυψης που σχετίζονται άμεσα με το χρόνο και το ρυθμό κάλυψής τους. Ορισμένα συστήματα, π.χ. το σύστημα Lorenz [330], τείνουν να παράγουν τοπικά πυκνές τροχιές και δυσκολεύονται να επεκτείνουν τις διαδρομές τους σε καθολικό επίπεδο, ιδιαίτερα σε μεγάλα περιβάλλοντα. Έτσι, οι χαοτικοί CPP που χρησιμοποιούν το σύστημα Lorenz τείνουν να έχουν σχετικά υψηλούς χρόνους κάλυψης. Άλλα συστήματα, π.χ. το σύστημα Arnold [328], μπορούν να επεκτείνουν καλύτερα τις διαδρομές τους σε απομακρυσμένες περιοχές και να δημιουργήσουν λιγότερο πυκνές τροχιές.

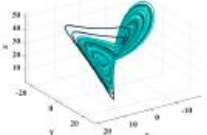
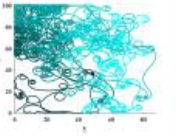
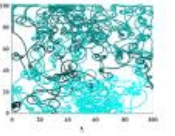
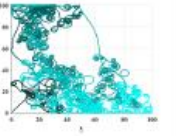
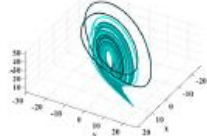
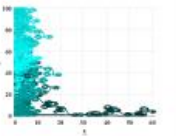
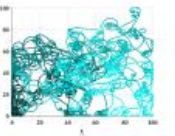
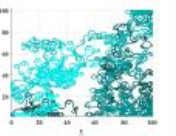
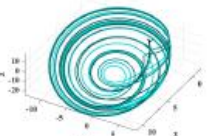
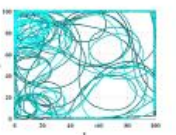
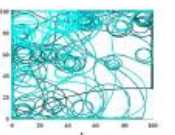
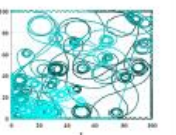
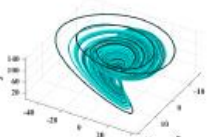
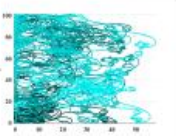
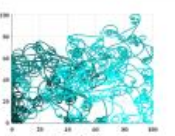
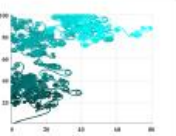
Το επίπεδο της τυχειότητας σε τροχιές είναι ένας άλλος παράγοντας για τους χαοτικούς σχεδιαστές διαδρομών. Για να διασφαλιστεί ότι οι παραγόμενες τροχιές παρουσιάζουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά μιας τυχαίας αλληλουχίας, ορισμένες μελέτες [172], [340], [360-363] έχουν σχεδιάσει γεννήτριες ψευδο-τυχαίου bit (PRBGs) που βασίζονται σε διακριτά συστήματα όπως ο Logistic map. Αυτές οι PRBGs παράγουν τυχαίες ακολουθίες που περνούν διάφορες δοκιμές τυχειότητας και χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να δημιουργήσουν εντολές κίνησης σε διακριτές κατευθύνσεις.

Ορισμένες βιβλιογραφίες χαοτικού σχεδιασμού διαδρομών [253] και [254] παρουσιάζουν συγκρίσεις με γνωστές χαοτικές εξισώσεις. Οι συγκρίσεις αυτές διεξάγονται για να καθοριστούν οι εξισώσεις που είναι καλύτερα εφαρμοσμένες σε διάφορες συνθήκες δοκιμών κρίνοντας από το ποσοστό κάλυψής τους. Οι χαοτικές εξισώσεις προσομοιώνονται με παραμέτρους που επιλέγονται προσεκτικά για να παράγουν την καλύτερη δυνατή κάλυψη. Η αναφορά [253] παρουσιάζει μια μελέτη σχετικά με την τροχιά των καθοδηγητικών σημάτων του ελκυστή Chua και του ελκυστή Arnold και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι οι τροχιές από τον ελκυστή Chua καλύπτουν περισσότερες περιοχές από ότι εκείνη του ελκυστή Arnold. Η αναφορά [262] συγκρίνει το κύκλωμα Chua, την εξίσωση Lorenz, και το σύστημα Volos, Kyrprianidis και Stouboulos (VKS) [364] για τα ποσοστά κάλυψής τους. Τα αποτελέσματα από την [262] δείχνουν ότι το VKS έχει καλύτερο ποσοστό κάλυψης λόγω της φύσης των χαοτικών double-scroll ελκυστών που παράγονται από το VKS. Μέχρι σήμερα, το ποσοστό κάλυψης έχει παραμείνει ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο κριτήριο για τον προσδιορισμό της επιλογής των χαοτικών εξισώσεων για τους χαοτικούς σχεδιαστές διαδρομών, αν και η επιλογή εξακολουθεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υλοποίηση της εργασίας και του αλγορίθμου. Για παράδειγμα, αν η εργασία είναι να μετακινηθεί το ρομπότ μεταξύ δύο συγκεκριμένων σημείων χρησιμοποιώντας μια άμεση αλλά απρόβλεπτη διαδρομή, ο Henon map ή ο Logistic map έχουν αποδειχθεί ότι είναι καλά χαοτικά συστήματα για αυτές τις εργασίες [328], [330]. Εναλλακτικά, εάν η εργασία είναι να διερευνήσει εντελώς μια περιοχή, οι σχεδιαστές θα πρέπει να εξετάσουν τις απαιτήσεις μιας εργασίας κάλυψης, όπως η πυκνότητα κάλυψης και το εύρος της κάλυψης. Ορισμένα συστήματα όπως το Lorenz δημιουργούν σημεία με υψηλότερη πυκνότητα, αλλά δυσκολεύονται να επεκτείνουν τα

μονοπάτια σε απομακρυσμένες περιοχές, οπότε μπορεί να μην είναι αποτελεσματικά όσον αφορά το χρόνο κάλυψης για την κάλυψη ενός μεγάλου περιβάλλοντος, εκτός αν χρησιμοποιήσουμε κάποιες τεχνικές ελέγχου χάους.

Η τεχνική mirror mapping συνήθως χρησιμοποιείται για να κρατήσει το ρομπότ περιορισμένο στην περιοχή ενδιαφέροντος και να αποτρέψει την έξοδό του. Τα χαοτικά συστήματα αποδείχθηκαν χρήσιμα για τα ρομπότ επιτήρησης. Τέσσερα διαφορετικά χαοτικά συστήματα (Lorenz, Chen, Arneodo, και Liu), το καθένα με τρεις καταστάσεις, χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της γωνίας κίνησης του ρομπότ [349]. Οι επιδόσεις τους συγκρίθηκαν σε σχέση με την ταχύτερη κάλυψη εδάφους. Προσομοιάζοντας τις διαδρομές όλων των συστημάτων ξεκινώντας από την ίδια αρχική θέση, ο Arneodo έδωσε τον υψηλότερο δείκτη απόδοσης όταν χρησιμοποιούσε το X για τον έλεγχο της γωνίας. Όταν χρησιμοποιείται το Y, ο Lorenz έδωσε τον υψηλότερο δείκτη απόδοσης. Όταν χρησιμοποιήθηκε το Z, ο Chen έδωσε τον υψηλότερο δείκτη απόδοσης. Συγκρίνοντας αυτά τα τρία συστήματα, ο Lorenz ήταν ο καλύτερος όταν χρησιμοποιούσε το Y ως γωνία του ελεγκτή.

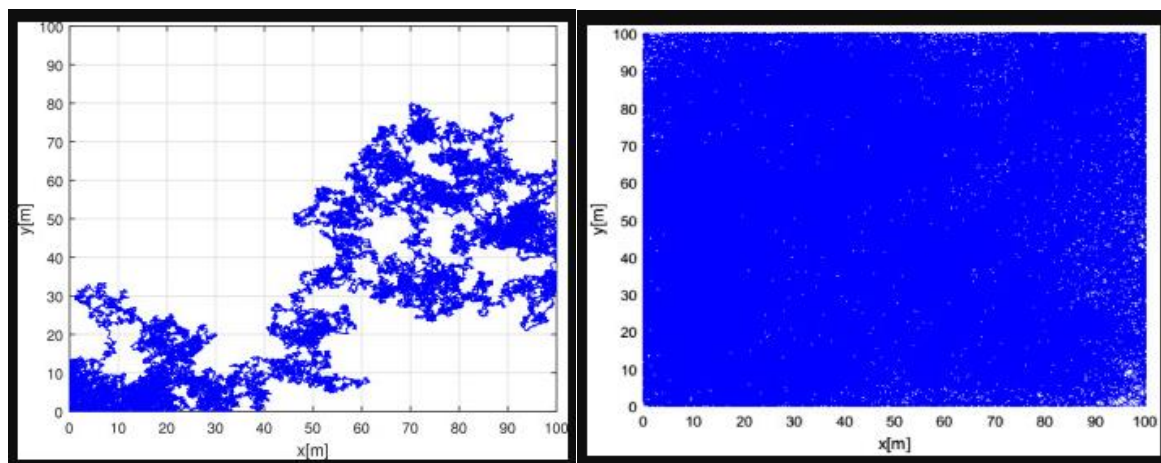
Πίνακας 7.1: Ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων χαοτικών συστημάτων και οι ληφθείσες τροχιές [349]

Σύστημα	Εξισώσεις	ΕΛΚΥΣΤΗΣ	Τροχιά		
			$\theta=X$	$\theta=Y$	$\theta=Z$
Lorenz	$\begin{aligned}\dot{X} &= -10X + 10Y, \\ \dot{Y} &= 28X - Y - XZ, \\ \dot{Z} &= -\frac{8}{3}X + XY.\end{aligned}$ $(X_0, Y_0, Z_0) = (1.0, 1), h=0.01.$				
Chen	$\begin{aligned}\dot{X} &= 35(Y - X), \\ \dot{Y} &= -7X + 28Y - XZ, \\ \dot{Z} &= -bZ + XY.\end{aligned}$ $(X_0, Y_0, Z_0) = (0.01, 0.01, 3), h=0.001.$				
Arneodo	$\begin{aligned}\dot{X} &= Y, \\ \dot{Y} &= Z, \\ \dot{Z} &= 7.5X - 3.8Y - Z - X^2.\end{aligned}$ $(X_0, Y_0, Z_0) = (-0.2, 0.5, 0.2), h=0.005.$				
Liu	$\begin{aligned}\dot{X} &= 10(Y - X), \\ \dot{Y} &= 40X - XZ, \\ \dot{Z} &= -2.5Z + 4X^2.\end{aligned}$ $(X_0, Y_0, Z_0) = (0.2, 0, 0.5), h=0.005$				

7.4 Σύγκριση double-scroll και multi-scroll χαοτικών συστημάτων

Για να δούμε την αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης που βασίζεται στο σύστημα multi-scroll Chua, θα συγκριθεί αυτό το σύστημα με το κλασικό σύστημα double-scroll Chua. Οι παράμετροι προσομοίωσης και οι αρχικές συνθήκες επιλέγονται ως εξής: Ο συνολικός χρόνος επαναλήψεων $N = 80.000$, οι αρχικές συνθήκες των χαοτικών μεταβλητών $(X_0, Y_0, Z_0) = (1, 0, 1)$, το σημείο εκκίνησης του κινητού ρομπότ $(x_0, y_0) = (0, 0)$ και το χρησιμοποιούμενο βήμα ενσωμάτωσης $h = 0,1$.

Σημειώνεται ότι τα συστήματα double-scroll και multi-scroll Chua δοκιμάζονται στον ίδιο χρόνο προσομοίωσης. Το σχήμα 7.3 δείχνει την τροχιά κάλυψης του χαοτικού ρομπότ χρησιμοποιώντας τα χαοτικά συστήματα double-scroll και multi-scroll.



Σχήμα 7.3. Αριστερά: Διαδρομή κάλυψης του ρομπότ χρησιμοποιώντας το χαοτικό σύστημα double-scroll Chua σε χώρο εργασίας $100\text{ m} \times 100\text{ m}$. Δεξιά: Διαδρομή κάλυψης του ρομπότ χρησιμοποιώντας το χαοτικό σύστημα multi-scroll Chua σε χώρο εργασίας $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ [160].

Ο πίνακας 7.2 παρουσιάζει το ποσοστό κάλυψης για τα δύο χαοτικά συστήματα. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο προτεινόμενων χαοτικών συστημάτων, απεικονίζονται στο σχήμα 7.3. Σε αυτό το σχήμα παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις της ρομποτικής τροχιάς κάθε χαοτικού συστήματος. Επιπλέον, στον πίνακα 7.2 συγκρίνεται η κάλυψη εδάφους ή το ποσοστό κάλυψης (C) για τα δύο δυναμικά συστήματα.

Όπως φαίνεται, το σύστημα double-scroll Chua εμφανίζει μια μικρότερη τιμή του ποσοστού κάλυψης ($C = 31.42\%$) σε σύγκριση με το άλλο σύστημα. Το multi-scroll χαοτικό σύστημα εμφανίζει μια σημαντικά υψηλότερη τιμή του ποσοστού κάλυψης. Ως αποτέλεσμα, από τα δύο προτεινόμενα χαοτικά συστήματα, το multi-scroll χαοτικό σύστημα έχει καλύτερα αποτελέσματα ή απόδοση, η οποία είναι εμφανής στο σχήμα 7.3, όπου $89,86\%$ του χώρου εργασίας καλύπτεται από το κινούμενο ρομπότ. Αυτό συμβαίνει επειδή το multi-scroll χαοτικό σύστημα παράγει μια τροχιά για το κινούμενο ρομπότ χωρίς πλεονασμό.

Πίνακας 7.2. Ποσοστό κάλυψης για κάθε σύστημα [160].

Σχήματα	Χαοτικά Συστήματα	$C(\%)$
Σχήμα 7.3 (αριστερά)	Double-scroll Chua	31.42
Σχήμα 7.3 (δεξιά)	Multi-scroll Chua	89.86

7.5 Επίλογος

Εξετάζοντας τις χαοτικές τροχιές για κινούμενα ρομπότ που εκτελούν ένα έργο επίβλεψης προκύπτει ότι έχουν εντυπωσιακά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις. Κατά συνέπεια, το σύστημα είναι εξαιρετικά ανθεκτικό έναντι της αποτυχίας λαμβάνοντας υπόψη μια

ομάδα πολλών ρομπότ. Δεν είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί ο αριθμός των διαθέσιμων ρομπότ, επειδή χάρη στα χαρακτηριστικά ενός χαοτικού ελκυστή διατηρείται μια σχεδόν σταθερή μέση απόσταση. Αυτή η ιδιότητα και ένας χαμηλός ορίζοντας πρόβλεψης είναι τα πλεονεκτήματα έναντι συστηματικών προσεγγίσεων. **Οι συστηματικές προσεγγίσεις μπορούν να καλύψουν ένα συγκεκριμένο χώρο αποστολής σε μικρότερο χρονικό διάστημα, αλλά είναι λιγότερο ισχυρές χωρίς επικοινωνία.** Από την άλλη πλευρά, **τυχαίες στρατηγικές με ακόμη χαμηλότερη προβλεψιμότητα χρειάζονται ένα αξιοσημείωτα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να καλύψουν τον καθορισμένο χώρο αποστολής για λεπτομερέστερες διακριτοποιήσεις.** Κάνοντας χρήση του χρόνου κάλυψης του ελκυστή για την αξιολόγηση του πόσο γρήγορα οι διαφορετικές στρατηγικές καλύπτουν μια καθορισμένη περιοχή για αυξανόμενες αναλύσεις οδηγούμαστε σε έναν αριθμό ταξινόμησης για τη σύγκριση στρατηγικών. Οι παρόντες περιορισμοί περιορίζουν τη γενική εφαρμογή αυτής της προσέγγισης, γεγονός που απαιτεί μελλοντική επέκταση έτσι ώστε ο χώρος αποστολής να μην περιορίζεται στον ελκυστή [256].

Κεφάλαιο 8^ο: Οι μόνιμοι περιορισμοί του χαοτικού σχεδιασμού διαδρομής και των μελλοντικών εργασιών

8.1 Εισαγωγή

Ένας από τους πολλούς λόγους που κάνουν το χαοτικό σχεδιασμό διαδρομής να αξίζει να μελετηθεί είναι οι πιθανές λύσεις που μπορεί να προσφέρει σε αμέτρητα προβλήματα ρομποτικής μηχανικής που απαιτούν μη προβλεψιμότητα και αυτονομία. Οι χαοτικές εξισώσεις παρέχουν το χαρακτηριστικό της μη προβλεψιμότητας από τη φύση τους, αλλά η αυτονομία για τα χαοτικά συστήματα CPP έχει συζητηθεί σπάνια στη σχετική βιβλιογραφία. Σε ορισμένες εφαρμογές, υπάρχει ανάγκη για παρέμβαση ενός ανθρώπινου χειριστή, η οποία υπονομεύει την ικανότητα του ρομπότ να επιτύχει πλήρη αυτονομία. Επιπλέον, αν και η περιοχή κάλυψης συζητείται συχνά στην χαοτική βιβλιογραφία και υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που δημιουργήθηκαν για να χειριστούν και να αυξήσουν την περιοχή που καλύπτεται από το ρομπότ, υπάρχουν συγκριτικά λιγότερες μελέτες που συζητούν το χρόνο κάλυψης, δηλαδή το χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη αυτής της κάλυψης. Κατά συνέπεια, η αυτονομία και ο χρόνος κάλυψης του χαοτικά κινούμενου ρομπότ είναι πτυχές του σχεδιασμού διαδρομών που θέτουν τους μεγαλύτερους περιορισμούς στο σχεδιασμό χαοτικής διαδρομής, όπως συζητείται στα ακόλουθα υποκεφάλαια.

8.2 Αυτονομία και πραγματικές εφαρμογές

Σε εξαιρετικά πολύπλοκες εφαρμογές του χαοτικού σχεδιασμού διαδρομών, όπως ορισμένες στρατιωτικές εφαρμογές, υπάρχει ανάγκη τα ρομπότ να είναι εξαιρετικά αυτόνομα και ευφυή. Αυτό συνεπάγεται την ικανότητα ενός ρομπότ να πλοηγείται σε ένα περιβάλλον χωρίς να χρειάζεται την επιρροή ενός ανθρώπινου χειριστή. Σε μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας χαοτικού σχεδιασμού διαδρομών, η αυτονομία του ρομπότ σπάνια λαμβάνεται υπόψη. Επιπλέον, οι μέθοδοι χειρισμού του χάους [365]-[370] που χρησιμοποιούνται από ορισμένες μελέτες προκαλούν μείωση του επιπέδου αυτονομίας του ρομπότ. Για παράδειγμα, οι μέθοδοι χειρισμού του χάους που χρησιμοποιούνται από την [332] κατέστησαν απαραίτητο τον υπολογισμό των σημείων ενδιαφέροντος για να διευκολυνθεί η πλοήγηση του ρομπότ. Επίσης χρειάστηκε ένας άνθρωπος ελεγκτής να δημιουργεί ένα χρονοδιάγραμμα του χρόνου που το ρομπότ πρέπει να περάσει σε κάθε κελί για να είναι πλήρως λειτουργικός ο αλγόριθμος. Ένα πλήρως αυτόνομο μηχάνημα συνεπάγεται ότι το ρομπότ μπορεί να λύσει προβλήματα που συναντώνται κατά τη διάρκεια της πλοήγησης χωρίς την παρουσία ενός ανθρώπινου χειριστή. Τα ημι-αυτόνομα ρομπότ είναι σε μεγάλο βαθμό ανίκανα να χειριστούν τις αβέβαιες καταστάσεις της πραγματικής ζωής.

Η διασφάλιση της αυτονομίας και των επιθυμητών επιδόσεων θα απαιτούσε την εφαρμογή των χαοτικών μεθόδων σε φυσικά κινούμενα ρομπότ ή αεροσκάφη και σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα, κάτι που σπάνια έχει γίνει στη βιβλιογραφία. Οι μελέτες έχουν περιοριστεί κυρίως στην εξέταση των χαοτικών αλγορίθμων σε προσομοιωμένα περιβάλλοντα χρησιμοποιώντας απλά διαφορικά ρομπότ με τροχούς. Η χρήση πραγματικών ρομπότ και αισθητήρων για χαοτική κάλυψη θα απαιτήσει τη διαμόρφωση μιας πιο εξελιγμένης προσέγγισης αποφυγής εμποδίων, δεδομένου ότι η χρήση της τρέχουσας κοινής τεχνικής *mirror mapping* προκαλεί αιχμηρές γωνίες στις διαδρομές κοντά στα όρια/εμπόδια που μπορεί να είναι δύσκολο να ακολουθήσει ένα φυσικό ρομπότ. Επιπλέον, η εστίαση της βιβλιογραφίας ήταν μέχρι στιγμής στην αποφυγή στατικών εμποδίων μέσα σε ένα περιβάλλον με γνωστό χάρτη. Περισσότερη έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί σε περιβάλλοντα με δυναμικά εμπόδια και άγνωστους χάρτες, ιδίως όταν αναπτύσσονται νέες τεχνικές αποφυγής εμποδίων.

Υπάρχουν επίσης πρόσθετες προκλήσεις στις πραγματικές εφαρμογές, όπως η προσομοίωση των συνεχών χαοτικών συστημάτων που συζητούνται στο κεφάλαιο 6. Καθώς τα συστήματα είναι χαοτικά, η εξέλιξη του συστήματος με την πάροδο του χρόνου πρέπει να επιλυθεί αριθμητικά, γεγονός που οδηγεί σε χαοτική υποβάθμιση [372]. Η χαοτική υποβάθμιση είναι η αύξηση σε σφάλμα της προσομοιωμένης τροχιάς σε ένα χαοτικό δυναμικό σύστημα αληθινής τροχιάς δεδομένης οποιασδήποτε αρχικής κατάστασης. Αυτό είναι αναπόφευκτο λόγω των αριθμητικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται και της χαοτικής φύσης του συστήματος με θετικό MLE. Το μέγεθος του σφάλματος της τροχιάς εξαρτάται από την επιλογή του χαοτικού συστήματος, το αριθμητικό σχήμα και το επιλεγμένο χρονικό βήμα. Δεδομένων των προδιαγραφών της εκάστοτε ρομποτικής πλατφόρμας, αυτό μπορεί να περιορίσει τις επιλογές που είναι διαθέσιμες στο σχεδιαστή του συστήματος, αλλά η επιρροή της χαοτικής υποβάθμισης εξαρτάται τελικά από το έργο που αναλαμβάνεται.

8.3 Χρόνος κάλυψης

Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο για την ανάλυση του χαοτικού σχεδιασμού διαδρομών είναι ο χρόνος κάλυψης που έχει παραμεληθεί στην χαοτική βιβλιογραφία. Ίδανικά, μια χαοτική μέθοδος σχεδιασμού διαδρομής μπορεί να επιτύχει πλήρη κάλυψη εάν της επιτρέπεται να τρέχει απεριόριστα. Ωστόσο, είναι παράλογο να αναμένουμε ή να επιθυμούμε ένα απεριόριστο χρονικό διάστημα για να καλυφθεί το περιβάλλον από το ρομπότ σε εφαρμογές σχεδιασμού διαδρομής πραγματικής ζωής. Συνεπώς, ο χρόνος κάλυψης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη επιπρόσθετα των εκτιμήσεων για την κάλυψη οποιασδήποτε περιοχής στο περιβάλλον. Τα πολύ λίγα έγγραφα χαοτικού σχεδιασμού διαδρομής που συζητούν το χρόνο κάλυψης εμφανίζουν αποτελέσματα που μπορεί να μην είναι πρακτικά σε πραγματικές εφαρμογές. Στην [122], [252], χρειάζονται περισσότερες από δύο ώρες για να επιτύχει το ρομπότ αυτό που παρουσιάζεται ως πλήρης κάλυψη ενός χώρου $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ όταν κινείται με ταχύτητα 1 μέτρο το δευτερόλεπτο σε ένα χαοτικό μονοπάτι. Η επαναλαμβανόμενη κάλυψη είναι ένας από τους παράγοντες που συμβάλλουν στον κακό χρόνο κάλυψης. Τα αποτελέσματα της [265] δείχνουν ότι το ρομπότ έχει καλύψει μερικά κελιά 18 φορές, ενώ υπάρχουν κελιά που παραμένουν ανέγγιχτα. Μόνο πρόσφατα [328], [330] δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο χρόνο κάλυψης και αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την ενίσχυσή του, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με το χρόνο που λαμβάνει ένας βέλτιστος απλός αλγόριθμος σχεδίασης για να καλύψει το ίδιο περιβάλλον. Πολλές προηγούμενες εργασίες έχουν επικεντρωθεί σε προσομοιωμένα περιβάλλοντα, ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζουν ότι απαιτείται περισσότερη έρευνα και εξερεύνηση στην ενίσχυση των εφαρμογών του πραγματικού κόσμου και περαιτέρω μείωση του χρόνου κάλυψης. Η χρήση προηγμένων μεθόδων αποφυγής εμποδίων φαίνεται να είναι η πιο πρακτική οδός προόδου προς την επίτευξη αυτού του στόχου, καθώς οι προηγμένες μέθοδοι θα μειώσουν την επαναλαμβανόμενη κάλυψη κοντά στα εμπόδια ή τα όρια.

8.4 Επίλογος- Μελλοντικές εργασίες

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να δώσει προτεραιότητα στην ενίσχυση της πραγματικής εφαρμογής και της απόδοσης των αλγορίθμων χαοτικού σχεδιασμού διαδρομών και στην περαιτέρω ενσωμάτωσή τους σε φυσικά ρομποτικά συστήματα. Αυτό συνεπάγεται την αντιμετώπιση των περιορισμών του πραγματικού κόσμου, όπως περιορισμοί χρόνου, περιορισμοί της εμβέλειας ανίχνευσης και της κίνησης των οχημάτων. Επιπλέον, θα πρέπει να περιλαμβάνει την ανάπτυξη μεθόδων για γρήγορο υπολογισμό σε πραγματικό χρόνο των αισθητηριακών δεδομένων και τη λήψη άμεσων αποφάσεων ανάλογα με τις παραμέτρους και τις προδιαγραφές του συστήματος.

Η ενσωμάτωση της μηχανικής μάθησης (machine learning: ML) στους αλγόριθμους CPP μπορεί να διευκολύνει εφαρμογές της πραγματικής ζωής μέσω της βελτίωσης της απόδοσης σε διάφορες πτυχές. Αυτές περιλαμβάνουν τη βελτίωση της ομοιομορφίας κάλυψης, τη μείωση του χρόνου κάλυψης, την αύξηση του ποσοστού κάλυψης, την ενίσχυση της προσαρμοστικότητας σε άγνωστα ακανόνιστα περιβάλλοντα και τη διασφάλιση της επεκτασιμότητας (scalability) σε χάρτες διαφορετικών μεγεθών και σχημάτων. Ένας ελπιδοφόρος τομέας εφαρμογής είναι η χρήση της ML για καθοδήγηση των αλγορίθμων CPP στην επιλογή κατάλληλων χαοτικών συστημάτων ή συνδυασμών τους και τον προσδιορισμό βέλτιστων παραμέτρων με βάση τις απαιτήσεις κάθε εργασίας και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά. Αυτό βοηθά στην επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού κάλυψης, του επιθυμητού χρόνου ή του επιθυμητού επιπέδου μη προβλεψιμότητας. Αυτοί οι αλγόριθμοι ML μπορούν επίσης να εκπαιδευτούν για να προβλέψουν τις βέλτιστες παραμέτρους του συστήματος και να δημιουργήσουν μια ισορροπία μεταξύ της συνολικής απόδοσης κάλυψης και του επιπέδου της μη προβλεψιμότητας των τροχιών. Οι αλγόριθμοι ενίσχυσης μάθησης (reinforcement learning: RL) προσφέρουν ένα μέσο για τη βελτίωση της απόδοσης σε πραγματικό χρόνο των χαοτικών πρακτόρων. Ο RL μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκπαιδεύσει τους πράκτορες, επιτρέποντάς τους να πλοηγηθούν ομαλά σε ακανόνιστα περιβάλλοντα διατηρώντας ταυτόχρονα την κινηματική απόδοση και τον μετριασμό των διαταραχών σε χαοτικές διαδρομές καθώς και τη διατήρηση της ομαλότητάς τους παρουσία τόσο στατικών όσο και δυναμικών εμποδίων. Ο RL μπορεί επίσης να επιτρέψει στους πράκτορες να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις παραμέτρους του συστήματος για καλύτερο διασκορπισμό των σημείων τροχιάς.

Κεφάλαιο 9^ο: Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία έχουν παρουσιαστεί εφαρμογές της θεωρίας του χάους στη ρομποτική. Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν τη θεωρία του χάους για να κατανοήσουν τις βασικές αρχές που διέπουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του ρομπότ, της εργασίας που έχει να επιτελέσει και του περιβάλλοντός του. Εκτός από τους εκθέτες Lyapunov και τις διαστάσεις fractal, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και άλλοι ποσοτικοποιητές για την ανάλυση, οι οποίοι θα διευρύνουν την κατανόησή μας για τη δυναμική των ρομπότ. Η νοημοσύνη σμήνους (SI) έχει αναδειχθεί ως ένα διεπιστημονικό ερευνητικό πεδίο για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς. Οι υβριδικοί χαοτικοί αλγόριθμοι θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό κινήσεων των αυτόνομων πρακτόρων. Οι εφαρμογές της χαοτικής δυναμικής θα δημιουργήσουν αποτελεσματικές τεχνικές σχεδιασμού κινήσεων για κινούμενα ρομπότ.

Ο απλός πρωταρχικός στόχος της έρευνας πάνω στο σχεδιασμό χαοτικής διαδρομής με σκοπό την κάλυψη κάποιας περιοχής είναι να δημιουργηθεί ένα χαοτικό σύστημα αυτόνομα κινούμενου ρομπότ που μπορεί να καλύψει πλήρως οποιοδήποτε περιβάλλον που περιέχει στατικά ή/και δυναμικά εμπόδια κάτω από ένα δεδομένο ρεαλιστικό χρονικό περιορισμό λειτουργίας. Το χάος έχει μια μοναδική δύναμη στη δημιουργία απρόβλεπτου και ταυτόχρονα ντετερμινιστικού σχεδιασμού διαδρομής, ο οποίος θα ήταν αλλιώς αδύνατος χρησιμοποιώντας άλλους τύπους μεθόδων σχεδίασης διαδρομών. Έχοντας μελετήσει την έρευνα που έγινε σε αρκετές χαοτικές εξισώσεις, συμπεριλαμβανομένων των Arnold, Lorenz, Chen, κ.λπ., μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν υπήρξε μεγάλη πρόοδος στη χρήση αυτών των χαοτικών δυναμικών συστημάτων για ένα πραγματικό ρομπότ που αναλαμβάνει μια εργασία κάλυψης. Αν και ο χειρισμός αυτών των χαοτικών συστημάτων οδηγεί συχνά σε ευνοϊκά αποτελέσματα κάλυψης, π.χ. στον τριγωνομετρικό μετασχηματισμό των χαρτών Chebyshev, είναι δύσκολο να συμπεράνουμε ότι αυτά τα ευνοϊκά αποτελέσματα μπορούν να έχουν ρεαλιστική εφαρμογή σε ρομποτικές εφαρμογές της πραγματικής ζωής επειδή δεν αξιολογήθηκαν βάσει πραγματικών περιορισμών, όπως ορίων χρόνου, εύρους αισθητήρων και περιορισμών κίνησης των οχημάτων. Αυτό φωτίζει ένα τεράστιο ερευνητικό κενό που πρέπει να διερευνηθεί σε μεγαλύτερο βάθος. Επιπλέον, δεδομένου ότι τα πολλά ρομπότ προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία σε πραγματικές εφαρμογές χαοτικής κάλυψης και ανάθεσης καθηκόντων, πρέπει να γίνουν περισσότερες δοκιμές και έρευνα στην εφαρμογή οποιασδήποτε προόδου έχει επιτευχθεί στο σχεδιασμό χαοτικών διαδρομών με συστήματα πολλών ρομπότ. Για το σκοπό αυτό, ο πλήρως αυτόνομος χαοτικός σχεδιασμός διαδρομών απαιτεί περισσότερη έρευνα για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την αυτονομία και το χρόνο κάλυψης. Η υλοποίηση έξυπνων χαοτικών ρομπότ θα επιτρέψει την αποτελεσματική κάλυψη εντελώς άγνωστων και αβέβαιων περιβαλλόντων, που είναι επιθυμητή σε πολλές εφαρμογές της πραγματικής ζωής, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν αντιμαχόμενους (adversarial) πράκτορες (πράκτορες που εργάζονται για έναν κοινό στόχο σε ανταγωνιστικά περιβάλλοντα πολλών πρακτόρων).

Ο τελικός στόχος της ρομποτικής είναι η δημιουργία ευφυών αυτόνομων ρομπότ. Η θεωρία των δυναμικών συστημάτων είναι η σωστή απάντηση σε έναν δυναμικό κόσμο. Από αυτήν την ανασκόπηση των εργασιών, είναι προφανές ότι το αιτιοκρατικό χάος είναι μια μοναδική ιδέα στην επιστήμη και ένα πανταχού παρόν φαινόμενο σε διάφορους τομείς της ρομποτικής. Τα φυσικά συστήματα εμπνέουν τα συστήματα ελέγχου και τα σχήματα των ρομπότ. Επιστήμονες και μηχανικοί προσπαθούν να πραγματοποιήσουν το όνειρο δεκαετιών για ένα ευέλικτο αυτόνομα κινούμενο ρομπότ γενικής χρήσης. Η θεωρία του χάους, σε συνδυασμό με άλλες σημαντικές τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση και ο μη γραμμικός βέλτιστος έλεγχος, θα βοηθήσουν στην επίτευξη αυτού του στόχου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] F. Ahuraka, P. Mcnamee, Q. Wang, Z. N. Ahmadabadi and J. Hudack, "Chaotic Motion Planning for Mobile Robots: Progress, Challenges, and Opportunities," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 134917-134939, 2023
- [2] Lorenz, E.N., 1963, "Deterministic nonperiodic flow", *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 20, No. 2, pp. 130-141.
- [3] V. Bjerknes, *Dynamic Meteorology and Hydrography*, New York, NY, USA:Carnegie, 1910.
- [4] D. Orrell, "Role of the metric in forecast error growth: How chaotic is the weather?", *Tellus A: Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, vol. 54, no. 4, pp. 350, Jan. 2002.
- [5] E. N. Lorenz and K. Haman, "The essence of chaos", *Pure Appl. Geophysics*, vol. 147, no. 3, pp. 598-599, 1996.
- [6] J. Slingo and T. Palmer, "Uncertainty in weather and climate prediction", *Phil. Trans. Roy. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 369, no. 1956, pp. 4751-4767, 2011.
- [7] K. T. Alligood, T. D. Sauer and J. A. Yorke, *Chaos*, Cham, Switzerland:Springer, 1996.
- [8] B. B. Ferreira, A. S. de Paula and M. A. Savi, "Chaos control applied to heart rhythm dynamics", *Chaos Solitons Fractals*, vol. 44, no. 8, pp. 587-599, Aug. 2011.
- [9] C. Haigh, "Using chaos theory: The implications for nursing", *J. Adv. Nursing*, vol. 37, no. 5, pp. 462-469, Mar. 2002.
- [10] S. Ayers, "The application of chaos theory to psychology", *Theory Psychol.*, vol. 7, no. 3, pp. 373-398, Jun. 1997.
- [11] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, Cham, Switzerland:Springer, 2016.
- [12] G. Xusheng, G. Wenming and H. Jun, "Robot path planning based on genetic and chaotic optimization algorithm", *Proc. 5th Int. Conf. Comput. Automat. Power Electron. (CAPE)*, pp. 1-6, 2017.
- [13] O. Wahhab and A. Al-Araji, "Path planning and control strategy design for mobile robot based on hybrid swarm optimization algorithm", *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 565-579, Jun. 2021.
- [14] A. Ait-Saadi, Y. Meraihi, A. Soukane, S. Yahia, A. Ramdane-Cherif and A. B. Gabis, "An enhanced African vulture optimization algorithm for solving the unmanned aerial vehicles path planning problem", *Comput. Electr. Eng.*, vol. 110, Sep. 2023
- [15] J. Yu, G. Liu, J. Xu, Z. Zhao, Z. Chen, M. Yang, et al., "A hybrid multi-target path planning algorithm for unmanned cruise ship in an unknown obstacle environment", *Sensors*, vol. 22, no. 7, pp. 2429, 2022
- [16] D. V. Lyridis, "An improved ant colony optimization algorithm for unmanned surface vehicle local path planning with multi-modality constraints", *Ocean Eng.*, vol. 241, Dec. 2021
- [17] M. S. Gharajeh and H. B. Jond, "An intelligent approach for autonomous mobile robots path planning based on adaptive neuro-fuzzy inference system", *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 1, Jan. 2022
- [18] Q. Wang, J. Guo, Z. Wang, E. Tahchi, X. Wang, B. Moran, et al., "Cost-effective path planning for submarine cable network extension", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 61883-61895, 2019.

- [19] M. Xi, J. Yang, J. Wen, H. Liu, Y. Li and H. H. Song, "Comprehensive ocean information-enabled AUV path planning via reinforcement learning", *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 18, pp. 17440-17451, Sep. 2022.
- [20] Y. Ma, W. Feng, Z. Mao, H. Li and X. Meng, "Path planning of UUV based on HQPSO algorithm with considering the navigation error", *Ocean Eng.*, vol. 244, Jan. 2022
- [21] H. Huang, P. Huang, S. Zhong, T. Long, S. Wang, E. Qiang, et al., "Dynamic path planning based on improved D* algorithms of Gaode map", *Proc. IEEE 3rd Inf. Technol. Netw. Electron. Autom. Control Conf. (ITNEC)*, pp. 1121-1124, Mar. 2019.
- [22] P. M. Kolahi and M. Nazemizadeh, "Nonlinear dynamic modeling of tractor-trailer mobile robots with consideration of wheels inertia and their optimal point-to point path planning", *Meccanica*, vol. 58, no. 1, pp. 245-253, Jan. 2023.
- [23] K. R. Hong, R. H. Kim, T. S. Kim and J. S. Kim, "Minimum dose path planning for facility inspection based on the discrete rao-combined ABC algorithm in radioactive environments with obstacles", *Nucl. Sci. Techn.*, vol. 34, no. 4, pp. 1-15, Apr. 2023.
- [24] N. A. K. Zghair and A. S. Al-Araji, "Intelligent hybrid path planning algorithms for autonomous mobile robots", *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 15, no. 5, pp. 309-325, 2022.
- [25] Y. Liu and X. Li, "A hybrid mobile robot path planning scheme based on modified gray wolf optimization and situation assessment", *J. Robot.*, vol. 2022, pp. 1-9, Feb. 2022.
- [26] X. Xie, Z. Tang and J. Cai, "The multi-objective inspection path-planning in radioactive environment based on an improved ant colony optimization algorithm", *Prog. Nucl. Energy*, vol. 144, Feb. 2022
- [27] S. Dian, J. Zhong, B. Guo, J. Liu and R. Guo, "A smooth path planning method for mobile robot using a BES-incorporated modified QPSO algorithm", *Exp. Syst. Appl.*, vol. 208, Dec. 2022
- [28] S. Aslan and T. Erkin, "A multi-population immune plasma algorithm for path planning of unmanned combat aerial vehicle", *Adv. Eng. Informat.*, vol. 55, Jan. 2023
- [29] N. Du, Y. Zhou, W. Deng and Q. Luo, "Improved chimp optimization algorithm for three-dimensional path planning problem", *Multimedia Tools Appl.*, vol. 81, no. 19, pp. 27397-27422, Aug. 2022.
- [30] M. Zhou, Z. Wang, J. Wang and Z. Dong, "A hybrid path planning and formation control strategy of multi-robots in a dynamic environment", *J. Adv. Comput. Intell. Informat.*, vol. 26, no. 3, pp. 342-354, May 2022.
- [31] C. Zhou, S. Gu, Y. Wen, Z. Du, C. Xiao, L. Huang, et al., "The review unmanned surface vehicle path planning: Based on multi-modality constraint", *Ocean Eng.*, vol. 200, Mar. 2020
- [32] B. K. Patle, G. Babu L, A. Pandey, D. R. K. Parhi and A. Jagadeesh, "A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot", *Defence Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 582-606, Aug. 2019
- [33] T. M. Cabreira, L. B. Brisolará and P. R. Ferreira, "Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles", *Drones*, vol. 3, no. 1, pp. 4, 2019
- [34] H. Wu, Y. Zhang, L. Huang, J. Zhang, Z. Luan, W. Zhao, et al., "Research on vehicle obstacle avoidance path planning based on APF-PSO", *Proc. Inst. Mech. Eng. D J. Automobile Eng.*, vol. 237, no. 6, pp. 1391-1405.

- [35] Y. Zhang, B. Ou, Y. Xu and C. Dai, "Path planning of mobile robots based on genetic algorithm", Proc. 8th Int. Conf. Cloud Comput. Big Data Analytics (ICCCBDA), pp. 501-505, Apr. 2023.
- [36] H. Zhang, B. Xin, L.-H. Dou, J. Chen and K. Hirota, "A review of cooperative path planning of an unmanned aerial vehicle group", *Frontiers Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 21, no. 12, pp. 1671-1694, Dec. 2020.
- [37] Z. Wei, M. Zhu, N. Zhang, L. Wang, Y. Zou, Z. Meng, et al., "UAV-assisted data collection for Internet of Things: A survey", *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 17, pp. 15460-15483, Sep. 2022.
- [38] L. Liu, X. Wang, X. Yang, H. Liu, J. Li and P. Wang, "Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect", *Exp. Syst. Appl.*, vol. 227, Oct. 2023
- [39] Ü. Öztürk, M. Akdag and T. Ayabakan, "A review of path planning algorithms in maritime autonomous surface ships: Navigation safety perspective", *Ocean Eng.*, vol. 251, May 2022
- [40] H. Qin, S. Shao, T. Wang, X. Yu, Y. Jiang and Z. Cao, "Review of autonomous path planning algorithms for mobile robots", *Drones*, vol. 7, no. 3, pp. 211, 2023
- [41] S. Lin, A. Liu, J. Wang and X. Kong, "A review of path-planning approaches for multiple mobile robots", *Machines*, vol. 10, no. 9, pp. 773, Sep. 2022
- [42] M. Jones, S. Djahel and K. Welsh, "Path-planning for unmanned aerial vehicles with environment complexity considerations: A survey", *ACM Comput. Surveys*, vol. 55, no. 11, pp. 1-39, Nov. 2023.
- [43] A. Basiri, V. Mariani, G. Silano, M. Aatif, L. Iannelli and L. Glielmo, "A survey on the application of path-planning algorithms for multi-rotor UAVs in precision agriculture", *J. Navigat.*, vol. 75, no. 2, pp. 364-383, Mar. 2022.
- [44] D. Noh, W. Lee, H.-R. Kim, I.-S. Cho, I.-B. Shim and S. Baek, "Adaptive coverage path planning policy for a cleaning robot with deep reinforcement learning", Proc. IEEE Int. Conf. Consum. Electron. (ICCE), pp. 1-6, Jan. 2022.
- [45] Y. Ma, Y. Zhao, Z. Li, H. Bi, J. Wang, R. Malekian, et al., "Cciba*: An improved BA* based collaborative coverage path planning method for multiple unmanned surface mapping vehicles", *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 10, pp. 19578-19588, Oct. 2022.
- [46] Y. Liu, W. Zhao, H. Liu, Y. Wang and X. Yue, "Coverage path planning for robotic quality inspection with control on measurement uncertainty", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 27, no. 5, pp. 3482-3493, Oct. 2022.
- [47] Y. Cao, X. Cheng and J. Mu, "Concentrated coverage path planning algorithm of UAV formation for aerial photography", *IEEE Sensors J.*, vol. 22, no. 11, pp. 11098-11111, Jun. 2022.
- [48] J. Xie and J. Chen, "Multiregional coverage path planning for multiple energy constrained UAVs", *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 10, pp. 17366-17381, Oct. 2022.
- [49] L. Jiao, Z. Peng, L. Xi, S. Ding and J. Cui, "Multi-agent coverage path planning via proximity interaction and cooperation", *IEEE Sensors J.*, vol. 22, no. 6, pp. 6196-6207, Mar. 2022.
- [50] L. Wang, Z. Wang, M. Liu, Z. Ying, N. Xu and Q. Meng, "Full coverage path planning methods of harvesting robot with multi-objective constraints", *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 106, no. 1, pp. 1-15, Sep. 2022.

- [51] L. Li, D. Shi, S. Jin, S. Yang, C. Zhou, Y. Lian, et al., "Exact and heuristic multi-robot Dubins coverage path planning for known environments", *Sensors*, vol. 23, no. 5, pp. 2560, 2023
- [52] Y. Xia, C. Chen, Y. Liu, J. Shi and Z. Liu, "Two-layer path planning for multi-area coverage by a cooperative ground vehicle and drone system", *Exp. Syst. Appl.*, vol. 217, May 2023
- [53] R. I. Mukhamediev, K. Yakunin, M. Aubakirov, I. Assanov, Y. Kuchin, A. Symagulov, et al., "Coverage path planning optimization of heterogeneous UAVs group for precision agriculture", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 5789-5803, 2023.
- [54] V. P. Tran, M. A. Garratt, K. Kasmarik and S. G. Anavatti, "Dynamic frontier-led swarming: Multi-robot repeated coverage in dynamic environments", *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, vol. 10, no. 3, pp. 646-661, Mar. 2023.
- [55] G. Fevgas, T. Lagkas, V. Argyriou and P. Sarigiannidis, "Coverage path planning methods focusing on energy efficient and cooperative strategies for unmanned aerial vehicles", *Sensors*, vol. 22, no. 3, pp. 1235, 2022
- [56] M. A. V. J. Muthugala, S. M. B. P. Samarakoon and M. R. Elara, "Toward energy-efficient online complete coverage path planning of a ship hull maintenance robot based on Gladius bio-inspired neural network", *Exp. Syst. Appl.*, vol. 187, Jan. 2022
- [57] N. A. Kyriakakis, M. Marinaki, N. Matsatsinis and Y. Marinakis, "A cumulative unmanned aerial vehicle routing problem approach for humanitarian coverage path planning", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 300, no. 3, pp. 992-1004, Aug. 2022
- [58] M. A. Luna, M. S. Ale Isaac, A. R. Ragab, P. Campoy, P. F. Peña and M. Molina, "Fast multi-UAV path planning for optimal area coverage in aerial sensing applications", *Sensors*, vol. 22, no. 6, pp. 2297, 2022
- [59] S. D. Apostolidis, P. C. Kapoutsis, A. C. Kapoutsis and E. B. Kosmatopoulos, "Cooperative multi-UAV coverage mission planning platform for remote sensing applications", *Auto. Robots*, vol. 46, no. 2, pp. 373-400, Feb. 2022.
- [60] S. M. Swadi, A. K. Kadhim and G. M. Ali, "Design of path planning controller of autonomous wheeled mobile robot based on triple pendulum behaviour", *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 12, no. 1, pp. 23-31, 2023.
- [61] S. Aggarwal and N. Kumar, "Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review solutions and challenges", *Comput. Commun.*, vol. 149, pp. 270-299, Jan. 2020
- [62] J. Luo, Z. Wang, M. Xia, L. Wu, Y. Tian and Y. Chen, "Path planning for UAV communication networks: Related technologies solutions and opportunities", *ACM Comput. Surveys*, vol. 55, no. 9, pp. 1-37, Sep. 2023.
- [63] S. Karaman and E. Frazzoli, "Sampling-based algorithms for optimal motion planning", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 30, no. 7, pp. 846-894, Jun. 2011.
- [64] S. Karaman and E. Frazzoli, "Sampling-based optimal motion planning for non-holonomic dynamical systems", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 5041-5047, May 2013.
- [65] M. S. Branicky, S. Morgan, J. Levine and M. M. Curtiss, "Sampling-based planning control and verification of hybrid systems", *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 153, no. 5, pp. 575-590, Sep. 2006.

- [66] M. Elbanhawi and M. Simic, "Sampling-based robot motion planning: A review", *IEEE Access*, vol. 2, pp. 56-77, 2014.
- [67] M. Elbanhawi and M. Simic, "On the performance of sampling-based optimal motion planners", *Proc. Eur. Model. Symp.*, pp. 73-78, Nov. 2013.
- [68] K. I. Tsianos, I. A. Sucas and L. E. Kavraki, "Sampling-based robot motion planning: Towards realistic applications", *Comput. Sci. Rev.*, vol. 1, no. 1, pp. 2-11, Aug. 2007.
- [69] M. Xanthidis, J. M. Esposito, I. Rekleitis and J. M. O'Kane, "Motion planning by sampling in subspaces of progressively increasing dimension", *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 100, no. 3, pp. 777-789, Dec. 2020.
- [70] S. M. LaValle and J. J. Kuffner, "Randomized kinodynamic planning", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 20, no. 5, pp. 378-400, May 2001.
- [71] B. Donald, P. Xavier, J. Canny and J. Reif, "Kinodynamic motion planning", *J. Appl. Comput. Mech.*, vol. 40, no. 5, pp. 1048-1066, 1993.
- [72] D. Hsu, R. Kindel, J.-C. Latombe and S. Rock, "Randomized kinodynamic motion planning with moving obstacles", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 21, no. 3, pp. 233-255, Mar. 2002.
- [73] J. Canny, J. Reif, B. Donald and P. Xavier, "On the complexity of kinodynamic planning", *Proc. 29th Annu. Symp. Found. Comput. Sci. (SFCS)*, pp. 306-316, 1988.
- [74] J. Canny, A. Rege and J. Reif, "An exact algorithm for kinodynamic planning in the plane", *Discrete Comput. Geometry*, vol. 6, no. 3, pp. 461-484, Sep. 1991.
- [75] R. Alami, J. P. Laumond and T. Siméon, "Two manipulation planning algorithms", *Proc. Workshop Algorithmic Found. Robot.*, pp. 109-125, 1995.
- [76] D. Berenson, S. S. Srinivasa, D. Ferguson, A. Collet and J. J. Kuffner, "Manipulation planning with workspace goal regions", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 618-624, May 2009.
- [77] D. Berenson, S. S. Srinivasa, D. Ferguson and J. J. Kuffner, "Manipulation planning on constraint manifolds", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 625-632, May 2009.
- [78] T. Siméon, J.-P. Laumond, J. Cortés and A. Sahbani, "Manipulation planning with probabilistic roadmaps", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 23, no. 7, pp. 729-746, Aug. 2004.
- [79] M. Stilman, J.-U. Schamburek, J. Kuffner and T. Asfour, "Manipulation planning among movable obstacles", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 3327-3332, Oct. 2007.
- [80] H. Choset, "Coverage of known spaces: The boustrophedon cellular decomposition", *Auton. Robots*, vol. 9, no. 3, pp. 247-253, 2000.
- [81] H. Choset, "Coverage for robotics—A survey of recent results", *Ann. Math. Artif. Intell.*, vol. 31, no. 1, pp. 113-126, 2001.
- [82] J. I. Vasquez-Gomez, M. Marciano-Melchor, L. Valentin and J. C. Herrera-Lozada, "Coverage path planning for 2D convex regions", *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 97, no. 1, pp. 81-94, Jan. 2020.
- [83] D. Zhu, C. Tian, B. Sun and C. Luo, "Complete coverage path planning of autonomous underwater vehicle based on GBNN algorithm", *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 94, no. 1, pp. 237-249, Apr. 2019.

- [84] Y. Choi, Y. Choi, S. Briceno and D. N. Mavris, "Energy-constrained multi-UAV coverage path planning for an aerial imagery mission using column generation", *J. Intell. Robotic Syst.*, vol. 97, no. 1, pp. 125-139, Jan. 2020.
- [85] P.-M. Hsu, C.-L. Lin and M.-Y. Yang, "On the complete coverage path planning for mobile robots", *J. Intell. Robotic Syst.*, vol. 74, no. 3, pp. 945-963, Jun. 2014.
- [86] C. Di Franco and G. Buttazzo, "Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints", *J. Intell. Robotic Syst.*, vol. 83, no. 3, pp. 445-462, Sep. 2016.
- [87] I. A. Hameed, "Intelligent coverage path planning for agricultural robots and autonomous machines on three-dimensional terrain", *J. Intell. Robotic Syst.*, vol. 74, no. 3, pp. 965-983, Jun. 2014.
- [88] A. C. Kapoutsis, S. A. Chatzichristofis and E. B. Kosmatopoulos, "DARP: Divide areas algorithm for optimal multi-robot coverage path planning", *J. Intell. Robotic Syst.*, vol. 86, no. 3, pp. 663-680, Jun. 2017.
- [89] Y. Li, D. Li, C. Maple, Y. Yue and J. Oyekan, "K-order surrounding roadmaps path planner for robot path planning", *J. Intell. Robotic Syst.*, vol. 75, no. 3, pp. 493-516, Sep. 2014.
- [90] J. Faigl, M. Kulich and L. Přeučil, "A sensor placement algorithm for a mobile robot inspection planning", *J. Intell. Robotic Syst.*, vol. 62, no. 3, pp. 329-353, Jun. 2011.
- [91] E. Galceran and M. Carreras, "A survey on coverage path planning for robotics", *Robot. Auto. Syst.*, vol. 61, no. 12, pp. 1258-1276, Dec. 2013.
- [92] T. Oksanen and A. Visala, "Coverage path planning algorithms for agricultural field machines", *J. Field Robot.*, vol. 26, no. 8, pp. 651-668, Aug. 2009.
- [93] A. Khan, I. Noreen and Z. Habib, "On complete coverage path planning algorithms for non-holonomic mobile robots: Survey and challenges", *J. Inf. Sci. Eng.*, vol. 33, no. 1, pp. 101-121, 2017.
- [94] H. M. Choset, S. Hutchinson, K. M. Lynch, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavraki, et al., *Principles of Robot Motion: Theory Algorithms and Implementation*, Cambridge, MA, USA:MIT Press, 2005.
- [95] A. Zelinsky, R. Jarvis, J. C. Byrne and S. Yuta, "Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot", *Proc. Int. Conf. Adv. Robot.*, pp. 533-538, 1993.
- [96] P. N. Atkar, D. C. Conner, A. Greenfield, H. Choset and A. A. Rizzi, "Hierarchical segmentation of piecewise pseudoextruded surfaces for uniform coverage", *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 107-120, Jan. 2009.
- [97] E. Galceran and M. Carreras, "Planning coverage paths on bathymetric maps for in-detail inspection of the ocean floor", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4159-4164, May 2013.
- [98] J. Jin and L. Tang, "Coverage path planning on three-dimensional terrain for arable farming", *J. Field Robot.*, vol. 28, no. 3, pp. 424-440, May 2011.
- [99] G. Papadopoulos, H. Kurniawati and N. M. Patrikalakis, "Asymptotically optimal inspection planning using systems with differential constraints", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4126-4133, May 2013.
- [100] W. H. Huang, "Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms", *Proc. ICRA IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 1, pp. 27-32, 2001.

- [101] P. A. Jimenez, B. Shirinzadeh, A. Nicholson and G. Alici, "Optimal area covering using genetic algorithms", Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. mechatronics, pp. 1-5, Sep. 2007.
- [102] T. Bretl and S. Hutchinson, "Robust coverage by a mobile robot of a planar workspace", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 4582-4587, May 2013.
- [103] E. Galceran, S. Nagappa, M. Carreras, P. Ridao and A. Palomer, "Uncertainty-driven survey path planning for bathymetric mapping", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 6006-6012, Nov. 2013.
- [104] X. Zheng, S. Jain, S. Koenig and D. Kempe, "Multi-robot forest coverage", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 3852-3857, Aug. 2005.
- [105] K. Easton and J. Burdick, "A coverage algorithm for multi-robot boundary inspection", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 727-734, Oct. 2005.
- [106] A. Ahmadzadeh, J. Keller, G. Pappas, A. Jadbabaie and V. Kumar, An Optimization-Based Approach to Time-Critical Cooperative Surveillance and Coverage With UAVs, Berlin, Germany:Springer, pp. 491-500, 2008.
- [107] E. I. Grøtli and T. A. Johansen, "Path planning for UAVs under communication constraints using SPLAT! And MILP", J. Intell. Robotic Syst., vol. 65, no. 1, pp. 265-282, Jan. 2012.
- [108] Z. J. Butler, A. A. Rizzi and R. L. Hollis, "Contact sensor-based coverage of rectilinear environments", Proc. IEEE Int. Symp. Intell. Control Intell. Syst. Semiotics, pp. 266-271, Sep. 1999.
- [109] Y.-H. Choi, T.-K. Lee, S.-H. Baek and S.-Y. Oh, "Online complete coverage path planning for mobile robots based on linked spiral paths using constrained inverse distance transform", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 5788-5793, Oct. 2009.
- [110] L. Paull, S. Saeedi, M. Seto and H. Li, "Sensor-driven online coverage planning for autonomous underwater vehicles", IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 18, no. 6, pp. 1827-1838, Dec. 2013.
- [111] Y. Gabriely and E. Rimon, "Spiral-STC: An on-line coverage algorithm of grid environments by a mobile robot", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., vol. 1, pp. 954-960, 2002.
- [112] C. Luo, S. Yang, D. Stacey and J. Jofriet, "A solution to vicinity problem of obstacles in complete coverage path planning", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., vol. 1, pp. 612-617, Jul. 2002.
- [113] S. X. Yang and C. Luo, "A neural network approach to complete coverage path planning", IEEE Trans. Syst. Man Cybern. B Cybern., vol. 34, no. 1, pp. 718-724, Feb. 2004.
- [114] S. Hert, S. Tiwari and V. Lumelsky, A Terrain Covering Algorithm for an AUV, Cham, Switzerland:Springer, pp. 17-45, 1996.
- [115] P. N. Atkar, H. Choset, A. A. Rizzi and E. U. Acar, "Exact cellular decomposition of closed orientable surfaces embedded in \mathbb{R}^3 ", Proc. ICRA IEEE Int. Conf. Robot. Autom., vol. 1, pp. 699-704, 2001.
- [116] P. Cheng, J. Keller and V. Kumar, "Time-optimal UAV trajectory planning for 3D urban structure coverage", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 2750-2757, Nov. 2008.
- [117] R. Mannadiar and I. Rekleitis, "Optimal coverage of a known arbitrary environment", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 5525-5530, May 2010.

- [118] E. U. Acar and H. Choset, "Exploiting critical points to reduce positioning error for sensor-based navigation", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., vol. 4, pp. 3831-3837, 2002.
- [119] A. Kim, "Active visual SLAM with exploration for autonomous underwater navigation", 2012.
- [120] I. Rekleitis, A. P. New, E. S. Rankin and H. Choset, "Efficient boustrophedon multi-robot coverage: An algorithmic approach", Ann. Math. Artif. Intell., vol. 52, no. 2, pp. 109-142, Apr. 2008.
- [121] S. Choi, S. Lee, H. H. Viet and T. Chung, "B-Theta*: An efficient online coverage algorithm for autonomous cleaning robots", J. Intell. Robot. Syst., vol. 87, no. 2, pp. 265-290, Aug. 2017.
- [122] Y. Nakamura and A. Sekiguchi, "The chaotic mobile robot", Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 17, no. 6, pp. 898-904, Dec 2001.
- [123] J. Awrejcewicz, Bifurcation and Chaos: Theory and Applications, Berlin, Germany:Springer, 2012.
- [124] R. Gilmore and M. Lefranc, The Topology of Chaos, College Park, MD, USA:AAPT, 2003.
- [125] X. Zang, S. Iqbal, Y. Zhu, X. Liu, J. Zhao, "Applications of chaotic dynamics in robotics", Int J Adv Rob Syst, 13 (2) (2016), p. 60
- [126] Kuwata K., Kajitani Y., Watanabe M., Katayama R., "Chaos simulator as a developing tool and a research environment for applications of chaos engineering," Journal of Network and Computer Applications, vol. 19, pp. 45-66, 1996
- [127] Katayama R., Kajitani Y., Kuwata K., Nishida Y., "Developing tools and methods for applications incorporating neuro, fuzzy and chaos technology," Computers & Industrial Engineering, vol. 24, pp. 579-592, 1993.
- [128] Aihara K., Katayama R., "Chaos engineering in Japan," Communications of the ACM, vol. 38, pp. 103-107, 1995.
- [129] Aihara K., "Chaos and Its Applications," Procedia IUTAM, vol. 5, pp. 199-203, 2012.
- [130] Nomura Hiroyoshi, Wakami Noboru, Kondo Shinji. "Non-linear technologies in a dishwasher." Fuzzy Systems, 1995. International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium., Proceedings of 1995 IEEE Int. Vol. 5. pp. 57-58. 1995.
- [131] T.-C. E. C.-H. C. S.-L. C. F. M., R. Trejo-Guerra, "Current conveyor realization of synchronized Chua's circuits for binary communications", IEEE DTIS (2008), pp. 1-4
- [132] Kaygisiz B., Karahan M., Erkmen A., Erkmen I., "Robotic Approaches at the Crossroads of Chaos, Fractals and Percolation Theory," in Applications of Chaos and Nonlinear Dynamics in Engineering, vol. 1, Understanding Complex Systems, Banerjee S., Mitra M., Rondoni L., Eds.: Springer Berlin Heidelberg, pp. 167-199, 2011.
- [133] Michael Brin, Garrett Stuck (2002), "Introduction to Dynamical Systems", Cambridge University Press
- [134] Kalman, R. E. (1963). "Mathematical Description of Linear Dynamical Systems". Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics Series A Control, 1(2), 152-192.
- [135] Brown, R., & Chua, L. O. (1993). "Dynamical Synthesis Of Poincaré Maps". International Journal of Bifurcation and Chaos, 03(05), 1235-1267.

- [136] S.G. Stavrinos, A.N. Anagnostopoulos, A.N. Miliou, A. Valaristos, L. Magafas, K. Kosmatopoulos, S. Papaioannou, “Digital chaotic synchronized communication system”, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2 (2009), pp. 82-86
- [137] Ch.K. Volos, I.M. Kyprianidis, I.N. Stouboulos, “Experimental demonstration of a chaotic cryptographic scheme”, *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 5 (2006), pp. 1654-1661
- [138] Ch.K. Volos, I.M. Kyprianidis, I.N. Stouboulos, “Fingerprint images encryption process based on a chaotic true random bits generator”, *International Journal of Multimedia Intelligence and Security*, 1 (2010), pp. 320-335
- [139] M.E. Yalcin, A.K. Suykens, J. Vandewalle, “True random bit generation from a double-scroll attractor”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 51 (2004), pp. 1395-1404
- [140] M. Ebner, S. Hameroff, Computational modelling of robust figure/ground separation, in: *Proc. of the 3rd International Conference on Biocomputational Systems and Biotechnologies*, 2011, pp. 67–72.
- [141] O. Castillo, P. Melin, “Automated mathematical modelling, simulation and behavior identification of robotic dynamic systems using a new fuzzy-fractal-genetic approach”, *Robotics and Autonomous Systems*, 28 (1999), pp. 19-30
- [142] H. Cao, X. Chi, G. Chen, “Suppressing or inducing chaos in a model of robot arms and mechanical manipulators”, *Journal of Sound and Vibration*, 271 (2004), pp. 705-724
- [143] K. Itoh, H. Miwa, H. Takanobu, A. Takanishi, “Application of neural network to humanoid robots—development of co-associative memory model”, *Neural Networks*, 18 (2005), pp. 666-673
- [144] S. Aoi, K. Tsuchiya, “Bifurcation and chaos of a simple walking model driven by a rhythmic signal”, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 41 (2006), pp. 438-446
- [145] Gleick J., *Chaos: Making of a new science*, Penguin Books. 1988.
- [146] Strogatz S. H., “Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering (studies in nonlinearity),” Westview Press. 2001.
- [147] Iqbal S., Zang X., Zhu Y., Liu X., Zhao J., “Introducing Undergraduate Electrical Engineering Students to Chaotic Dynamics: Computer Simulations with Logistic Map and Buck Converter,” presented at 2014 8th Asia Modelling Symposium (AMS 2014), Taipei, Taiwan, 2014.
- [148] Moon F. C., *Chaotic and Fractal Dynamics: Introduction for Applied Scientists and Engineers*: John Wiley & Sons, 1992.
- [149] https://el.wikipedia.org/wiki/Θεωρία_του_χάους
- [150] Selvam, A.M. (2017). *Nonlinear Dynamics and Chaos: Applications in Meteorology and Atmospheric Physics*. In: *Self-organized Criticality and Predictability in Atmospheric Flows*. Springer Atmospheric Sciences
- [151] A. A. Tsonis and J. B. Eisner, “Chaos, Strange Attractors and Weather”, *American Meteorological Society* 1989, pp. 14-23
- [152] Hsieh, D.A. (1991), *Chaos and Nonlinear Dynamics: Application to Financial Markets*. *The Journal of Finance*, 46: 1839-1877.
- [153] R. Blümel, W. P. Reinhardt (1997). “Chaos in Atomic Physics”, Cambridge University Press

- [154] Anshul Choudhary, John F. Lindner, Elliott G. Holliday, Scott T. Miller, Sudeshna Sinha, and William L. Ditto, "Physics-enhanced neural networks learn order and chaos", *Phys. Rev. E* 101, 062207 – Published 18 June 2020
- [155] Tang, Y., Kurths, J., Lin, W., Ott, E., & Kocarev, L. (2020). Introduction to Focus Issue: When machine learning meets complex systems: Networks, chaos, and nonlinear dynamics. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 30(6), 063151.
- [156] Βουγιατζής, Γ., & Μελετιίδου, Ε. (2015). *Εισαγωγή στα μη γραμμικά δυναμικά συστήματα* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις
- [157] B. Hasselblatt, A. Katok, "A First Course in Dynamics: With a Panorama of Recent Developments", Cambridge University Press (2003)
- [158] S. Vaidyanathan, "Analysis and adaptive synchronization of two novel chaotic systems with hyperbolic sinusoidal and cosinusoidal nonlinearity and unknown parameters", *J Eng Sci Technol Rev*, 6 (4) (2013), pp. 53-65
- [159] S.H. Strogatz, "Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering", Westview Press (2014)
- [160] Salah Nasr, Hassen Mekki, Kais Bouallegue, "A multi-scroll chaotic system for a higher coverage path planning of a mobile robot using flatness controller", *Chaos, Solitons & Fractals*, Volume 118, January 2019, Pages 366-375
- [161] T. Kapitaniak, *Chaos for Engineers: Theory, Applications, and Control*. Berlin, Germany: Springer, 1998.
- [162] F. C. Hoppensteadt, *Analysis and Simulation of Chaotic Systems*, 2nd ed. New York, USA: Springer: Applied Mathematical Sciences, 2000.
- [163] N. S. Soliman, M. F. Tolba, L. A. Said, A. H. Madian and A. G. Radwan, "Fractional x-shape controllable multi-scroll attractor with parameter effect and fpga automatic design tool software", *Chaos Solitons & Fractals*, vol. 126, pp. 292-307, 2019.
- [164] S. M. Mohamed, W. S. Sayed, L. A. Said and A. G. Radwan, "Reconfigurable fpga realization of fractional-order chaotic systems", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 89 376-89 389, 2021.
- [165] Ch.K. Volos, I.M. Kyprianidis, I.N. Stouboulos, "A chaotic path planning generator for autonomous mobile robots", *Robotics and Autonomous Systems*, 60 (2012), pp. 651-656
- [166] K. Fallahi and H. Leung, "A cooperative mobile robot task assignment and coverage planning based on chaos synchronization", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 20, no. 01, pp. 161-176, 2010.
- [167] "German National Library". International classification system of the German National Library (GND). Archived on 2020-08-19.
- [168] Juan Manuel Ramos Arreguin, (2008) "Automation and Robotics", I-Tech Education and Publishing
- [169] T. M. Gasser and D. Westhoff, "Bast-study: Definitions of automation and legal issues in germany", *Proceedings of the 2012 road vehicle automation workshop*, 2012.

- [170] B. Paden, M. Čáp, S. Z. Yong, D. Yershov and E. Frazzoli, "A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles", *IEEE Transactions on intelligent vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 33-55, 2016.
- [171] C.-h. Li, Y. Song, F.-y. Wang, Z.-q. Wang and Y.-b. Li, "A chaotic coverage path planner for the mobile robot based on the chebyshev map for special missions", *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 18, no. 9, pp. 1305-1319, 2017.
- [172] E. Petavratzis, L. Moysis, C. Volos, I. Stouboulos, H. Nistazakis and K. Valavanis, "A chaotic path planning generator enhanced by a memory technique", *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 103826, 2021.
- [173] C. Li, F. Wang, L. Zhao, Y. Li and Y. Song, "An improved chaotic motion path planner for autonomous mobile robots based on a logistic map", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 6, pp. 273, 2013.
- [174] L.S. Martins-Filho, E.E.N. Macau, R. Rocha, R.F. Machado, L.A. Hirano, Kinematic control of mobile robots to produce chaotic trajectories, in: *Proc. of the 18th Int. Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, November 2005.
- [175] A. A. Fahmy, "Chaotic mobile robot workspace coverage enhancement", *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, vol. 6, pp. 33-38, 2012.
- [176] C. Li, Y. Song, F. Wang, Z. Wang and Y. Li, "A bounded strategy of the mobile robot coverage path planning based on lorenz chaotic system", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 107, 2016.
- [177] J.H. Suh, Y.J. Lee, K.S. Lee, "Object-transportation control of cooperative AGV systems based on virtual-passivity decentralized control algorithm", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19 (2005), pp. 1720-1730
- [178] J. Palacin, J.A. Salse, I. Valganon, X. Clua, "Building a mobile robot for a floor-cleaning operation in domestic environments", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53 (2004), pp. 1418-1424
- [179] X. Gao, K. Li, Y. Wang, G. Men, D. Zhou, K. Kikuchi, "A floor cleaning robot using Swedish wheels", in: *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2007*, Sanya, China, December 2007, pp. 2069–2073.
- [180] M.J.M. Tavera, M.S. Dutra, E.Y.V. Diaz, O. Lengerke, "Implementation of chaotic behaviour on a fire fighting robot", in: *Proc. of the 20th Int. Congress of Mechanical Engineering*, Gramado, Brazil, November 2009.
- [181] L.S. Martins-Filho, E.E.N. Macau, "Trajectory planning for surveillance missions of mobile robots", *Studies in Computational Intelligence*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2007), pp. 109-117
- [182] S. Marslanda, U. Nehmzowb, "On-line novelty detection for autonomous mobile robots", *Robotics and Autonomous Systems*, 51 (2005), pp. 191-206
- [183] P. Sooraksa, K. Klomkarn, "No-CPU chaotic robots: from classroom to commerce", *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 10 (2010), pp. 46-53

- [184] D.R. Corbett, D.W. Gage, D.D. Hackett, “Robotic communications and surveillance-the DARPA LANdroids program”, *Lecture Notes in Computer Science*, 7106 (2011), pp. 749-758
- [185] R.C. Luo, T.Y. Lin, K.L. Su, “Multisensor based security robot system for intelligent building”, *Robotics and Autonomous Systems*, 57 (2009), pp. 330-338
- [186] F. Capezio, A. Sgorbissa, R. Zaccaria, “GPS-based localization for a surveillance UGV in outdoor areas”, in: *Proc. of the 5th IEEE Int. Workshop on Robot Motion and Control*, Dymaczewo, Poland, June 2005, pp. 157–162.
- [187] N. Hara, H. Kokame, K. Konishi, “Circular periodic motion generation for mobile robots using limit cycle systems”, in: *Proc. of the American Control Conference, ACC*, Baltimore, USA, June 2010, pp. 4271–4276.
- [188] Robot density data for industrial installations, the most automated countries. Available: <https://www.industrialmeeting.club/robot-density-data-for-industrial-installations-in-automated-countries>
- [189] Pierre E. Dupont, Bradley J. Nelson, Michael Goldfarb, Blake Hannaford, Arianna Menciassi, Marcia K. O’malley, Nabil Simaan, Pietro Valdastrri And Guang-Zhong Yang, “A decade retrospective of medical robotics research from 2010 to 2020”, *Science Robotics*, Vol 6, Issue 60, 2021
- [190] L. Pedersen¹, D. Kortenkamp, D. Wettergreen, I. Nourbakhsh, “A Survey of Space Robotics”, 7th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS), 2003
- [191] Gianluca A., Thor I. F., Dana R. Y. (2008). Part F Field and Service Robotics: Underwater Robotics. Στο Siciliano B. & Khatib Ous. *Springer Handbook of Robotics*. (pp. 987-1008).
- [192] Lubofsky E. (2019). Underwater robots swarm the ocean Researchers tackle a big problem for tiny ocean robots. Available: <https://www.whoi.edu/news-insights/content/underwater-robots-swarm-the-ocean/>.
- [193] North Atlantic Treaty Organization, NATO defence against terrorism programme, 2014. https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/pdf_2014_10/20151029_141007-dat-prog.pdf.
- [194] The Permanent Structured Cooperation (PESCO). Harbour & Maritime Surveillance and Protection. <https://pesco.europa.eu/project/harbour-and-maritime-surveillance-and-protection/>.
- [195] Terracciano, D., Bazzarello, L., Caiti, A. et al. Marine Robots for Underwater Surveillance. *Curr Robot Rep* 1, 159–167 (2020)
- [196] Jung SE, Won E-s. “Systematic Review of Research Trends in Robotics Education for Young Children”. *Sustainability*. 2018 10(4), 905
- [197] Anwar, S., Bascou, N. A., Menekse, M., & Kardgar, A. (2019). “A Systematic Review of Studies on Educational Robotics”. *Journal of Pre-College Engineering Education Research (J-PEER)*, 9(2), Article 2.
- [198] V. Shivashankar, R. Jain, U. Kuter and D. Nau, "Real-time planning for covering an initially-unknown spatial environment", *Proc. FLAIRS Conf.*, pp. 63-68, 2011.
- [199] E. Gonzalez, O. Alvarez, Y. Diaz, C. Parra, C. Bustacara, “BSA: a complete coverage algorithm”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, IEEE (2005), pp. 2040-2044

- [200] T.-K. Lee, S.-H. Baek, Y.-H. Choi and S.-Y. Oh, "Smooth coverage path planning and control of mobile robots based on high-resolution grid map representation", *Robot. Auto. Syst.*, vol. 59, no. 10, pp. 801-812, Oct. 2011
- [201] C. Luo and S. X. Yang, "A bioinspired neural network for real-time concurrent map building and complete coverage robot navigation in unknown environments", *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 19, no. 7, pp. 1279-1298, Jul. 2008.
- [202] M. Z. Yan and D. Q. Zhu, "An algorithm of complete coverage path planning for autonomous underwater vehicles" in *Materials Mechatronics and Automation*, Stafa-Zurich, Switzerland:Trans Tech Publications, vol. 467, pp. 1377-1385, May 2011.
- [203] X. Qiu, J. Song, X. Zhang and S. Liu, "A complete coverage path planning method for mobile robot in uncertain environments", *Proc. 6th World Congr. Intell. Control Autom.*, vol. 2, pp. 8892-8896, 2006.
- [204] Y. Guo and M. Balakrishnan, "Complete coverage control for nonholonomic mobile robots in dynamic environments", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1704-1709, Jul. 2006.
- [205] J. Palacin, T. Palleja, I. Valganon, R. Pernia and J. Roca, "Measuring coverage performances of a floor cleaning mobile robot using a vision system", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 4236-4241, Oct. 2005.
- [206] T.-S. Lee, J.-S. Choi, J.-H. Lee and B.-H. Lee, "3-D terrain covering and map building algorithm for an AUV", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, pp. 4420-4425, Oct. 2009.
- [207] H. Choset and P. Pignon, "Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition" in *Field and Service Robotics*, London, U.K.:Springer, pp. 203-209, 1998.
- [208] H. Choset, E. Acar, A. Rizzi and J. Luntz, "Exact cellular decompositions in terms of critical points of Morse functions", *Proc. ICRA Millennium Conf. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. Symposia*, vol. 3, pp. 2270-2277, 2000.
- [209] E. U. Acar, H. Choset, A. A. Rizzi, P. N. Atkar and D. Hull, "Morse decompositions for coverage tasks", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 21, no. 4, pp. 331-344, Apr. 2002.
- [210] J. Milnor, *Morse Theory (AM-51)*, Princeton, NJ, USA:Princeton Univ. Press, vol. 51, 2016.
- [211] E. U. Acar and H. Choset, "Sensor-based coverage of unknown environments: Incremental construction of Morse decompositions", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 21, no. 4, pp. 345-366, Apr. 2002.
- [212] E. U. Acar and H. Choset, "Robust sensor-based coverage of unstructured environments", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. Expanding Societal Role Robot. the Next Millennium*, vol. 1, pp. 61-68, 2001.
- [213] E. A. Codling, M. J. Plank and S. Benhamou, "Random walk models in biology", *J. Roy. Soc. Interface*, vol. 5, no. 25, pp. 813-834, 2008.
- [214] B. Pang, Y. Song, C. Zhang, H. Wang and R. Yang, "A swarm robotic exploration strategy based on an improved random walk method", *J. Robot.*, vol. 2019, pp. 1-9, Mar. 2019.
- [215] B. Pang, J. Qi, C. Zhang, Y. Song and R. Yang, "Analysis of random walk models in swarm robots for area exploration", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics (ROBIO)*, pp. 2484-2489, Dec. 2019.

- [216] G. M. Viswanathan, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. G. E. da Luz, E. P. Raposo and H. E. Stanley, "Optimizing the success of random searches", *Nature*, vol. 401, no. 6756, pp. 911-914, Oct. 1999.
- [217] D. W. Sims, N. E. Humphries, R. W. Bradford and B. D. Bruce, "Lévy flight and Brownian search patterns of a free-ranging predator reflect different prey field characteristics", *J. Animal Ecology*, vol. 81, no. 2, pp. 432-442, Mar. 2012.
- [218] T. Balch, "The case for randomized search", *Proc. Workshop Sensors Motion IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 213-215, Apr. 2000.
- [219] D. W. Gage, "Randomized search strategies with imperfect sensors", *Proc. SPIE*, vol. 2058, pp. 270-279, 1994.
- [220] R. Fujisawa and S. Dobata, "Lévy walk enhances efficiency of group foraging in pheromone-communicating swarm robots", *Proc. IEEE/SICE Int. Symp. Syst. Integr.*, pp. 808-813, Dec. 2013.
- [221] A. Schroeder, S. Ramakrishnan, M. Kumar and B. Trease, "Efficient spatial coverage by a robot swarm based on an ant foraging model and the Lévy distribution", *Swarm Intell.*, vol. 11, no. 1, pp. 39-69, Mar. 2017.
- [222] D. K. Sutantyo, S. Kernbach, P. Levi and V. A. Nepomnyashchikh, "Multi-robot searching algorithm using Lévy flight and artificial potential field", *Proc. IEEE Saf. Secur. Rescue Robot.*, pp. 1-6, 2010.
- [223] A. Deshpande, M. Kumar and S. Ramakrishnan, "Robot swarm for efficient area coverage inspired by ant foraging: The case of adaptive switching between Brownian motion and Lévy flight", *Proc. Mechatron. Estimation Identificat.; Uncertain Syst. Robustness; Path Planning Motion Control; Tracking Control Syst.; Multi-Agent Networked Syst.; Manuf.; Intell. Transp. Vehicles; Sensors Actuators; Diagnostics (Don't short) Detection; Unmanned Ground Surface Robotics; Motion Vib. Control Appl.*, vol. 2, pp. 8, Oct. 2017.
- [224] Vakakis A. F., Burdick J. W., "Chaotic motions in the dynamics of a hopping robot," presented at Robotics and Automation, 1990. Proceedings, 1990 IEEE International Conference on, 1990.
- [225] Vakakis A. F., Burdick J. W., Caughey T. K., "An "interesting" strange attractor in the dynamics of a hopping robot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 10, pp. 606-618, 1991.
- [226] McCloskey R. T., Burdick J. W., "Periodic motions of a hopping robot with vertical and forward motion," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 12, pp. 197-218, 1993.
- [227] Lankalapalli S., Ghosal A., "Possible chaotic motions in a feedback controlled 2R robot," presented at Robotics and Automation, 1996. Proceedings, 1996 IEEE International Conference on, 1996.
- [228] Lankalapalli S., Ghosal A., "Chaos in robot control equations," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 7, pp. 707-720, 1997.
- [229] Buhler M., Koditschek D. E., "From stable to chaotic juggling: Theory, simulation, and experiments," presented at Robotics and Automation, 1990. Proceedings, 1990 IEEE International Conference on, 1990.
- [230] Koditschek D. E., Buhler M., "Analysis of a simplified hopping robot," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 10, pp. 587-605, 1991.

- [231] Mahout V., Lopez P., Carcasses J. P., Mira C., “Complex behaviors of a two revolute joints robot: harmonic, subharmonic, higher harmonic, fractional harmonic, chaotic responses,” presented at Systems, Man and Cybernetics, Systems Engineering in the Service of Humans', 1993. Proceedings, 1993 International Conference on, 1993.
- [232] Ravishankar A. S., Ghosal A., “Nonlinear dynamics and chaotic motions in feedback-controlled two- and three-degree-of-freedom robots,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 18, pp. 93–108, 1999.
- [233] Wiener N., “The homogeneous chaos,” *Amer. J. Math.*, vol. 60, pp. 897–936, 1938.
- [234] Hover F. S., Triantafyllou M. S., “Application of polynomial chaos in stability and control,” *Automatica*, vol. 42, pp. 789–795, 2006.
- [235] Voglewede Philip A., Monti Antonello. “Variation Analysis of a Two Link Planar Manipulator Using Polynomial Chaos Theory.” ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [236] Voglewede P., Smith A. H. C., Monti A., “Dynamic performance of a SCARA robot manipulator with uncertainty using polynomial chaos theory,” *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 206–210, 2009.
- [237] Varghese M., Fuchs A., Mukundan R., “Chaotic zero dynamics in kinematically redundant robots,” *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 784–796, 1991.
- [238] Duarte F. B. M., Machado J. A. T., “Chaos dynamics in the trajectory control of redundant manipulators,” presented at Robotics and Automation, 2000. Proceedings, ICRA'00. IEEE International Conference on, 2000.
- [239] Duarte F. B. M., Machado J. A. Tenreiro, “Motion chaos in the pseudoinverse control of redundant robots,” presented at Advanced Motion Control, 2000. Proceedings, 6th International Workshop on, 2000.
- [240] da Graca Marcos M., Duarte F., Machado J. A. Tenreiro, “Fractional dynamics in the trajectory control of redundant manipulators,” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 13, pp. 1836–1844, 2008.
- [241] Nehmzow U., *Scientific Methods in Mobile Robotics: quantitative analysis of agent behaviour*: Springer, 2006.
- [242] Nehmzow U., *Robot Behaviour: design, description, analysis and modelling*: Springer, 2009.
- [243] Schoner G., Dose M., Engels C., “Dynamics of behavior: Theory and applications for autonomous robot architectures,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 16, pp. 213–245, 1995.
- [244] Smithers T., “On quantitative performance measures of robot behaviour,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 15, pp. 107–133, 1995.
- [245] Nehmzow U., Walker K., “The behaviour of a mobile robot is chaotic,” *AISB Journal*, vol. 1, pp. 373–388, 2003.
- [246] Nehmzow U., “Quantitative analysis of robot-environment interaction towards “scientific mobile robotics”,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 44, pp. 55–68, 2003.

- [247] Nehmzow U., Walker K., “Quantitative description of robot-environment interaction using chaos theory,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 53, pp. 177–193, 2005.
- [248] Nehmzow U., “On the role of quantitative descriptions of behaviour in mobile robotics research,” in *RoboCup 2003: Robot Soccer World Cup VII*: Springer, pp. 54–66, 2004.
- [249] Odagiri R., Islam Monirul. “Md., Okura, M., Asai, T., Murase, K.: Deterministic chaos in sensory information of real mobile robot Khepera.” *The 1st International Khepera Workshop*. pp. 49–56. 1999.
- [250] Islam M., Murase K., “Chaotic dynamics of a behavior-based miniature mobile robot: effects of environment and control structure,” *Neural Networks*, vol. 18, pp. 123–144, 2005.
- [251] Da Rold F., “Deterministic chaos in mobile robots,” presented at *Neural Networks (IJCNN)*, 2015. *International Joint Conference on*, 2015.
- [252] Sekiguchi A., Nakamura Y., “The chaotic mobile robot,” presented at *Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS'99. Proceedings, 1999 IEEE/RSJ International Conference on*, 1999.
- [253] Klomkarn A. J. K., Sooraksa P., “Further investigation on trajectory of chaotic guiding signals for robotic systems,” presented at *Communications and Information Technology, 2004. ISCIT 2004. IEEE International Symposium on*, 2004.
- [254] A. Jansri, K. Klomkarn, P. Sooraksa, On comparison of attractors for chaotic mobile robots, in: *Proc. of the 30th IEEE Annual Conference of Industrial Electronics Society, Busan, Korea*, vol. 3, November 2004, pp. 2536–2541.
- [255] C. Chanvech, K. Klomkarn, and P. Sooraksa, “Combined chaotic attractor mobile robots”, *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference*, pp. 3079–3082, Oct. 2006.
- [256] F. Hackbarth, "Chaotic vs. random coverage missions," *2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong, China, 2009*, pp. 2119-2123
- [257] Youngchul B., “Obstacle avoidance method in the chaotic robot,” presented at *23rd Digital Avionics Systems Conference, 2004. DASC 04, 2004*.
- [258] Youngchul B., “Target searching method in the chaotic mobile robot,” presented at *23rd Digital Avionics Systems Conference, 2004. DASC 04, 2004*.
- [259] Youngchul B., “An obstacle avoidance method for chaotic robots using angular degree limitations,” *Journal of Security Engineering*, vol. 2, pp. 249–254, 2005.
- [260] L.S. Martins-Filho, R.F. Machado, R. Rocha, V.S. Vale, Commanding mobile robots with chaos, in: *Symposium Series in Mechatronics*, vol. 1, 2004, pp. 40–46.
- [261] Volos C. K., Bardis N. G., Kyprianidis I. M., Stouboulos I. N., “Implementation of mobile robot by using double-scroll chaotic attractors,” *WSEAS Recent Researches in Applications of Electrical and Computer Engineering. Vouliagmeni Beach, Athens, Greece*, pp. 119–124, 2012.
- [262] Volos C. K., Bardis N., Kyprianidis I. M., Stouboulos I. N., “Motion Control of a Mobile Robot Based on Double-Scroll Chaotic Circuits,” *WSEAS Trans. Systems*, vol. 11, pp. 479–488, 2012.
- [263] Volos C. K., Kyprianidis I. M., Stouboulos I. N., “Motion Control of Robots Using a Chaotic Truly Random Bits Generator,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 5, pp. 6–11, 2012.

- [264] Volos C. K., Doukas N., Kyprianidis I. M., Stouboulos I. N., Kostis T. G., “Chaotic Autonomous Mobile Robot for Military Missions,” presented at Recent Advances in Telecommunications and Circuit Design (CSCC '13), 2013.
- [265] Volos C. K., Kyprianidis I. M., Stouboulos I. N., “Experimental investigation on coverage performance of a chaotic autonomous mobile robot,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, pp. 1314–1322, 2013.
- [266] Volos C. K., “Motion direction control of a robot based on chaotic synchronization phenomena,” *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, vol. 7, pp. 64–69, 2013.
- [267] Li C., Song Y., Wang F., Liang Z., Zhu B., “Chaotic Path Planner of Autonomous Mobile Robots Based on the Standard Map for Surveillance Missions,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, 2015.
- [268] Curiac D.-I., Volosencu C., “A 2D chaotic path planning for mobile robots accomplishing boundary surveillance missions in adversarial conditions,” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 19, pp. 3617–3627, 2014.
- [269] D.-I. Curiac, O. Baniyas, C. Volosencu and C.-D. Curiac, "Novel bioinspired approach based on chaotic dynamics for robot patrolling missions with adversaries", *Entropy*, vol. 20, no. 5, pp. 378, May 2018.
- [270] M. Minami, G. Jingyu, and Y. Mae, “Chaos-driving robotic intelligence for catching fish,” in 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, Apr. 2007, pp. 85–91.
- [271] Jun Hirao, Mamoru Minami, Yasushi Mae and Gao Jingyu, "Emergence of robotic intelligence by chaos for catching fish," *SICE Annual Conference 2007*, Takamatsu, Japan, 2007, pp. 969-975
- [272] Choi C., Lee J.-J., “Chaotic local search algorithm,” *Artificial Life and Robotics*, vol. 2, pp. 41–47, 1998.
- [273] Determan J., Foster J. A., “Using chaos in genetic algorithms,” presented at Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings, 1999 Congress on, 1999.
- [274] Yang L.-J., Chen T.-L., “Application of chaos in genetic algorithms,” *Communications in Theoretical Physics*, vol. 38, pp. 168–172, 2002.
- [275] Bucolo M., Caponetto R., Fortuna L., Frasca M., Rizzo A., “Does chaos work better than noise?” *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, vol. 2, pp. 4–19, 2002.
- [276] Jia Q., Wang X., “Path planning of mobile robots in dynamic environment using chaotic prediction,” presented at Control and Decision Conference, 2008. CCDC 2008. China, 2008.
- [277] Gao M., Xu J., Tian J., Wu H., “Path planning for mobile robot based on chaos genetic algorithm,” presented at Natural Computation, 2008. ICNC'08. Fourth International Conference on, 2008.
- [278] Lin J.-H., Huang L.-R., “Chaotic bee swarm optimization algorithm for path planning of mobile robots,” presented at Proceedings of the 10th WSEAS international conference on evolutionary computing, 2009.
- [279] Xu C., Duan H., Liu F., “Chaotic artificial bee colony approach to Uninhabited Combat Air Vehicle (UCAV) path planning,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 14, pp. 535–541, 2010.

- [280] Luo Q., Duan H., “Chaotic artificial bee colony approach to step planning of maintaining balance for quadruped robot,” *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, vol. 7, pp. 175–191, 2014.
- [281] Bing L., Weisun J., “Optimizing complex functions by chaos search,” *Cybernetics & Systems*, vol. 29, pp. 409–419, 1998.
- [282] Hongyan S., Zhifei C., Changzhi S., “Application of improved chaotic optimization algorithm to problems with motion planning for mobile robots,” presented at *Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, 2003. *Proceedings, 2003 IEEE International Conference on*, 2003.
- [283] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4
- [284] Seyedali Mirjalili, Seyed Mohammad Mirjalili, Andrew Lewis, “Grey Wolf Optimizer”, *Advances in Engineering Software*, Volume 69, 2014, Pages 46-61, ISSN 0965-9978
- [285] Cheng X, Li J, Zheng C, Zhang J and Zhao M (2021), “An Improved PSO-GWO Algorithm With Chaos and Adaptive Inertial Weight for Robot Path Planning”.
- [286] Hongyue Chu ,Junkai Yi, Fei Yang, “Chaos Particle Swarm Optimization Enhancement Algorithm for UAV Safe Path Planning”, *AI Applications in the Industrial Technologies*, *Appl. Sci.* 2022, 12(18), 8977
- [287] Amylia Ait-Saadi, Yassine Meraihi, Assia Soukane, Amar Ramdane-Cherif, Asma Benmessaoud Gabis, “A novel hybrid Chaotic Aquila Optimization algorithm with Simulated Annealing for Unmanned Aerial Vehicles path planning”, *Computers and Electrical Engineering*, Volume 104, Part B, 2022, 108461, ISSN 0045-7906
- [288] Bisio I., Garibotto C., Lavagetto F., Sciarrone A., Zappatore S., Unauthorized amateur UAV detection based on WiFi statistical fingerprint analysis, *IEEE Commun Mag*, 56 (4) (2018), pp. 106-111
- [289] Helbing D., Brockmann D., Chadeaux T., Donnay K., Blanke U., Woolley-Meza O., Moussaid M., Johansson A., Krause J., Schutte S., et al., Saving human lives: What complexity science and information systems can contribute, *J Stat Phys*, 158 (3) (2015), pp. 735-781
- [290] Giordan D., Manconi A., Remondino F., Nex F., Use of unmanned aerial vehicles in monitoring application and management of natural hazards, *Geomat Natl Hazards Risk*, 8 (1) (2017), pp. 1-4
- [291] Kamate S., Yilmazer N., Application of object detection and tracking techniques for unmanned aerial vehicles, *Procedia Comput Sci*, 61 (2015), pp. 436-441
- [292] Ibrahim A.W.N., Ching P.W., Seet G.G., Lau W.M., Czajewski W., Moving objects detection and tracking framework for UAV-based surveillance, 2010 Fourth Pacific-Rim symposium on image and video technology, *IEEE* (2010), pp. 456-461
- [293] Yang T., Jiang Z., Sun R., Cheng N., Feng H., Maritime search and rescue based on group mobile computing for unmanned aerial vehicles and unmanned surface vehicles, *IEEE Trans Ind Inf*, 16 (12) (2020), pp. 7700-7708
- [294] Kim J., Kim S., Ju C., Son H.I., Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications, *Ieee Access*, 7 (2019), pp. 105100-105115

- [295] Hu D., Qi B., Du R., Yang H., Wang J., Zhuge J., An atmospheric vertical detection system using the multi-rotor UAV, 2019 international conference on meteorology observations (ICMO), IEEE (2019), pp. 1-4
- [296] Meraihi Y., Ramdane-Cherif A., Acheli D., Mahseur M., Dragonfly algorithm: a comprehensive review and applications, *Neural Comput Appl*, 32 (21) (2020), pp. 16625-16646
- [297] Ait Saadi A., Soukane A., Meraihi Y., Benmessaoud Gabis A., Mirjalili S., Ramdane-Cherif A., UAV path planning using optimization approaches: A survey, *Arch Comput Methods Eng* (2022), pp. 1-52
- [298] Abualigah L., Yousri D., Abd Elaziz M., Ewees A.A., Al-Qaness M.A.A., Gandomi A.H., Aquila optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm, *Comput Ind Eng*, 157 (2021), Article 107250
- [299] Saremi S., Mirjalili S., Lewis A., Biogeography-based optimisation with chaos, *Neural Comput Appl*, 25 (5) (2014), pp. 1077-1097
- [300] Saremi S, Mirjalili S (2013) Integrating chaos to biogeography-based optimization algorithm. *Int J Comput Commun Eng* 2:655–658
- [301] M. Ma, J. Wu, Y. Shi, L. Yue, C. Yang and X. Chen, "Chaotic random opposition-based learning and Cauchy mutation improved moth-flame optimization algorithm for intelligent route planning of multiple UAVs", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 49385-49397, 2022.
- [302] C. Choi, S.-G. Hong, J.-H. Shin, I.-K. Jeong and J.-J. Lee, "Dynamical path-planning algorithm of a mobile robot using chaotic neuron model", *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. Hum. Robot Interact. Cooperat. Robots*, vol. 2, pp. 456-461, 1995.
- [303] C. Zhang, "Path planning for robot based on chaotic artificial potential field method", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 317, Mar. 2018.
- [304] J. Lian, W. Yu, K. Xiao and W. Liu, "Cubic spline interpolation-based robot path planning using a chaotic adaptive particle swarm optimization algorithm", *Math. Problems Eng.*, vol. 2020, pp. 1-20, Feb. 2020.
- [305] A. Tharwat, M. Elhoseny, A. E. Hassanien, T. Gabel and A. Kumar, "Intelligent Bézier curve-based path planning model using chaotic particle swarm optimization algorithm", *Cluster Comput.*, vol. 22, no. 4, pp. 4745-4766, Mar. 2018.
- [306] Z. Wang and J. Cai, "The path-planning in radioactive environment of nuclear facilities using an improved particle swarm optimization algorithm", *Nucl. Eng. Design*, vol. 326, pp. 79-86, Jan. 2018.
- [307] L. Cao and Q. Chen, "Cooperative path planning for multi-USV based on improved artificial bee colony algorithm", *Proc. SPIE*, vol. 10611, pp. 352-359, 2018.
- [308] E.N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow", *J Atmos Sci*, 20 (2) (1963), pp. 130-141
- [309] O.E. RöSSLer, "An equation for continuous chaos", *Phys Lett A*, 57 (5) (1976), pp. 397-398
- [310] A. Arneodo, P. Couillet, C. Tresser, "Possible new strange attractors with spiral structure", *Commun Math Phys*, 79 (4) (1981), pp. 573-579
- [311] V. Sundarapandian, I. Pehlivan, "Analysis, control, synchronization, and circuit design of a novel chaotic system", *Math Comput Model*, 55 (7) (2012), pp. 1904-1915

- [312] S. Vaidyanathan, "A new six-term 3-D chaotic system with an exponential nonlinearity", *Far East J Math Sci*, 79 (1) (2013), p. 135
- [313] L.S. Martins-Filho, E.E.N. Macau, "Patrol mobile robots and chaotic trajectories", *Mathematical Problems in Engineering*, 2007 (2007), p. 1
- [314] K. Bouallegue, "Generation of multi-scroll chaotic attractors from fractal and multi-fractal processes", *Proceedings of the Fourth International Workshop on Chaos-Fractals Theories and Applications (IWCFTA)*, IEEE (2011), pp. 398-402
- [315] Y. Gao, Q. Li, X. Li, G. Qian, "Construction of multi-scroll chaotic attractors with exponential function", *Proceedings of the IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, IEEE (2016), pp. 542-544
- [316] S. Rasappan, S. Vaidyanathan, "Hybrid synchronization of n-scroll chaotic Chua circuits using adaptive backstepping control design with recursive feedback", *Malays J Math Sci*, 7 (2) (2013), pp. 219-246
- [317] N. Salah, B. Kais, M. Hassen, V. S, "Controlling mobile robot based on multi-scroll dynamic chaotic systems", *Int J Control Theory Appl*, 10 (34) (2017), pp. 31-42
- [318] M. Kapanoglu, M. Ozkan, O. Parlaktuna, et al., "Pattern-based genetic algorithm approach to coverage path planning for mobile robots", *Proceedings of the International Conference on Computational Science*, Springer (2009), pp. 33-42
- [319] H. Steven, *Nonlinear Dynamics And Chaos: With Applications To Physics Biology Chemistry and Engineering*, Boulder, CO, USA:Westview Press, 1994.
- [320] D.-I. Curiac and C. Volosencu, "Path planning algorithm based on Arnold cat map for surveillance UAVs", *Defence Sci. J.*, vol. 65, no. 6, pp. 483-488, Nov. 2015.
- [321] V. S. Afraimovich and S.-B. Hsu, *Lectures on Chaotic Dynamical Systems*, Providence, RI, USA:American Mathematical Society, 2003.
- [322] R. Femat and G. Solis-Perales, *Robust Synchronization of Chaotic Systems via Feedback*, Cham, Switzerland:Springer, vol. 378, 2009.
- [323] G. Chen and T. Ueta, "Yet another chaotic attractor", *Int. J. Bifurcation Chaos*, vol. 9, no. 7, pp. 1465-1466, Jul. 1999.
- [324] J. Lü and G. Chen, "A new chaotic attractor coined", *Int. J. Bifurcation Chaos*, vol. 12, no. 3, pp. 659-661, Mar. 2002.
- [325] S.-M. Guo, L. S. Shieh, G. Chen and M. Ortega, "Ordering chaos in chua's circuit: A sampled-data feedback and digital redesign approach", *Int. J. Bifurcation Chaos*, vol. 10, no. 9, pp. 2221-2231, Sep. 2000.
- [326] G. Chen and X. Dong, "Ordering chaos of Chua's circuit—A feedback control approach", *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 2604-2607, 1993.
- [327] C. Nwachioma and J. H. Pérez-Cruz, "Analysis of a new chaotic system electronic realization and use in navigation of differential drive mobile robot", *Chaos Solitons Fractals*, vol. 144, Mar. 2021
- [328] K. Sridharan, P. McNamee, Z. N. Ahmadabadi and J. Hudack, "Online search of unknown terrains using a dynamical system-based path planning approach", *arXiv:2103.11863*, 2021.

- [329] U. P. Amadasun, P. McNamee and Z. N. Ahmadabadi, "Autonomous search of real-life environments combining dynamical system-based path planning and unsupervised learning", arXiv:2305.01834, 2023.
- [330] K. Sridharan and Z. N. Ahmadabadi, "A multi-system chaotic path planner for fast and unpredictable online coverage of terrains", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 4, pp. 5268-5275, Oct. 2020.
- [331] M. W. Hirsch, *Differential Equations Dynamical Systems and an Introduction to Chaos*, Waltham, MA, USA:Academic Press, 2013.
- [332] D.-I. Curiac and C. Volosencu, "Chaotic trajectory design for monitoring an arbitrary number of specified locations using points of interest", *Math. Problems Eng.*, vol. 2012, pp. 1-18, 2012.
- [333] C. Li, C. Liu, Y. Song and Z. Liang, "Parameter value selection strategy for complete coverage path planning based on the Lü system to perform specific types of missions", *Frontiers Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 24, no. 2, pp. 231-244, Feb. 2023.
- [334] L.O. Chua, E.W. Szeto, "High-order non-linear circuit elements: circuit-theoretic properties", *Int J Circuit Theory Appl*, 11 (2) (1983), pp. 187-206
- [335] C. Pimentel-Romero, J. M. Muñoz-Pacheco, O. Felix-Beltran, L. Gomez-Pavon and C. K. Volos, *Chaotic Planning Paths Generators by Using Performance Surfaces*, Cham, Switzerland:Springer, pp. 805-832, 2017.
- [336] E. Tlelo-Cuautle, H. C. Ramos-López, M. Sánchez-Sánchez, A. D. Pano-Azucena, L. A. Sánchez-Gaspariano, J. C. Núñez-Pérez, et al., "Application of a chaotic oscillator in an autonomous mobile robot", *J. Electr. Eng.*, vol. 65, no. 3, pp. 157-162, May 2014.
- [337] L. Moysis, E. Petavratzis, M. Marwan, C. Volos, H. Nistazakis and S. Ahmad, "Analysis synchronization and robotic application of a modified hyperjerk chaotic system", *Complexity*, vol. 2020, pp. 1-15, Apr. 2020.
- [338] R. M. May, "Simple mathematical models with very complicated dynamics", *Nature*, vol. 261, no. 5560, pp. 459-467, Jun. 1976.
- [339] E. Petavratzis, L. Moysis, C. Volos, M. K. Gupta, I. Stouboulos and S. Goudos, "Chaotic motion control of a mobile robot using a memory technique", *Proc. 24th Int. Conf. Syst. Theory Control Comput. (ICSTCC)*, pp. 506-511, Oct. 2020.
- [340] E. Petavratzis, L. Moysis, C. Volos, H. Nistazakis and I. Stouboulos, "Chaotic path planning for grid coverage using a modified logistic-may map", *J. Autom. Mobile Robot. Intell. Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 3-9, 2020.
- [341] L. Moysis, E. Petavratzis, C. Volos, H. Nistazakis, I. Stouboulos and K. Valavanis, "A chaotic path planning method for 3D area coverage using modified logistic map and a modulo tactic", *Proc. Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst. (ICUAS)*, pp. 220-227, Sep. 2020.
- [342] L. Moysis, E. Petavratzis, C. Volos, H. Nistazakis and I. Stouboulos, "A chaotic path planning generator based on logistic map and modulo tactics", *Robot. Auto. Syst.*, vol. 124, Feb. 2020.
- [343] E. Petavratzis, C. Volos, A. Ouannas, H. Nistazakis, K. Valavanis and I. Stouboulos, "A 2D discrete chaotic memristive map and its application in robot's path planning", *Proc. 10th Int. Conf. Modern Circuits Syst. Technol. (MOCASST)*, pp. 1-4, Jul. 2021.

- [344] Kim, B. and Tsiotras, P., 2002, "Controllers for unicycle-type wheeled robots: Theoretical results and experimental validation", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 3, pp. 294-307.
- [345] Maaref, H. and Barret, C. , 2002, "Sensor-based navigation of a mobile robot in an indoor environment", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-18.
- [346] Hoseinnezhad, R., Moshiri, B. and Asharif, M.R., 2003, "Improved pose estimation for mobile robots by fusion of odometry data and environment map", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 36, No. 1, pp. 89-108.
- [347] Berlanga, A., Sanchis, A., Isasi, P. and Molina, J.M., 2002, "Neural network controller against environment: A coevolutionary approach to generalize robot navigation behavior", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 33, No. 2, pp. 139-166.
- [348] N. Hara, H. Kokame, K. Konishi, Circular periodic motion generation for mobile robots using limit cycle systems, in: *Proc. of the American Control Conference, ACC, Baltimore, USA, June 2010*, pp. 4271–4276.
- [349] M. Walid, M. M. Elnaggar, W. S. Sayed, L. A. Said and A. G. Radwan, "A Comparative Study of Different Chaotic Systems in Path Planning for Surveillance Applications," *2021 International Conference on Microelectronics (ICM), New Cairo City, Egypt, 2021*, pp. 25-28
- [350] D.I. Curiac, C. Volosencu, Developing 2D trajectories for monitoring an area with two points of interest, in: *Proc. of the 10th WSEAS Int. Conference on Automation and Information, 2009*, pp. 366–369.
- [351] Cuomo, K.M, Oppenheim, A.V. and Strogatz, S.H., 1993, "Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II – Analog and Digital Processing*, Vol. 40, No. 10, pp. 626-633.
- [352] Y. Bae, "Obstacle avoidance method in the chaotic robot", *Proc. 23rd Digit. Avionics Syst. Conf.*, pp. 12, 2004.
- [353] Y. Bae, "Target searching method in the chaotic mobile robot", *Proc. 23rd Digit. Avionics Syst. Conf.*, pp. 12, 2004.
- [354] Y. Bae, J. Kim, and Y. Kim, "Chaotic behavior analysis in the mobile robot of embedding some chaotic equation with obstacle," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 13, no. 6. Korean Institute of Intelligent Systems, pp. 729–736, 01-Dec-2003.
- [355] L. M. Pecora and T. L. Carroll, "Synchronization in chaotic systems", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, no. 8, pp. 821, Feb. 1990.
- [356] L. M. Pecora, T. L. Carroll, G. A. Johnson, D. J. Mar and J. F. Heagy, "Fundamentals of synchronization in chaotic systems concepts and applications", *Chaos Interdiscipl. J. Nonlinear Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 520-543, Dec. 1997.
- [357] A. Zhu and H. Leung, "Cooperation random mobile robots based on chaos synchronization", *Proc. IEEE Mechatronics Int. Conf.*, pp. 1-5, May 2007.
- [358] E. Bitton and K. Goldberg, "Hydra: A framework and algorithms for mixed-initiative UAV-assisted search and rescue," in *4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, Key Bridge Marriott, Washington DC, USA, Aug. 2008, pp. 61–66.

- [359] A. A. Koronovski, A.V.Starodubov, and A. E. Khramov, "Attractor coverage time, time dimension, and its relation to capacity dimension," in *Technical Physics Letters*, vol. 29, no. 12. Heidelberg, Germany: MAIK Nauka/Interperiodica distributed exclusively by Springer Science+Business Media LLC, Dec. 2003, pp. 1037–1039.
- [360] L. Moysis, K. Rajagopal, A. V. Tutueva, C. Volos, B. Teka and D. N. Butusov, "Chaotic path planning for 3D area coverage using a pseudo-random bit generator from a 1D chaotic map", *Mathematics*, vol. 9, no. 15, pp. 1821, 2021, [online] Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/9/15/1821>.
- [361] E. K. Petavratzis, C. K. Volos, I. N. Stouboulos, H. E. Nistazakis, K. G. Kyritsi and K. P. Valavanis, "Coverage performance of a chaotic mobile robot using an inverse pheromone model", *Proc. 8th Int. Conf. Modern Circuits Syst. Technol. (MOCASST)*, pp. 1-4, May 2019.
- [362] E. Petavratzis, C. Volos, L. Moysis, H. Nistazakis, A. Giakoumis and I. Stouboulos, "Experimental coverage performance of a chaotic autonomous mobile robot", *Proc. 11th Int. Conf. Modern Circuits Syst. Technol. (MOCASST)*, pp. 1-4, Jun. 2022.
- [363] E. Petavratzis, C. Volos and I. Stouboulos, "Experimental study of terrain coverage of an autonomous chaotic mobile robot", *Integration*, vol. 90, pp. 104-114, May 2023
- [364] C. K. Volos, I. M. Kyprianidis, I. N. Stouboulos and A. N. Anagnostopoulos, "Experimental study of the dynamic behavior of a double scroll circuit", *J. Appl. Funct. Anal.*, vol. 4, no. 4, pp. 703-711, 2009.
- [365] I. M. Kyprianidis, A. N. Bogiatzi, M. Papadopoulou, I. N. Stouboulos, G. N. Bogiatzis, and T. Bountis, "Synchronizing Chaotic Attractors of Chua's Canonical Circuit: The case of Uncertainty in Chaos Synchronization", *International Journal of Bifurcation and Chaos* 2006 16:07, 1961-1976
- [366] I. N. Stouboulos, I. M. Kyprianidis, and M.S. Papadopoulou, "Experimental Study of Antimonotonicity in a 4th Order Nonlinear Autonomous Electric Circuit", *WSEAS TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS*, Issue 11, Vol. 5, November 2006, 1662-1668.
- [367] M.S. Papadopoulou, I.M. Kyprianidis, I.N. Stouboulos, "Complex Chaotic Dynamics of the Double-Bell Attractor", *WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS AND SYSTEMS*, Vol. 7, 2008, 13-21.
- [368] I.N. Stouboulos, I.M. Kyprianidis, M.S. Papadopoulou, "Chaotic dynamics and coexisting attractors in a modified Chua's circuit", *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, Issue 11, Vol. 5, November 2006, 1640-1646.
- [369] M.S. Papadopoulou, I.M. Kyprianidis, I.N. Stouboulos, "Study of the Behavior of a 4th Order Non Driven Circuit. Chaotic Synchronization of Two Identical Circuits", *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, Issue 7, Vol. 5, July 2006, 993-1000.
- [370] M. S. Papadopoulou, I. M. Kyprianidis, I. N. Stouboulos, "Chaotic Dynamics of Coupled Nonlinear Circuits in Ring Connection", in *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM)*, Athens 2012, Greece, pp. 177-184.
- [371] M.S. Papadopoulou, I.M. Kyprianidis, I.N. Stouboulos, "Dynamics of two resistively coupled electric circuits of 4th order", in *WSEAS Proceedings of the 10th International Conference on CIRCUITS*, Athens 2006, Greece, pp. 191-196.

[372] R. Méndez-Ramírez, A. Arellano-Delgado, M. Murillo-Escobar and C. Cruz-Hernández, "Degradation analysis of chaotic systems and their digital implementation in embedded systems", *Complexity*, vol. 2019, Dec. 2019.