

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ



ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΠΑΡΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΔΡ. ΜΗΝΑΣ ΔΑΣΥΓΕΝΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ

2023

Η παρούσα διατριβή υποβλήθηκε με σκοπό τη μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για την απόκτηση του τίτλου του Διδάκτορα του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Η υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής συγχρηματοδοτήθηκε από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», 2014-2020, στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας Υποδράση 2: Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ σε υποψηφίους διδάκτορες των ΑΕΙ της Ελλάδας»



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Μηνάς Δασυγένης, Επίκουρος Καθηγητής Π.Δ.Μ.

ΜΕΛΗ ΤΡΙΜΕΛΟΥΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Πέτρος Δάρας, Ερευνητής Α' Βαθμίδας, Ι.Π.ΤΗΛ Ε.Κ.Ε.Τ.Α.

Νικόλαος Πλόσκας, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Δ.Μ.

Μηνάς Δασυγένης, Επίκουρος Καθηγητής Π.Δ.Μ.

ΜΕΛΗ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Γεώργιος Φραγκούλης, Καθηγητής Π.Δ.Μ.

Πέτρος Δάρας, Ερευνητής Α' Βαθμίδας Ε.Κ.Ε.Τ.Α.

Μαλαματή Λούτα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Π.Δ.Μ.

Νικόλαος Πλόσκας, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Δ.Μ.

Μηνάς Δασυγένης, Επίκουρος Καθηγητής Π.Δ.Μ.

Δημήτριος Καραμπατζάκης, Επίκουρος Καθηγητής ΔΙ.ΠΑ.Ε

Κοσμάς Δημητρόπουλος, Ερευνητής Γ' Βαθμίδας Ε.Κ.Ε.Τ.Α.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας δε σημαίνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

Στην οικογένεια μου....

Περίληψη

Εξαιτίας της ραγδαίας τεχνολογικής και επιστημονικής ανάπτυξης, τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται η ολοένα και αυξανόμενη χρήση των ρομποτικών συστημάτων σε πολλούς τομείς, όπως η γεωργία, η εξερεύνηση της θάλασσας και χαρτογράφηση. Παρόλο που η ρομποτική δίνει λύση σε μια σειρά από προβλήματα, νέα προβλήματα που χρήζουν λύση έρχονται στην επιφάνεια. Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα είναι ο σχεδιασμός μιας διαδρομής που καλύπτει όλα τα σημεία μιας προκαθορισμένης περιοχής και αποφεύγει σημεία με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως εμπόδια και περιοχές απαγορευμένης πτήσης. Το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό και ως Σχεδιασμός Διαδρομής Κάλυψης (ΣΔΚ).

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στο πολυδιάστατο πρόβλημα της ρομποτικής πλοήγησης, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην πρόκληση του ΣΔΚ. Αρχικά, περιγράφονται οι ιστορικές προοπτικές της ρομποτικής και των ποικίλων εφαρμογών τους, θέτοντας στον αναγνώστη τις βάσεις της εξέλιξης και του μετασχηματιστικού ρόλου των ρομπότ σε διάφορους τομείς της ζωής του ανθρώπου. Στη συνέχεια αναλύεται η καίρια πρόκληση της πλοήγησης και η σημασία του ΣΔΚ, παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη συζήτηση που ακολουθεί.

Στην πρώτη συνεισφορά της διατριβής, παρουσιάζεται μια μέθοδος διαχωρισμού της περιοχής, που αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις πολυπλοκότητες του ΣΔΚ σε περιπτώσεις πολλαπλών ρομπότ. Με τον αποτελεσματικό διαχωρισμό της περιοχής, αυτή η μεθοδολογία εξασφαλίζει την αποτελεσματικότερη και την πιο αποδοτική κάλυψη του χώρου. Στη δεύτερη συνεισφορά της διατριβής, παρουσιάζεται μια τεχνική για τη βελτίωση των υποπεριοχών των ρομπότ, με σκοπό τη δημιουργία πιο αποδοτικών διαδρομών κάλυψης. Έτσι, αφενός διευκολύνεται η ομαλότερη πλοήγηση, και αφετέρου επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι συνεισφορές που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή, διαμορφώνουν μια πορεία προς πιο προηγμένες, αποδοτικές και βιώσιμες λύσεις ρομποτικής πλοήγησης, υπογραμμίζοντας τον καθοριστικό ρόλο των αλγορίθμων στη διαμόρφωση του μέλλοντος των ρομποτικών εφαρμογών.

Λέξεις κλειδιά: Αλγόριθμοι Ρομποτικής, Αυτόνομα Οχήματα, Σχεδιασμός Διαδρομής Κάλυψης, Κατανάλωση Ενέργειας Ρομποτικών Εφαρμογών

Abstract

Due to the rapid technological and scientific development, in recent years, autonomous robots are being used in several application domains, such as mapping, agriculture and deep-sea exploration. Although the usage of robotics provides a solution to a number of problems, new problems that need to be solved are coming to the surface. One of the most important problems is the problem of finding a path that covers the entire area of interest in a predefined environment while avoiding obstacles. This problem is also known as Coverage Path Planning (CPP).

This thesis focuses on the complex problem of robotic navigation, with a particular emphasis on the challenge of CPP. First, the historical perspectives of robotics and their diverse applications are described, setting the reader the foundation of the evolution and transformative role of robots in various areas of human life. The key challenge of navigation and the importance of CPP are then discussed, providing a comprehensive framework for the discussion that follows.

In the first contribution of the thesis, an area partitioning method is presented that effectively addresses the complexities of the SDK in multi-robot cases. By effectively partitioning the area, this methodology ensures the most efficient and effective coverage of the area. In the second contribution of the thesis, a technique for optimizing the sub-regions of the robots is presented to generate more efficient coverage paths. This facilitates smoother navigation on the one hand and achieves significant energy savings on the other hand.

The contributions presented in this thesis form a path towards more advanced, efficient and sustainable robotic navigation solutions, highlighting the crucial role of algorithms in shaping the future of robotic applications.

Keywords: Robotics Algorithms, Autonomous Vehicles, Coverage Path Planning, Energy Consumption of Robotic Applications

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	iv
Abstract	v
Πίνακας Περιεχομένων	vi
Κατάλογος Εικόνων	viii
Κατάλογος Πινάκων.....	x
Κατάλογος Αλγορίθμων.....	xi
Απόδοση Όρων – Πίνακας Συντομογραφιών.....	xii
Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων	xiii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορική αναδρομή στις ρομποτικές εφαρμογές.....	2
1.2 Οι ρομποτικές εφαρμογές σήμερα	6
1.3 Πλοήγηση ρομποτικών εφαρμογών	10
1.3.1 Ο ρόλος της πλοήγησης στη ρομποτική	10
1.3.2 Η σημαντικότητα του σχεδιασμού δρομολογίου κάλυψης.....	12
1.3.3 Περιορισμοί αλγορίθμων σχεδιασμού δρομολογίου κάλυψης	14
1.4 Ερευνητικοί στόχοι και ερωτήματα της παρούσας διατριβής.....	17
1.5 Πλάνο έρευνας	19
1.6 Διάρθρωση της διατριβής	21
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο	23
2.1 Εισαγωγή στους αλγορίθμους σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης	24
2.1.1 Προβλήματα σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης.....	24
2.1.2 Διαφορές μεταξύ online και offline αλγορίθμων.....	26
2.2 Αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης	30
2.2.1 Ακριβής κυτταρική αποσύνθεση	31
2.2.2 Προσεγγιστική αποσύνθεση	34
2.2.3 Αλγόριθμοι ανταμοιβής.....	43
2.3 Προκλήσεις στην περίπτωση πολλαπλών ρομπότ	45
2.3.1 Διαμοιρασμός της περιοχής σε πολλαπλά ρομπότ	45
2.3.2 Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.....	46
2.4 Σύνοψη κεφαλαίου.....	47
Κεφάλαιο 3: Διαμοιρασμός της περιοχής σε προβλήματα πολλαπλών ρομπότ ..	49
3.1 Εισαγωγή.....	50
3.2 Ορισμός του προβλήματος.....	53
3.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση	56

3.4	Η προτεινόμενη προσέγγιση.....	60
3.4.1	Αρχικοποίηση δεδομένων	60
3.4.2	Υπολογισμός της κανονικοποιημένης απόστασης	62
3.4.3	Υπολογισμός του πίνακα ομοιότητας.....	63
3.4.4	Ανταλλαγή μηνυμάτων διατηρώντας τη γειτνίαση	65
3.4.5	Δημιουργία υποπεριοχών	66
3.5	Πειραματική διαδικασία	69
3.6	Συζήτηση	76
3.6.1	Περιορισμοί.....	76
3.6.2	Λειτουργία σε στατικά περιβάλλοντα	76
3.6.3	Χρονική και χωρική πολυπλοκότητα	76
3.6.4	Βελτίωση της απόδοσης	77
3.7	Συμπεράσματα.....	79
Κεφάλαιο 4: Βελτίωση των περιοχών κάλυψης.....		81
4.1	Εισαγωγή	82
4.2	Ορισμός προβλήματος	84
4.3	Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	87
4.4	Η προτεινόμενη προσέγγιση.....	89
4.4.1	Διαμοιρασμός και βελτιστοποίηση της περιοχής.....	89
4.4.2	Ανταλλαγή κόμβων	95
4.5	Πειραματική διαδικασία	99
4.6	Μείωση Κατανάλωσης ενέργειας.....	100
4.7	Συμπεράσματα.....	103
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα		105
5.1	Προκλήσεις και ανάγκες βελτίωσης.....	106
5.2	Συνεισφορά της εργασίας	111
5.2.1	Διαμοιρασμός της περιοχής στα ρομπότ	111
5.2.2	Βελτιστοποίηση των περιοχών για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.....	112
5.2.3	Απάντηση των ερευνητικών ερωτημάτων που τέθηκαν στην εισαγωγή.....	113
5.3	Επίλογος	115
Βιβλιογραφία		117
Παράρτημα δημοσιεύσεων		129

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 – Το περιστέρι του Αρχύτα.....	2
Εικόνα 2 – Αυτόνομο επίγειο ρομπότ σε χωράφι.....	8
Εικόνα 3 – Η διαδρομή οργώματος εντός του χωραφίου.	12
Εικόνα 4 – Ανίχνευση εμποδίου από το ρομπότ.	28
Εικόνα 5 – Κάλυψη χώρου με κινήσεις ζιγκ-ζαγκ.	31
Εικόνα 6 – Τραπεζοειδής αποσύνθεση χώρου.....	33
Εικόνα 7 – Boustrophedon αποσύνθεση χώρου.....	34
Εικόνα 8 – Προσεγγιστική αποσύνθεση χώρου σε κελιά.....	35
Εικόνα 9 – Κυματοειδής κάλυψη χώρου.....	38
Εικόνα 10 – Απεικόνιση του περιβάλλοντος με γράφους.....	38
Εικόνα 11 – Δέντρο κάλυψης χώρου.....	39
Εικόνα 12 – Γραφική αναπαράσταση ενός mega cell.....	41
Εικόνα 13 – Γειτνίαση τεσσάρων επιπέδων μεταξύ των κελιών.....	55
Εικόνα 14 - Γραφική αναπαράσταση του προτεινόμενου αλγορίθμου	60
Εικόνα 15 – Μετατροπή του περιβάλλοντος σε σύνολο σημείων	61
Εικόνα 16 – Υπολογισμός κανονικοποιημένης απόστασης	63
Εικόνα 17 – Ομοιότητα μεταξύ δυο σημείων	65
Εικόνα 18 – Υπολογισμός υποπεριοχών	68
Εικόνα 19 – Υπολογισμός υποπεριοχών στο μεγαλύτερο περιβάλλον	73
Εικόνα 20 – Υπολογισμός υποπεριοχών με διαφορετικές τιμές βάρους	74
Εικόνα 21 – Υποπεριοχές χαμηλής ομοιογένειας.....	75
Εικόνα 22 – Σχηματική απεικόνιση αλγορίθμου	90
Εικόνα 23 – Παράδειγμα διαμοιρασμού περιοχής σε 2 ρομπότ.....	91
Εικόνα 24 – Παράδειγμα διαμοιρασμού περιοχής σε 3 ρομπότ.....	92
Εικόνα 25 – Επιρροή του χώρου στο πλήθος των στροφών του ΔΚΧ.....	93
Εικόνα 26 – Παράδειγμα μεταβολής πλήθους στροφών	94
Εικόνα 27 – Πλήθος στροφών σε ΔΚΧ.....	96

Εικόνα 28 – Συνολική οπτική αναπαράσταση του αλγορίθμου.....	98
--	----

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Πειραματικά αποτελέσματα σε δύο περιβάλλοντα.	71
Πίνακας 2. Πειραματικά αποτελέσματα υπολογισμού υποπεριοχών	75
Πίνακας 3. Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....	99

Κατάλογος Αλγορίθμων

Αλγόριθμος 1. Υπολογισμός της απόστασης μεταξύ δύο σημείων	62
Αλγόριθμος 2. Διαδικασία υπολογισμού του πίνακα ομοιότητας S	64
Αλγόριθμος 3. Προσαρμοσμένη ανταλλαγή μηνυμάτων	66
Αλγόριθμος 4. Υπολογισμός γειτονικών κελιών	66
Αλγόριθμος 5. Δημιουργία των υποπεριοχών.....	67
Αλγόριθμος 6. Μείωση τις ανάμειξης στο αρχικά διαιρεμένο περιβάλλον.....	95

Απόδοση Όρων – Πίνακας Συντομογραφιών

ACO	Ant Colony Optimization
AP	Affinity Propagation
AMR	Autonomous Mobile Robot
ANN	Artificial Neural Network
BSA	Backtracking Spiral Algorithm
CNC	Computer Numerical Control
CNN	Convolutional Neural Network
CPP	Coverage Path Planning
CPSO	Chaotic Particle Swarm Optimization
CPU	Central Processing Unit
FOV	Field Of View
FPGA	Field Programme Gate Array
GPU	Graphics Processing Unit
IoT	Internet of Things
LIDAR	Light Detection and Ranging
MST	Minimum Spanning Tree
RAM	Random Access Memory
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
ST	Spanning Tree
STC	Spanning Tree Coverage
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
AK	Ανταλλαγή Κελιού
ΔΚΧ	Δέντρο Κάλυψής Χώρου
ΔτΠ	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
ΕΔΚ	Ελάχιστο Δέντρο Κάλυψης
ΕΣ	Ενσωματωμένα Συστήματα
ΚΜΕ	Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας
ΣΔΚ	Σχεδιασμός Διαδρομής Κάλυψης

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Η παρούσα διατριβή δεν έχει υποβληθεί προηγουμένως για την εκπλήρωση των απαιτήσεων απονομής βραβείου σε αυτό ή σε οποιοδήποτε άλλο ίδρυμα τριτοβάθμιας εκπαίδευσης. Εξ όσων γνωρίζω και πιστεύω, η διατριβή δεν περιέχει υλικό που έχει προηγουμένως δημοσιευθεί ή γραφτεί από άλλο πρόσωπο, εκτός εάν γίνεται η σχετική αναφορά.

Υπογραφή: _____

Ημ/νία: _____

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Καθώς ο κόσμος γίνεται όλο και πιο συνυφασμένος με τις τεχνολογικές εξελίξεις, η ρομποτική αναδύεται στην πρώτη γραμμή αυτής της εξέλιξης, αναδιαμορφώνοντας πολλές πτυχές της ζωής του ανθρώπου. Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να συστήσει τον αναγνώστη στην έννοια της ρομποτικής και των εφαρμογών της. Αρχικά, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή, καθώς και πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και την εξέλιξη των ρομποτικών τεχνολογιών μέσα στο πέρασμα των χρόνων. Εμβαθύνοντας, η εστίαση μετατοπίζεται στις σύγχρονες εφαρμογές των ρομπότ, αναδεικνύοντας τον κομβικό τους ρόλο σε διάφορους τομείς της σύγχρονης ζωής. Το κεντρικό θέμα που πραγματεύεται το κεφάλαιο είναι η πλοήγηση των ρομποτικών συστημάτων, και πιο συγκεκριμένα ο Σχεδιασμός Διαδρομής Κάλυψης (ΣΔΚ). Επιπλέον, παρουσιάζονται λεπτομερώς οι ερευνητικοί στόχοι που έχουν τεθεί και τα ερευνητικά ερωτήματα που αποσκοπεί να απαντήσει η παρούσα διατριβή. Στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου, περιλαμβάνεται η διάρθρωση της διατριβής για τα επόμενα κεφάλαια που ακολουθούν.

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Από τις μυστηριώδεις μηχανικές φιγούρες των αρχαίων πολιτισμών, όπως το μηχανικό περιστέρι του Αρχύτα [1] (Εικόνα 1) ή τους πνευματικούς αυτοματισμούς του Ήρωνα της Αλεξάνδρειας [2], μέχρι τα σημερινά ρομπότ τελευταίας τεχνολογίας με ενσωματωμένη τεχνητή νοημοσύνη [3], το ταξίδι της ρομποτικής αναδεικνύει την επιτομή του ανθρώπινου οράματος, της επιμονής και της εφευρετικότητας. Σε όλη τη διάρκεια της ιστορίας, οι αλληλένδετες αφηγήσεις της επιστήμης, της τεχνολογίας και της καλλιτεχνίας διαιώνισαν την ανάπτυξη και την εξέλιξη των ρομποτικών μηχανισμών [4], [5]. Πρόκειται για ένα πεδίο που έχει γνωρίσει όχι μόνο πρόοδο αλλά και επαναστατικούς μετασχηματισμούς. Αυτές οι μεταβάσεις δεν ήταν απλές τεχνικές αναβαθμίσεις- ήταν σημαδιακές αλλαγές που έχουν διαδοθεί σε όλους τους κλάδους, έχουν μεγεθύνει τις ανθρώπινες ικανότητες και, σε ορισμένες περιπτώσεις, έχουν επαναπροσδιορίσει τους κοινωνικούς κανόνες και τις δομές.

Ένα από τα γοητευτικά στοιχεία της πρώιμης ρομποτικής ήταν η σύνδεσή της με την τέχνη και την ψυχαγωγία [6]. Στην αρχαία Ελλάδα, οι αυτόματες μηχανές δεν ήταν απλά μηχανές - αποτελούσαν ενσαρκώσεις της μυθολογίας, των ιστοριών των θεών και του αχανούς σύμπαντος [1]. Τέτοιες μηχανές χρησιμοποιούνταν συχνά σε ναούς ή για την εξυπηρέτηση βασιλικών προσώπων, προκαλώντας γοητεία με τον περίπλοκο σχεδιασμό τους και τις φαινομενικά «μαγικές» λειτουργίες τους.



Εικόνα 1 – Το περιστέρι του Αρχύτα.

Η πρώτη αυτόνομη πτητική μηχανή της αρχαιότητας. Αποτελούνταν από ένα ελαφρύ αλλά ισχυρό κέλυφος που είχε τη μορφή περιστεριού και έφερε εσωτερικά την κύστη ενός μεγάλου ζώου.

Στην αρχαία Κίνα, αυτοματοποιημένες φιγούρες που κινούνταν με νερό και περίπλοκους μηχανισμούς ρολογιού μάγευαν τους αυτοκράτορες και την αυλή, αναδεικνύοντας έτσι την κατανόηση των βασικών μηχανικών αρχών από τους δημιουργούς τους [6]. Παράλληλα, κατά τη χρυσή εποχή του Ισλάμ εφευρέτες όπως

ο Αλ Τζαζάρι σχεδίασαν και κατασκεύασαν μια σειρά από αξιοσημείωτες μηχανικές συσκευές, όπως ρολόγια νερού και αυτόματους μουσικούς, οι οποίες συχνά θεωρούνται πρόδρομοι της σύγχρονης ρομποτικής [7].

Στην αρχαία Ινδία, η έννοια των αυτόματων μηχανών εντοπίζεται στα πλούσια μυθολογικά της κείμενα. Οι θρύλοι από τη Μαχαμπαράτα [8] και τη Ραμαγιάνα [9] μιλούν για πολεμιστές-μηχανές, και άρματα με αυτοματοποιημένη κίνηση, υπονοώντας μια εννοιολογική κατανόηση των μηχανών που δρουν από μόνες τους. Αν και η ύπαρξη αυτών των ρομπότ παραμένει στη σφαίρα της μυθολογίας, τα ιστορικά κείμενα αναφέρονται στη χρήση διαφόρων μηχανικών συσκευών στους ναούς, όπως οι πόρτες των ναών που άνοιγαν με τη χρήση κρυφών μηχανισμών ή υδάτινων βαρών. Αυτές οι κατασκευές, αν και έχουν κυρίως πνευματικό και διακοσμητικό χαρακτήρα, αντανακλούν την αρχαία περιέργεια της Ινδίας προς την αυτοματοποίηση και τη μηχανική

Στο μεσαίωνα, το ενδιαφέρον για τις αυτοματοποιημένες συσκευές και τις ανθρωπόμορφες μηχανές διατηρήθηκε. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, αναπτύχθηκαν διάφορες μηχανικές κατασκευές, σχεδιασμένες να μιμούνται ανθρώπινες ή ζωικές ενέργειες [10]. Ένα παράδειγμα τέτοιων μηχανισμών, είναι οι πύργοι των ρολογιών στα Ευρωπαϊκά μοναστήρια και στις εκκλησίες. Αυτοί οι πύργοι, διέθεταν περίτεχνους μηχανισμούς, διακοσμημένους με ιππότες που μάχονταν, ή πουλιά που κελαηδούσαν, και εξυπηρετούσαν διπλό σκοπό: ανακοίνωναν την ώρα, σηματοδοτώντας τις ώρες προσευχής, ενώ παράλληλα παρείχαν ψυχαγωγία και θαυμασμό σε όσους τα παρακολουθούσαν.

Η Βυζαντινή περίοδος, που διήρκεσε από την πτώση της Δυτικής Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας τον 5ο αιώνα μ.Χ., έως την πτώση της Κωνσταντινούπολης το 1453, είχε επίσης αξιοσημείωτες εξελίξεις στις αυτόματες μηχανές [11]. Οι Βυζαντινοί αυτοκράτορες, που συχνά διέπονταν από μια τάση μεγαλοπρέπειας, είχαν ιδιαίτερη αδυναμία στις εντυπωσιακές επιδείξεις των τεχνολογικών θαυμάτων. Η αίθουσα του θρόνου στο Μεγάλο Παλάτι της Κωνσταντινούπολης, για παράδειγμα, λέγεται ότι ήταν εξοπλισμένη με χρυσά μηχανικά λιοντάρια που βρυχόντουσαν και μηχανικά πουλιά που κελαηδούσαν. Αυτές οι μεγαλοπρεπείς επιδείξεις όχι μόνο αναδείκνυαν τη γλιδή της αυτοκρατορίας, αλλά χρησίμευαν επίσης ως απόδειξη της βυζαντινής μηχανικής ικανότητας, που συχνά αποσκοπούσε στο δέος των επισκεπτών και των υψηλόβαθμων προσώπων.

Κατά τη διάρκεια της Ευρωπαϊκής Αναγέννησης, φωστήρες όπως ο Λεονάρντο ντα Βίντσι οραματίστηκαν και σχεδίασαν ανθρωποειδή ρομπότ, φέρνοντας σε επαφή την τέχνη, τη μηχανική και την ανατομία [12]. Τα σχέδιά του, αν και δεν υλοποιήθηκαν ποτέ, έδειχναν μια απίστευτη κατανόηση της ανθρώπινης φυσιολογίας. Το ανθρωπόμορφο ρομπότ που δημιούργησε, ντυμένο με μεσαιωνική πανοπλία, αποτελεί απόδειξη της αστείρευτης περιέργειας και της ιδιοφυΐας του δημιουργού του. Αυτά τα φιλόδοξα οράματα τεχνητών οντοτήτων με ανθρώπινη μορφή, μαζί με μια πληθώρα άλλων σχεδίων και μηχανισμών, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ανάφλεξη του ενδιαφέροντος για τους «μηχανοποιημένους» ανθρώπους και ζώα.

Ωστόσο, η βιομηχανική εποχή ήταν αυτή που πραγματικά μετατόπισε το μοντέλο της ρομποτικής από την απλή γοητεία στη λειτουργική εφαρμογή [13]. Η ανάγκη για αποδοτικές μεθόδους παραγωγής άνοιξε το δρόμο για τα πρώτα βιομηχανικά ρομπότ. Οι μηχανές αυτές, αν και ήταν αρχικά απλές στη λειτουργία τους, άρχισαν να αναλαμβάνουν επαναλαμβανόμενες εργασίες, ενισχύοντας πολλαπλά τις παραγωγικές δυνατότητες.

Εντούτοις, το επίκεντρο της ρομποτικής αναγέννησης τοποθετείται στον 20ό αιώνα. Τα μέσα της δεκαετίας του 1900 ήταν μια καθοριστική περίοδος για τη ρομποτική. Το 1954, ο George Devol σχεδίασε το πρώτο προγραμματιζόμενο ρομπότ, το οποίο τελικά οδήγησε στη δημιουργία του Unimate το 1961 [14], [15]. Αυτό το ρομπότ, το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ στον κόσμο, βρήκε τη θέση του στη γραμμή συναρμολόγησης της General Motors, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες της ρομποτικής σε πραγματικές εφαρμογές.

Στο δεύτερο μισό του 20ού αιώνα παρατηρήθηκε η συγχώνευση της ρομποτικής με την επιστήμη των υπολογιστών και την ηλεκτρονική μηχανική. Ερευνητές όπως ο Rodney Brooks πίεσαν για πιο προσαρμοστικές, αποκεντρωμένες ρομποτικές αρχιτεκτονικές που ήταν εμπνευσμένες από τη βιολογία [16], [17], ενώ ο Hans Moravec και ο Marvin Minsky οραματίστηκαν ένα μέλλον στο οποίο κυριαρχούσαν οι ευφυείς μηχανές [18]–[20].

Σήμερα, η ρομποτική δεν αφορά μόνο την κατασκευή μηχανοποιημένων οντοτήτων. Πρόκειται για τη δημιουργία συστημάτων που μπορούν να μαθαίνουν, να προσαρμόζονται και να συνεργάζονται με τον άνθρωπο [21]–[24]. Τα σύγχρονα ρομπότ, εξοπλισμένα με προηγμένους αλγορίθμους [25], τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

(Artificial Neural Networks, ANN) [26] και μηχανισμούς μάθησης [27], καταρρίπτουν τα όρια αυτού που κάποτε θεωρούνταν δυνατό. Η ρομποτική σήμερα αφορά τη συμπλήρωση των ανθρώπινων ικανοτήτων, εξασφαλίζοντας ότι οι μηχανές μπορούν να ενσωματωθούν απρόσκοπτα στην καθημερινή μας ζωή, βοηθώντας σε διάφορους κλάδους, από την υγειονομική περίθαλψη [28], [29] έως την ψυχαγωγία [30], [31], και ακόμη και να επιχειρήσουν σε τομείς όπου η ανθρώπινη παρουσία μπορεί να είναι επικίνδυνη [32]–[36].

Ζούμε σε μια εποχή όπου η ρομποτική δεν μιμείται απλώς τις ανθρώπινες ενέργειες - τις ενισχύει και τις επαυξάνει. Οι μηχανές δεν είναι απλά εργαλεία, αλλά συμμέτοχοι, συνεργάτες, και σε ορισμένες περιπτώσεις, πρωτοπόροι. Η ρομποτική θα γίνει όλο και πιο ενδιαφέρουσα, πιο πολύπλοκη και πιο συνυφασμένη με την ιστορία της ανθρώπινης προόδου καθώς εξελίσσεται συνεχώς.

1.2 ΟΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΗΜΕΡΑ

Καθώς η ανθρωπότητα προχωρά στα αχαρτογράφητα νερά του 21ου αιώνα, η ρομποτική κρατάει σταθερά τα ηνία, οδηγώντας μας σε μια εποχή όπου οι μηχανές δεν συμπληρώνουν απλώς, αλλά συχνά ηγούνται των ανθρώπινων δραστηριοτήτων [37]. Αυτή η εποχή, γεμάτη υποσχέσεις και δυνατότητες, δεν βλέπει τα ρομπότ ως μακρινές έννοιες που καταγράφονται σε ακαδημαϊκά περιοδικά ή βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο σε προηγμένα εργαστήρια, αλλά ως αναπόσπαστα στοιχεία της καθημερινής μας ζωής. Σε κάθε σημείο που κοιτάζει κανείς, μπορεί να δει παντού τη σύμπραξη της ανθρώπινης δημιουργικότητας και της ρομποτικής ακρίβειας που ζωγραφίζουν τον ζωντανό πίνακα της σύγχρονης εποχής μας.

Η ρομποτική επαναπροσδιορίζει τον τομέα της σύγχρονης βιομηχανίας [38], [39], καθιστώντας παρωχημένες τις παραδοσιακές πρακτικές και εισάγοντας καινοτομίες. Το σύγχρονο εργοστάσιο δεν περιλαμβάνει απλώς ανθρώπους με εργαλεία, αλλά μια αρμονική συνεργασία ανθρώπων και ρομπότ [40], [41]. Χάρη στην ανάπτυξη των Ενσωματωμένων Συστημάτων (ΕΣ) και της χρήσης τους, οι εργασίες που κάποτε θεωρούνταν ρουτίνα, εκτελούνται τώρα με εκπληκτική ακρίβεια και ταχύτητα, εισάγοντας μια εποχή αυξημένης αποδοτικότητας και παραγωγικότητας [42].

Ο βιομηχανικός κόσμος, ακρογωνιαίος λίθος του ανθρώπινου πολιτισμού από την αρχή της βιομηχανικής επανάστασης, έχει μεταμορφωθεί ριζικά χάρη στη ρομποτική [43]. Οι αυτοματοποιημένοι ρομποτικοί βραχίονες, με τις ακριβείς και μεθοδικές κινήσεις τους, μπορούν να συγκολλούν, να συναρμολογούν και να επιθεωρούν με ακρίβεια και συνέπεια που ξεπερνά τις ανθρώπινες ικανότητες [44], [45]. Από τις μηχανές Computer Numerical Control (CNC) που χαράζουν περίπλοκα σχέδια μέχρι τα drones που παρακολουθούν μεγάλα εργοστάσια, η συνέργεια ανθρώπου και μηχανής έχει εγκαινιάσει μια εποχή πρωτοφανούς αποτελεσματικότητας και ακρίβειας. Αυτή η εξέλιξη δεν καταδεικνύει βέβαια μόνο την πρόοδο της τεχνολογίας, αλλά και την προσαρμοστικότητα και το καινοτόμο πνεύμα της ανθρωπότητας.

Ένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της μετασχηματιστικής δύναμης είναι η αυτοκινητοβιομηχανία [3]. Τα αυτοκίνητα, που κάποτε αποτελούσαν σύμβολα του ανθρώπινου μηχανικού θαύματος, συναρμολογούνται τώρα κατά κόρον από ρομποτικά συστήματα [46], [47]. Αυτά τα ρομποτικά

συστήματα, βάφουν τα οχήματα, τοποθετούν περίπλοκα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και διεξάγουν ακόμη και ελέγχους ποιότητας, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τόσο την τήρηση των προδιαγραφών όσο και την ελαχιστοποίηση των λαθών στην παραγωγή. Το ίδιο παρατηρείται και στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρονικών ειδών, μια βιομηχανία που έχει επίσης μεγάλες απαιτήσεις ακρίβειας, ταχύτητας και συνέπειας [48]. Εδώ, τα ρομπότ τύπου Selective Compliance Assembly Robot Arm (SCARA) χρησιμοποιούνται τόσο για την τοποθέτηση μικροσκοπικών εξαρτημάτων σε πλακέτες κυκλωμάτων, όσο και για τη συγκόλληση μικροσκοπικών συνδέσεων και τη δοκιμή πολύπλοκων ηλεκτρονικών συσκευών.

Πέρα όμως από τη βιομηχανία και τις γραμμές παραγωγής, τα ρομπότ διεισδύουν όλο και περισσότερο σε τομείς που μέχρι πρότινος θεωρούνταν αποκλειστικός τομέας των ανθρώπων. Στον χώρο της ιατρικής για παράδειγμα, τα ρομπότ έχουν αποδειχθεί επαναστατικά [28]. Τα ιατρικά αυτά ρομπότ, με την απaráμιλλη σταθερότητα και ακρίβειά τους, βοηθούν τους χειρουργούς στην εκτέλεση περίπλοκων επεμβάσεων [4], [49]–[51]. Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση ρομπότ σε χειρουργικές επεμβάσεις, οδηγεί συχνά σε μειωμένο χρόνο ανάρρωσης και ελαχιστοποιεί τους κινδύνους επιπλοκών. Αυτός ο συνδυασμός ανθρώπινης τεχνογνωσίας και ρομποτικής ακρίβειας εξασφαλίζει υψηλότερο βαθμό επιτυχίας στα χειρουργικά αποτελέσματα. Επιπλέον, τα ρομπότ που πλέον είναι εξοπλισμένα με προηγμένες τεχνολογίες απεικόνισης, παρέχουν ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια των χειρουργικών επεμβάσεων, βοηθώντας τους γιατρούς να πλοηγηθούν με αυξημένη ορατότητα και βεβαιότητα.

Ομοίως, στη γεωργία, η συμβολή των ρομπότ τις τελευταίες δεκαετίες είναι ιδιαίτερα σημαντική [52], [53]. Τα γεωργικά ρομπότ, εξοπλισμένα με συστήματα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT), παρακολουθούν και φροντίζουν τις καλλιέργειες, εξασφαλίζοντας ότι τους παρέχονται οι βέλτιστες συνθήκες νερού, ηλιακού φωτός και θρεπτικών συστατικών (Εικόνα 2). Το αποτέλεσμα αυτής της ρομποτικής «παρέμβασης» είναι η σημαντική αύξηση των αποδόσεων των καλλιεργειών και η βιώσιμη χρήση πόρων όπως το νερό και τα λιπάσματα. Κυρίως όμως η δυνατότητα που δίνεται στον παραγωγό να αυξήσει σημαντικά το μέγεθος των καλλιεργειών του. Στις σύγχρονες καλλιέργειες, η χρήση φυτοφαρμάκων γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια, μειώνοντας έτσι τις περιβαλλοντικές και τις υγειονομικές επιπτώσεις. Επιπλέον, τα drones, και οι

εναέριες απεικονίσεις με χρήση της ρομποτικής, έχουν ποικίλες εφαρμογές, από την ζωντανή επισκόπηση των καλλιεργειών μέχρι την ανίχνευση ασθενειών και παρασίτων [54].

Εκτός βέβαια από τα εναέρια οχήματα και την γεωργία, παρατηρείται η χρήση των αυτόνομων οχημάτων και σε υποθαλάσσιες αποστολές [32]. Ένα μη επανδρωμένο υποθαλάσσιο όχημα μπορεί να πραγματοποιεί υποθαλάσσιες παρατηρήσεις σε σημεία που τα περισσότερα ιπτάμενα ή επίγεια οχήματα δεν μπορούν. Είναι εξοπλισμένα με κάμερες και αισθητήρες υψηλής ανάλυσης, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να εντοπίσουν με απίστευτη λεπτομέρεια ό,τι συμβαίνει κάτω από την επιφάνεια του νερού. Τα υποθαλάσσια οχήματα χρησιμοποιούνται για την εξερεύνηση του βυθού, για την χαρτογράφηση και συλλογή δεδομένων καθώς και σε περιπτώσεις ατυχημάτων [55].



Εικόνα 2 – Αυτόνομο επίγειο ρομπότ σε χωράφι.

Ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα που κινείται εντός του χωραφιού και συλλέγει πληροφορίες από τους αισθητήρες του. Πηγή: AIFARMS - University of Illinois .

Πέρα από τις εναέριες και γεωργικές εφαρμογές, η ρομποτική έχει βρει σημαντική χρησιμότητα και στον τομέα της εξερεύνησης του διαστήματος [33], [34]. Τα μη επανδρωμένα οχήματα, που συχνά αναφέρονται ως διαστημικά ανιχνευτικά σκάφη, μπορούν να επιχειρήσουν σε περιβάλλοντα πολύ επικίνδυνα για τους ανθρώπους αστροναύτες. Εφοδιασμένα με προηγμένους αισθητήρες και εξοπλισμό απεικόνισης, αυτά τα σκάφη μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από μακρινούς πλανήτες, φεγγάρια και άλλα ουράνια σώματα. Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα παραδείγματα είναι το Mars Curiosity rover, το οποίο έχει συμβάλει καθοριστικά στην εξερεύνηση και κατανόηση του πλανήτη Άρη [56]. Τα διαστημικά

ρομπότ, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μελέτη εξωγήινων εδαφών, στη διεξαγωγή επιστημονικών πειραμάτων, ακόμη και στην ανίχνευση πιθανών περιοχών προσγείωσης για μελλοντικές επανδρωμένες αποστολές. Η ικανότητά τους να λειτουργούν σε αυτά τα δύσβατα περιβάλλοντα για μεγάλες χρονικές περιόδους τα έχει καταστήσει ανεκτίμητα στην προσπάθειά μας να κατανοήσουμε το σύμπαν.

Είναι αναμφισβήτητο - η ρομποτική σήμερα δεν εξυπηρετεί απλώς την ανθρωπότητα, αλλά ενισχύει τις δυνατότητές της. Τα ρομπότ έχουν εδραιώσει σταθερά τη θέση τους στον σύγχρονο κόσμο, αγγίζοντας πτυχές της ζωής μας από την υγειονομική περίθαλψη έως την ψυχαγωγία, από την κατασκευή έως την εξερεύνηση. Η ενσωμάτωσή τους δεν είναι μια παροδική τάση, αλλά μια αντανάκλαση των εξελισσόμενων αναγκών και φιλοδοξιών μας. Κοιτώντας προς το μέλλον, είναι προφανές ότι τα ρομπότ ήρθαν για να μείνουν και η εστίασή μας θα πρέπει να είναι στη συνεχή βελτίωση και προσαρμογή τους, έτσι ώστε να ταιριάζουν καλύτερα στον συνεχώς μεταβαλλόμενο κόσμο μας.

1.3 ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Η προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε στις ποικίλες εφαρμογές της ρομποτικής στη σύγχρονη κοινωνία, καθώς και στους επιμέρους τομείς στους οποίους έχει ενσωματωθεί, όπως για παράδειγμα στις ιατρικές επεμβάσεις, στις εξερευνήσεις στα βάθη της θάλασσας, στα συστήματα αυτόνομης οδήγησης και στις περίπλοκες βιομηχανικές συναρμολογήσεις.

Έχοντας εμβαθύνει στις διάφορες εφαρμογές της ρομποτικής στη σύγχρονη ζωή, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να σημειωθεί ότι η επιτυχία αυτών των ρομποτικών συστημάτων βασίζεται σημαντικά στην ικανότητα τους να κινούνται και να αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον τους [37]. Αυτή η λειτουργία της διάσχισης μέσα στο χώρο δεν αφορά μόνο τους κινητήρες, τους τροχούς ή τους έλικες που προωθούν το ρομπότ προς τα εμπρός, αλλά είναι μια πιο σύνθετη διαδικασία με πολλές παραμέτρους που ονομάζεται **πλοήγηση**. Προτού αναλυθούν οι σύνθετες ιδιαιτερότητες του τρόπου πλοήγησης των ρομπότ, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το ευρύ φάσμα των ρομποτικών εφαρμογών σήμερα, από τις βιομηχανικές γραμμές συναρμολόγησης έως τις αποστολές διάσωσης, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ικανότητα του ρομπότ να κατανοεί και να κινείται στο περιβάλλον του. Οι υποκείμενοι αλγόριθμοι, αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο των ρομποτικών λειτουργιών, καθιστώντας την πλοήγηση όχι απλώς μια λειτουργία αλλά έναν κρίσιμο παράγοντα που καθορίζει τη χρησιμότητα και την αποτελεσματικότητα ενός ρομπότ.

1.3.1 Ο ρόλος της πλοήγησης στη ρομποτική

Συνοπτικά, η πλοήγηση θα μπορούσε να οριστεί ως η επιστήμη και η τέχνη της μετάβασης από ένα σημείο σε ένα άλλο. Στο πλαίσιο όμως της ρομποτικής, είναι κάτι περισσότερο από απλή κίνηση - πρόκειται για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για την ασφαλή και αποτελεσματική διέλευση στο χώρο [57].

Οι προκλήσεις της πλοήγησης μεγεθύνονται πολλαπλασιαστικά όταν αναλογιστεί κανείς το τεράστιο φάσμα των περιβαλλόντων στα οποία λειτουργούν τα ρομπότ. Τα ομαλά, δομημένα όρια ενός εργοστασιακού δαπέδου, γεμάτα με δείκτες και οδηγούς, έρχονται σε πλήρη αντίθεση με το απρόβλεπτο των εξωτερικών χώρων, όπως τα δάση, οι ωκεανοί και τα αστικά τοπία. Κάθε περιβάλλον παρουσιάζει ένα μοναδικό σύνολο προκλήσεων. Για παράδειγμα, τα υποβρύχια

ρομπότ πρέπει να αντιμετωπίσουν τα υδάτινα ρεύματα, τις αλλαγές πίεσης και την περιορισμένη ορατότητα, σε αντίθεση με τα εναέρια ρομπότ που πρέπει να πλοηγηθούν στις προκλήσεις που θέτουν οι μεταβαλλόμενες μορφές ανέμου, οι κινήσεις των πτηνών και οι ψηλές υποδομές.

Για έναν εξωτερικό παρατηρητή, η κίνηση ενός ρομπότ μπορεί να φαίνεται σαν μια απλή μεταφορά από ένα σημείο σε ένα άλλο, όμως στην πραγματικότητα είναι κάτι πολύ πιο σύνθετο. Η πλοήγηση είναι ξεκινάει με την αντίληψη του περιβάλλοντος από το ρομπότ, η οποία συνήθως γίνεται με τη χρήση μιας σειράς αισθητήρων, όπως κάμερες και αισθητήρες φωτός ή υπερήχων [58]. Μόλις το ρομπότ αντιληφθεί το περιβάλλον γύρω του, πρέπει να επεξεργαστεί αυτές τις πληροφορίες για να κατανοήσει το τοπίο, εντοπίζοντας τα εμπόδια, τις ασφαλείς ζώνες και τις πιθανές διαδρομές [59].

Αφού κατανοήσει το περιβάλλον, το ρομπότ σχεδιάζει στη συνέχεια τη διαδρομή του. Σε αυτό το σημείο υπεισέρχονται οι αλγόριθμοι, οι οποίοι καθορίζουν την πιο αποτελεσματική, ασφαλή ή ταχύτερη διαδρομή με βάση την εκάστοτε εργασία. Η πλοήγηση, ωστόσο, δεν τελειώνει στον σχεδιασμό της διαδρομής. Καθώς το ρομπότ κινείται, λαμβάνει συνεχώς ανατροφοδότηση από το περιβάλλον του, γεγονός που καθιστά αναγκαίες συνεχείς προσαρμογές της διαδρομής του σε πραγματικό χρόνο. Ένα απροσδόκητο εμπόδιο, μια δυναμική οντότητα ή ακόμη και μια αλλαγή στη φύση του περιβάλλοντος (όπως ένα υγρό δάπεδο) μπορεί να αλλάξει την τροχιά του ρομπότ.

Αξίζει να σημειωθεί πως δεν είναι όλα τα ρομπότ κατασκευασμένα με τον ίδιο τρόπο, και ως εκ τούτου, οι ανάγκες και οι στρατηγικές πλοήγησης διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τον σκοπό τους. Ένα εργοστασιακό ρομπότ, σχεδιασμένο να λειτουργεί σε ελεγχόμενο περιβάλλον, έχει προκαθορισμένες διαδρομές και συναντά προβλέψιμα εμπόδια. Το σύστημα πλοήγησής του είναι βελτιστοποιημένο για επαναληψιμότητα και ακρίβεια. Από την άλλη πλευρά, ένα αυτόνομο εναέριο όχημα έρευνας και διάσωσης, που πλοηγείται σε ένα χώρο μετά από κάποια φυσική καταστροφή, αντιμετωπίζει πληθώρα αβεβαιοτήτων. Σε αυτή την περίπτωση, η προσαρμοστικότητα και η γρήγορη λήψη αποφάσεων αποκτούν ύψιστη σημασία. Το μη επανδρωμένο αεροσκάφος μπορεί να θέτει ως προτεραιότητα την αποφυγή μεγάλων, δυναμικών εμποδίων, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι καλύπτει όσο το δυνατόν περισσότερο έδαφος στα μοτίβα αναζήτησης.

Στην ουσία, η πλοήγηση είναι η σύμπραξη της αντίληψης, της γνώσης και της δράσης. Είναι αυτό που επιτρέπει σε ένα ρομπότ να αλληλεπιδρά, να κατανοεί και να κινείται στον κόσμο του. Καθώς εμβαθύνουμε στον κόσμο της ρομποτικής, ο ρόλος των εξειδικευμένων στρατηγικών πλοήγησης, όπως ο σχεδιασμός διαδρομής κάλυψης, θα καταδείξει περαιτέρω την πολυπλοκότητα και τις καινοτομίες σε αυτόν τον τομέα.

1.3.2 Η σημαντικότητα του σχεδιασμού δρομολογίου κάλυψης

Μια στρατηγική που έχει ουσιαστική σημασία στη σύγχρονη ρομποτική, είναι αυτή που ονομάζεται Σχεδιασμός Διαδρομής Κάλυψης (ΣΔΚ) [60]–[62]. Στον πυρήνα της ρομποτικής, υπάρχει μια πρόκληση που εκτείνεται πέρα από την απλή πλοήγηση από το ένα σημείο σε ένα άλλο. Η πρόκληση αυτή αναφέρεται στην ικανότητα ενός ρομπότ να καλύπτει κάθε τμήμα μιας καθορισμένης περιοχής, όπως για παράδειγμα ένας κηπουρός διασφαλίζει ότι κάθε γωνιά ενός κήπου είναι καλά περιποιημένη, όπως μια αυτόματη ηλεκτρική σκούπα διασφαλίζει ότι δεν παραμελεί κανένα σημείο του δαπέδου ενός δωματίου, ή ένας γεωργός διασφαλίζει ότι οργώνει και ποτίζει ολόκληρο το χωράφι (Εικόνα 3).



Εικόνα 3 – Η διαδρομή οργώματος εντός του χωραφιού.

Ένα γεωργικό όχημα (κόκκινο τρακτέρ) που βρίσκεται σε ένα χωράφι. Η μπλε γραμμή δείχνει τη διαδρομή που θα ακολουθήσει ο γεωργός για να καλύψει με πληρότητα και αποτελεσματικότητα το χωράφι.

Ο ΣΔΚ είναι μια ενορχήστρωση αλγορίθμων και στρατηγικών, που κατευθύνουν τα ρομπότ στο έργο τους να διασχίσουν διεξοδικά κάθε τμήμα ενός προκαθορισμένου χώρου. Το έργο αυτό μπορεί να φαντάζει απλό, ωστόσο όταν χρησιμοποιείται σε πραγματικές συνθήκες με τις εγγενείς πολυπλοκότητές που αυτές εμπεριέχουν, απαιτεί ένα μείγμα ακρίβειας, πρόβλεψης και προσαρμοστικότητας. Ας αναλογιστούμε για παράδειγμα την πλοήγηση ενός υποβρύχιου ρομπότ για την εύρεση ενός κοραλλιογενούς υφάλου, ή ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος που παρακολουθεί την υγεία των δασών, ή ακόμη και ενός ρομποτικού χλοοκοπτικού για την περιποίηση ενός ακανόνιστου γκαζόν - σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, ο σχεδιασμός διαδρομής κάλυψης είναι ο αφανής ήρωας που εξασφαλίζει την αποτελεσματικότητα του ρομπότ.

Σε επιχειρήσεις με υψηλότερο κίνδυνο, όπως για παράδειγμα η εξουδετέρωση ναρκών, η άμεση χαρτογράφηση ενός περιβάλλοντος και η εύρεση πληγέντων μετά από καταστροφές, ο σχεδιασμός διαδρομών κάλυψης γρήγορα και αποτελεσματικά είναι υψίστης σημασίας. Εδώ, ο σχεδιασμός αναποτελεσματικών διαδρομών μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλούς κινδύνους και να θέσει ακόμη και ζωές σε κίνδυνο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο σχεδιασμός διαδρομών κάλυψης είναι ένα απαραίτητο μέσο για την εγγύηση της ασφάλειας.

Οι εγγενείς προκλήσεις που σχετίζονται με το πρόβλημα του ΣΔΚ μεγεθύνονται όταν αναλογιστεί κανείς τα ποικίλα και συνεχώς μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα στα οποία λειτουργούν τα ρομπότ. Για παράδειγμα, ένα γεωργικό ρομπότ που έχει αναλάβει τον ψεκασμό φυτοφαρμάκων σε ένα αγρόκτημα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τα διαφορετικά ύψη των καλλιεργειών, τις ανακολουθίες του εδάφους και άλλα εμπόδια όπως δέντρα ή βράχια. Ομοίως, ένα ρομπότ υποβρύχιας εξερεύνησης πρέπει να προσαρμόζεται στα μεταβαλλόμενα υποβρύχια ρεύματα, τη θαλάσσια ζωή και τις κυματισμούς του εδάφους.

Γίνεται κατανοητό ότι οι βασικοί στόχοι που έχουν οι αλγόριθμοι ΣΔΚ χώρου είναι:

- **Η πλήρης κάλυψη:** Αυτός ο στόχος διασφαλίζει ότι κανένα σημείο εντός της καθορισμένης περιοχής δεν μένει απροσπέλαστο. Η έλλειψη πληρότητας σε εργασίες όπως ο γεωργικός ψεκασμός, μπορεί να οδηγήσει σε άνισες αποδόσεις καλλιεργειών, ενώ σε τομείς όπως η υποβρύχια

εξερεύνηση, μια παραμελημένη περιοχή θα μπορούσε αυτόματα να σημαίνει την απώλεια κρίσιμων σημείων δεδομένων. Η πλήρης κάλυψη του χώρου, επομένως, είναι αναγκαία και αδιαπραγμάτευτη.

- **Η αποτελεσματικότητα:** Όπως η κάλυψη του κάθε σημείου της καθορισμένης περιοχής είναι σημαντική, έτσι και η επίτευξη αυτού του στόχου με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο είναι εξίσου σημαντική. Μια αναποτελεσματική διαδρομή θα μπορούσε να οδηγήσει σε σπατάλη ενέργειας, αύξηση του λειτουργικού κόστους και παράταση της διάρκειας των εργασιών. Μια ρομποτική ηλεκτρική σκούπα για παράδειγμα, μπορεί να καθαρίζει την ίδια περιοχή ενός δωματίου πολλές φορές, ενώ παραμελεί άλλες – αυτή η αναποτελεσματικότητα δυσχεραίνει τον πρωταρχικό σκοπό του ρομπότ.

Στη σημερινή εποχή, η σημασία και η πολυδιάστατη χρησιμότητα του ΣΔΚ είναι αδιαμφισβήτητα σημαντική. Η πολύπλοκη φύση του προβλήματος, απαιτεί τη συνέργεια της τεχνολογικής καινοτομίας και την ανάπτυξη ισχυρών αλγορίθμων. Ο πρωταρχικός λόγος αυτής της πολυπλοκότητας προκύπτει από τη δυναμική φύση των περιβαλλόντων του πραγματικού κόσμου. Είτε μιλάμε για το συνεχώς μεταβαλλόμενο αστικό τοπίο, είτε για την απρόβλεπτη άγρια φύση, τα ρομπότ καλούνται να αποδίδουν πάντα απροβλημάτιστα και αποτελεσματικά. Για να επιτευχθεί αυτό, οι αλγόριθμοι σχεδίασης διαδρομής κάλυψης πρέπει να προσαρμόζονται στο περιβάλλον, στις δυνατότητες των ρομπότ και το έργο που πρέπει να φέρουν εις πέρας.

1.3.3 Περιορισμοί αλγορίθμων σχεδιασμού δρομολογίου κάλυψης

Οι αλγόριθμοι ΣΔΚ, όσο απαραίτητοι και αν είναι στη σύγχρονη ρομποτική, εξακολουθούν να έχουν αρκετούς περιορισμούς. Η αποτελεσματικότητα και η απόδοσή τους μπορούν να επηρεαστούν από ένα πλήθος παραγόντων που περιλαμβάνουν τις ιδιαιτερότητες του περιβάλλοντος, το σχεδιασμό των ρομπότ και τους εγγενείς αλγοριθμικούς περιορισμούς. Η κατανόηση αυτών των περιορισμών δεν είναι απαραίτητη μόνο για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής ανάπτυξης των ρομπότ, αλλά προσφέρει επίσης δρόμους για περαιτέρω έρευνα και καινοτομία.

Ένας από τους πιο σημαντικούς περιορισμούς των σημερινών αλγορίθμων ΣΔΚ προκύπτει από την πολυπλοκότητα των πραγματικών περιβαλλόντων. Τα

πολύπλοκα περιβάλλοντα, με ποικίλα εδάφη και απρόβλεπτα στοιχεία, δημιουργούν συχνά δυσκολίες που είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν από τους αλγόριθμους. Για παράδειγμα, μια δασώδης περιοχή, με ανομοιόμορφη κατανομή των δέντρων, θάμνων και διαφορετικό υψόμετρο, καθιστά το σχεδιασμό μιας αποτελεσματικής διαδρομής κάλυψης αρκετά δύσκολη. Το ίδιο ισχύει και για τα αστικά περιβάλλοντα, στα οποία η κίνηση πεζών, οχημάτων και η παρουσία δυναμικών εμποδίων μπορεί να αλλάξει δραστικά τη βέλτιστη διαδρομή σε πραγματικό χρόνο. Οι αλγόριθμοι που δεν είναι σχεδιασμένοι να προσαρμόζονται δυναμικά με βάση αυτές τις απρόβλεπτες αλλαγές, συχνά αποδεικνύονται αναποτελεσματικοί.

Ο σχεδιασμός του εκάστοτε ρομπότ, σε συνδυασμό με τις δυνατότητές του, περιπλέκει περαιτέρω το πρόβλημα. Το κάθε ρομπότ (Autonomous Mobile Robot, AMR) μπορεί να έχει διαφορετικό σχεδιασμό, με διαφορετικά δυνατά και αδύναμα σημεία. Ένα αυτόνομο εναέριο όχημα (UAV), αν και διαθέτει το πλεονέκτημα της εναέριας κίνησης, μπορεί να περιορίζεται από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, τις συνθήκες ανέμου και τους περιορισμούς του υψομέτρου. Από την άλλη πλευρά, τα επίγεια ρομπότ (UGV) μπορεί να δυσκολεύονται με εμπόδια όπως σκάλες, λακκούβες ή εδάφη όπως η άμμος ή η λάσπη. Είναι σαφές ότι οι αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης για όλα τα ρομπότ δυσκολεύονται, επειδή συχνά αποτυγχάνουν να λάβουν υπόψη τους αυτές τις ειδικές προκλήσεις του κάθε ρομπότ. Επιπλέον, όταν μια αποστολή απαιτεί μια συνεργατική προσπάθεια ρομπότ με διαφορετικούς τρόπους - όπως ένας συνδυασμός εναέριων μη επανδρωμένων αεροσκαφών και επίγειων περιπλανώμενων οχημάτων - η εξασφάλιση συγχρονισμένης και αποτελεσματικής κάλυψης καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη.

Επιπροσθέτως, οι υπολογιστικές απαιτήσεις ορισμένων προηγμένων αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης μπορούν να αποτελέσουν σημείο συμφόρησης, ιδίως σε επιχειρήσεις πραγματικού χρόνου. Η ανάγκη για γρήγορους υπολογισμούς, ιδίως σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από απρόβλεπτες καταστάσεις, απαιτεί σημαντική επεξεργαστική ισχύ. Για ρομπότ με περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες, η εκτέλεση τέτοιων αλγορίθμων σε πραγματικό χρόνο καθίσταται σημαντική πρόκληση. Αυτός ο περιορισμός συχνά επιβάλλει έναν συμβιβασμό μεταξύ της βέλτιστης διαδρομής και της αποδοτικότητας.

Τέλος, η μεγαλύτερη πρόκληση που θα παρατηρείται είναι η έλλειψη ενός γενικευμένου αλγορίθμου σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης. Ενώ αρκετοί αλγόριθμοι

ΣΔΚ υπερέχουν σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα ή υπό ορισμένες συνθήκες, μια ολιστική λύση που να αποδίδει βέλτιστα σε όλα τα διαφορετικά περιβάλλοντα παραμένει ασύλληπτη. Η επίτευξη αυτού του στόχου απαιτεί μια λεπτή ισορροπία μεταξύ προσαρμοστικότητας και ακρίβειας - μια πρόκληση με την οποία παλεύουν οι σημερινοί αλγόριθμοι.

1.4 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Οι ραγδαίες τεχνολογικές και επιστημονικές εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών, έχουν καταστήσει τη ρομποτική αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης ζωής. Λαμβάνοντας υπόψη την ολοένα αυξανόμενη σημαντικότητα της ρομποτικής, και πιο συγκεκριμένα το πρόβλημα της πλοήγησης των αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων, ιδιαίτερα στον τομέα του ΣΔΚ, η παρούσα ενότητα περιγράφει τους ερευνητικούς στόχους, καθώς και τα ερωτήματα που οδήγησαν στην παρούσα διατριβή.

1.4.1 Οι ερευνητικοί στόχοι της παρούσας διατριβής είναι:

- Η ανασκόπηση των υφιστάμενων αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης χώρου.
- Ο προσδιορισμός των πιο αποδοτικών και σύγχρονων αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό διαδρομής κάλυψης.
- Η διερεύνηση των περιορισμών και των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι σημερινοί αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης σε διαφορετικά περιβάλλοντα.
- Η αξιολόγηση της λειτουργικότητας και της δυνητικής επεκτασιμότητας των αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης σε πραγματικές συνθήκες.
- Η παραμετροποίηση και η εφαρμογή υφιστάμενων αλγορίθμων στο πρόβλημα του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης, για την αντιμετώπιση ειδικών προβλημάτων και απαιτήσεων που εμφανίζονται σε διάφορα πεδία, όπως αγροτικές περιοχές ή σε συνθήκες διαφορετικών τύπων επιφανειών.
- Η ανάπτυξη και παρουσίαση μεθόδων και τεχνικών που στοχεύουν στην εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης, μέσω της βελτίωσης των διαδρομών των ρομπότ.

1.4.2 Τα ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας διατριβής είναι:

- Ποιες είναι οι ιδιαιτερότητες της πλοήγησης των ρομπότ και γιατί σχεδιασμός διαδρομής κάλυψης αναδεικνύεται ως κεντρική στρατηγική;
- Ποιες είναι οι εγγενείς προκλήσεις και οι περιορισμοί των υφιστάμενων αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης σε διαφορετικά και σύνθετα περιβάλλοντα;
- Μπορούν νέες καινοτόμες στρατηγικές και βελτιώσεις των αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομών κάλυψης να παρέχουν πιο ισχυρές λύσεις σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών;

Η εμβάθυνση στους αλγορίθμους ΣΔΚ έχει ύψιστη σημασία για το μέλλον των αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων. Με την ανάλυση των βασικών λειτουργιών, των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους, μπορούμε να χαράξουμε μια πορεία προς πιο εκλεπτυσμένες και ευέλικτες μεθοδολογίες πλοήγησης. Η φιλοδοξία αυτής της διατριβής είναι να προσφέρει μια νέα προοπτική και ουσιαστικές συνεισφορές στον τομέα του ΣΔΚ και στον ευρύτερο κλάδο της ρομποτικής.

1.5 ΠΛΑΝΟ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την αντιμετώπιση των ερευνητικών στόχων της παρούσας διατριβής. Η μεθοδολογία διαρθρώνεται σε τέσσερις βασικές φάσεις: στην εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση, στον εντοπισμό ερευνητικών κενών, στην ανάπτυξη της προτεινόμενης προσέγγισης και στην επικύρωση μέσω πειραμάτων.

Η αρχική φάση της έρευνας ξεκίνησε με μια συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση. Αυτή περιελάμβανε εκτεταμένη έρευνα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σε αλγορίθμους ΣΔΚ, συστήματα πολλαπλών ρομπότ και τεχνικές αναπαράστασης χώρου. Χρησιμοποιήθηκαν βάσεις δεδομένων, όπως οι IEEE Xplore, ScienceDirect και Google Scholar, για να συγκεντρωθούν σχετικές ακαδημαϊκές εργασίες και διατριβές.

Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας οδήγησε σε μια ολοκληρωμένη κατανόηση της τρέχουσας κατάστασης και κατέδειξε τα κενά και τους περιορισμούς των υφιστάμενων προσεγγίσεων. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε πως παρόλο που έχουν γίνει σημαντικά βήματα όσον αφορά το πρόβλημα του ΣΔΚ, η πρόκληση του αποτελεσματικού διαμοιρασμού μιας δεδομένης περιοχής στα επιμέρους ρομπότ δεν έχει αντιμετωπιστεί επαρκώς, ιδίως όταν λαμβάνονται υπόψη σύνθετα περιβάλλοντα και περιορισμοί.

Με βάση τις γνώσεις που αποκτήθηκαν από τη βιβλιογραφική επισκόπηση, διαμορφώθηκε μια νέα προσέγγιση για το πρόβλημα του ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, και συγκεκριμένα για το πρόβλημα του διαμοιρασμού του χώρου. Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης προσέγγισης και την επικύρωση της αποτελεσματικότητάς της, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων σε περιβάλλοντα που προσομοιώνουν τον πραγματικό κόσμο. Τα περιβάλλοντα διαμορφώθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της προσέγγισης σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών καταστάσεων. Για την αξιολόγηση της απόδοσης της προτεινόμενης προσέγγισης, χρησιμοποιήθηκαν τόσο ποσοτικές, όσο και ποιοτικές μετρήσεις. Τα κριτήρια αξιολόγησης περιλάμβαναν χαρακτηριστικά όπως η ποιότητα του διαμοιρασμού των υποπεριοχών και η κατανάλωση ενέργειας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την

πειραματική διαδικασία αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν με ανταγωνιστικούς αλγορίθμους.

1.6 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στον ταχέως εξελισσόμενο κόσμο της ρομποτικής και των αυτόνομων συστημάτων, καθοριστικό ρόλο παίζει η κατανόηση των περιπλοκών των αλγορίθμων. Η παρούσα διατριβή έχει δομηθεί με σκοπό να προσφέρει στον αναγνώστη μια ολοκληρωμένη κατανόηση των αλγορίθμων για ρομποτικές εφαρμογές, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο πρόβλημα του ΣΔΚ.

Το **Κεφάλαιο 2** αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο της διατριβής, όπου παρουσιάζονται οι βασικές και θεμελιώδεις έννοιες της ρομποτικής στον τομέα του σχεδιασμού διαδρομών κάλυψης. Εξετάζεται η εξέλιξη των αλγορίθμων σχεδιασμών κάλυψης ανά τα χρόνια και οι κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται οι αλγόριθμοι αυτοί. Υπογραμμίζονται τεχνικές πλοήγησης σε συστήματα που απαρτίζονται από ένα ή περισσότερα ρομπότ. Τέλος, παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνικές που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία καθώς και οι περιορισμοί τους.

Το **Κεφάλαιο 3** επικεντρώνεται στο πρόβλημα του διαμοιρασμού της αρχικής περιοχής στα επιμέρους ρομπότ κατά τη διαδικασία της σχεδίασης διαδρομής κάλυψης χώρου. Καταδεικνύονται οι κυρίαρχοι παράγοντες και οι προκλήσεις που σχετίζονται με το συγκεκριμένο πρόβλημα, ενώ παρουσιάζεται μια πρωτότυπη εφαρμογή ενός υφιστάμενου αλγορίθμου για το πρόβλημα του διαμοιρασμού του χώρου. Η προτεινόμενη προσέγγιση πραγματοποιεί τον διαμοιρασμό χώρου λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του, όπως το υψόμετρο και τον τύπο εδάφους. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί, τα οποία αναδεικνύουν την αποδοτικότητα και τα πλεονεκτήματα της προσέγγισης αυτής σε σύγκριση με άλλες που έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία.

Το **Κεφάλαιο 4** πραγματεύεται το πρόβλημα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας σε περιβάλλοντα χωρίς διαφορετικούς τύπους εδάφους και διαφορές υψομέτρου. Σε αυτό το κεφάλαιο, αναλύεται μια μέθοδος ανταλλαγής κελιών και κόμβων με σκοπό τη μείωση των στροφών στις διαδρομές των ρομπότ, προκειμένου να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και οι συγκρίσεις με τις παραδοσιακές μεθόδους που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 5**, προσεγγίζουμε τις προοπτικές για μελλοντική έρευνα, παρουσιάζοντας συγκεκριμένες συστάσεις και πιθανές κατευθύνσεις για την επέκταση της παρούσας εργασίας. Εξετάζονται τα πιθανά εμπόδια και οι προκλήσεις που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν οι ερευνητές στο μέλλον, ιδιαίτερα στην πρακτική εφαρμογή των προτεινόμενων αλγορίθμων. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τα κύρια συμπεράσματα που αποκομίζονται από την παρούσα έρευνα, υπογραμμίζοντας τη σημασία και τη συνεισφορά της στον τομέα της ρομποτικής και τη σχεδίαση διαδρομών κάλυψης.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο

Αυτό το κεφάλαιο εμβαθύνει στις θεμελιώδεις πτυχές της πλοήγησης ρομποτικών συστημάτων. Αρχικά, γίνεται εισαγωγή στους αλγορίθμους Σχεδιασμού Διαδρομής Κάλυψης (ΣΔΚ) και παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες αλγορίθμων. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι διαφορετικές προκλήσεις που εμπεριέχουν τα συστήματα ενός και πολλών ρομπότ ενώ παράλληλα εξετάζονται οι περιορισμοί και οι προκλήσεις τους. Επιπλέον, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που έχουν τα συστήματα πολλαπλών ρομπότ, αυτό του διαμοιρασμού του χώρου. Το κεφάλαιο αποσκοπεί στη παρουσίαση μιας ολοκληρωμένης εικόνας σχετικά με τους αλγορίθμους ΣΔΚ, ανοίγοντας το δρόμο για την περαιτέρω εμβάθυνση που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια.

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ

Ο ΣΔΚ μπορεί να οριστεί ως η συστηματική προσέγγιση της εξερεύνησης ή της μεθοδικής διέλευσης σε ένα χώρο εργασίας. Ο χώρος αυτός μπορεί να αφορά συγκεκριμένες δομές, όπως κτίρια αλλά και ευρύτερα περιβάλλοντα, όπως γεωργικά χωράφια ή αστικές τοποθεσίες. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πρόβλημα ΣΔΚ απαιτεί την εύρεση μιας διαδρομής που επιτρέπει σε ένα ρομπότ να περάσει από όλα τα σημεία μιας περιοχής. Στη βιβλιογραφία, οι Cao κ.α. [63], σε μία από τις πρώτες έρευνες σχετικά με το πρόβλημα του ΣΔΚ, όρισαν τις απαιτήσεις που πρέπει να πληροί ένας τέτοιος αλγόριθμος. Οι απαιτήσεις έχουν ως εξής:

1. Το ρομπότ πρέπει να διέλθει από όλα τα σημεία της περιοχής.
2. Το ρομπότ πρέπει να πραγματοποιήσει την κάλυψη χωρίς αλληλοεπικάλυψη διαδρομών.
3. Είναι απαραίτητη η συνεχής και ακολουθιακή κίνηση του ρομπότ.
4. Το ρομπότ πρέπει να αποφεύγει όλα τα εμπόδια.
5. Για απλότητα στον έλεγχο και στον προγραμματισμό, το ρομπότ ενθαρρύνεται (χωρίς αυτό να καθίσταται απαραίτητο) να χρησιμοποιεί απλές τροχιές κίνησης (π.χ. ευθείες γραμμές).
6. Ανάλογα τις συνθήκες του εκάστοτε προβλήματος σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης, μια βέλτιστη/σχεδόν βέλτιστη διαδρομή είναι επιθυμητή.

Ωστόσο, δεν είναι πάντα δυνατό να ικανοποιούνται όλα αυτά τα κριτήρια σε πολύπλοκα περιβάλλοντα. Επομένως, μερικές φορές απαιτείται εξέτασή τους με σειρά προτεραιότητας. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, διερευνώνται περεταίρω τα προβλήματα ΣΔΚ, και θα παρουσιαστούν οι κύριες κατηγορίες στις οποίες μπορούν να ταξινομηθούν.

2.1.1 Προβλήματα σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης

Το πρόβλημα σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης σχετίζεται με το πρόβλημα του καλύπτοντος πωλητή, μια παραλλαγή του προβλήματος του πλανόδιου πωλητή (Traveling Salesman Problem, TSP) [64], [65], όπου, αντί ένας πράκτορας να επισκέπτεται κάθε πόλη, πρέπει να επισκέπτεται τη γειτονιά κάθε πόλης [66]. Το πρόβλημα του TSP, έχοντας ως δεδομένο έναν κατάλογο πόλεων και των

αποστάσεων μεταξύ κάθε ζεύγους πόλεων, αναζητά τη συντομότερη διαδρομή ώστε να επισκέπτεται ο πράκτορας κάθε πόλη μια ακριβώς φορά και στη συνέχεια να επιστρέφει στην πόλη προέλευσης. Δεδομένου ότι το TSP είναι ένα πρόβλημα της τάξης NP-hard, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος αυξάνεται σημαντικά όταν αυξάνεται η διάσταση του προβλήματος.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, μια εφαρμογή των αλγορίθμων ΣΔΚ είναι αυτή της κοπής όλων των χόρτων μιας δεδομένης περιοχής. Το πρόβλημα αυτό, είναι γνωστό και ως «πρόβλημα του χορτοκοπτικού», και αποδεικνύεται ότι είναι NP-hard [67]. Στην πραγματικότητα, ακόμη και το βασικό πρόβλημα σχεδιασμού μονοπατιών, γνωστό ως «πρόβλημα του πιάνου», για την εύρεση μιας διαδρομής χωρίς συγκρούσεις από μια αρχική διάταξη σε μια διάταξη στόχου, αποδεικνύεται ότι είναι PSPACE-hard, πράγμα που συνεπάγεται NP-hard [68], [69].

Δύο πρόσθετα, παρόμοια προβλήματα που σχετίζονται με το ΣΔΚ, είναι το πρόβλημα της γκαλερί τέχνης και το πρόβλημα της διαδρομής του φύλακα. Το πρόβλημα της γκαλερί τέχνης απαιτεί τον ελάχιστο αριθμό φρουρών που απαιτούνται για τη στελέχωση μιας πολυγωνικής γκαλερί, έτσι ώστε κάθε σημείο της γκαλερί να είναι ορατό από τουλάχιστον έναν φρουρό [70]. Στην περίπτωση του προβλήματος της διαδρομής του φύλακα ζητείται η συντομότερη διαδρομή από ένα δεδομένο σημείο μέχρι την αρχική του θέση, έτσι ώστε κάθε σημείο σε ένα δεδομένο χώρο να είναι ορατό από τουλάχιστον ένα σημείο κατά μήκος της διαδρομής [71].

Απλές περιπτώσεις του προβλήματος της διαδρομής του φύλακα, όπως η κάλυψη του εσωτερικού απλών πολυγώνων, μπορούν να επιτευχθούν σε πολυωνυμικό χρόνο [72]. Παρόλα αυτά, τόσο το πρόβλημα της γκαλερί τέχνης όσο και το πρόβλημα της διαδρομής του φύλακα είναι NP-hard [70], [71]. Ορισμένοι αλγόριθμοι κάλυψης που συζητάμε παρακάτω προσεγγίζουν το σχεδιασμό διαδρομών κάλυψης ως το πρόβλημα της γκαλερί τέχνης και το πρόβλημα της διαδρομής του φύλακα.

Σε ορισμένα περιβάλλοντα, μια αποδεκτή προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος κάλυψης χώρου είναι η τυχαιοποίηση [73]. Σε αυτή την προσέγγιση βασίζονται αρκετά ρομπότ-σκούπες που καθαρίζουν το πάτωμα ενός χώρου (όπως για παράδειγμα ενός σπιτιού). Η λογική που ακολουθούν αυτά τα ρομπότ είναι η εξής: αν το πάτωμα σκουπιστεί τυχαία για αρκετή ώρα, τότε μάλλον θα καθαριστεί πλήρως. Αυτή η προσέγγιση, συχνά συνδυάζει την τυχειότητα με διάφορα πρότυπα

διαδρομής, όπως η ακολούθηση τοίχων. Υπάρχουν πλεονεκτήματα σε αυτή την προσέγγιση, το κυριότερο από τα οποία είναι ότι δεν απαιτούνται πολύπλοκοι αισθητήρες για την ερμηνεία του περιβάλλοντος χώρου και δεν απαιτούνται υψηλοί υπολογιστικοί πόροι. Ωστόσο, για την κάλυψη μεγαλύτερων εκτάσεων, όπως σε γεωργικές εφαρμογές, είναι δύσκολο να θεωρηθεί ότι ένας τυχαιοποιημένος «αλγόριθμος» θα μπορούσε να είναι χρηστικός, καθώς το κόστος λειτουργίας του οχήματος (ενέργεια και χρόνος) θα ήταν ασύμφορο.

Δεδομένου ότι οι περισσότεροι αλγόριθμοι ΣΔΚ αναλύουν το χώρο σε υποπεριοχές (που ονομάζονται κελιά) για την επίτευξη κάλυψης, ο Choset [74] ταξινομήσε τους αλγορίθμους κάλυψης ανάλογα με τον τύπο της διάσπασης. Ως εκ τούτου, η ταξινόμησή του περιλαμβάνει ευρετικές και τυχαιοποιημένες προσεγγίσεις (οι οποίες συνήθως δεν χρησιμοποιούν αναπαράσταση του περιβάλλοντος και επομένως δεν χρησιμοποιούν αποσύνθεση χώρου), καθώς και προσεγγιστικές, ημι-προσεγγιστικές και ακριβείς κατατιμήσεις χώρου (που έχουν ως στόχο την αναπαράσταση του χώρου ως ένα σύνολο απλούστερων γεωμετρικά τμημάτων). Ωστόσο, μεταξύ αυτών των κατηγοριών μπορούν να διακριθούν ποιοτικά διαφορετικές προσεγγίσεις. Στη συνέχεια, του κεφαλαίου, θα αναλυθούν περεταίρω οι προσεγγίσεις αυτές, τόσο σε προβλήματα του ενός ρομπότ όσο και σε προβλήματα πολλαπλών ρομπότ. Θα παρουσιαστούν οι βασικές τεχνικές που εφαρμόζουν οι online αλγόριθμοι, ενώ θα δοθεί έμφαση κυρίως στους offline αλγορίθμους και στις τεχνικές αναπαράστασης του περιβάλλοντος που χρησιμοποιούν.

2.1.2 Διαφορές μεταξύ online και offline αλγορίθμων

Οι αλγόριθμοι ΣΔΚ μπορούν να ταξινομηθούν είτε ως **offline** είτε ως **online**. Η ταξινόμηση αυτή προτάθηκε αρχικά στο [74]. Οι offline αλγόριθμοι βασίζονται μόνο σε σταθερές πληροφορίες και το περιβάλλον θεωρείται γνωστό εκ των προτέρων. Η προσέγγιση των offline αλγορίθμων αξιοποιεί ένα προκαθορισμένο μοντέλο αναφοράς του χώρου ή της δομής που εξετάζεται, προσφέροντας μια προμελετημένη κατευθυντήρια γραμμή στα ρομπότ. Έτσι, σε αυτή τη προσέγγιση θεωρούνται γνωστές οι ακριβείς διαστάσεις του χώρου, οι θέσεις των εμποδίων καθώς και τα χαρακτηριστικά των ρομπότ, όπως το μέγεθος και η ταχύτητα. Βέβαια, η παραδοχή της πλήρους εκ των προτέρων γνώσης του περιβάλλοντος μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να είναι μη ρεαλιστική, όπως στο προαναφερθέν πρόβλημα της

ρομποτικής σκούπας, όπου καθίσταται πρακτικά αδύνατο ένα ρομπότ τέτοιου μεγέθους να έχει πλήρη γνώση του περιβάλλοντος, το οποίο συνεχώς μεταβάλλεται. Οι online αλγόριθμοι δεν προϋποθέτουν την πλήρη εκ των προτέρων γνώση του περιβάλλοντος και χρησιμοποιούν πληροφορίες που λαμβάνουν σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες για την ερμηνεία του περιβάλλοντος χώρου (Εικόνα 4). Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται οι βασικές διαφορές των online και των offline αλγορίθμων:

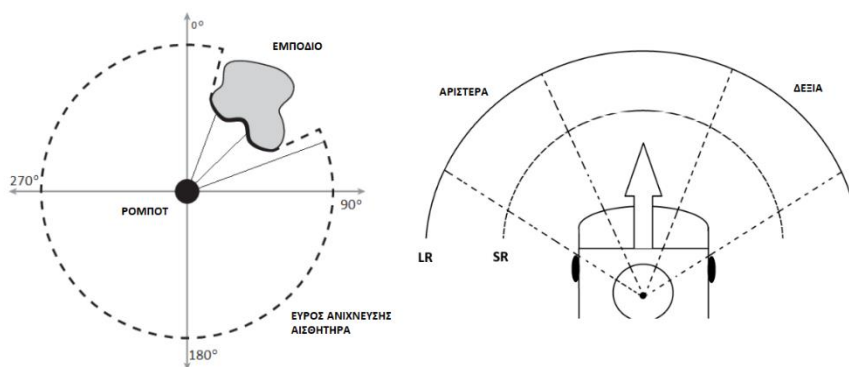
2.1.2.1 Προσαρμοστικότητα και αντιδράσεις σε πραγματικό χρόνο

Οι online αλγόριθμοι είναι εκ φύσεως προσαρμόσιμοι. Καθώς το ρομπότ διασχίζει μια περιοχή, συλλέγει συνεχώς πληροφορίες μέσω των αισθητήρων του. Εάν το ρομπότ συναντήσει ένα απρόβλεπτο εμπόδιο, μια δυναμική αλλαγή στο περιβάλλον ή οποιοσδήποτε τυχόν αποκλίσεις από αυτό που ενδεχομένως να αναμένει βάσει της προηγούμενης γνώσης, ο online αλγόριθμος μπορεί να προσαρμόσει τη διαδρομή του ρομπότ άμεσα. Αυτή η προσαρμοστικότητα είναι ιδιαίτερα επωφελής σε συνεχώς μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα ή σε περιοχές όπου οι προϋπάρχουσες πληροφορίες μπορεί να είναι ανεπαρκείς ή παρωχημένες. Αντίθετα, οι offline αλγόριθμοι απαιτούν τη πλήρη εκ των προτέρων γνώση του περιβάλλοντος. Έτσι, η χρήση τους περιορίζεται σε περιβάλλοντα όπου οι ακριβείς διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος δεν μεταβάλλονται, όπως για παράδειγμα ένα χωράφι.

2.1.2.2 Εξάρτηση από αισθητήρες

Η αποτελεσματικότητα των online αλγορίθμων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις δυνατότητες των αισθητήρων του ρομπότ. Εάν οι αισθητήρες είναι υψηλής ευκρίνειας και διαθέτουν μεγάλο εύρος, το ρομπότ μπορεί να λαμβάνει πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις. Αντίθετα, σε περιπτώσεις όπου τα αισθητηριακά δεδομένα είναι ανακριβή ή περιορισμένα, ο αλγόριθμος μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστες επιλογές διαδρομής ή ακόμη και σε πιθανές συγκρούσεις. Έτσι, ενώ οι online αλγόριθμοι προσφέρουν προσαρμοστικότητα, βρίσκονται σε εξάρτηση από τον εξοπλισμό αισθητήρων του ρομπότ. Σε πολλά σύγχρονα ρομπότ, τα τελευταία έχουν παρατηρηθεί και πιο σύγχρονες μέθοδοι *ερμηνείας* του περιβάλλοντος, όπως

για παράδειγμα Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks, CNN), τα οποία προ επεξεργάζονται τις πληροφορίες που λαμβάνουν οι αισθητήρες, με σκοπό να τροφοδοτήσουν τον γενικότερο αλγόριθμο πλοήγησης που χρησιμοποιούν. Αντίθετα, στους offline αλγορίθμους, αυτό το πρόβλημα δεν υφίσταται. Για την ακρίβεια, τα ρομποτικά οχήματα που πλοηγούνται βάσει μιας διαδρομής που έχει δημιουργηθεί με έναν offline αλγόριθμο, η ύπαρξη αισθητήρων δεν είναι καταρχήν απαραίτητη. Η διαδρομή έχει προσχεδιαστεί, και το ρομπότ καλείται να την εκτελέσει, χωρίς να απαιτείται η επιτήρηση του περιβάλλοντος χώρου.



Εικόνα 4 – Ανίχνευση εμποδίου από το ρομπότ.

Ένα ρομπότ που είναι εξοπλισμένο με έναν αισθητήρα LIDAR για την ανίχνευση εμποδίων. Ο αισθητήρας LIDAR μπορεί να εντοπίσει με ακρίβεια τα εμποδία που βρίσκονται στο FOV, καθώς και την απόστασή τους από το ρομπότ. Ανάλογα με την απόσταση του εμποδίου (SR – Short Range, LR – Long Range) το ρομπότ λαμβάνει την κατάλληλη απόφαση κίνησης [75].

2.1.2.3 Υπολογιστικές απαιτήσεις

Δεδομένου ότι οι online αλγόριθμοι λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, η λήψη γρήγορων και αποτελεσματικών αποφάσεων είναι υψίστης σημασίας. Αυτό συχνά προϋποθέτει τις ισχυρές υπολογιστικές δυνατότητες του ρομπότ. Οι γρήγορες διαδικασίες λήψης αποφάσεων, συνήθως απαιτούν προηγμένους επεξεργαστές και βελτιστοποιημένους αλγορίθμους, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή και έγκαιρη λειτουργία. Σε αντίθεση με τους online αλγορίθμους, οι offline αλγόριθμοι εκτελούνται σε προγενέστερο χρονικό διάστημα για να σχεδιάσουν τη διαδρομή κάλυψης του χώρου. Έτσι, δεν απαιτούν την ύπαρξη υψηλών υπολογιστικών πόρων στα ίδια τα ρομπότ.

2.1.2.4 Πληρότητα και αποδοτικότητα

Μια αξιοσημείωτη πρόκληση για τους online αλγορίθμους είναι η διασφάλιση της κάλυψης ολόκληρης της περιοχής, ειδικά όταν το ρομπότ προσαρμόζει συνεχώς τη διαδρομή του. Σε αντίθεση με τους offline αλγορίθμους, όπου ολόκληρη η διαδρομή μπορεί να χαρτογραφηθεί εκ των προτέρων, οι online αλγόριθμοι κινδυνεύουν να παραλείψουν περιοχές ή να επισκεφτούν άσκοπα ορισμένα σημεία. Ο σχεδιασμός ενός online αλγορίθμου που παραμένει συγχρόνως ευέλικτος στο περιβάλλον του και διασφαλίζει την πλήρη κάλυψη είναι μια μεγάλη πρόκληση.

2.1.2.5 Καταλληλότητα σε συγκεκριμένες συνθήκες

Γίνεται κατανοητό, πως οι offline αλγόριθμοι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα όπου ο χώρος μεταβάλλεται συνεχώς. Αντίθετα, οι online αλγόριθμοι διαπρέπουν σε περιβάλλοντα όπου η προβλεψιμότητα είναι χαμηλή. Για παράδειγμα, σε περιοχές που έχουν πληγεί από καταστροφές, όπου οι δομές μπορεί να έχουν αλλάξει και να έχουν μεταβληθεί σημαντικά, ή σε εξερευνήσεις στην άγρια φύση όπου δεν υπάρχουν λεπτομερείς προϋπάρχοντες χάρτες, η προσαρμοστικότητα των online αλγορίθμων είναι πολύτιμη.

2.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ

Ενώ η προσαρμοστικότητα των online αλγορίθμων σε πραγματικό χρόνο είναι ιδιαίτερα σημαντική σε απρόβλεπτα περιβάλλοντα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου μια δομημένη και προσχεδιασμένη διαδρομή είναι πιο επωφελής. Αυτή η ενότητα θα δώσει έμφαση στους offline αλγορίθμους, οι οποίοι παρέχουν μια ντετερμινιστική λύση στο πρόβλημα του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης.

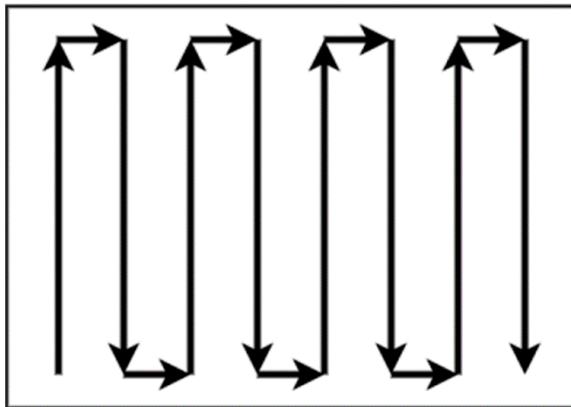
Οι offline αλγόριθμοι, όπως έχει αναφερθεί ήδη, βασίζονται κατά βάση στην εκ των προτέρων γνώση. Αυτή η γνώση μπορεί να είναι ένας λεπτομερής χάρτης του περιβάλλοντος, γνώση για την παρουσία ή την απουσία εμποδίων, η συνολική τοπογραφία του χώρου και πολλά άλλα. Ο αλγόριθμος ΣΔΚ, χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, καθορίζει μια βέλτιστη - ή τουλάχιστον μια καλύτερη/σχεδόν βέλτιστη - διαδρομή πριν καν το ρομπότ ξεκινήσει το ταξίδι του. Μια τέτοια προσέγγιση έχει εγγενή πλεονεκτήματα, αλλά συνοδεύεται και από τις δικές της προκλήσεις.

Ένα εύλογο ερώτημα που θα μπορούσε να τεθεί, είναι το εξής: Γιατί να προτιμηθεί μια offline προσέγγιση, όταν τα ρομπότ είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες και έχουν την τεχνολογία για τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο; Οι λόγοι είναι πολλαπλοί. Για εργασίες όπου η προβλεψιμότητα, η επαναληψιμότητα και η ακρίβεια είναι υψίστης σημασίας, οι offline αλγόριθμοι μπορούν να υπολογίσουν *πιο αποδοτικές και αποτελεσματικές* διαδρομές κάλυψης. Σε σενάρια όπως ο καθαρισμός εργοστασιακών δαπέδων, η κάλυψη γεωργικών αγρών, ή ακόμη και κάποιες εξελιγμένες λειτουργίες όπως ο σχεδιασμός μιας δορυφορικής διαδρομής, όπου το περιβάλλον είναι γνωστό και κατά βάση δεν μεταβάλλεται, η διασφάλιση της κάλυψης κάθε *εκατοστού* ή η τήρηση μιας συγκεκριμένης διαδρομής με ακρίβεια υπερτερεί της ανάγκης για προσαρμοστικότητα.

Οι offline αλγόριθμοι, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τη μεθοδολογία που ακολουθούν για να *αποτυπώσουν* το περιβάλλον ως εξής: Αλγόριθμοι που βασίζονται σε **ακριβή κυτταρική αποσύνθεση** του χώρου (exact cellular decomposition), αλγόριθμοι που βασίζονται σε **προσεγγιστική αποσύνθεση** του χώρου (approximate cellular decomposition) και αλγόριθμοι που βασίζονται στην **ανταμοιβή** (reward based algorithms). Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες αλγορίθμων προσφέρει μια μοναδική προσέγγιση για το πρόβλημα και έχει το δικό της σύνολο πλεονεκτημάτων και προκλήσεων.

2.2.1 Ακριβής κυτταρική αποσύνθεση

Οι μέθοδοι ακριβούς κυτταρικής αποσύνθεσης διασπούν τον ελεύθερο χώρο (δηλαδή τον χώρο χωρίς εμπόδια) σε απλές, μη επικαλυπτόμενες περιοχές που ονομάζονται κελιά ή κύτταρα. Η ένωση όλων των κελιών, γεμίζει ακριβώς τον αρχικό χώρο του περιβάλλοντος. Αυτές οι περιοχές, οι οποίες δεν περιέχουν εμπόδια, είναι «εύκολο» να καλυφθούν, και έτσι μπορούν τα ρομπότ να πλοηγηθούν με απλές κινήσεις. Για παράδειγμα, κάθε κελί θα μπορούσε να καλυφθεί χρησιμοποιώντας ένα μοτίβο ζιγκ ζαγκ, όπως αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 5. Η παραγωγή αυτών των κινήσεων ζιγκ ζαγκ, που ονομάζονται επίσης «κινήσεις σποράς», έχουν απασχολήσει αρκετά τους ερευνητές και τεκμηριώνονται επαρκώς στη βιβλιογραφία [76]–[78].



Εικόνα 5 – Κάλυψη χώρου με κινήσεις ζιγκ-ζαγκ.

Το περιβάλλον καλύπτεται από το ρομπότ με μια διαδικασία κάλυψης τύπου ζιγκ-ζαγκ.

Τα επιμέρους κελιά ενός χώρου που αναπαρίσταται με τη μέθοδο της ακριβούς κυτταρικής αποσύνθεσης, θεωρούνται γειτονικά εάν έχουν ένα κοινό όριο. Ένας γράφος γειτνίασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση της κυτταρικής αποσύνθεσης, όπου ένας κόμβος αναπαριστά ένα κελί και μια ακμή αναπαριστά τη σχέση γειτνίασης μεταξύ δύο κελιών. Οι ακριβείς κυτταρικές αποσυνθέσεις μπορούν να σχηματισθούν με τη χάραξη μιας γραμμής μέσα στο χώρο (π.χ. από αριστερά προς τα δεξιά). Τα όρια των κελιών σχηματίζονται στη συνέχεια όταν κάποιο στοιχείο συναντάται στη γραμμή χάραξης. Για παράδειγμα, ένα τέτοιο στοιχείο μπορεί να είναι η αλλαγή στον αριθμό που η γραμμή χάραξης τέμνει τα όρια ενός εμποδίου.

Τυπικά, ένας αλγόριθμος που βασίζεται στην ακριβή κυτταρική αποσύνθεση, παράγει μια διαδρομή κάλυψης σε δύο βήματα. Πρώτον, αποσυνθέτει τον ελεύθερο χώρο σε κελιά και αποθηκεύει την αποδόμηση του περιβάλλοντος ως έναν γράφο γειτνίασης. Στη συνέχεια, υπολογίζει μια πλήρη διαδρομή μέσω του γράφου γειτνίασης (δηλαδή μια ακολουθία που επισκέπτεται κάθε κόμβο του γράφου ακριβώς μία φορά). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός της διαδρομής είναι μια ακολουθία σημείων (δηλαδή μια ακολουθία κελιών) και όχι μια πραγματική διαδρομή κάλυψης. Επομένως, πρέπει να προκύψει ένα ξεκάθαρο μονοπάτι για την κάλυψη κάθε κελιού με τη χρήση απλών κινήσεων (π.χ. ζιγκ-ζαγκ), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

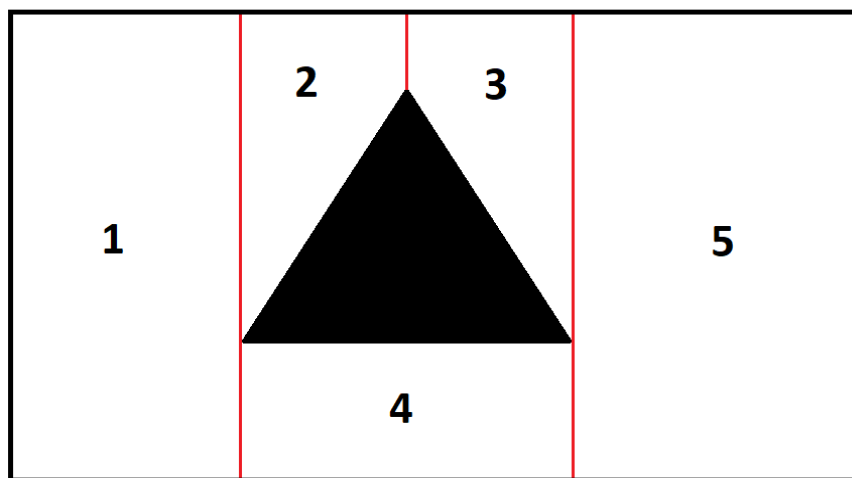
Οι δύο βασικές κατηγορίες ακριβούς κυτταρικής αποσύνθεσης που έθεσαν τα θεμέλια για τους πιο σύγχρονους αλγορίθμους, είναι η **τραπεζοειδής αποσύνθεση** και η αποσύνθεση **boustrophedon**.

2.2.1.1 Τραπεζοειδής αποσύνθεση

Μια από τις απλούστερες τεχνικές ακριβούς κυτταρικής αποσύνθεσης που μπορεί να υπολογίσει μια πλήρη διαδρομή κάλυψης είναι η τραπεζοειδής αποσύνθεση [79], [80], η οποία χειρίζεται μόνο επίπεδους, πολυγωνικούς χώρους (Εικόνα 6). Στην τραπεζοειδή αποσύνθεση, κάθε κελί είναι ένα τραπέζιο. Ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλές κινήσεις μπρος-πίσω για την κάλυψη κάθε κελιού. Η πλήρης κάλυψη εξασφαλίζεται με την εξεύρεση μιας διεξοδικής διαδρομής μέσω του γραφήματος γειτνίασης που σχετίζεται με την αποσύνθεση. Στο τέλος, δημιουργείται μια συγκεκριμένη ζιγκ-ζαγκ διαδρομή για την κάλυψη κάθε κελιού. Η διαδρομή καθορίζει τη σειρά με την οποία επισκέπτονται τα κύτταρα για να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη. Τέλος, δημιουργούνται συγκεκριμένες διαδρομές για την κάλυψη κάθε κελιού, συνήθως χρησιμοποιώντας κινήσεις ζιγκ-ζαγκ.

Οι Oksanen κ.α. [62] πρότειναν έναν αλγόριθμο που βασίζεται στην τραπεζοειδή διάσπαση για το ΣΔΚ στην περίπτωση γεωργικών αγρών. Ο αλγόριθμός τους εφαρμόζει μια τραπεζοειδή αποσύνθεση του χωραφιού ακολουθούμενη από μια διαδικασία συγχώνευσης κελιών. Τα κελιά που προκύπτουν είναι παρόμοια με εκείνα που παράγονται από την αποσύνθεση boustrophedon, η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Για τη βελτιστοποίηση της διαδρομής, χρησιμοποιούν μια συνάρτηση κόστους με βάση τη διαδρομή για να αξιολογήσουν το μεγαλύτερο κελί που προκύπτει σε έξι διαφορετικές τραπεζοειδείς αποσυνθέσεις που λαμβάνονται με

τη χρήση μιας γραμμής σάρωσης με κλίση ανά 30° . Στη συνέχεια, επιλέγονται οι τρεις πιο ευνοϊκές κατευθύνσεις και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, με πρόσθετες αποσυνθέσεις σε 15° εκατέρωθεν των επιλεγμένων κατευθύνσεων. Η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά έως ότου ο ρυθμός βελτίωσης ανά βήμα πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο. Στη συνέχεια, το μεγαλύτερο κελί στην αποσύνθεση ελάχιστου κόστους αφαιρείται από την περιοχή-στόχο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το υπόλοιπο πεδίο, έως ότου όλη η περιοχή καλυφθεί από τη διαδρομή. Αυτή η προσέγγιση παράγει αποτελεσματικές διαδρομές κάλυψης για ένα κυρτό πεδίο του οποίου τα όρια αποτελούνται από μεγάλα, ευθύγραμμα τμήματα.



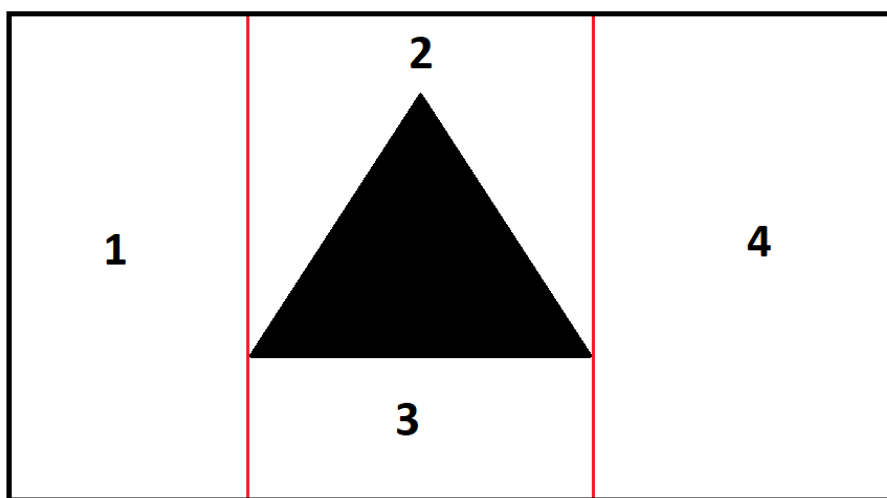
Εικόνα 6 – Τραπεζοειδής αποσύνθεση χώρου.

Το περιβάλλον «χωρίζεται» σε 5 επιμέρους τμήματα (τραπεζίδια). Η αποσύνθεση του χώρου σε τραπέζια, απλοποιεί το πρόβλημα του ΣΔΚ, καθώς αυτά τα επιμέρους τμήματα μπορούν να καλυφθούν χρησιμοποιώντας απλούστερους αλγορίθμους.

2.2.1.2 *Boustrophedon αποσύνθεση*

Ένα μειονέκτημα της τραπεζοειδούς αποσύνθεσης είναι ότι παράγει πολλά κελιά, που ενδεχομένως θα μπορούσαν να συγχωνευθούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν μεγαλύτερα κελιά. Αυτό είναι σαφώς αναποτελεσματικό, καθώς όσο περισσότερα κελιά υπάρχουν, τόσο μακρύτερη γίνεται η τελική διαδρομή κάλυψης. Αυτό συμβαίνει επειδή η τραπεζοειδής αποσύνθεση δημιουργεί μόνο κυρτά κελιά. Ωστόσο, ορισμένα μη κυρτά κελιά, μπορούν επίσης να καλυφθούν πλήρως με απλές κινήσεις. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, ο Choset πρότεινε την αποσύνθεση boustrophedon [78], [81]. Η λέξη «boustrophedon», ή στα ελληνικά Βουστροφηδόν, είναι στην πραγματικότητα αρχαία ελληνική, και σημαίνει «ο

δρόμος του βοδιού», υποδηλώνοντας το μοτίβο με το οποίο ένα βόδι σέρνει το άροτρο μπρος-πίσω. Η αποσύνθεση boustrophedon είναι παρόμοια με την τραπεζοειδή αποσύνθεση, με τη διαφορά ότι εξετάζει μόνο τις κορυφές στο περιβάλλον, όπου ένα κατακόρυφο τμήμα μπορεί να επεκταθεί τόσο πάνω όσο και κάτω από την κορυφή. Οι κορυφές στις οποίες συμβαίνει αυτό ονομάζονται κρίσιμα σημεία. Με τη χρήση της συγκεκριμένης στρατηγικής, η αποσύνθεση boustrophedon μειώνει αποτελεσματικά τον αριθμό των κελιών της τραπεζοειδούς αποσύνθεσης. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνονται συντομότερες διαδρομές κάλυψης.

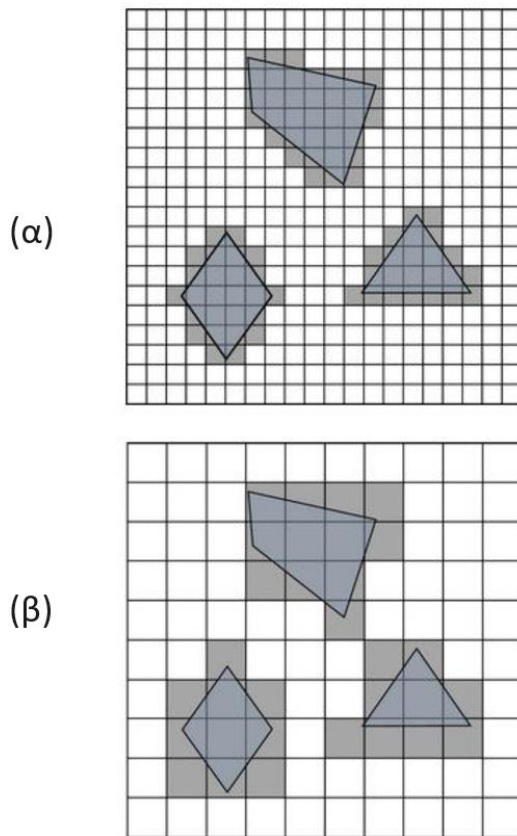


Εικόνα 7 – Boustrophedon αποσύνθεση χώρου.

Το περιβάλλον «χωρίζεται» σε 4 επιμέρους τμήματα. Η boustrophedon αποσύνθεση μπορεί να χωρίσει το περιβάλλον σε λιγότερα επιμέρους τμήματα σε σχέση με την τραπεζοειδή αποσύνθεση χώρου.

2.2.2 Προσεγγιστική αποσύνθεση

Μία άλλη κατηγορία αποσύνθεσης χώρου, πέρα από την ακριβή κυτταρική αποσύνθεση, είναι αυτή που βασίζεται σε πλέγματα (grid based), γνωστή και ως προσεγγιστική αποσύνθεση (Εικόνα 8). Σε αυτή τη κατηγορία, το περιβάλλον αναπαρίσταται ως ένα πλέγμα ομοιόμορφων κελιών. Παρόλο που αυτή η αναπαράσταση του περιβάλλοντος πολλές φορές δυσχεραίνει την ακριβή αναπαράσταση του χώρου και των ιδιοτήτων του (όπως για παράδειγμα τα εμπόδια), σε απλούς γεωμετρικά χώρους απλουστεύει σημαντικά τη διαδικασία του ΣΔΚ.



Εικόνα 8 – Προσεγγιστική αποσύνθεση χώρου σε κελιά.

Το περιβάλλον «χωρίζεται» σε επιμέρους κελιά. Η αποσύνθεση του χώρου σε ένα πλέγμα κελιών, μπορεί να έχει διαφορετική «ανάλυση», ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια. Στην εικόνα (α), έχει επιλεχθεί ένα μικρότερο μέγεθος κελιού από ότι στην εικόνα (β). Έτσι, η ακρίβεια της αναπαράστασης της εικόνας (α) είναι μεγαλύτερη. Αυτό βέβαια συνεπάγεται και αυξημένη πολυπλοκότητα για τον αλγόριθμο ΣΔΚ που θα χρησιμοποιηθεί.

Οι προσεγγίσεις με βάση το πλέγμα χρησιμοποιούν μια αναπαράσταση του περιβάλλοντος που αποσυντίθεται σε μια συλλογή ομοιόμορφων κελιών πλέγματος. Αυτή η αναπαράσταση προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Moravec κ.α. [82] για τη χαρτογράφηση ενός εσωτερικού περιβάλλοντος με τη χρήση ενός δακτυλίου σόναρ τοποθετημένου σε ένα κινητό ρομπότ. Σε αυτή την αναπαράσταση, κάθε κελί του πλέγματος έχει μια σχετική τιμή που δηλώνει αν υπάρχει εμπόδιο ή αν είναι ελεύθερος χώρος. Η τιμή μπορεί να είναι είτε δυαδική (0 ή 1), είτε μια πιθανότητα [83]. Τυπικά, κάθε κελί είναι τετράγωνο, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διαφορετικά σχήματα κελιών πλέγματος, όπως τρίγωνα ή άλλα πολύγωνα. Καθώς οι αναπαραστάσεις πλέγματος προσεγγίζουν μόνο το σχήμα της περιοχής στόχου και των εμποδίων της, ο Choset κατέταξε τις μεθόδους που βασίζονται σε πλέγμα ως προσεγγιστικές κυτταρικές αποσυνθέσεις [74]. Ως αποτέλεσμα αυτής της

προσεγγιστικής αναπαράστασης, οι περισσότερες προσεγγίσεις αυτού του τύπου είναι «πλήρεις ως προς την ανάλυση», δηλαδή η πληρότητά τους εξαρτάται από την ανάλυση του πλέγματος.

Η δημιουργία ενός χάρτη πλέγματος είναι εύκολη, καθώς μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας πίνακας, όπου κάθε στοιχείο περιέχει πληροφορίες πληρότητας που σχετίζονται με το κάθε κελί, ενώ είναι εξίσου εύκολη η σήμανση των καλυμμένων περιοχών. Ως αποτέλεσμα, οι αναπαραστάσεις με βάση το πλέγμα είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες για προβλήματα ΣΔΚ. Παρόλα αυτά, εμφανίζουν εκθετική αύξηση της χρήσης της μνήμης, καθώς η ανάλυση παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος [84], ενώ παράλληλα απαιτούν τη διασφάλιση της διατήρησης της συνοχής του περιβάλλοντος [85], [86].

Ως εκ τούτου, οι μέθοδοι κάλυψης με βάση το πλέγμα είναι κατάλληλες για λειτουργίες κινητών ρομπότ σε εσωτερικούς χώρους, ή χώρους που η γεωμετρία τους επιτρέπει να αναπαρασταθούν χωρίς μεγάλες παρεκκλίσεις. Σε περιπτώσεις όπου η γεωμετρία των εμποδίων, ή των προσβάσιμων χώρων είναι σύνθετη, ενδέχεται να υπάρχουν κελιά τα οποία θα σημειωθούν ως εμπόδια, ενώ στη πραγματικότητα είναι *μερικώς* μη προσβάσιμα. Αν και η αύξηση της ανάλυσης του χώρου μπορεί να μειώσει αυτή την πλασματική κάλυψη ορισμένων κελιών (Εικόνα 8), αυτή η προσέγγιση δεν καθίσταται πάντα πρακτική.

Σε προβλήματα ΣΔΚ που χρησιμοποιείται η αναπαράσταση του περιβάλλοντος σε πλέγμα, τα κελιά συνήθως έχουν τετράγωνο σχήμα και μέγεθος ίσο με το μέγεθος του ρομπότ. Οι Oh κ.α. [87] πρότειναν έναν αλγόριθμο κάλυψης που χρησιμοποιεί ένα χάρτη πλέγματος στον οποίο τα κελιά είναι τρίγωνα. Η λογική πίσω από την επιλογή τριγωνικών κελιών είναι ότι προσφέρουν υψηλότερη ανάλυση σε σύγκριση με ορθογώνια κελιά παρόμοιου μεγέθους. Ωστόσο, η ανάλυση του πλέγματος μπορεί επίσης να επιτευχθεί και με τη χρήση τετραγωνικών κελιών με μικρότερες διαστάσεις. Στην ρομποτική, και ειδικότερα στο πλαίσιο του προβλήματος ΣΔΚ, τα περισσότερα ρομπότ δεν είναι σε θέση να κάνουν πολύ λεπτές κινήσεις και, ως εκ τούτου, δεν υπάρχει ανάγκη για εξαιρετικά υψηλή ανάλυση στο ΣΔΚ. Επομένως, η προαναφερθείσα προσέγγιση που βασίζεται στην αναπαράσταση του περιβάλλοντος σε ένα τριγωνικό πλέγμα, δεν φαίνεται να έχει πρακτικές εφαρμογές.

2.2.2.1 Κυματοειδής κάλυψη πλέγματος

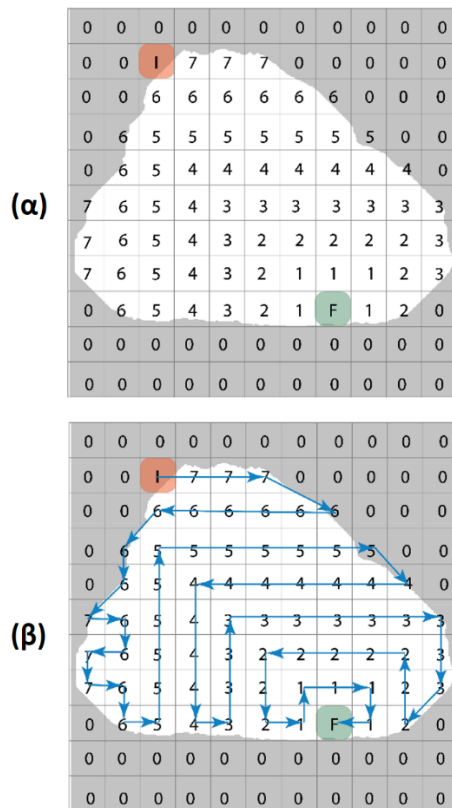
Οι Zelinsky κ.α. [88] ήταν από τους πρώτους ερευνητές που παρουσίασαν μια μέθοδο ΣΔΚ βασισμένη σε πλέγμα. Η μέθοδος τους προϋποθέτει ένα κελί εκκίνησης και ένα κελί στόχο. Χρησιμοποιείται ένας μετασχηματισμός απόστασης που διαδίδει ένα κυματοειδές μέτωπο από τον στόχο στην αφετηρία, με σκοπό την ανάθεση ενός συγκεκριμένου αριθμού σε κάθε κελί του πλέγματος. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν αλγόριθμο που αποδίδει πρώτα τιμή 0 στο στόχο και στη συνέχεια τιμή 1 σε όλα τα περιβάλλοντα κελιά του. Στη συνέχεια, όλα τα μη χαρακτηρισμένα κελιά που γειτνιάζουν με το χαρακτηρισμένο με 1 κελί, χαρακτηρίζονται με 2. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει το κύμα στο κελί εκκίνησης. Η Εικόνα 9 απεικονίζει τη διαδικασία κυματοειδούς κάλυψης πλέγματος.

Μόλις υπολογιστεί ο μετασχηματισμός απόστασης, μπορεί να βρεθεί μια διαδρομή κάλυψης ξεκινώντας από το κελί εκκίνησης και επιλέγοντας το γειτονικό κελί με την υψηλότερη ετικέτα που δεν έχει επισκεφθεί. Εάν δύο ή περισσότερα μη επισκέψιμα γειτονικά κελιά μοιράζονται την ίδια ετικέτα, επιλέγεται τυχαία ένα από αυτά. Αυτή η διαδικασία για την εύρεση μιας διαδρομής κάλυψης είναι ισοδύναμη με τη χρήση ψευδο-βαθμωτής καθόδου από το σημείο εκκίνησης στην αριθμητική συνάρτηση δυναμικού που σχηματίζεται από την επισήμανση, δηλαδή ακολουθώντας τις ισοδυναμικές καμπύλες από πάνω προς τα κάτω. Στην Εικόνα 9 (β) φαίνεται το παραγόμενο μονοπάτι κάλυψης για το περιβάλλον του παραδείγματος (α). Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό αυτού του αλγορίθμου κάλυψης (που δεν έχουν οι προαναφερθείσες προσεγγίσεις) είναι ότι μπορεί να καθοριστεί ένα σημείο εκκίνησης και ένα σημείο-στόχος.

2.2.2.2 Κάλυψη πλέγματος με Γράφους

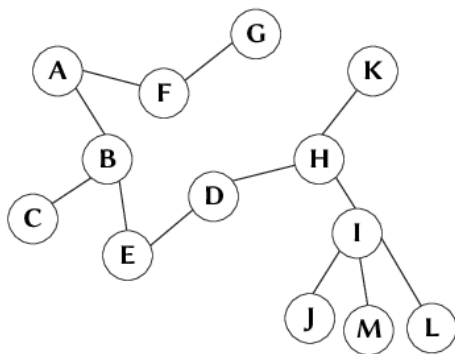
Ο Xu [89] παρουσίασε αλγορίθμους κάλυψης για περιβάλλοντα που μπορούν να αναπαρασταθούν ως ένας γράφος, όπως για παράδειγμα ένα οδικό δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω εργασία προσεγγίζει το πρόβλημα του ΣΔΚ με τον εξής τρόπο. Αρχικά, αναπαριστά το περιβάλλον ως έναν γράφο. Στη συνέχεια, λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς του περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα τον περιορισμό κατευθύνσεων που αντιστοιχούν σε ένα μονόδρομο. Η παρούσα εργασία, χρησιμοποιεί στη συνέχεια διάφορους αλγόριθμους αναζήτησης γράφου για τον

σχεδιασμό των διαδρομών. Αναθέτει μια τιμή κόστους σε κάθε ακμή του γράφου, και υπολογίζει τη βέλτιστη λύση.



Εικόνα 9 – Κυματοειδής κάλυψη χώρου.

Ο κυματοειδής αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει τις τιμές του κάθε κελιού (α), και στη συνέχεια όπως φαίνεται στην εικόνα (β), καλύπτει το χώρο έως ότου φτάσει στο σημείο στόχου.

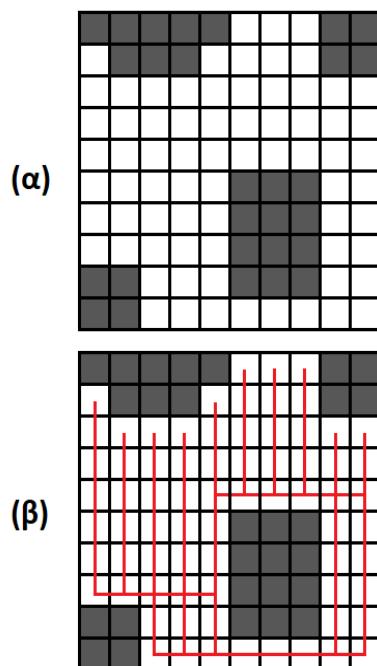


Εικόνα 10 – Απεικόνιση του περιβάλλοντος με γράφους.

Στην αναπαράσταση του περιβάλλοντος με γράφους, το περιβάλλον εκφράζεται από ένα σύνολο αλληλοσυνδεδεμένων σημείων. Κάθε σημείο, μπορεί να συνδέεται με ένα ή περισσότερα άλλα σημεία.

2.2.2.3 Κάλυψη πλέγματος με Δέντρα Κάλυψης Χώρου

Μια αρκετά δημοφιλής προσέγγιση που δίνει λύση στο πρόβλημα του ΣΔΚ είναι η μέθοδος κάλυψης του δέντρου διάσχισης (Spanning Tree Coverage - STC) [90]–[94]. Στον πυρήνα της, το STC έχει τις ρίζες του στη θεωρία γραφημάτων και στην υπολογιστική γεωμετρία. Η προσέγγιση STC, ξεκινά με τον μετασχηματισμό μιας δεδομένης περιοχής κάλυψης σε μια αναπαράσταση πλέγματος, όπου κάθε κελί μπορεί να θεωρηθεί ως κόμβος. Το ζητούμενο είναι να δημιουργηθεί στη συνέχεια ένα δέντρο κάλυψης για αυτό το πλέγμα, όπου το δέντρο ουσιαστικά αγγίζει όλους τους προσβάσιμους κόμβους χωρίς να περιλαμβάνει επαναλήψεις (Εικόνα 11). Μόλις σχηματιστεί το δέντρο, το ρομπότ πλοηγείται στο χώρο ακολουθώντας το δέντρο, μεταβαίνοντας σε κάθε ακμή αυτού του δέντρου δύο φορές - μία φορά προς τα εμπρός και μία προς τα πίσω. Αυτό εξασφαλίζει την πλήρη κάλυψη της περιοχής, αφού κάθε κελί (ή κόμβος) καλύπτεται κατά τη διάρκεια αυτής της πλοήγησης.



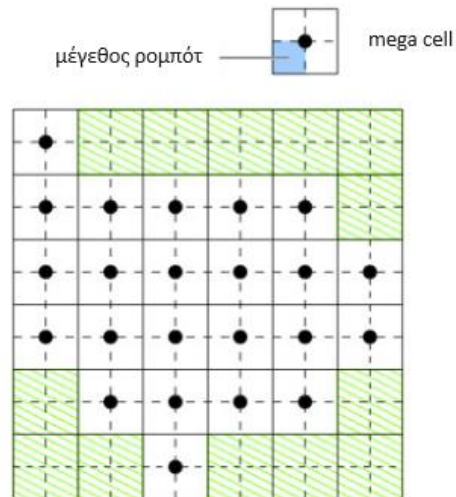
Εικόνα 11 – Δέντρο κάλυψης χώρου.

Σε αυτή την προσέγγιση, ο κύριος στόχος είναι να υπολογιστεί το δέντρο κάλυψης του χώρου (ή ιδανικά το ελάχιστο δέντρο κάλυψης χώρου), και στη συνέχεια το ρομπότ να «διασχίσει» το δέντρο. Η εικόνα (α) παρουσιάζει το αρχικό περιβάλλον. Στην εικόνα (β), οι κόκκινες γραμμές απεικονίζουν το ΔΚΧ.

Οι Gabriely κ.α. [90] πρότειναν τη σπειροειδή κάλυψη χώρου με δέντρα επικάλυψης, μια online προσέγγιση για κινητά ρομπότ η οποία συνίσταται στην υποδιαίρεση του χώρου σε ένα πλέγμα και στη δημιουργία μιας συστηματικής σπειροειδούς διαδρομής για τη κάλυψη του χώρου (Spiral-STC). Αυτή η συστηματική σπειροειδής διαδρομή δημιουργείται «ακολουθώντας» ένα δέντρο κάλυψης του μερικού χάρτη πλέγματος που κατασκευάζει σταδιακά το ρομπότ, χρησιμοποιώντας τους ενσωματωμένους αισθητήρες του. Το ρομπότ είναι σε θέση να καλύψει κάθε κελί πλέγματος ακριβώς μία φορά και να διανύσει μια πλήρη διαδρομή κάλυψης. Επικυρώνουν την πρόταση σε προσομοίωση. Ο αλγόριθμος Spiral-STC λειτουργεί ως εξής. Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά μεγέθη κελιών πλέγματος. Τα μεγαλύτερα κελιά (τα λεγόμενα mega cells) χωρίζονται σε τέσσερα μικρότερα κελιά, τα οποία έχουν μέγεθος ίσο με αυτό του ρομπότ. Αυτό φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 12. Για να εκτελέσει την κάλυψη, το ρομπότ εκτελεί την ακόλουθη διαδικασία. Ξεκινώντας από το τρέχον κελί, το ρομπότ επιλέγει μια νέα κατεύθυνση κίνησης επιλέγοντας το πρώτο νέο mega cell στον ελεύθερο χώρο κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται μια νέα ακμή του δέντρου κάλυψης από το τρέχον mega cell προς το νέο. Ο αλγόριθμος εκτελείται επαναλαμβανόμενα. Η εκτέλεση σταματά μόνο όταν το τρέχον κελί δεν έχει νέους γείτονες (ένα mega cell θεωρείται παλιό αν τουλάχιστον ένα από τα τέσσερα μικρότερα κελιά του έχει καλυφθεί, διαφορετικά θεωρείται νέο). Ως αποτέλεσμα αυτής της αναδρομικής διαδικασίας, το ρομπότ κινείται κατά μήκος της μιας πλευράς του δέντρου κάλυψης μέχρι να φτάσει στο τέλος του δέντρου. Στο σημείο αυτό, το ρομπότ γυρίζει για να διασχίσει την άλλη πλευρά του δέντρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όταν ολοκληρωθεί η κάλυψη, το ρομπότ επιστρέφει στο αρχικό κελί, διευκολύνοντας τη συλλογή και την αποθήκευση του. Από την άλλη πλευρά, το STC δεν επισκέπτεται ποτέ κανένα μικρό κελί δύο φορές και έτσι ελαχιστοποιεί το χρόνο κάλυψης.

Μια επέκταση του Spiral-STC είναι ο αλγόριθμος Backtracking Spiral Algorithm (BSA) που προτάθηκε στο [95], ο οποίος είναι επίσης μια on-line προσέγγιση που προορίζεται για κινητά ρομπότ. Ως πλεονέκτημα σε σχέση με τον αλγόριθμο Spiral-STC, αυτός ο αλγόριθμος προτείνει μια επέκταση για την κάλυψη όχι μόνο των μη κατειλημμένων κελιών, αλλά και των μερικώς κατειλημμένων. Αυτή η επέκταση βασίζεται στην ιδέα ότι τα μερικώς κατειλημμένα κελιά αποτελούν

μέρος του εξωτερικού δακτυλίου της σπειροειδούς διαδρομής. Τα κελιά αυτά καλύπτονται με μια διαδικασία ακολουθίας τοίχων. Η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί στους περισσότερους αλγορίθμους κάλυψης με βάση το πλέγμα.



Εικόνα 12 – Γραφική αναπαράσταση ενός mega cell.

Το mega cell έχει μήκος και πλάτος διπλάσια από τις διαστάσεις του ενός ρομπότ.

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου STC έγκειται στην απλότητα και την αποτελεσματικότητά της. Δεδομένου ότι το δένδρο διάσχισης δεν έχει εξ ορισμού βρόχους, το ρομπότ εξασφαλίζει μια διαδρομή χωρίς περιττές επικαλύψεις ή άσκοπες επανεπισκέψεις σε ήδη καλυπτόμενες περιοχές. Αυτό εξοικονομεί όχι μόνο ενέργεια αλλά και χρόνο, καθιστώντας τη διαδικασία κατάλληλη για εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο. Επιπλέον, δεδομένου ότι η αναπαράσταση του περιβάλλοντος σε μορφή πλέγματος μπορεί να διαμορφωθεί σε διάφορα σχήματα, η προσέγγιση μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τις δυνατότητες πλοήγησης του ρομπότ. Για παράδειγμα, ένα ρομπότ-σκούπα με μεγάλη βούρτσα μπορεί να επωφεληθεί από ένα λιγότερο λεπτομερές πλέγμα, ενώ ένα γεωργικό μη επανδρωμένο αεροσκάφος ακριβείας μπορεί να απαιτεί ένα περισσότερο λεπτομερές πλέγμα για να διασφαλίσει την επιθεώρηση κάθε σπιθαμής ενός χωραφιού.

Εντούτοις, ενώ η μέθοδος STC είναι αποτελεσματική, μπορεί να μην είναι πάντα η βέλτιστη. Η διαδρομή που προκύπτει δεν είναι εγγυημένα η συντομότερη δυνατή για μια δεδομένη εργασία κάλυψης. Επιπλέον, περιβαλλοντικές

πολυπλοκότητες, όπως εμπόδια ή δυναμικές οντότητες, μπορεί να περιπλέξουν περαιτέρω τη διαδρομή. Ως εκ τούτου, ορισμένες εφαρμογές ενδέχεται να απαιτούν περισσότερο σύνθετους αλγόριθμους ή υβριδικές μεθόδους που συνδυάζουν τη STC με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης. Σε πολλά περιβάλλοντα, ωστόσο, που οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι είναι περιορισμένοι και δεν υπάρχει η πολυτέλεια του χρόνου για την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης, ο ΣΔΚ χρησιμοποιώντας τη μέθοδο STC αναδεικνύεται ως μια αξιόπιστη επιλογή.

Ο σχεδιασμός του δέντρου κάλυψης σε μια δεδομένη περιοχή πλέγματος είναι η πιο κρίσιμη διαδικασία. Η κατασκευή αυτού του δέντρου μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφόρων αλγορίθμων, όπως η αναζήτηση με βάση το βάθος (Depth-First Search, DFS) [96], η αναζήτηση με βάση το εύρος (Breadth-First Search, BFS) [97] ή άλλοι αλγόριθμοι. Στα προβλήματα ΣΔΚ όπου η εύρεση της πιο σύντομης διαδρομής είναι υψίστης σημασίας, δεν πρέπει να σχεδιάσουμε απλά ένα δέντρο επικάλυψης, αλλά το Ελάχιστο Δέντρο Κάλυψης (ΕΔΚ) ή Minimum Spanning Tree (MST) [98], [99]. Η έννοια του ΕΔΚ εμφανίζεται σε σταθμισμένους γράφους και ο στόχος είναι να βρεθεί ένα δένδρο επικάλυψης με το ελάχιστο συνολικό βάρος ακμής. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι όλα τα δέντρα κάλυψης ΕΔΚ, λόγω του κριτηρίου ελαχιστοποίησης του βάρους.

Για την κατασκευή ενός ΕΔΚ, υπάρχουν δύο πρωταρχικοί και γνωστοί αλγόριθμοι: ο αλγόριθμος του Prim [100] και ο αλγόριθμος του Kruskal [101]. Ο αλγόριθμος του Prim ξεκινά με μια αυθαίρετη κορυφή και προσθέτει διαδοχικά τη συντομότερη ακμή που συνδέει οποιαδήποτε κορυφή στο αναπτυσσόμενο ΕΔΚ με μια εκτός αυτού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το δέντρο να καλύψει όλες τις κορυφές. Αντίθετα, ο αλγόριθμος του Kruskal ξεκινά με την ταξινόμηση όλων των ακμών από τη λιγότερο ακριβή προς την ακριβότερη. Στη συνέχεια προσθέτει σταδιακά ακμές, ξεκινώντας από τη μικρότερη, στο αυξανόμενο ΕΔΚ, μόνο όμως αν η ακμή δεν δημιουργεί κύκλο. Αυτή η προσθήκη συνεχίζεται μέχρι το δέντρο να περιλαμβάνει όλες τις κορυφές. Τόσο ο αλγόριθμος του Prim όσο και ο αλγόριθμος του Kruskal έχουν δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, και επιλέγονται με βάση τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε προβλήματος, όπως η πυκνότητα του γράφου ή η ανάγκη για συγκεκριμένη χρονική και χωρική πολυπλοκότητα.

2.2.3 Αλγόριθμοι ανταμοιβής

Οι προσεγγίσεις που βασίζονται στην ανταμοιβή (reward), χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στο πρόβλημα του ΣΔΚ, κυρίως σε περιπτώσεις πολλαπλών ρομπότ, λόγω των πλεονεκτημάτων τους, όπως η μη γραμμική χαρτογράφηση του χώρου, η ικανότητα εκμάθησης και η παράλληλη επεξεργασία. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν κυρίως νευρωνικά δίκτυα, μεθόδους εμπνευσμένες από τη φύση και υβριδικούς αλγορίθμους.

Οι βιο-εμπνευσμένες στρατηγικές κάλυψης χώρου έχουν αναπτυχθεί παρατηρώντας συμπεριφορές που συναντώνται στη φύση. Για παράδειγμα, οι Ranjbar-Sahraei κ.α. [102] περιέγραψαν ένα σενάριο όπου τα ρομπότ, μιμούμενα τη συμπεριφορά των μυρμηγκιών, αποφεύγουν το ένα τα όρια του άλλου. Σε αυτό το σενάριο, τα ρομπότ κινούνται σε κυκλικά μοτίβα, εναποθέτοντας φερομόνες στα όρια της περιοχής τους για να ελαχιστοποιήσουν τις διασταυρώσεις συνόρων. Εάν ένα ρομπότ ανιχνεύσει μια φερομόνη, αλλάζει την κατεύθυνσή του για να αποφύγει τα όρια ενός άλλου ρομπότ, διευκολύνοντας την ομοιόμορφη κατανομή στο περιβάλλον. Αυτή η τεχνική αναπτύχθηκε περαιτέρω με δύο διαφορετικούς τρόπους. Πρώτον, προσαρμόζοντας την ακτίνα κυκλικής κίνησης του ρομπότ με βάση την πιθανότητα ανίχνευσης φερομόνης. Δεύτερον, η τροποποιώντας τη συμπεριφορά κατά την ανίχνευση ενός «εισβολέα», μειώνοντας την περιοχή του ρομπότ.

Στη μελέτη [103], παρουσιάστηκε ένας βελτιστοποιημένος γενετικός αλγόριθμος σε συνδυασμό με μια μέθοδο πλήρους κάλυψης για τη δημιουργία τρισδιάστατων χαρτών με πολλαπλά UAV. Σε αυτή τη μελέτη, μοιράζεται η περιοχή στα επιμέρους UAV, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο πλημύρας (flood-fill) και τη θεωρία παιγνίων. Παρομοίως, στη μελέτη [104], παρουσιάζεται ένας γενετικός αλγόριθμος για το σχεδιασμό διαδρομής, με κύριο σκοπό την εξασφάλιση της πλήρους κάλυψης. Αρχικά, η μέθοδος αυτή σχεδιάστηκε για προβλήματα χρησιμοποιώντας UGV, αλλά αργότερα προσαρμόστηκε και σε προβλήματα πολλαπλών UAV με βάση τις θέσεις και την αντοχή τους.

Μια ενδιαφέρουσα εργασία [105] παρουσιάζει μια προσέγγιση ΣΔΚ χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή δράσης κάλυψης που πραγματοποιεί ενεργή επιλογή στόχων. Σε αυτή την προσέγγιση, προτείνονται δύο συναρτήσεις κόστους

προκειμένου να επιτραπεί στα ρομπότ να αποφεύγουν τα εμπόδια και να βρίσκουν τις βέλτιστες διαδρομές προς τους καθορισμένους στόχους. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επιλογή του καλύτερου στόχου, λαμβάνει υπόψη τις διαδρομές κάλυψης και εισάγει την έννοια του ασφαλούς στόχου. Οι συγγραφείς του [106] πρότειναν μια ευρετική προσέγγιση βασισμένη σε μια μέθοδο που κατανέμει το φορτίο κάλυψης σε έναν ετερογενή τύπο UAV, λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο σάρωσης και τη διάταξη των UAV. Η διαδρομή κάλυψης των περιοχών υπολογίζεται με τη χρήση μιας μεθόδου ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού.

2.3 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΡΟΜΠΟΤ

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος ΣΔΚ αυξάνεται σημαντικά όταν μεταβαίνουμε σε συστήματα πολλαπλών ρομπότ. Παρόλο που ο αρχικός στόχος είναι ο ίδιος, η πλήρη κάλυψη του χώρου, τα συστήματα πολλαπλών ρομπότ έχουν επιπρόσθετα προβλήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Καταρχάς, υπάρχει το πρόβλημα των παρεμβολών μεταξύ των ρομπότ - δύο ή περισσότερα ρομπότ μπορεί να συγκρουστούν ή να βρεθούν σε αδιέξοδο, εάν οι διαδρομές τους δεν έχουν σχεδιαστεί μεθοδικά. Αυτό γίνεται ακόμη πιο έντονο σε περιβάλλοντα με στενούς διαδρόμους ή δυναμικά εμπόδια. Το δεύτερο σημαντικότερο πρόβλημα είναι αυτό του διαμοιρασμού της περιοχής στα επιμέρους ρομπότ. Ο απλούστερος ή «τυχαίος» διαμοιρασμός του χώρου δεν είναι πάντα η καλύτερη προσέγγιση, ειδικά σε περιβάλλοντα με ποικίλα εδάφη ή όταν τα ρομπότ έχουν διαφορετικές δυνατότητες. Έχοντας κατά νου αυτές τις προκλήσεις, οι επόμενες ενότητες εμβαθύνουν στην ανάγκη για πιο αποδοτικό διαχωρισμό του χώρου, καθώς και στις προκλήσεις όσον αφορά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

2.3.1 Διαμοιρασμός της περιοχής σε πολλαπλά ρομπότ

Ο διαχωρισμός περιοχής παίζει καθοριστικό ρόλο στο πρόβλημα του ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, επηρεάζοντας άμεσα τη συνολική αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα του συστήματος. Σε καταστάσεις πολλαπλών ρομπότ, η πρόκληση δεν είναι απλώς να διασφαλιστεί ότι καλύπτεται κάθε τμήμα του περιβάλλοντος, αλλά ότι αυτό γίνεται με τρόπο που αξιοποιεί βέλτιστα τις δυνατότητες κάθε ρομπότ και ότι εξοικονομείται ενέργεια. Αυτό το πρόβλημα έρχεται στην επιφάνεια κυρίως όταν εξετάζονται περιβάλλοντα που διαθέτουν διαφορετικές επιφάνειες και εδάφη. Για παράδειγμα, μια περιοχή μπορεί να περιλαμβάνει ομαλά εδάφη, όσο και ανώμαλα εδάφη - η αποστολή ενός ρομπότ που είναι σχεδιασμένο για επίπεδες επιφάνειες σε ανώμαλα σημεία, μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική κάλυψη και αυξημένη φθορά. Ως εκ τούτου, ο σωστός διαχωρισμός περιοχών, διασφαλίζει ότι στα ρομπότ ανατίθενται περιοχές που ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές και τις δυνατότητες τους. Συνεπώς, η αντιμετώπιση της πρόκλησης του διαχωρισμού της αρχικής περιοχής στα επιμέρους ρομπότ καθίσταται απαραίτητη για τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας του συστήματος.

2.3.2 Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας

Η δεύτερη σημαντικότερη πρόκληση που εμφανίζεται σε συστήματα πολλαπλών ρομπότ, είναι αυτή της κατανάλωσης ενέργειας. Σε συστήματα όπου πολλαπλά ρομπότ λειτουργούν ταυτόχρονα, η αθροιστική κατανάλωση ενέργειας μπορεί να κλιμακωθεί γρήγορα, ειδικά αν οι διαδρομές πλοήγησης των ρομπότ δεν είναι βελτιστοποιημένες. Κάθε περιττή στροφή, οπισθοδρόμηση ή αλληλοεπικάλυψη μπορεί όχι μόνο να οδηγήσει σε χάσιμο χρόνου, αλλά και να εξαντλήσει την πολύτιμη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Σε περιβάλλοντα που απαιτούν εκτεταμένη κάλυψη, όπως μεγάλες αποθήκες ή γεωργικά χωράφια, μια μη αποδοτική διαδρομή μπορεί να σημαίνει τη διαφορά μεταξύ της ολοκλήρωσης της εργασίας με μία μόνο φόρτιση ή της ανάγκης πολλαπλών επαναφορτίσεων, διακόπτοντας τη ροή εργασιών. Εστιάζοντας στη δημιουργία καλύτερων, πιο βελτιωμένων διαδρομών για κάθε ρομπότ, μπορούμε να βελτιώσουμε σημαντικά την ενεργειακή απόδοση. Αυτό εξασφαλίζει μεγαλύτερους χρόνους λειτουργίας, μειωμένη φθορά των ρομπότ και μειωμένη ανάγκη για συχνές επαναφορτίσεις. Στην ουσία, η βελτιστοποίηση των διαδρομών για ενεργειακή απόδοση δεν αφορά μόνο τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας- αφορά τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας και της μακροζωίας ολόκληρου του συστήματος πολλαπλών ρομπότ.

2.4 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε ενδελεχής διερεύνηση του περίπλοκου πεδίου της πλοήγησης ρομποτικών συστημάτων, και πιο συγκεκριμένα το πρόβλημα του ΣΔΚ. Παρουσιάστηκαν οι κύριες κατηγορίες αλγορίθμων, καθώς και η επιμέρους κατηγορίες στις οποίες μπορούν να χωριστούν βάσει του τύπου αναπαράστασης του περιβάλλοντος που χρησιμοποιούν. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στους offline αλγορίθμους ΣΔΚ, και πιο συγκεκριμένα στους αλγορίθμους που χρησιμοποιούν προσεγγιστική αναπαράσταση χώρου. Στη συνέχεια, αναδείχθηκαν οι δυο πιο σημαντικές προκλήσεις που έχουν τα συστήματα πολλαπλών ρομπότ. Το επόμενο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζει μια προσέγγιση για τη λύση του προβλήματος διαμοιρασμού της αρχικής περιοχής στα επιμέρους ρομπότ.

Κεφάλαιο 3: Διαμοιρασμός της περιοχής σε προβλήματα πολλαπλών ρομπότ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκαν διεξοδικά οι τεχνικές Σχεδιασμού Διαδρομών Κάλυψης (ΣΔΚ) που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία. Γίνεται κατανοητό, ότι για την αποτελεσματική κάλυψη του χώρου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, όπως το υψόμετρο και ο τύπος εδάφους. Το κεφάλαιο αυτό, πραγματεύεται το κρίσιμο θέμα του διαχωρισμού της περιοχής στο πλαίσιο του ΣΔΚ σε προβλήματα πολλαπλών ρομπότ. Παρουσιάζεται μια προσέγγιση για το διαχωρισμό της περιοχής που λαμβάνει υπόψη όλα τα καίρια χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, και δεν εξαρτάται από το πλήθος των ρομπότ και των αρχικών τους θέσεων.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πολυπλοκότητα του ΣΔΚ αυξάνεται όταν περνάμε από συστήματα ενός ρομπότ σε συστήματα πολλαπλών ρομπότ. Ο σχεδιασμός διαδρομών κάλυψης πολλαπλών ρομπότ περιλαμβάνει τον σχεδιασμό πολλαπλών διαδρομών, ώστε να εξασφαλίζεται η ολοκληρωμένη και αποτελεσματική κάλυψη μιας μεγαλύτερης ή πιο σύνθετης περιοχής [94], [107]–[113]. Ένα σημαντικό ζήτημα στο ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, είναι ο διαχωρισμός της επιχειρησιακής περιοχής μεταξύ των ρομπότ, ένα πρόβλημα γνωστό ως «πρόβλημα διαμοιρασμού περιοχής». Για να γίνει το πρόβλημα αυτό πιο εύκολα κατανοητό, ας υποθεθεί μια ομάδα μη επανδρωμένων ρομπότ, που χρησιμοποιούνται σε μια μεγάλης κλίμακας περιβαλλοντική παρακολούθηση, ή έναν στόλο αυτόνομων οχημάτων που εκτελούν μια αποστολή έρευνας και διάσωσης σε μια πληγείσα περιοχή. Ο βέλτιστος διαμοιρασμός της αρχικής περιοχής σε επιμέρους υπόπεριοχές, μια για κάθε ρομπότ, μπορεί να βελτιώσει δραστικά την αποτελεσματικότητα της κάλυψης καθώς και του επιχειρησιακού συντονισμού, εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο. Η αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος του διαμοιρασμού της αρχικής περιοχής, είναι υψίστης σημασίας στο σχεδιασμό συστημάτων πολλαπλών ρομπότ, σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών του πραγματικού κόσμου. Ως εκ τούτου, παραμένει ένας τομέας με έντονη ερευνητική δραστηριότητα που έχει ανάγκη για νέες λύσεις και μεθοδολογίες που μπορούν να ανταποκριθούν στις εξελισσόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων ρομποτικών συστημάτων.

Αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει μοντέλα για την επίλυση του προβλήματος του διαμοιρασμού της περιοχής και του ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ. Παρόλο που αρκετά από αυτά τα μοντέλα μπορεί να δώσουν λύση σε αρκετά προβλήματα, συχνά διέπονται από σημαντικούς περιορισμούς που μειώνουν την αποτελεσματικότητά τους. Δύο βασικοί περιορισμοί των αλγορίθμων ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ είναι (α) η αδυναμία προσδιορισμού του πλήθους των ρομπότ που απαιτούνται, και (β) η επιλογή των θέσεων εκκίνησής τους. Και οι δύο αυτοί παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου διαμοιρασμού της περιοχής, καθώς και του σχεδιασμού των τελικών διαδρομών. Για παράδειγμα, ένας ανεπαρκής αριθμός ρομπότ μπορεί να αποδώσει ελλιπή κάλυψη, με αποτέλεσμα να παραλείπονται περιοχές. Αντίθετα, η χρήση υπερβάλλοντος αριθμού ρομπότ μπορεί να καταστήσει το έργο αναποτελεσματικό και περιττά περίπλοκο, αυξάνοντας έτσι

το κόστος και τον υπολογιστικό φόρτο. Ομοίως, η επιλογή της αρχικής τοποθέτησης των ρομπότ επηρεάζει καθοριστικά την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, καθώς προδιαγράφει την κατανομή της περιοχής στα ρομπότ. Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός που έχουν οι αλγόριθμοι ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, είναι η αδυναμία τους να διαχειρίζονται σύνθετα περιβάλλοντα, όπως για παράδειγμα περιβάλλοντα με σημεία διαφορετικού τύπου εδάφους και υψομέτρου.

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια σημαντική συμβολή στον τομέα του ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ με την εισαγωγή ενός νέου μοντέλου για το διαχωρισμό περιοχής, που βασίζεται στον αλγόριθμο Affinity Propagation (AP) [114]. Η βασική ιδέα της παρούσας προσέγγισης είναι η αποδόμηση του προβλήματος ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ σε ένα σύνολο υπόπροβλημάτων ΣΔΚ του ενός ρομπότ, τα οποία μπορεί να είναι ή να μην είναι αλληλεξαρτώμενα. Παρόλο που πολυάριθμα μοντέλα στη βιβλιογραφία ακολουθούν μια παρόμοια στρατηγική τύπου «διαίρει και βασίλευε», το προτεινόμενο μοντέλο διαφέρει σε τρία βασικά σημεία:

- Η προτεινόμενη προσέγγιση αναθέτει περιοχές στα ρομπότ χωρίς να απαιτείται ο αυθαίρετος προσδιορισμός του πλήθους των ρομπότ. Ο αλγόριθμος διαμοιρασμού περιοχής AP αξιοποιεί μια σταθμισμένη συνάρτηση δείκτη ομοιότητας (Similarity Index) για να διακρίνει παρόμοια σημεία του χώρου και να εξακριβώσει τον βέλτιστο αριθμό ρομπότ. Αυτό ουσιαστικά απαλλάσσει τον χειριστή από την ευθύνη του προσδιορισμού του κατάλληλου αριθμού ρομπότ που απαιτούνται συνολικά για την εργασία.
- Όπως αναφέρθηκε ήδη, Ένα κοινό μειονέκτημα πολλών υφιστάμενων αλγορίθμων είναι η αδυναμία τους να χειριστούν καταστάσεις όπου οι αρχικές θέσεις των ρομπότ βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, οδηγώντας σε μη αποδοτικό διαμοιρασμό της περιοχής. Σε αντίθεση με αυτές τις προσεγγίσεις, η προτεινόμενη προσέγγιση παρακάμπτει έξυπνα τους περιορισμούς των προκαθορισμένων αριθμών και θέσεων των ρομπότ, προσφέροντας έτσι μια πιο ευέλικτη και αποτελεσματική λύση για το διαμοιρασμό της αρχικής περιοχής, και άρα στο γενικότερο πρόβλημα του ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ.

- Η συνάρτηση ομοιότητας (Similarity Function) του αλγορίθμου AP, λαμβάνει υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος του εδάφους, η χωρική συνδεσιμότητα των σημείων και η μεταξύ τους «κανονικοποιημένη απόστασή», προτού τα ενσωματώσει σε μια υποπεριοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μειωμένα ποσοστά ανάμειξης περιοχών, πράγμα που σημαίνει ότι τα σημεία εντός των τελικών συστάδων που δημιουργούνται με αυτή τη μέθοδο είναι λιγότερο πιθανό να περιβληθούν από σημεία άλλων υποπεριοχών.

Η δομή του υπόλοιπου κεφαλαίου διαμορφώνεται ως εξής:

Στην ενότητα 2, παρουσιάζεται ο μαθηματικός ορισμός του προβλήματος. Στην ενότητα 3, παρουσιάζονται παρόμοια έργα από τη βιβλιογραφία και επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Στην ενότητα 4, αναλύεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Στη συνέχεια, στην ενότητα 5 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου. Οι περιορισμοί του αλγορίθμου, οι πιθανές βελτιώσεις της απόδοσης και η χρήση των παράλληλων υπολογιστών περιγράφονται στην ενότητα 6. Τέλος, η ενότητα 7 υπογραμμίζει τα συμπεράσματα.

3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ο αποτελεσματικός διαχωρισμός μιας περιοχής σε διακριτές επιμέρους υποπεριοχές αποτελεί ένα σύνθετο και πολυδιάστατο πρόβλημα. Για να θεμελιωθεί η παρούσα έρευνα, είναι απαραίτητο να τεθεί αρχικά μια μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, αποτυπώνοντας συνοπτικά τις βασικές πτυχές και τους περιορισμούς που εμπλέκονται. Αυτό το μαθηματικό μοντέλο, χρησιμεύει ως σαφής αναπαράσταση του υποκείμενου προβλήματος, αποσαφηνίζοντας τα βασικά του στοιχεία και καθοδηγώντας έτσι την ανάπτυξη μιας ορθής αλγοριθμικής λύσης.

Το αρχικό περιβάλλον (ή αρχική περιοχή), περιγράφεται από ένα δυαδικό πίνακα ο οποίος ορίζει τις προσβάσιμες περιοχές και τα εμπόδια. Κάθε ρομπότ ανατίθενται σε ένα τμήμα του αρχικού περιβάλλοντος, το οποίο ονομάζεται υποπεριοχή. Κάθε σημείο του αρχικού περιβάλλοντος μπορεί να αποτελείται από διαφορετικό τύπο εδάφους, όπως για παράδειγμα άσφαλτος ή γρασίδι. Ο βασικός στόχος είναι να διαχωριστεί η αρχική περιοχή σε επιμέρους υποπεριοχές, ώστε να ικανοποιείται ένα σύνολο περιορισμών σχετικά με την προσβασιμότητα και τη συνέχεια των περιοχών. Το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται στη συνέχεια είναι μια ακριβής περιγραφή του προβλήματος, που θέτει τις βάσεις της παρούσας έρευνας και διευκολύνει την περαιτέρω συζήτηση και τον σχεδιασμό της λύσης.

Πιο συγκεκριμένα, έχοντας:

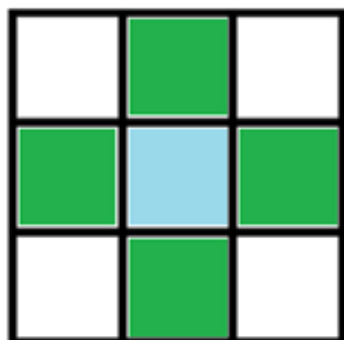
- Ένα αρχικό περιβάλλον A μεγέθους $X \times Y$ που αναπαρίσταται ως δυαδικός πίνακας $A = [a_{i,j}]$, όπου $a_{i,j} \in \{0,1\}$ για όλα τα $1 \leq i \leq X$ και $1 \leq j \leq Y$. Στον πίνακα A , $a_{i,j} = 0$ αντιπροσωπεύει εμπόδιο ενώ $a_{i,j} = 1$ αντιπροσωπεύει προσπελάσιμο σημείο. Εξ ορισμού, τα ρομπότ μπορούν να διασχίσουν μόνο προσβάσιμα σημεία.
- Έναν σύνολο ρομπότ $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, όπου n είναι ο αριθμός των ρομπότ.
- Έναν πίνακα $T = [t_{i,j}]$, που περιγράφει τον τύπο εδάφους $a_{i,j}$.
- Έναν πίνακα $E = [e_{i,j}]$, που περιγράφει το υψόμετρο του κάθε σημείου $a_{i,j}$.
- Την τιμή E_W που αντιπροσωπεύει τη βαρύτητα του υψομέτρου, την τιμή F_W που αντιπροσωπεύει τη βαρύτητα του εδάφους και την τιμή D_W που αντιπροσωπεύει τη βαρύτητα της απόστασης.

Με βάση αυτές τις πληροφορίες, αναζητούμε:

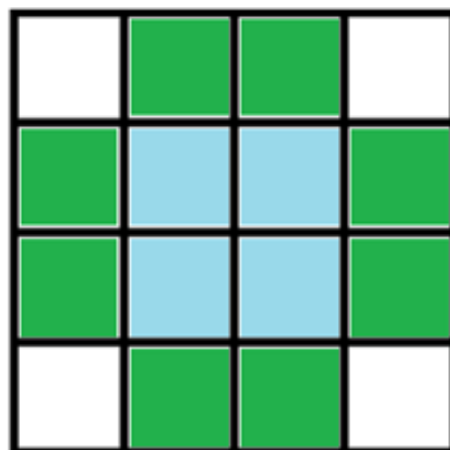
- Ένα σύνολο υποπεριοχών $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, όπου κάθε υποπεριοχή s_i είναι ένα συνεχές τμήμα της αρχικής περιοχής A με γειτνίαση τεσσάρων επιπέδων και ανατίθεται στο ρομπότ r_i .

Τυπικά, ορίζονται οι παρακάτω περιορισμοί:

- Κάθε υποπεριοχή s_i διατηρεί γειτνίαση με όλα τα σημεία που ανήκουν σε αυτή (Εικόνα 13), δηλαδή, για κάθε ζεύγος προσβάσιμων σημείων c_{m_1, n_1} και c_{m_2, n_2} σε μια υποπεριοχή s_i , υπάρχει μια ακολουθία σημείων $c_{m_k, n_k}, k = 1, \dots, p$, τέτοια ώστε $c_{m_1, n_1} = c_{m_1, n_1}, c_{m_p, n_p} = c_{m_2, n_2}$, και το σημείο c_{m_k, n_k} να είναι γειτονικό σημείο του $c_{m_{k+1}, n_{k+1}}$ για όλα τα $k = 1, \dots, p - 1$. Το κριτήριο γειτνίασης (4-neighbor) ορίζει ότι η συνδεσιμότητα μεταξύ των κελιών πρέπει να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη - όχι διαγώνια. Έτσι, στην ουσία, κάθε σημείο στην ακολουθία είναι οριζοντίως ή καθέτως γειτονικό με το διάδοχό του, για όλες τις τιμές του k που κυμαίνονται από 1 έως $p - 1$. Αυτή η συνθήκη εξασφαλίζει μια συνέχεια ή αλυσίδα συνδέσεων 4 γειτόνων μεταξύ οποιωνδήποτε δύο προσβάσιμων κελιών σε μια δεδομένη υποπεριοχή, διατηρώντας έτσι τον κανόνα της συνδεσιμότητας 4 γειτόνων σε ολόκληρο το πλέγμα.
- Το περιβάλλον A είναι η ένωση όλων των υποπεριοχών S , δηλαδή, $A = \bigcup_{i=1}^n s_i$.
- Η τομή δύο διαφορετικών υποπεριοχών s_i και s_j για κάθε $i \neq j$ είναι το κενό σύνολο, δηλαδή $s_i \cap s_j = \emptyset$ για κάθε $i \neq j$.
- Το πρόβλημα είναι να βρεθεί μια συνάρτηση $f: R \rightarrow S$ τέτοια ώστε $f(r_i) = s_i$ για κάθε $1 \leq i \leq n$, που πληροί τους προαναφερθέντες περιορισμούς.



(a)



(b)

Εικόνα 13 – Γειτνίαση τεσσάρων επιπέδων μεταξύ των κελιών.

Η εικόνα (α) απεικονίζει ένα σύμπλεγμα που αποτελείται από ένα μόνο κελί (μπλε κελί). Τα πράσινα κελιά αντιπροσωπεύουν τα κύτταρα που έχουν συνδεσιμότητα 4 γειτόνων με το μπλε κελί. Η εικόνα (β) απεικονίζει ένα μεγαλύτερο περιβάλλον μαζί με τους 4 γείτονές του. Ουσιαστικά, η συνδεσιμότητα 4 γειτόνων μεταξύ των κυττάρων εμποδίζει ένα ρομπότ να κινείται διαγώνια μέσα στο περιβάλλον.

3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Αυτή η ενότητα εμβαθύνει στις ερευνητικές προσπάθειες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και πραγματεύονται το πρόβλημα του ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον διαμοιρασμό και την κατανομή της περιοχής. Στόχος αυτής της ενότητας είναι να παράσχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των υφιστάμενων αλγορίθμων και μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση του προβλήματος ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ. Για την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους, πραγματοποιήθηκε ανάλυση, σύγκριση και κριτική αξιολόγηση των σχετικών εργασιών, δημιουργώντας έτσι τις βάσεις για την αξιολόγηση της επιστημονικής συμβολής και της καινοτομίας του μοντέλου που προτείνεται στην παρούσα διατριβή.

Μια μέθοδος ΣΔΚ σε συστήματα πολλαπλών ρομπότ προτάθηκε από τους Hazon κ.α. [115]. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη γενίκευση της κάλυψης πλέγματος χρησιμοποιώντας Δέντρα Κάλυψης Χώρου (ΔΚΧ) χρησιμοποιώντας έναν ευρετικό αλγόριθμο, ο οποίος ονομάστηκε Multi-robot Spanning Tree Coverage (MSTC). Σε αυτή τη προσέγγιση, οι ερευνητές θεωρούν πως τα ρομπότ βρίσκονται ήδη τοποθετημένα μέσα στο χώρο. Σκοπός του αλγορίθμου είναι να σχεδιάσει ένα ενιαίο ΔΚΧ, το οποίο θα ακολουθήσουν τα ρομπότ, προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη. Το κάθε ρομπότ ξεκινάει την πλοήγηση από την αρχική του θέση, και καταλήγει στην αρχική θέση ενός άλλου ρομπότ. Μόλις ολοκληρωθεί η κάλυψη, κάθε αρχική θέση ενός ρομπότ θα είναι καλυμμένη αλλά από ένα διαφορετικό ρομπότ.

Οι Zheng κ.ά. [116] παρουσίασαν μια βελτιωμένη (σε σχέση με την MSTC) μέθοδο για την εύρεση ενός ΔΚΧ για μια ομάδα ρομπότ. Σε αυτήν την μέθοδο, ο αλγόριθμος δημιουργεί ένα ενιαίο ΔΚΧ το οποίο καλύπτει ολόκληρο το χώρο. Στη συνέχεια, κάθε ρομπότ εκτελεί το δρομολόγιο κάλυψης χώρου ακολουθώντας ένα μέρος του αρχικού ΔΚΧ. Παρόλο που πρόκειται για μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση, αυτή η μέθοδος δεν εξασφαλίζει τη μοναδικότητα των διαδρομών και την αποφυγή της επικάλυψής τους. Για την ακρίβεια, αν τα ρομπότ είναι αρχικά τοποθετημένα σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, ενδέχεται μέρος του ΔΚΧ να καλυφθεί από όλα τα ρομπότ. Βέβαια, συγκριτικά με την MSTC, οι συγγραφείς της εργασίας αναφέρουν πως η δική τους μέθοδος αποδίδει σημαντικά καλύτερα.

Ένας ευρέως αναγνωρισμένος offline αλγόριθμος ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ είναι ο αλγόριθμος που προτάθηκε από τους Tang κ.α. [110] που προτείνουν το μοντέλο MSTC*. Αυτός ο αλγόριθμος στοχεύει κατά κύριο λόγο στο ΣΔΚ, λαμβάνοντας υπόψη ρεαλιστικούς φυσικούς περιορισμούς, όπως εμπόδια και επικοινωνιακές διόδους μεταξύ των ρομπότ. Η τεχνική που χρησιμοποιείται για να διαμοιράσει το αρχικό περιβάλλον σε επιμέρους υποπεριοχές βασίζεται στα Ελάχιστα Δέντρα Κάλυψης (ΕΔΚ), και αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του αλγορίθμου. Τα ρομπότ κατανέμονται στη συνέχεια σε αυτές τις υποπεριοχές ανάλογα με τις ικανότητές τους και τις απαιτήσεις του φόρτου εργασίας τους. Αυτός ο αλγόριθμος διαθέτει το πλεονέκτημα ότι αντιμετωπίζει τους φυσικούς περιορισμούς του χώρου, μια καίρια παράμετρο σε πραγματικές καταστάσεις όπου τα ρομπότ πρέπει να ελιχθούν μέσα σε πολύπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα. Το κύριο μειονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ότι αδυνατεί να επιλέξει τον αριθμό των ρομπότ που θα χρησιμοποιηθούν. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η διατύπωση του προβλήματος των Tang κ.α. είναι αντίστοιχη με το πρόβλημα που διατυπώνεται στην παρούσα εργασία όσον αφορά τον διαμοιρασμό και την κατανομή της περιοχής, αν και οι επιμέρους λεπτομέρειες του προβλήματος με τις οποίες ασχολούνται οι συγγραφείς είναι διαφορετικές.

Ένας άλλος αξιοσημείωτος αλγόριθμος ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ είναι αυτός που προτείνει ο Rahman κ.ά. [113] για αυτόνομη χαρτογράφηση ακτινοβολίας με τη χρήση κινητών ρομπότ. Ο πρωταρχικός στόχος αυτού του αλγορίθμου είναι η δημιουργία διαδρομών κάλυψης τις οποίες μπορεί να διασχίσει ένα μεμονωμένο ρομπότ για να πραγματοποιήσει χαρτογράφηση ακτινοβολίας σε μια καθορισμένη περιοχή. Η μέθοδος βασίζεται σε έναν γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός πλήθους πιθανών διαδρομών κάλυψης και, στη συνέχεια, επιλέγεται η βέλτιστη διαδρομή με βάση κριτήρια όπως η αποτελεσματικότητα της κάλυψης και το μήκος της διαδρομής. Η ευελιξία αυτού του αλγορίθμου έγκειται στην προσαρμοστικότητά του - μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να ανταποκρίνεται σε διαφορετικά σενάρια χαρτογράφησης ακτινοβολίας. Επιπλέον, η υπολογιστική αποδοτικότητα του αλγορίθμου τον καθιστά κατάλληλο για εκτεταμένη εφαρμογή. Ωστόσο, χρησιμοποιεί την τεχνική ομαδοποίησης K-means [117] για τον διαχωρισμό του συνολικού χώρου σε μικρότερους υποχώρους, γεγονός που σημαίνει ότι ο αλγόριθμος απαιτεί μια εντελώς αυθαίρετη επιλογή του αριθμού των ρομπότ.

Ο αλγόριθμος DARP [94] αποτελεί την πιο ενδιαφέρουσα προσέγγιση στον τομέα του ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ. Προσφέρει μια συστηματική λύση διαιρώντας το συνολικό περιβάλλον σε διακριτές υποπεριοχές, καθεμία από τις οποίες ανατίθεται σε ένα συγκεκριμένο ρομπότ. Ο πρωταρχικός στόχος του DARP είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου κάλυψης, που επιτυγχάνεται με την έξυπνη διαίρεση του περιβάλλοντος με βάση τα χαρακτηριστικά του και τις δυνατότητες του ρομποτικού στόλου. Παρόλα αυτά, όπως και στις προηγούμενες δύο προσεγγίσεις, ο αλγόριθμος αδυνατεί να υπολογίσει το βέλτιστο αριθμό υποπεριοχών και η αποδοτικότητά του βασίζεται σημαντικά στις αρχικές τους τοποθεσίες, γεγονός που οδηγεί σε περιορισμούς σε πιο σύνθετα περιβάλλοντα.

Μια ενδιαφέρουσα εργασία που εντοπίζεται στη βιβλιογραφία προτάθηκε από τους Idir κ.α. [118], οι οποίοι πρότειναν έναν αλγόριθμο ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ βασισμένο στον αλγόριθμο DARP. Οι συγγραφείς προσπάθησαν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της κατανομής βαρών για την κάλυψη πολλαπλών ρομπότ χρησιμοποιώντας μια σταθμισμένη προσέγγιση. Στα ρομπότ αποδίδονται σταθμισμένα βάρη και ο αλγόριθμος DARP χρησιμοποιείται για την κατανομή αυτών των βαρών μεταξύ των ρομπότ και τον σχεδιασμό των διαδρομών κάλυψής τους. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ο αλγόριθμος διαμοιράζει το αρχικό περιβάλλον στα ρομπότ βάσει των δυνατοτήτων τους. Παρά τη βελτίωση του αρχικού αλγορίθμου DARP, εξακολουθεί να έχει τον σημαντικό περιορισμό της αδυναμίας εύρεσης λύσης όταν οι αρχικές θέσεις των ρομπότ είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους.

Ένας ακόμη αλγόριθμος που βασίζεται στο DARP προτάθηκε στην [108]. Οι συγγραφείς παρουσίασαν έναν τροποποιημένο αλγόριθμο DARP με τη χρήση του αλγορίθμου A^* [119]. Αυτή η τροποποιημένη έκδοση του αλγορίθμου DARP αναθέτει εργασίες στο κατάλληλο ρομπότ, και με βάση μια Up-First προσέγγιση κατασκευάζονται τα ΕΔΚ προκειμένου να εξασφαλίζεται πλήρης κάλυψη της αρχικής περιοχής. Οι συγγραφείς, ισχυρίζονται ότι σε σύγκριση με τον αρχικό αλγόριθμο DARP, οι τροποποιήσεις τους αποδίδουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα και υψηλότερο ποσοστό κάλυψης, ωστόσο οι περιορισμοί του αρχικού αλγορίθμου DARP παραμένουν.

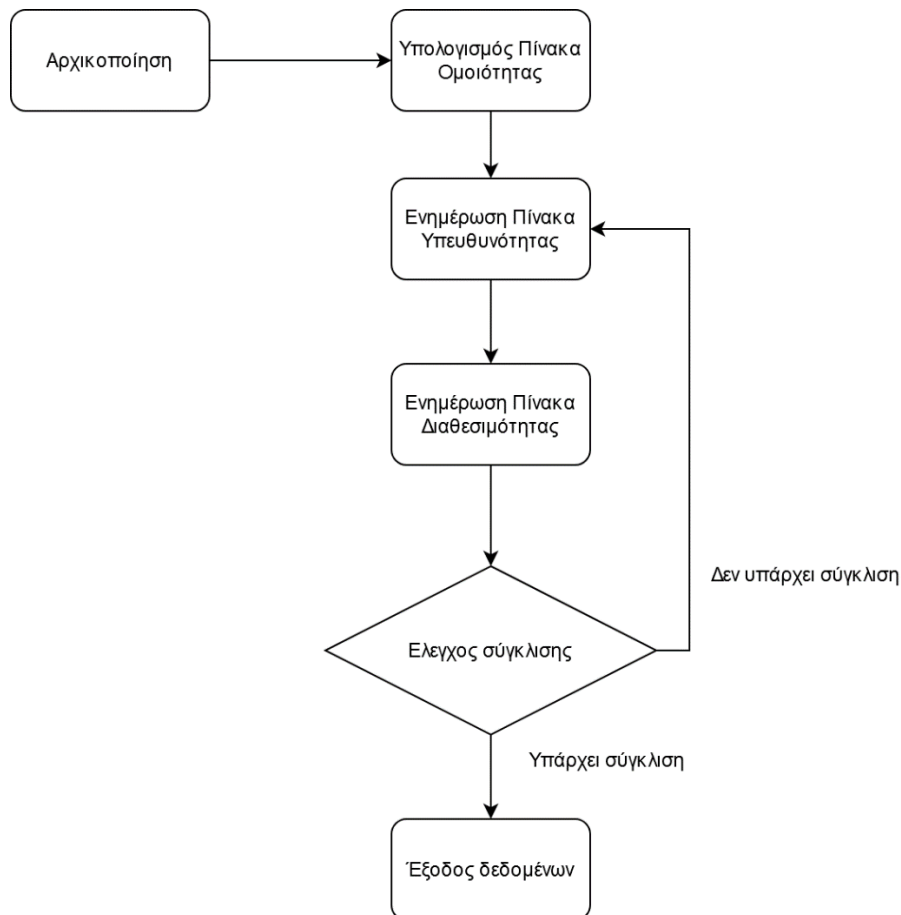
Δεδομένης της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, είναι προφανές ότι ο σχεδιασμός διαδρομής κάλυψης πολλαπλών ρομπότ έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή από

τους ερευνητές. Ωστόσο, η άμεση αξιολόγηση και σύγκριση αυτών των ερευνητικών εργασιών αποτελεί πρόκληση, καθώς κάθε εργασία αντιμετωπίζει ένα ελαφρώς διαφορετικό πρόβλημα. Ένα κοινό σημείο που μοιράζονται οι περισσότεροι offline αλγόριθμοι ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, συμπεριλαμβανομένων των προαναφερθέντων, είναι η εξάρτησή τους από τον αυθαίρετο καθορισμό του αριθμού των ρομπότ και η ευαισθησία τους στις αρχικές θέσεις των ρομπότ. Κρίνεται αναγκαία λοιπόν η περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ που δεν θα έχουν αυτούς τους περιορισμούς, θα είναι πιο αποτελεσματικοί και θα μπορούν να προσαρμοστούν και να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες όσο πιο κοντά σε αυτές του πραγματικού κόσμου. Ο αλγόριθμος που προτείνεται στη παρούσα διατριβή, αποδεικνύει τη δυνατότητα αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων και, ως εκ τούτου, αποτελεί σημαντική εξέλιξη στον τομέα αυτό.

3.4 Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

3.4.1 Αρχικοποίηση δεδομένων

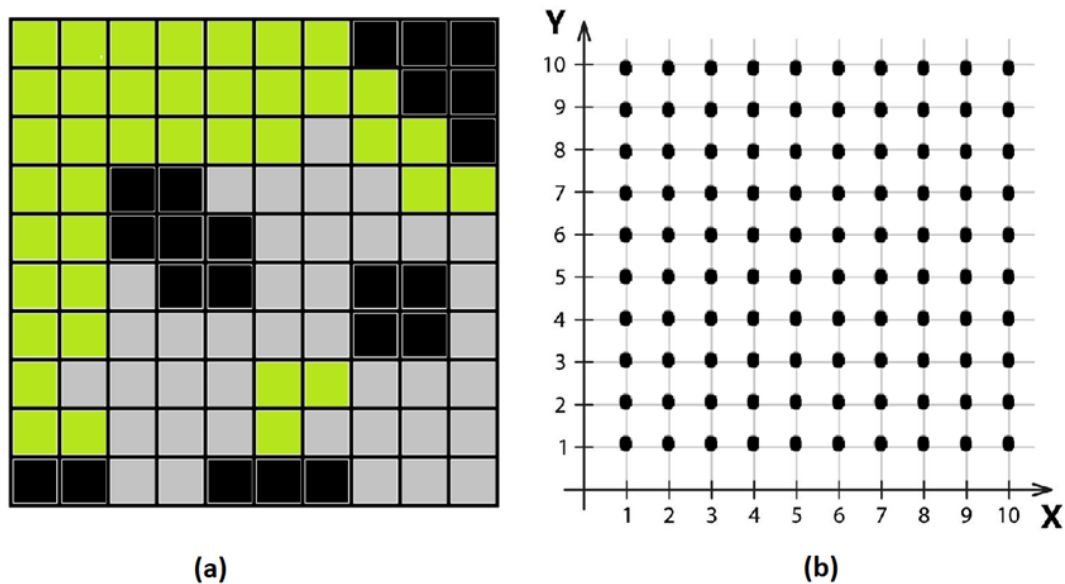
Η προσέγγιση που παρουσιάζεται στη παρούσα διατριβή για το διαχωρισμό του αρχικού περιβάλλοντος, χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο βασισμένο στον αλγόριθμο Affinity Propagation [114] (Εικόνα 14). Ο AP είναι ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης (clustering) που συνήθως χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση δεδομένων. Στη δική μας προσέγγιση, ο αλγόριθμος ομαδοποιεί τα σημεία που απαρτίζουν το αρχικό περιβάλλον σε υποπεριοχές, μια για κάθε ρομπότ.



Εικόνα 14 - Γραφική αναπαράσταση του αλγορίθμου AP.

Το στάδιο αρχικοποίησης προετοιμάζει τα δεδομένα και μετατρέπει το περιβάλλον σε ένα σύνολο σημείων δεδομένων. Έπειτα, υπολογίζεται ο πίνακας ομοιότητας S . Στη συνέχεια, ενημερώνεται ο πίνακας υπευθυνότητας R . Ο πίνακας υπευθυνότητας αντικατοπτρίζει το πόσο κατάλληλο είναι ένα σημείο δεδομένων για να χρησιμεύσει ως αρχηγός για τα υπόλοιπα σημεία δεδομένων. Στη συνέχεια, ενημερώνεται ο πίνακας διαθεσιμότητας A . Αυτός ο πίνακας αντικατοπτρίζει πόσο κατάλληλο είναι ένα σημείο για κάθε άλλο σημείο δεδομένων να χρησιμοποιηθεί ως ο αρχηγός του. Τέλος, ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει αυτή τη διαδικασία έως ότου επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που έχει οριστεί ή μέχρι να μην υπάρχουν αλλαγές από την τελευταία επανάληψη.

Ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου AP βασίζεται στην ανταλλαγή μηνυμάτων (αριθμητικών τιμών) μεταξύ των σημείων δεδομένων. Τα μηνύματα αυτά επιτρέπουν στον αλγόριθμο να καθορίσει το βέλτιστο αριθμό ομάδων, καθώς και τη βέλτιστη κατανομή των σημείων σε αυτές τις ομάδες. Ο AP είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος που επαναλαμβάνει τη διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων έως ότου εντοπισθεί μια ικανοποιητική λύση, ή έως ότου δεν μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω μια ήδη υπάρχουσα λύση. Το κύριο πλεονέκτημα του AP είναι ότι επιτρέπει την παράκαμψη του αυθαίρετου προσδιορισμού του μεγέθους των υποπεριοχών, καθώς και του πλήθους των ρομπότ που θα χρησιμοποιηθούν. Για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος AP σε περιβάλλοντα που προσομοιάζουν πραγματικές συνθήκες, είναι απαραίτητο πρώτα να μετασχηματιστεί το αρχικό περιβάλλον σε ένα σύνολο δεδομένων (Εικόνα 15)



Εικόνα 15 – Μετατροπή του περιβάλλοντος σε σύνολο σημείων.

Το αρχικό περιβάλλον (α) αποτελείται από εμπόδια (μαύρα κελιά), κελιά τύπου έδαφος γρασίδι (πράσινα κελιά) και κελιά που έχουν ως έδαφος άσφαλτο (γκρι κελιά). Για να διαμοιράσουμε το περιβάλλον σε πολλαπλές υποπεριοχές, μια για κάθε ρομπότ, πρέπει πρώτα να μετατρέψουμε το περιβάλλον σε ένα σύνολο σημείων δεδομένων. Το (β) απεικονίζει τα σημεία δεδομένων σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων X, Y.

3.4.2 Υπολογισμός της κανονικοποιημένης απόστασης

Κάθε σημείο του αρχικού περιβάλλοντος (κελί) απεικονίζεται ως ένα σημείο δεδομένων σε ένα δισδιάστατο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Για να διακρίνουμε τη σχέση μεταξύ των σημείων δεδομένων, ορίζεται μια συνάρτηση ομοιότητας. Στις περισσότερες εφαρμογές του AP, η ομοιότητα εκφράζεται ως η αρνητική Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ δύο σημείων. Αυτή η αντιστρόφως ανάλογη σχέση, συνεπάγεται μικρότερη ομοιότητα για μεγαλύτερες απόλυτες αποστάσεις μεταξύ των σημείων δεδομένων.

Ωστόσο, η χρήση της Ευκλείδειας απόστασης σε ένα περιβάλλον δισδιάστατου πλέγματος, όπου σκοπός είναι η διατήρηση της συνέχειας κάθε υποπεριοχής, καθώς και της σχέσης γειτνίασης των κελιών της, δεν είναι κατάλληλη. Αυτή η μετρική αποτυγχάνει να λάβει υπόψη της τα εμπόδια που μπορεί να διακόψουν τη διαδρομή μεταξύ δύο σημείων. Η ασυμφωνία αυτή μεταξύ των Ευκλείδειων αποστάσεων και των πραγματικών αποστάσεων που μπορούν να διανυθούν από τα ρομπότ, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά προβλήματα και αναποτελεσματικές λύσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη τους εγγενείς περιορισμούς της τυπικής προσέγγισης υπολογισμού απόστασης, η συνάρτηση ομοιότητας που προτείνεται περιλαμβάνει ένα προσαρμοσμένο και διαφοροποιημένο μοντέλο (Αλγόριθμος 1).

Αλγόριθμος 1. Υπολογισμός της απόστασης μεταξύ δύο σημείων

1. Είσοδος: Δυαδικός πίνακας A με διαστάσεις X, Y . Το αρχικό σημείο (x_1, y_1) , και το σημείο στόχου (x_2, y_2)
 2. Έξοδος: Η ελάχιστη απόσταση D μεταξύ του αρχικού και του τελικού σημείου
 3. Συνάρτηση $4_neighbor_distance(A, x_1, y_1, x_2, y_2)$:
 4. Βήμα 1: Αρχικοποίηση του πίνακα D με διαστάσεις X, Y . Ορισμός όλων των πεδίων σε μια πολύ μεγάλη τιμή
 5. Βήμα 2: Αρχικοποίηση σειράς Q
 6. Βήμα 3: Υπολογισμός $D[x_1, y_1] = 0$ και πρόσθεσε (x_1, y_1) στο Q
 7. Βήμα 4: Όσο το Q δεν είναι άδειο:
 8. Βήμα 4.1: Αφαίρεσε το σημείο (x, y) από το Q
 9. Βήμα 4.2: Για κάθε γείτονα του (x_n, y_n) στο περιβάλλον A , επανάλαβε:
 10. Βήμα 4.2.1: Αν το (x_n, y_n) είναι ένα εμπόδιο ($A[x_n, y_n] = 0$), τότε παρέλειψε το συγκεκριμένο γείτονα
 11. Βήμα 4.2.2: Αν $D[x_n, y_n] > D[x, y] + 1$:
 12. Βήμα 4.2.2.1: Ανανέωσε την απόσταση με $D[x_n, y_n] = D[x, y] + 1$
 13. Βήμα 4.2.2.2: Πρόσθεσε το (x_n, y_n) στο Q
 14. Βήμα 5: Επέστρεψε το $D[x_2, y_2]$ ως την ελάχιστη απόσταση D μεταξύ του αρχικού και τελικού σημείου
 15. Τέλος συνάρτησης
-

Η ενσωμάτωση αυτού του αλγορίθμου, δεν υπολογίζει απλώς την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο σημείων, αλλά και τον τύπο του δαπέδου και το υψόμετρο του, λαμβάνοντας έτσι υπόψη κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με τα μοναδικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος. Διασφαλίζεται έτσι μια πιο ακριβή και πρακτική αναπαράσταση της προσπελασιμότητας των ρομπότ εντός του περιβάλλοντος. Στην Εικόνα 16, απεικονίζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού απόστασης από ένα αρχικό σημείο του χώρου στα υπόλοιπα.

3	4	5	6
2	3	4	5
1		5	6
0		6	7

Εικόνα 16 – Υπολογισμός κανονικοποιημένης απόστασης.

Το κίτρινο κελί είναι το αρχικό σημείο από το οποίο αναζητούμε να υπολογίσουμε την κανονικοποιημένη απόσταση. Κάθε κελί, περιλαμβάνει μια τιμή που εκφράζει την κανονικοποιημένη απόσταση από το αρχικό κελί, χρησιμοποιώντας τον Αλγόριθμο 1.

3.4.3 Υπολογισμός του πίνακα ομοιότητας

Στον πίνακα ομοιότητας, κάθε στοιχείο κατέχει μια μοναδιαία μετρική που ποσοτικοποιεί την ομοιότητά του με τα άλλα στοιχεία στη γειτονική περιοχή (Αλγόριθμος 2). Ο βαθμός ομοιότητας μεταξύ δύο οποιωνδήποτε στοιχείων, αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της τιμής ομοιότητας. Αξίζει να τονιστεί ότι, λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών του αλγορίθμου AP, η συνάρτηση ομοιότητας $S(p_1, p_2)$ μπορεί να μην ταυτίζεται απαραίτητα με την $S(p_2, p_1)$. Παρόλο που αυτή η δυνατότητα κατεύθυνσης δεν ενσωματώνεται στην τρέχουσα εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας (Εικόνα 17), πιθανές μελλοντικές προσαρμογές του αλγορίθμου μπορούν να εξετάσουν την ενσωμάτωσή της για τη διευκόλυνση της

κατευθυνόμενης ομαδοποίησης σημείων. Με μια τέτοια επέκταση, θα μπορούσε για παράδειγμα να αποτυπωθεί αλγοριθμικά ένας «μονόδρομος» εντός του χώρου, ή μια περιοχή που επιβάλλει μια συγκεκριμένη κατεύθυνση πορείας.

Αλγόριθμος 2. Διαδικασία υπολογισμού του πίνακα ομοιότητας S

1. Είσοδος:
 2. Χαρακτηριστικά περιβάλλοντος: δυαδικός πίνακας A , πίνακας εδαφών T , πίνακας υψομέτρων E , τύπος εδάφους F
 3. Πολλαπλασιαστές σημαντικότητας: D_w, T_w, F_w
 4. Έξοδος: πίνακας υπευθυνότητας S
 - 5.
 6. Συνάρτηση $\text{similarity_calculation}(A, T, E, F, D_w, T_w, F_w)$:
 7. Βήμα 1: Αρχικοποίηση ενός πίνακα S με διαστάσεις X, Y
 8. Βήμα 2: Για κάθε ζεύγος σημείων (x_1, y_1) και (x_2, y_2) στο περιβάλλον A :
 9. Βήμα 2.1: Υπολογισμός της κανονικοποιημένης απόστασης μεταξύ των δυο σημείων:
 10. $d = 4_neighbor_distance(x_1, y_1, x_2, y_2)$
 11. Βήμα 2.2: Υπολογισμός διαφοράς υψομέτρου
 12. Βήμα 2.3: Υπολογισμός διαφοράς εδάφους
 13. Βήμα 2.2: Πολλαπλασιασμός κάθε χαρακτηριστικού με τον πολλαπλασιαστή σημαντικότητας του:
 14. Βήμα 2.3: Αποθήκευση της ομοιότητας στον πίνακα S :
 15. Βήμα 3: Επιστροφή του πίνακα ομοιότητας S
 16. Τέλος συνάρτησης
-

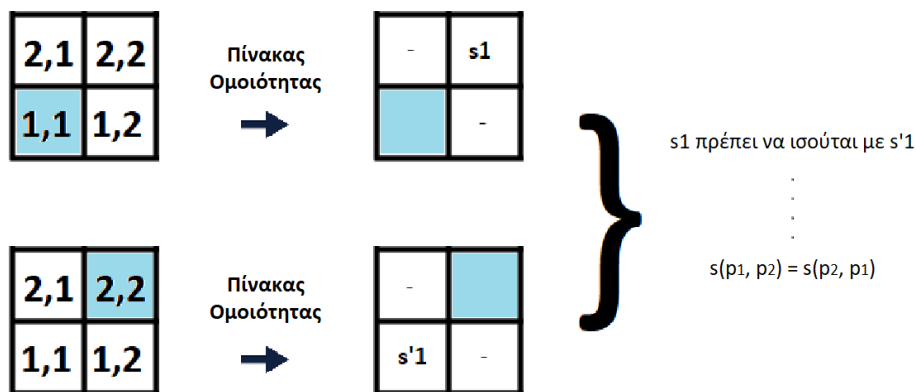
Ο υπολογισμός της ομοιότητας μεταξύ δυο κελιών, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μια εξίσωση που συνυπολογίζει (α) την κανονικοποιημένη απόσταση μεταξύ δυο σημείων, (β) την υψομετρική τους διαφορά και (γ) τη διαφορά στον τύπο εδάφους. Για κάθε μια από τις 3 παραμέτρους, μπορεί να οριστεί η αντίστοιχη τιμή σημαντικότητας (βάρος) που θα επηρεάσει την συνολική ομοιότητα S μεταξύ δύο σημείων p_1, p_2 .

$$S(p_1, p_2) = -(D_w \cdot d(p_1, p_2) + E_w \cdot |E[x_1, y_1] - E[x_2, y_2]| + F_w \cdot |F[x_1, y_1] - F[x_2, y_2]|) \quad (1)$$

όπου:

- $S(p_1, p_2)$ είναι η ομοιότητα μεταξύ δυο σημείων p_1 και p_2
- D_w είναι το βάρος της απόστασης μεταξύ δυο σημείων p_1 και p_2
- $d(p_1, p_2)$ είναι η κανονικοποιημένη απόσταση μεταξύ δυο σημείων p_1 και p_2 χρησιμοποιώντας τον Αλγόριθμο 1

- E_w είναι το βάρος της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ δυο σημείων p_1 και p_2
- $E[x_1, y_1]$ και $E[x_2, y_2]$ είναι τα υψόμετρα των σημείων p_1 και p_2
- F_w είναι το βάρος της διαφοράς του δαπέδου μεταξύ δυο σημείων p_1 και p_2
- $F[x_1, y_1]$ και $F[x_2, y_2]$ είναι οι τιμές που εκφράζουν τον τύπο δαπέδου των σημείων p_1 και p_2



Εικόνα 17 – Ομοιότητα μεταξύ δυο σημείων

Δύο σημεία θα έχουν πάντα την ίδια τιμή στον πίνακα ομοιότητας μεταξύ τους. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι η μετάβαση από το σημείο p_1 στο σημείο p_2 έχει το ίδιο κόστος με τη μετάβαση από το σημείο p_2 στο p_1 .

3.4.4 Ανταλλαγή μηνυμάτων διατηρώντας τη γειτνίαση

Ο αλγόριθμος AP στον οποίο βασίζεται η προτεινόμενη προσέγγιση, έχει αρχικά σχεδιαστεί για την ομαδοποίηση σημείων βάσει της μεταξύ τους Ευκλείδειας απόστασης. Σε αυτή τη περίπτωση, τα σημεία θεωρούνται *ανεξάρτητα* μεταξύ τους, και μπορούν να ομαδοποιηθούν χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μεταξύ τους συνδέσεις. Στο πρόβλημα του ΣΔΚ σε ένα περιβάλλον που αναπαρίσταται σε μορφή πλέγματος, ωστόσο, είναι απαραίτητο να διατηρηθεί η γειτνίαση τεσσάρων γειτόνων μεταξύ των κελιών. Επιπλέον, τα κελιά μεταξύ των κελιών της κάθε υποπεριοχής, πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μια διαδρομή (ένα σύνολο κελιών συνδεδεμένα με γειτνίαση τεσσάρων επιπέδων) που να τα συνδέει. Για να επιτευχθεί αυτό, προτείνεται μια προσαρμοσμένη διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων (Αλγόριθμος 3) η οποία «επιβραβεύει» κελιά που είναι άμεσα συνδεδεμένα με γειτνίαση τεσσάρων επιπέδων με μια υποπεριοχή, ενώ «τιμωρεί» κελιά που δεν είναι άμεσα συνδεδεμένα.

Αλγόριθμος 3. Προσαρμοσμένη ανταλλαγή μηνυμάτων

1. Είσοδος: S
2. Αρχικοποίηση των πινάκων R και A
3. $R = 0$
4. $A = 0$
5. Συνάρτηση $APSpatialConstraint(S, \max_iterations, damping_factor)$:
6. Για $iteration = 1$ μέχρι $iteration = \max_iterations$
7. ανανέωση του πίνακα υπευθυνότητας R
8. για κάθε κελί i :
9. για κάθε j :
10. αν i και j έχουν γειτνίαση τεσσάρων επιπέδων (i, j) :
11. $R[i, j] = S[i, j] - \max(S[i, k] + A[i, k] \text{ για όλα τα } k \neq j)$
12. αλλιώς:
13. $R[i, j] = 0$
14. ανανέωση του πίνακα διαθεσιμότητας A
15. για κάθε κελί i :
16. για κάθε κελί j :
17. αν i και j έχουν γειτνίαση τεσσάρων επιπέδων (i, j) :
18. $A[i, j] = \min(0, R[j, j] + \sum(\max(0, R[k, j]) \text{ για όλα } k \neq i, j))$
19. αλλιώς:
20. $A[i, j] = 0$
21. εφαρμογή περιορισμού σύγκλισης
22. $R = damping_factor * R + (1 - damping_factor) * \text{προηγούμενο_R}$
23. Τέλος συνάρτησης

Η συνάρτηση που υπολογίζει αν δυο κελιά είναι γειτονικά μεταξύ τους παρουσιάζεται στον Αλγόριθμο 4.

Αλγόριθμος 4. Υπολογισμός γειτονικών κελιών

1. Είσοδος: κελί1, κελί2
2. γείτονες = $[(0, 1), (1, 0), (0, -1), (-1, 0)]$
3. Για κάθε γειτονικό κελί:
4. αν $\text{κελί1.x} + \text{γείτονες.x} == \text{κελί2.x}$ και $\text{κελί1.y} + \text{γείτονες.y} == \text{κελί2.y}$:
5. είναι γείτονες
6. αλλιώς:
7. δεν είναι γείτονες
8. Τέλος συνάρτησης

3.4.5 Δημιουργία υποπεριοχών

Αφού υπολογιστεί η ομοιότητα μεταξύ όλων των σημείων, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των υποπεριοχών. Ο αλγόριθμος AP λειτουργεί με τη διαβίβαση μηνυμάτων μεταξύ των σημείων δεδομένων, τα οποία υποδεικνύουν την προτίμησή τους για μια συγκεκριμένη ομάδα. Τα μηνύματα αυτά ενημερώνονται επαναληπτικά μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση σχετικά με τον αριθμό των υποπεριοχών, καθώς και

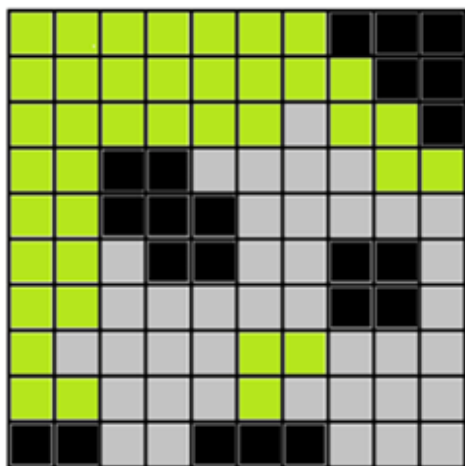
ποια σημεία ανήκουν σε ποια ομάδα. Μετά την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας διαβίβασης μηνυμάτων, ο αλγόριθμος προχωρά προς τη δημιουργία υποπεριοχών (Αλγόριθμος 5). Αυτό το κρίσιμο στάδιο καθορίζει το καταλληλότερο σημείο αναφοράς για κάθε συστάδα - ένα σημείο δεδομένων δηλαδή που συγκεντρώνει τη μέγιστη τιμή προτίμησης από όλα τα σημεία. Κατά συνέπεια, κάθε σημείο δεδομένων (κελί) ανατίθεται στο υπόδειγμα της αντίστοιχης συστάδας.

Αλγόριθμος 5. Δημιουργία των υποπεριοχών

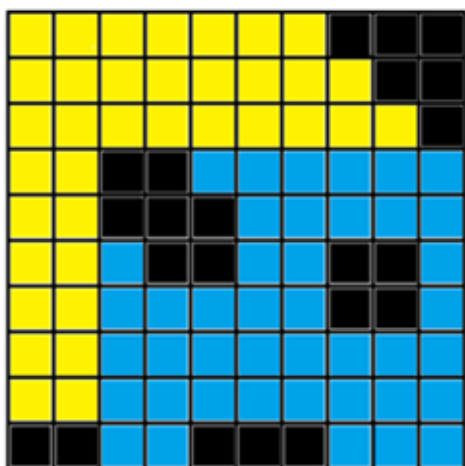
-
1. Είσοδος: Περιβάλλον A με διαστάσεις X, Y
 2. Έξοδος: Υποπεριοχές για κάθε ρομπότ
 3. Βήμα 1: Μετατροπή του περιβάλλοντος A από την αρχική μορφή πλέγματος
 4. (grid) σε ένα σύνολο σημείων.
 5. Αναπαράσταση του κάθε σημείου του περιβάλλοντος ως ένα σημείο
 6. σε ένα δισδιάστατο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.
 7. Βήμα 2: Υπολογισμός της ομοιότητας μεταξύ όλων των σημείων
 8. Υπολογισμός του πίνακα ομοιότητας των σημείων χρησιμοποιώντας
 9. τον Αλγόριθμο 2.
 10. Αποθήκευση της ομοιότητας των σημείων στον πίνακα S
 11. Βήμα 3: Αρχικοποίηση των μηνυμάτων μεταξύ των σημείων
 12. Αρχικοποίηση δυο πινάκων για την αποθήκευση των στοιχείων
 13. υπευθυνότητας R και διαθεσιμότητας A μεταξύ των σημείων
 14. Υπολογισμός της ομοιότητας μεταξύ ενός σημείου και του εαυτού
 15. του
 16. Βήμα 4: Επανάληψη μέχρι να υπάρξει σύγκλιση
 17. Ενημέρωση του πίνακα υπευθυνότητας R
 18. Ενημέρωση του πίνακα διαθεσιμότητας A
 19. Βήμα 5: Εντοπισμός των σημείων-αρχηγών
 20. Ορισμός των σημείων με τη μεγαλύτερη τιμή υπευθυνότητας και
 21. διαθεσιμότητας ως σημεία-αρχηγοί
 22. Βήμα 6: Ανάθεση των σημείων στα ρομπότ
 23. Ανάθεση κάθε σημείου (πλην των σημείων-αρχηγών) στο
 24. κοντινότερο σημείο-αρχηγό, με τη προϋπόθεση να τηρείται η
 25. γειτνίαση 4 επιπέδων
 26. Ομαδοποίηση των σημείων που έχουν ανατεθεί σε ένα
 27. σημείο-αρχηγό ως μια υποπεριοχή
 28. Βήμα 7: Επιστροφή των υποπεριοχών
-

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του προτεινόμενου αλγορίθμου έγκειται στην ικανότητά του να προσδιορίζει αυτόνομα τον βέλτιστο αριθμό ομάδων (υποπεριοχών), χωρίς να είναι απαραίτητη η εισαγωγή του από τον χρήστη. Αυτή η ικανότητα αυτορρύθμισης του σχηματισμού ομάδων εξασφαλίζει ευελιξία και προσαρμοστικότητα, η οποία είναι ιδιαίτερα επωφελής σε πολύπλοκες εφαρμογές σε συνθήκες πραγματικού κόσμου.

Η τελική έξοδος του αλγορίθμου είναι ένας κατάλογος τιμών των συστάδων για κάθε σημείο δεδομένων στο αρχικό περιβάλλον, υποδεικνύοντας την αντίστοιχη ανάθεση ρομπότ για κάθε κελί (Εικόνα 18). Αυτό το ομαδοποιημένο σύνολο σημείων δεδομένων χρησιμεύει ως βάση για τα επόμενα στάδια του προτεινόμενου μοντέλου, που οδηγεί στον τελικό σχεδιασμό διαδρομής για τα ρομπότ.



(α)



(β)

Εικόνα 18 – Υπολογισμός υποπεριοχών.

Το αρχικό περιβάλλον, όπως απεικονίζεται στο (α), περιέχει δύο τύπους εδάφους (πράσινο και γκρι). Η έξοδος του αλγορίθμου στο (β) δείχνει τις δύο υποπεριοχές, όπως δημιουργήθηκαν από τον αλγόριθμο. Αξίζει να αναφερθεί ότι διαφορετικές τιμές της τιμής T_w μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικές υποπεριοχές.

3.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζουμε τα ευρήματα που προέκυψαν από την εις βάθος ανάλυση του προτεινόμενου αλγορίθμου. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα και την προσαρμοστικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου στο διαμοιρασμό της αρχικής περιοχής σε επιμέρους υποπεριοχές. Οι μετρικές αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν επικεντρώθηκαν κυρίως στα κριτήρια του υπολογιστικού χρόνου και της ποιότητας των παραγόμενων υποπεριοχών.

Όσον αφορά τη σύγκριση με τους υπάρχοντες αλγορίθμους, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος αντιμετωπίζει ένα ιδιαίτερο πρόβλημα στον τομέα του ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3, υπάρχουν αρκετοί αλγόριθμοι στη βιβλιογραφία που δίνουν λύση σε αυτό το πρόβλημα. Ωστόσο, το ακριβές πρόβλημα που επιλύει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, χωρίς αυθαίρετο προκαθορισμό του αριθμού των ρομπότ και των αρχικών τους θέσεων, απουσιάζει από την τρέχουσα βιβλιογραφία. Παρ' όλα αυτά, σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται μια αναλυτική σύγκριση, αντιπαραθέτοντας τις επιδόσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου με τους παραδοσιακούς αλγορίθμους διαμοιρασμού περιοχής στον τομέα του ΣΔΚ, οι οποίοι βασίζονται σε προκαθορισμένο αριθμό και θέσεις ρομπότ. Η συγκριτική μελέτη εστιάζει κυρίως στις βελτιώσεις στην αποδοτικότητα, την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα που εισάγει ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Παρά τις εγγενείς διαφορές στα πλαίσια του προβλήματος, η συγκριτική ανάλυση παρέχει μια σαφή επίδειξη των πλεονεκτημάτων που έχει η προσέγγιση διαμοιρασμού του χώρου χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο, ιδίως σε περιπτώσεις όπου οι αρχικές θέσεις των ρομπότ βρίσκονται σε κοντινή απόσταση.

Οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν σε δύο συνθετικά περιβάλλοντα διαφορετικών μεγεθών, το καθένα με ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Στη προσπάθεια δημιουργίας συνθετικών περιβαλλόντων που προσομοιώνουν στο μέγιστο δυνατό τις πραγματικές συνθήκες, και τα δύο περιβάλλοντα δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας μια ψευδό-τυχαία διαδικασία, προσφέροντας έναν μοναδικό συνδυασμό προσβάσιμων περιοχών και εμποδίων μαζί με ποικίλους τύπους εδάφους.

Το μικρότερο περιβάλλον 24×24 (όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 19) λειτούργησε ως το βασικό πεδίο δοκιμών για τον προτεινόμενο αλγόριθμο,

παρουσιάζοντας ένα πλέγμα με ποικίλες μοναδικές παραμέτρους και διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η συνολική περιοχή αποτελούνταν από 576 κελιά, με περίπου το 80% του σημείων να είναι προσβάσιμο και περίπου το 20% να είναι εμπόδια. Αυτά τα εμπόδια ήταν ομοιόμορφα διασκορπισμένα σε όλο το περιβάλλον για να προσομοιώσουν τα πιθανά εμπόδια που μπορεί να συναντήσουν τα ρομπότ σε πραγματικές καταστάσεις. Πέρα από την απλή προσβασιμότητα, τα κελιά του περιβάλλοντος χαρακτηρίζονταν από δύο διαφορετικούς τύπους εδάφους - γρασίδι και άσφαλο. Τα κελιά με γρασίδι αντιπροσωπεύουν περίπου το 60% της προσβάσιμης έκτασης, ενώ τα κελιά με άσφαλο αποτελούν το υπόλοιπο 40%. Αυτός ο διαχωρισμός των τύπων εδάφους έχει ως στόχο να μιμηθεί τα περιβάλλοντα του πραγματικού κόσμου, όπου τα ρομπότ μπορεί να συναντήσουν διαφορετικά εδάφη που απαιτούν διαφορετικές στρατηγικές σχεδιασμού διαδρομής και δυνατότητες πλοήγησης. Για να ενισχυθεί ο ρεαλισμός της προσομοίωσης, τα κελιά είχαν διαφορετικά επίπεδα υψομέτρου. Τα υψόμετρα κυμαίνονταν από 0 έως 10 μονάδες, με τυπική απόκλιση τριών μονάδων, ώστε να εξασφαλίζεται μια διακύμανση του υψομέτρου σε όλο το πλέγμα. Εφαρμόστηκε συντελεστής στάθμισης του υψομέτρου για να υποδηλωθεί η σημασία του υψομέτρου, όπως επίσης και για τον τύπο του εδάφους.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα δεύτερο, μεγαλύτερο και πιο σύνθετο περιβάλλον για μια πιο εμπειρισταωμένη προσομοίωση. Οι διαστάσεις αυτού του περιβάλλοντος ήταν 100×100 , ενώ υπόλοιπες παράμετροι ήταν οι ίδιες με αυτές του προηγούμενου μικρότερου περιβάλλοντος. Η δημιουργία αυτού του δεύτερου και μεγαλύτερου περιβάλλοντος αποσκοπεί στη προσομοίωση πιο περίπλοκων συνθηκών, αποδεικνύοντας έτσι την επεκτασιμότητα και την προσαρμοστικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου σε πιο σύνθετες και δύσκολες καταστάσεις.

Τα πειράματα διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας έναν σταθμό εργασίας υψηλής απόδοσης, εξοπλισμένο με επεξεργαστή Intel Core i7-9700K 8 πυρήνων χρονισμένο στα 3,60 GHz και με 32 GB μνήμη RAM DDR4 επιτρέποντας την αποτελεσματική τη διαχείριση δεδομένων. Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για κάθε πειραματική διάταξη. Για κάθε αλγόριθμο, πραγματοποιήθηκαν 20 πειράματα χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Ο Πίνακας 1 δείχνει τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Το πλήθος των υποπεριοχών που δημιουργήσε ο αλγόριθμος AP δεν ήταν σε κάθε

εκτέλεση το ίδιο. Επομένως, στις στήλες «Πλήθος Υποπεριοχών» και «Ποιότητα Ομαδοποίησης» αναγράφονται οι μέσες τιμές.

Πίνακας 1. Πειραματικά αποτελέσματα σε δύο περιβάλλοντα.

Μέγεθος Περιβάλλοντος	Αλγόριθμος	Πλήθος Υποπεριοχών	Ποιότητα Ομαδοποίησης
24 × 24	[94] n = 2	2	0.66
24 × 24	[118] n = 2	2	0.84
24 × 24	[108] n = 2	2	0.89
24 × 24	Προτεινόμενος	2.19	0.91
100 × 100	[94] n = 2	2	0.39 (συχνά δε βρήκε λύση)
100 × 100	[118] n = 2	2	0.85
100 × 100	[108] n = 2	2	0.92
100 × 100	Προτεινόμενος	6.52	0.94

Αξίζει να αναφερθεί ότι είναι δύσκολο να αξιολογηθεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκρίνοντας τον άμεσα με άλλους που έχουν βρεθεί στη βιβλιογραφία, δεδομένου ότι αυτοί οι αλγόριθμοι δεν μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να αναγνωρίζουν τους διαφορετικούς τύπους εδάφους και το υψόμετρο. Ως εκ τούτου, θα μπορούσαμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα αυτών των αλγορίθμων μόνο λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα της ομαδοποίησης. Αν και η ποιότητα της ομαδοποίησης δεν συνεπάγεται απαραίτητα μικρότερο χρόνο προσπέλασης από τα ρομπότ, είναι ένας χρήσιμος δείκτης που εκφράζει πόσο όμοια είναι τα κελιά μεταξύ τους εντός μιας υποπεριοχής. Η ποιότητα της ομαδοποίησης υπολογίστηκε με τη χρήση του συντελεστή Silhouette Coefficient (SC) [120]–[124].

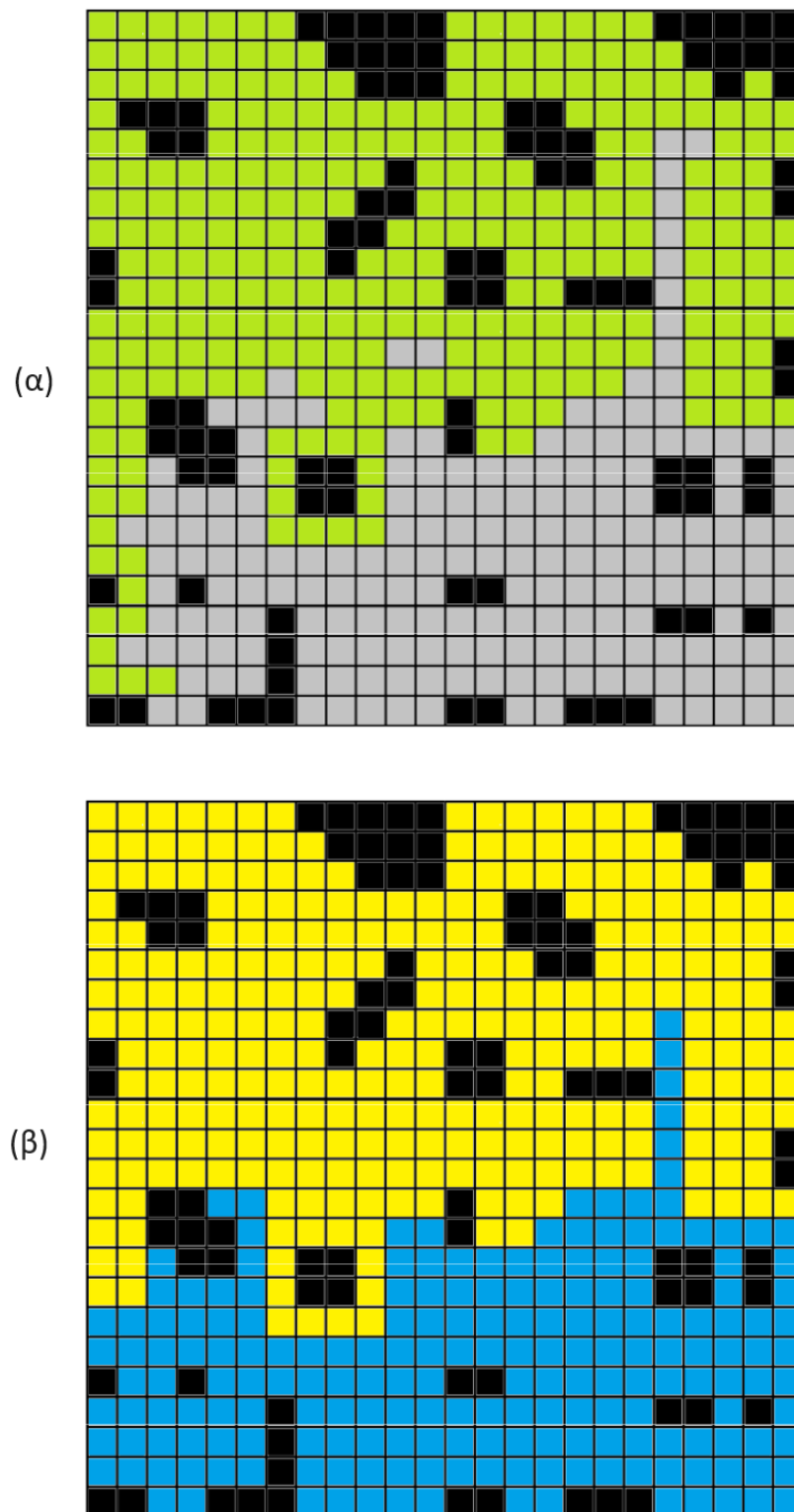
Ο δείκτης SC, επίσης γνωστός ως Silhouette Score, είναι μια καθιερωμένη και δημοφιλής μετρική για την αξιολόγηση της ποιότητας ενός αλγορίθμου ομαδοποίησης και διαμοιρασμού περιοχής. Η ουσία αυτής της μεθόδου έγκειται στη διττή προσέγγιση μέτρησης, ποσοτικοποιώντας ταυτόχρονα τόσο τη συνοχή όσο και τον διαχωρισμό για κάθε μεμονωμένο κελί. Λειτουργεί συγκρίνοντας τη μέση απόσταση ενός κελιού από όλα τα άλλα σημεία εντός της δικής του συστάδας (συνοχή) με τη μέση απόσταση από τα σημεία της πλησιέστερης συστάδας (διαχωρισμός). Ο συντελεστής παρέχει έτσι ένα συνολικό μέτρο του πόσο παρόμοιο είναι ένα δεδομένο σημείο δεδομένων με τη δική του ομάδα σε σχέση με άλλες ομάδες. Υψηλότερες τιμές του SC υποδηλώνουν ότι το κύτταρο είναι καλά ομαδοποιημένο και χαμηλότερες τιμές υποδηλώνουν ότι το συγκεκριμένο κύτταρο θα μπορούσε να είχε ανατεθεί καλύτερα σε μια γειτονική ομάδα. Θεωρείται ευρέως

ικανοποιητική μετρική λόγω της ικανότητάς της να λειτουργεί με οποιαδήποτε μετρική απόστασης (στο παράδειγμά μας η κανονικοποιημένη απόσταση όπως παρουσιάζεται στον Αλγόριθμος 1) και του αγνωστικισμού της ως προς τον εκάστοτε αλγόριθμο διαμοιρασμού περιοχής που χρησιμοποιείται. Για τη σωστή αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου, υπολογίστηκε ο δείκτης SC όχι μόνο για τις μέσες αποστάσεις αλλά και για την ομοιότητα όσον αφορά το υψόμετρο και τον τύπο του δαπέδου. Το συνολικό SC που υπολογίστηκε σταθμίστηκε με βάση τα αντίστοιχα βάρη του τύπου ορόφου και του υψομέτρου.

Μια πιο διαφοροποιημένη αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου, επιτεύχθηκε με τη διεξαγωγή πολλαπλών εκτελέσεων στο ίδιο περιβάλλον, αλλά με διαφορετικούς συντελεστές σημαντικότητας που αποδίδονται στον τύπο δαπέδου και στο υψόμετρο. Αυτή η διερευνητική προσέγγιση στόχευσε στη διερεύνηση της ικανότητας του αλγορίθμου να προσαρμόζεται και να ανταποκρίνεται στις μεταβολές των προτιμήσεων και της σημασίας των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών. Για το πείραμα αυτό, η κύρια εστίαση ήταν η μέτρηση της ομοιογένειας των παραγόμενων υποπεριοχών. Η ομοιογένεια εδώ ορίστηκε ως το ποσοστό μιας συστάδας που παρουσιάζει ομοιομορφία είτε ως προς τον τύπο του εδάφους είτε ως προς το υψόμετρο.

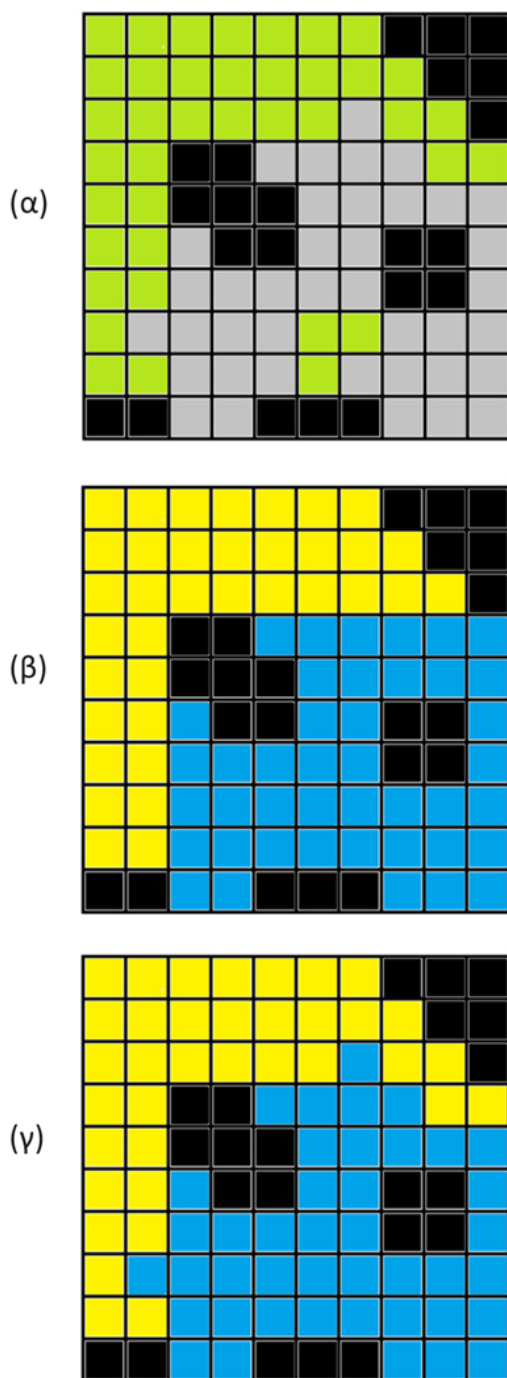
Όταν μεταβλήθηκε ο παράγοντας σημαντικότητας στον τύπο εδάφους, αναμέναμε να παρατηρήσουμε υποπεριοχές που περιέχουν σε μεγάλο βαθμό τον ίδιο τύπο εδάφους. Κατά συνέπεια, η ευαισθησία του αλγορίθμου στον τύπο εδάφους θα αντικατοπτριζόταν από τον βαθμό ομοιογένειας των συστάδων που προέκυπταν. Αντίστοιχα, όταν η έμφαση μετατοπίστηκε στο υψόμετρο, η ομοιογένεια των υποπεριοχών, όσον αφορά το υψόμετρό τους, γίνεται το κεντρικό μέτρο της απόδοσης του αλγορίθμου. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι συντελεστές σημαντικότητας επηρεάζουν τις τελικές υποπεριοχές. Είναι σημαντικό, ωστόσο, να γίνεται λεπτομερής διαμόρφωση των ακριβών τιμών σε κάθε πρόβλημα σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης πολλαπλών ρομπότ, με βάση τις δυνατότητες των διαθέσιμων ρομπότ. Μια οπτική αναπαράσταση ενός περιβάλλοντος 10×10 και η έξοδος του αλγορίθμου με διαφορετικό παράγοντα σπουδαιότητας T_W απεικονίζονται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 19 – Υπολογισμός υποπεριοχών στο μεγαλύτερο περιβάλλον.

Υπολογισμός υποπεριοχών σε ένα περιβάλλον με διαστάσεις 24×24 . Το αρχικό περιβάλλον (α) περιέχει δύο τύπους δαπέδων (πράσινο και γκρι). Η δεύτερη εικόνα (β) δείχνει την έξοδο του αλγορίθμου με παράγοντα σημαντικότητας $T_w=0,3$.



Εικόνα 20 – Υπολογισμός υποπεριοχών με διαφορετικές τιμές βάρους.

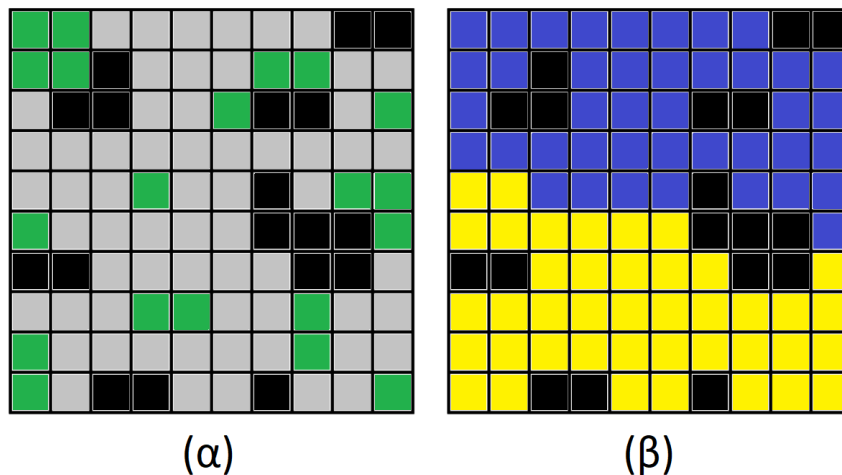
Το αρχικό περιβάλλον, όπως απεικονίζεται στο (α), περιέχει δύο τύπους εδάφους (πράσινο και γκρι). Στη δεύτερη εικόνα, (β) φαίνεται η έξοδος του αλγορίθμου με παράγοντα σημαντικότητας $T_w=0$. Στην τρίτη εικόνα, (γ) φαίνεται η έξοδος του αλγορίθμου για το ίδιο περιβάλλον εισόδου όπου ο παράγοντας σημαντικότητας T_w είναι ίσος με 0,8. Η αύξηση της τιμής σημαντικότητας του τύπου δαπέδου αυξάνει την πιθανότητα ο αλγόριθμος να θεωρήσει ότι δύο κελιά του ίδιου τύπου είναι περισσότερο όμοια.

Πίνακας 2. Πειραματικά αποτελέσματα υπολογισμού υποπεριοχών

Πειραματικά αποτελέσματα από την εκτέλεση του προτεινόμενου αλγορίθμου στο ίδιο περιβάλλον χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας E_w για το υψόμετρο και F_w για τον τύπο του δαπέδου. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 0 έως 1 και περιγράφουν πόσο σημαντική είναι η διατήρηση του υψομέτρου ή του τύπου εδάφους εντός μιας παραγόμενης υποπεριοχής. Η ταυτόχρονη αύξηση ή μείωση και των δύο τιμών μειώνει τη σημασία και των δύο μεταβλητών στο πλαίσιο της διαδικασίας ομαδοποίησης.

Περιβάλλον	Δείκτης Σημαντικότητας (E_w, F_w)	Ομοιογένεια Ύψους	Ομοιογένεια Εδάφους
100 × 100	(0, 0)	0.61	0.49
100 × 100	(0.8, 0)	0.75	0.45
100 × 100	(0.8, 0.8)	0.59	0.53
100 × 100	(0, 0.8)	0.53	0.78

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν πως μεταβάλλοντας τις τιμές σημαντικότητας E_w και F_w , ο αλγόριθμος AP μπορεί να διαμοιράσει τον αρχικό χώρο σε υποπεριοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια ως προς τον τύπο εδάφους ή υψομέτρου. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως σε περιβάλλοντα που τα σημεία διαφορετικού εδάφους ή υψομέτρου βρίσκονται τυχαία τοποθετημένα, κάτι τέτοιο καθίσταται αδύνατο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, προκειμένου να διατηρηθεί η συνεκτικότητα μεταξύ των υποπεριοχών, ο αλγόριθμος AP θα δημιουργήσει υποπεριοχές χαμηλής ομοιογένειας (Εικόνα 21).



Εικόνα 21 – Υποπεριοχές χαμηλής ομοιογένειας.

Στην περίπτωση που στο αρχικό περιβάλλον (α) βρίσκονται τυχαία τοποθετημένα σημεία διαφορετικού εδάφους (πράσινα και γκρι κελιά), προκειμένου να διατηρηθεί η συνεκτικότητα μεταξύ των υποπεριοχών, ο αλγόριθμος δημιουργεί υποπεριοχές χαμηλής ομοιογένειας (μπλε και κίτρινα κελιά) (β).

3.6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.6.1 Περιορισμοί

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάστηκε μια διαφορετική εφαρμογή του AP στον τομέα του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης πολλαπλών ρομπότ, ωστόσο, όπως κάθε εφαρμογή, έτσι και σε αυτή υπάρχουν ορισμένοι εν δυνάμει περιορισμοί. Η σαφής κατανόηση αυτών των ενδεχόμενων περιορισμών είναι απαραίτητη για την περαιτέρω βελτίωση του αλγορίθμου, την ενίσχυση της δυνατότητας εφαρμογής του και τον εντοπισμό των αδύναμων σημείων για μελλοντική έρευνα.

3.6.2 Λειτουργία σε στατικά περιβάλλοντα

Ένας σημαντικός περιορισμός είναι ο στατικός χαρακτήρας του αλγορίθμου AP, ο οποίος είναι πολύ δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να προσαρμοστεί σε δυναμικά περιβάλλοντα. Ο αλγόριθμος AP, όπως έχει παρουσιαστεί στη παρούσα διατριβή, προϋποθέτει ένα στατικό περιβάλλον όπου η θέση των εμποδίων και ο τύπος κάθε κελιού είναι γνωστά εκ των προτέρων. Σε σενάρια όπου το περιβάλλον αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, ο αλγόριθμος θα πρέπει να επανεκτελεστεί, γεγονός που ενδεχομένως να οδηγήσει σε καθυστερήσεις και αναποτελεσματικότητα. Η ικανότητα προσαρμογής σε δυναμικά περιβάλλοντα, παραμένει μια σημαντική πρόκληση στον τομέα του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης πολλαπλών ρομπότ και αποτελεί βασικό τομέα για μελλοντική έρευνα.

3.6.3 Χρονική και χωρική πολυπλοκότητα

Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου AP επηρεάζεται κυρίως από το πλήθος των κελιών (ή σημείων δεδομένων) και τον αριθμό των επαναλήψεων μέχρι τη σύγκλιση. Για ένα σύνολο από N κελιά, ο αλγόριθμος έχει χρονική πολυπλοκότητα $O(N^2)$ ανά επανάληψη, επειδή περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ομοιότητας μεταξύ όλων των ζευγών κελιών. Αυτή η τετραγωνική σχέση, απορρέει από την ενημέρωση δύο πινάκων: του πίνακα «ευθύνης» και του πίνακα «διαθεσιμότητας», οι οποίοι έχουν μέγεθος $N \times N$. Επομένως, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου για k επαναλήψεις είναι $O(N^2k)$.

Ομοίως, η χωρική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου AP είναι επίσης $O(N^2)$ λόγω των απαιτήσεων αποθήκευσης των πινάκων «ευθύνης» και «διαθεσιμότητας», οι οποίοι διατηρούν τιμές για όλα τα ζεύγη κελιών ξεχωριστά (N^2).

3.6.4 Βελτίωση της απόδοσης

Η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου, όπως συμβαίνει με τους περισσότερους αλγορίθμους, είναι καθοριστική σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Η αναγκαιότητα βελτίωσης της αποδοτικότητας και της ταχύτητας εκτέλεσης είναι ακόμη πιο έντονη όταν πρόκειται για τον σχεδιασμό διαδρομής κάλυψης πολλαπλών ρομπότ, σε πραγματικά περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας. Υπό το πρίσμα αυτό, μπορούν να εξεταστούν διάφορες στρατηγικές για τη βελτίωση της ταχύτητας εκτέλεσης και της συνολικής αποδοτικότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Το σημαντικότερο ίσως τμήμα του προτεινόμενου αλγορίθμου, είναι αυτό του υπολογισμού του πίνακα ομοιότητας. Δεδομένου ότι το τμήμα αυτό αντιπροσωπεύει σημαντικό ποσοστό των συνολικών υπολογισμών (περίπου 40%), η βελτίωση της αποδοτικότητάς του αποτελεί υψίστη προτεραιότητα. Λαμβάνοντας υπόψη την εγγενή παραλληλοποιήσιμη φύση της διαδικασίας αυτής (όπου η ομοιότητα μεταξύ κάθε ζεύγους κελιών μπορεί να υπολογιστεί ανεξάρτητα), θα ήταν δυνητικά εφικτό να αξιοποιηθεί η δύναμη της παράλληλης και κατανεμημένης επεξεργασίας. Κατανέμοντας τον υπολογισμό των μέτρων ομοιότητας σε πολλαπλούς πυρήνες ή κόμβους σε ένα περιβάλλον παράλληλου υπολογισμού, είναι δυνατόν να επιταχυνθεί αισθητά η διαδικασία αυτή, αυξάνοντας έτσι τη συνολική αποδοτικότητα του αλγορίθμου.

Από την άλλη πλευρά, η διαδικασία μετάδοσης μηνυμάτων του αλγορίθμου AP, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την επαναληπτική δομή του, είναι πιο δύσκολο να παραλληλοποιηθεί. Αν και θεωρητικά, κάθε ενημέρωση μηνυμάτων «ευθύνης» και «διαθεσιμότητας» θα μπορούσε να υπολογιστεί παράλληλα, η επαναληπτική φύση του αλγορίθμου AP απαιτεί όλα τα αποτελέσματα κάθε προηγούμενης επανάληψης. Παρ' όλα αυτά, θα μπορούσαμε να διερευνήσουμε ορισμένες μορφές «ήπιας» παραλληλοποίησης, όπως η χρήση διανυσματικών πράξεων ή παράλληλων συναρτήσεων χαρτογράφησης που παρέχονται από γλώσσες και βιβλιοθήκες υψηλού επιπέδου. Παρόλο που αυτή η προσέγγιση δεν θα προσέφερε πραγματική παραλληλοποίηση λόγω του ότι κάθε επανάληψη θα πρέπει να περιμένει την ολοκλήρωση όλων των ενημερώσεων του μηνύματος, θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην ταχύτητα.

Τέλος, εκτός από τον παράλληλο υπολογισμό σε επεξεργαστή (CPU), άλλες πιθανές στρατηγικές για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου AP θα

μπορούσαν να περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του αλγορίθμου ή την εφαρμογή επιταχυντών υλικού, όπως οι μονάδες επεξεργασίας γραφικών (GPU) [125]–[128] ή οι πλακέτες FPGA [129], [130]. Η λεπτομερής ρύθμιση παραμέτρων όπως ο παράγοντας απόσβεσης ή η τιμή προτίμησης θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση, επιταχύνοντας έτσι την ταχύτητα εκτέλεσης. Ομοίως, η χρήση καρτών γραφικών, οι οποίες είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για παραλληλοποιήσιμες εργασίες, θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του χρόνου υπολογισμού. Ωστόσο, οι στρατηγικές αυτές θα απαιτούσαν προσεκτική αξιολόγηση ώστε να εξισορροπηθούν τα οφέλη στην αποδοτικότητα με τις πιθανές επιπτώσεις στην ποιότητα των αποτελεσμάτων.

3.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε ένας πρωτοπόρος τρόπος διαμοιρασμού της περιοχής για το πρόβλημα του ΣΔΚ σε καταστάσεις πολλαπλών ρομπότ. Σε αντίθεση με παραδοσιακούς αλγορίθμους διαμοιρασμού της περιοχής, οι οποίες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στον αυθαίρετο προσδιορισμό του αριθμού των ρομπότ και τις αρχικές τους θέσεις, αυτή η καινοτόμος προσέγγιση διαμοιράζει δυναμικά την επιχειρησιακή περιοχή σε ένα πλήθος υποπεριοχών για κάθε ρομπότ. Η προσέγγιση αυτή, παρόλο που λειτουργεί υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει απεριόριστο πλήθος διαθέσιμων ρομπότ, παρέχει μοναδική ευελιξία, επιτρέποντας την πιο αποτελεσματική και αποδοτική κάλυψη του χώρου.

Ένας τομέας στον οποίο ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να βρει εφαρμογές είναι η γεωργία ακριβείας. Αυτός ο κλάδος, που είναι ήδη σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένος, περιλαμβάνει διαδικασίες όπως η σπορά, η λίπανση και η συγκομιδή, οι οποίες συχνά αφορούν την κατανομή των εργασιών σε ένα στόλο ρομποτικών οντοτήτων. Ο προσδιορισμός του βέλτιστου αριθμού των επιμέρους περιοχών είναι υψίστης σημασίας για την αποφυγή επικαλύψεων και πλεονασμού στις εργασίες. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος, καθιστώντας δυνατό τον αυτόματο διαμοιρασμό των γεωργικών εκτάσεων σε υποπεριοχές με βάση τον τύπο της καλλιέργειας και την τοπογραφία, ανοίγει το δρόμο για την περαιτέρω βελτίωση της διαχείρισης των πόρων. Επιπλέον, εξασφαλίζει τη βέλτιστη κατανομή εργασιών μεταξύ των αυτόνομων γεωργικών μηχανημάτων, ενισχύοντας τη συνολική επιχειρησιακή τους απόδοση, συμβάλλοντας έτσι στη σημαντική μείωση του χρόνου και του κόστους.

Ένας άλλος κλάδος στον οποίο ο αλγόριθμος μπορεί να φέρει σημαντική επανάσταση είναι οι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης. Συνήθως, οι επιχειρήσεις αυτές είναι χρονικά ευαίσθητες και απαιτούν τον διαχωρισμό μεγάλων, πληγείσων περιοχών σε μικρότερες διαχειρίσιμες υποπεριοχές, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή γρήγορων και αποτελεσματικών μεθόδων αναζήτησης. Η συμβατική μέθοδος διαχωρισμού περιοχών με βάση τους διαθέσιμους διασώστες μπορεί να μην είναι πάντα αποτελεσματική, ιδίως σε σενάρια όπου οι διασώστες είναι ρομποτικές οντότητες. Χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο, θα ήταν εφικτό να γίνει αποτελεσματικός διαχωρισμός της περιοχής αναζήτησης στον κατάλληλο αριθμό υποπεριοχών (clusters), ανεξάρτητα από τον αριθμό των ρομπότ, βελτιστοποιώντας

τη στρατηγική αναζήτησης και αυξάνοντας την πιθανότητα επιτυχών επιχειρήσεων διάσωσης.

Ως μια σημαντική πρόοδος στο ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, η μεθοδολογία αυτή ανοίγει το δρόμο για νέες ερευνητικές κατευθύνσεις και πρακτικές βελτιώσεις στον τομέα αυτό. Η ικανότητα να παρέχει αποτελεσματικό διαμοιρασμό της περιοχής, χωρίς να επιβαρύνει τον χειριστή με την αυθαίρετη απόφαση του αριθμού των ρομπότ ή των αρχικών τους θέσεων, θέτει ένα νέο σημείο αναφοράς για τις υλοποιήσεις του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης πολλαπλών ρομπότ. Επιπλέον, η προτεινόμενη προσέγγιση παρέχει μια ισχυρή βάση για την ανάπτυξη βελτιωμένων στρατηγικών που μπορούν να αντιμετωπίσουν τις πολυπλοκότητες του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης πολλαπλών ρομπότ και να επιταχύνουν περαιτέρω την ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων σε διάφορους τομείς που κυμαίνονται από τη γεωργία έως τις αποστολές εξερεύνησης.

Κεφάλαιο 4: Βελτίωση των περιοχών κάλυψης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξετάστηκαν διεξοδικά οι ιδιαιτερότητες του διαμοιρασμού της περιοχής σε προβλήματα Σχεδιασμού Διαδρομής Κάλυψης (ΣΔΚ) χώρου πολλαπλών ρομπότ. Γίνεται κατανοητό, ότι η αποτελεσματική κάλυψη του χώρου δεν καθορίζεται αποκλειστικά από τον τρόπο με τον οποίο διαχωρίζεται η περιοχή. Πέρα από τον διαχωρισμό, αναδύεται ένα άλλο πρόβλημα που χρήζει βελτιστοποίησης, αυτό που αφορά την κατανάλωση ενέργειας των ίδιων των ρομπότ κατά τη διάσχιση της διαδρομής τους. Ένας ενεργειακά αποδοτικός ΣΔΚ, δεν αφορά απλώς την ελαχιστοποίηση της απόστασης. Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ο αριθμός των στροφών που μπορεί να πραγματοποιήσει το εκάστοτε ρομπότ, οι πιθανοί περιορισμοί του εδάφους καθώς και οι ιδιαίτερες δυνατότητες των ίδιων των ρομπότ. Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται το κρίσιμο θέμα της βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης των ρομπότ στο πλαίσιο του ΣΔΚ. Εξετάζονται διεξοδικά τα παραδοσιακά μοντέλα, τα οποία εστιάζουν κυρίως στο μήκος της διαδρομής, και υπογραμμίζεται η αναγκαιότητα της ενσωμάτωσης της ενεργειακής κατανάλωσης.

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξοικονόμηση ενέργειας στο πρόβλημα του ΣΔΚ εκτείνεται πέρα από την απλή ελαχιστοποίηση της απόστασης. Η έννοια της ενεργειακής αποδοτικότητας, γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκη όταν λαμβάνονται υπόψη μεταβλητές όπως οι περιορισμοί του εδάφους, οι ειδικές δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά των ρομπότ, καθώς και ο αριθμός των στροφών που περιλαμβάνει μια διαδρομή κάλυψης. Η ενέργεια που καταναλώνει ένα ρομπότ, δεν εξαρτάται μόνο από το μήκος της διαδρομής που διανύει - εξαρτάται επίσης από τους ελιγμούς που πρέπει να κάνει το ρομπότ κατά μήκος της διαδρομής. Τις περισσότερες φορές, η ελαχιστοποίηση του αριθμού των στροφών σε μια δεδομένη διαδρομή μπορεί να μειώσει σημαντικά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας ενός ρομπότ. Αυτή είναι μια κρίσιμη πτυχή, την οποία τα Ελάχιστα Δέντρα Κάλυψης (ΕΔΚ) που επικεντρώνονται στην ελαχιστοποίηση του μήκους της διαδρομής, συνήθως δεν λαμβάνουν υπόψη.

Ενώ η σχέση μεταξύ του μήκους διαδρομής και της ενεργειακής απόδοσης φαίνεται ξεκάθαρη, στην πράξη, η συσχέτιση αυτή δεν είναι πάντα γραμμική. Αυτό σημαίνει ότι το συντομότερο μονοπάτι δεν ισοδυναμεί απαραίτητα με το πιο αποδοτικό ενεργειακά μονοπάτι. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός διαδρομής για ρομποτικά οχήματα απαιτεί μια προσέγγιση, που εξισορροπεί την ανάγκη για συντομότερες διαδρομές και λιγότερες στροφές, ενισχύοντας έτσι τη συνολική ενεργειακή απόδοση.

Το κεφάλαιο αυτό, φιλοδοξεί να δώσει λύση στο πρόβλημα του ΣΔΚ, λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των ρομπότ, εισάγοντας ένα μοντέλο που διακρίνεται από δύο βασικά χαρακτηριστικά:

- Μια εξελιγμένη τεχνική μετα-επεξεργασίας για τη βελτίωση των περιοχών κάλυψης που ανατίθενται στα ρομπότ. Αυτή η διαδικασία βελτιστοποιεί περαιτέρω τα αποτελέσματα του διαμοιρασμού του χώρου, μειώνοντας δραστικά την περιττή ανάμειξη περιοχών, και αυξάνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα των διαδρομών κάλυψης. Ο αλγόριθμος επανεξετάζει τα όρια κάθε υποπεριοχής, προσαρμόζοντάς τα έτσι ώστε να διασφαλίζεται η βέλτιστη και πιο ισορροπημένη κατανομή του περιβάλλοντος μεταξύ των ρομπότ, χωρίς να διακυβεύεται η ακεραιότητα της εκάστοτε αποστολής κάλυψης χώρου.

- Το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει έναν μηχανισμό Ανταλλαγής Κελιών (ΑΚ), που βελτιώνει σημαντικά τις τελικές διαδρομές κάλυψης των ρομπότ. Αυτός ο μηχανισμός, ανταλλάσσει ορισμένους κόμβους των Δέντρων Κάλυψης Χώρου (ΔΚΧ) που ανήκουν σε διαφορετικές γειτονικές υποπεριοχές, με σκοπό να μειωθεί περαιτέρω ο αριθμός των στροφών που πραγματοποιούν τα ρομπότ κατά τη διάρκεια των εργασιών κάλυψης χώρου, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας.

Η δομή του υπόλοιπου Κεφαλαίου διαμορφώνεται ως εξής:

Στην ενότητα 2, παρουσιάζεται ο μαθηματικός ορισμός του προβλήματος. Στην ενότητα 3, παρουσιάζονται παρόμοια έργα από τη βιβλιογραφία και επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Στην ενότητα 4, αναλύεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος. Στη συνέχεια, στην ενότητα 5, παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου. Οι περιορισμοί του αλγορίθμου, οι πιθανές βελτιώσεις της απόδοσης και η χρήση τεχνικών βελτίωσης της αποτελεσματικότητας περιγράφονται στην ενότητα 6. Τέλος, η ενότητα 7 υπογραμμίζει τα συμπεράσματα.

4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η βελτιστοποίηση των υποπεριοχών με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα. Για να θεμελιωθεί η παρούσα έρευνα, είναι απαραίτητο να τεθεί αρχικά μια μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, αποτυπώνοντας συνοπτικά τις βασικές πτυχές και τους περιορισμούς που εμπλέκονται. Αυτό το μαθηματικό μοντέλο χρησιμεύει ως σαφής αναπαράσταση του υποκείμενου προβλήματος, αποσαφηνίζοντας τα βασικά του στοιχεία και καθοδηγώντας έτσι την ανάπτυξη αλγοριθμικών λύσεων.

Πιο συγκεκριμένα, έχοντας:

- Ένα αρχικό περιβάλλον A μεγέθους $X \times Y$ που αναπαρίσταται ως δυαδικός πίνακας $A = [a_{i,j}]$, όπου $a_{i,j} \in \{0,1\}$ για όλα τα $1 \leq i \leq X$ και $1 \leq j \leq Y$. Στον πίνακα A , $a_{i,j} = 0$ αντιπροσωπεύει εμπόδιο ενώ $a_{i,j} = 1$ αντιπροσωπεύει προσπελάσιμο σημείο. Εξ ορισμού, τα ρομπότ μπορούν να διασχίσουν μόνο προσβάσιμα σημεία.
- Έναν σύνολο ρομπότ $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, όπου n είναι ο αριθμός των ρομπότ.
- Έναν πίνακα $V_{straight} = \{v_{straight_1}, v_{straight_2}, \dots, v_{straight_n}\}$ που εκφράζει την ταχύτητα πορείας του κάθε ρομπότ.
- Έναν πίνακα $V_{turn} = \{v_{turn_1}, v_{turn_2}, \dots, v_{turn_n}\}$ που εκφράζει την ταχύτητα στροφής του κάθε ρομπότ.

Με βάση αυτές τις πληροφορίες, αναζητούμε:

- Ένα σύνολο υποπεριοχών $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, όπου κάθε υποπεριοχή s_i είναι ένα συνεχές τμήμα της αρχικής περιοχής A με γειτνίαση τεσσάρων επιπέδων και ανατίθεται στο ρομπότ r_i .

Τυπικά, ορίζονται οι παρακάτω περιορισμοί:

- Κάθε υποπεριοχή s_i διατηρεί γειτνίαση με όλα τα σημεία που ανήκουν σε αυτή (Εικόνα 13), δηλαδή, για κάθε ζεύγος προσβάσιμων σημείων c_{m_1, n_1} και c_{m_2, n_2} σε μια υποπεριοχή s_i , υπάρχει μια ακολουθία σημείων c_{m_k, n_k} , $k = 1, \dots, p$, τέτοια ώστε $c_{m_1, n_1} = c_{m_1, n_1}$, $c_{m_p, n_p} = c_{m_2, n_2}$, και το σημείο c_{m_k, n_k} να είναι γειτονικό σημείο του $c_{m_{k+1}, n_{k+1}}$ για όλα τα $k = 1, \dots, p - 1$. Το κριτήριο γειτνίασης (4-neighbor) ορίζει ότι η συνδεσιμότητα μεταξύ των

κελιών πρέπει να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη - όχι διαγώνια. Έτσι, στην ουσία, κάθε σημείο στην ακολουθία είναι οριζοντίως ή καθέτως γειτονικό με το διάδοχό του, για όλες τις τιμές του k που κυμαίνονται από 1 έως $p - 1$. Αυτή η συνθήκη εξασφαλίζει μια συνέχεια ή αλυσίδα συνδέσεων 4 γειτόνων μεταξύ οποιωνδήποτε δύο προσβάσιμων κελιών σε μια δεδομένη υποπεριοχή, διατηρώντας έτσι τον κανόνα της συνδεσιμότητας 4 γειτόνων σε ολόκληρο το πλέγμα.

- Το περιβάλλον A είναι η ένωση όλων των υποπεριοχών S , δηλαδή, $A = \bigcup_{i=1}^n S_i$.
- Η τομή δύο διαφορετικών υποπεριοχών S_i και S_j για κάθε $i \neq j$ είναι το κενό σύνολο, δηλαδή $S_i \cap S_j = \emptyset$ για κάθε $i \neq j$.
- Η διαδρομή ενός ρομπότ r_i , ορίζεται ως η ακολουθία των κελιών της υποπεριοχής S_i , δηλαδή $T_i = (t_1, t_2, \dots, t_L)$ όπου T_i είναι το σύνολο των κελιών που περιλαμβάνονται στη διαδρομή ενός ρομπότ, και κάθε κελί t_j που ανήκει στο S_i , είναι προσβάσιμο από τα ρομπότ, δηλαδή $t_j \in \{(m, n) \mid a_{i,j} = 1\}$.
- Η ευθεία κίνηση ενός ρομπότ r_i ορίζεται ως μια ακολουθία κελιών στο T_i , όπου όλα τα κελιά βρίσκονται στον ίδιο άξονα, δηλαδή όλα τα κελιά έχουν ίδια τιμή γραμμής m ή όλα τα κελιά έχουν ίδια τιμή στήλης n . Η ευθεία κίνηση ορίζεται ως $\mathcal{S}_i = (s_1, s_2, \dots, s_P)$ όπου $P \leq L$ είναι ο συνολικός αριθμός των κελιών της ευθύγραμμης κίνησης, και κάθε κελί s_j είναι στοιχείο του T_i . Τυπικά, μια ακολουθία $\mathcal{S}_i$ είναι μια ευθύγραμμη κίνηση αν και μόνο αν $\forall s_j, s_k \in \mathcal{S}_i$; if $s_j = (m, n_j)$ και $s_k = (m, n_k)$, τότε $|n_j - n_k| = |j - k|$ για κάθε $j, k = 1, 2, \dots, P$, ή $\forall s_j, s_k \in \mathcal{S}_i$; αν $s_j = (m_j, n)$ και $s_k = (m_k, n)$, τότε $|m_j - m_k| = |j - k|$ για κάθε $j, k = 1, 2, \dots, P$. Γίνεται κατανοητό, πως μια διαδρομή ενός ρομπότ r_i , μπορεί να αποτελείται από μια ή περισσότερες ευθύγραμμες διαδρομές, καθώς και από μια ή περισσότερες στροφές. Η ελαχιστοποίηση των στροφών εντός μιας διαδρομής του ρομπότ r_i , μπορεί να εκφραστεί ως:

$$T_i \leq T_{i0}, \forall i \in 1, \dots, n_r$$

$$\min \sum_{i=1}^{n_r} T_i \quad (2)$$

- Το πρόβλημα είναι να βρεθεί μια συνάρτηση $f: R \rightarrow S$ τέτοια ώστε $f(r_i) = s_i$ για κάθε $1 \leq i \leq n$, που πληροί τους προαναφερθέντες περιορισμούς.

4.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, ο αλγόριθμος DARP [94] αντιπροσωπεύει τη δημοφιλέστερη προσέγγιση στον τομέα του ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ. Όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 3, ο DARP προσφέρει μια συστηματική λύση, διαιρώντας το συνολικό περιβάλλον σε διακριτές υποπεριοχές, καθεμία από τις οποίες ανατίθεται σε ένα συγκεκριμένο ρομπότ. Ο πρωταρχικός στόχος του DARP είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου κάλυψης, που επιτυγχάνεται με τον έξυπνο διαχωρισμό του περιβάλλοντος με βάση τα χαρακτηριστικά του και τις δυνατότητες των ρομπότ. Ωστόσο, ο αλγόριθμος αυτός κάνει ορισμένες παραδοχές σχετικά με τον αριθμό των ρομπότ, το πλήθος των υποπεριοχών και τις αρχικές τους θέσεις, οδηγώντας σε πιθανούς περιορισμούς σε μεγαλύτερα και πιο σύνθετα περιβάλλοντα. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα του αλγορίθμου DARP, ωστόσο, είναι πως δε λαμβάνει υπόψη του τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων υποπεριοχών. Έτσι, ενώ φαινομενικά διαχωρίζει τον αρχικό χώρο σε υποπεριοχές ίσου μεγέθους, οι υποπεριοχές αυτές μπορεί να απαιτούν μεγαλύτερο πλήθος στροφών για να διασχιστούν από τα ρομπότ, και ως εκ τούτου, να παρουσιάζεται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

Στην εργασία [131], οι συγγραφείς παρουσιάζουν μια προσέγγιση ΣΔΚ που χρησιμοποιεί ακριβή κυτταρική αποσύνθεση χώρου (Exact Cellular Decomposition). Η συγκεκριμένη εργασία δίνει έμφαση στο πρόβλημα της ελαχιστοποίησης των στροφών των ρομπότ κατά την πλοήγηση. Παρουσιάζεται μια αποτελεσματική μέθοδο για τον προσδιορισμό του ελάχιστου ύψους μη κυρτών πολυγώνων και, στη συνέχεια, τον τρόπο βέλτιστης διαίρεσης αυτών των πολυγώνων για καλύτερη κάλυψη. Οι προσομοιώσεις σε διάφορους χώρους εργασίας δείχνουν ότι η προσέγγισή τους μειώνει τόσο τον αριθμό των στροφών όσο και τον συνολικό χρόνο εκτέλεσης. Παρόλα αυτά, η ακριβής κυτταρική αποσύνθεση χώρου που χρησιμοποιείται καθιστά την προτεινόμενη προσέγγιση δύσχρηστη και δύσκολα παραμετροποιήσιμη.

Η μελέτη που παρουσιάζεται στο [132] αντιμετωπίζει το πρόβλημα ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, εστιάζοντας στην ελαχιστοποίηση του χρόνου αποστολής, ο οποίος επηρεάζεται από τον αριθμό των στροφών που πραγματοποιούν τα ρομπότ. Η προτεινόμενη λύση, χωρίζει το περιβάλλον σε λεπτές ορθογώνιες «τάξεις», που αντιστοιχούν στο μέγεθος του εργαλείου κάλυψης των ρομπότ, μέσω μιας ευρετικής

συνάρτησης που ελαχιστοποιεί τις στροφές. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μια παραλλαγή του προβλήματος του πωλητή (m-TSP) [133]–[136] για την περαιτέρω ελαχιστοποίηση του χρόνου αποστολής του ρομπότ. Η συγκριτική ανάλυση με πραγματικά εσωτερικά περιβάλλοντα δείχνει μείωση των στροφών κατά 6,7% και μείωση του χρόνου κάλυψης κατά 3,8% κατά μέσο όρο για ομάδες 1-5 ρομπότ. Παρόλο που τα αποτελέσματα αυτά είναι ενθαρρυντικά, η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει υψηλή πολυπλοκότητα (καθώς δεν χρησιμοποιεί την κοινή τεχνική STC) και έχει μονοπάτια επικαλυπτόμενων περιοχών.

4.4 Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία για την αντιμετώπιση του προβλήματος ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, όπως ορίζεται στην ενότητα 2. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται, αποτελείται από δύο βασικές συνιστώσες. Και οι δύο συνιστώσες είναι απαραίτητες για τη βελτιστοποίηση της συνολικής αποδοτικότητας των διαδρομών. Η ενότητα 4.4.1, «Διαμοιρασμός και βελτιστοποίηση της περιοχής», υπογραμμίζει μια προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση της ανάμειξης των υποπεριοχών, ενώ η ενότητα 4.2, «Ανταλλαγή κόμβων», εξετάζει μια δευτερεύουσα μέθοδο που μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τις διαδρομές, επιτρέποντας την ανταλλαγή κόμβων μεταξύ γειτονικών ΔΚΧ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των στροφών κατά την πλοήγηση, και συνεπώς τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Στην Εικόνα 22, απεικονίζεται το διάγραμμα επισκόπησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

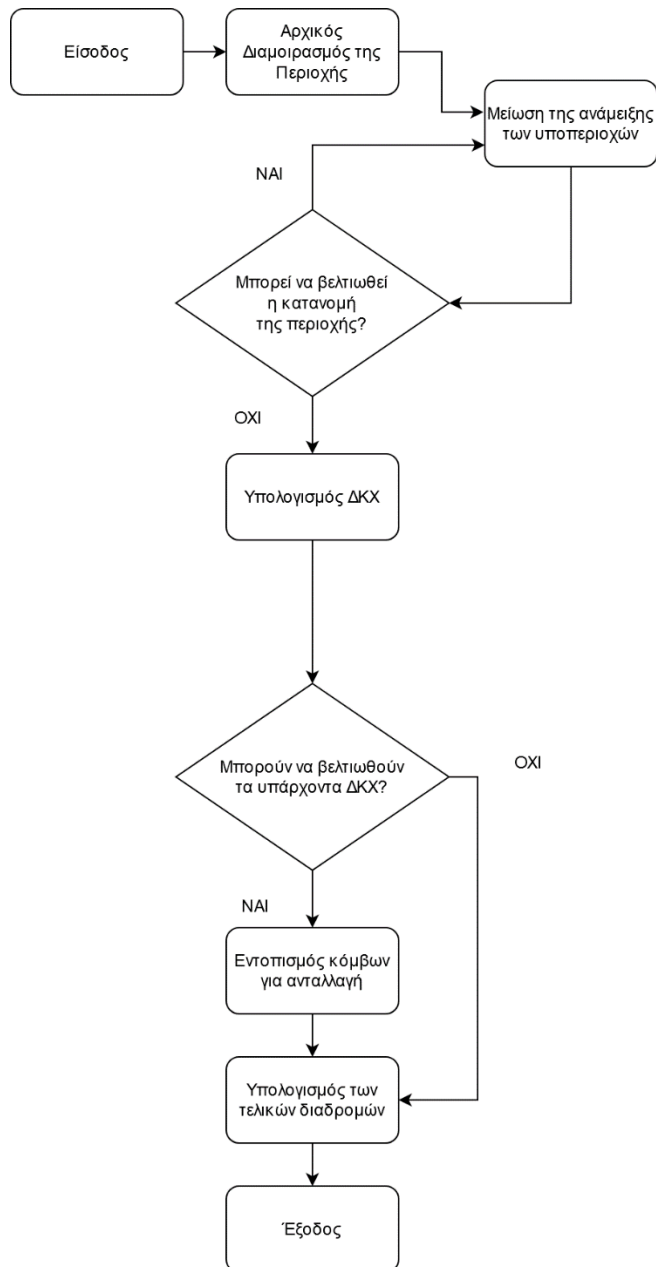
4.4.1 Διαμοιρασμός και βελτιστοποίηση της περιοχής

Το κύριο μέλημα αυτής της ενότητας είναι να περιγράψει τη μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται μετά τον διαχωρισμό της αρχικής περιοχής. Σε μια βέλτιστη κατάσταση (Εικόνα 23), ο διαχωρισμός της αρχικής περιοχής θα οδηγούσε σε υποπεριοχές τέλειου σχήματος, όπου κάθε υποπεριοχή που έχει ανατεθεί σε ένα ρομπότ θα μοιάζει με ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Αυτή η μορφή, λόγω της γραμμικότητας και της απλότητάς της, όπως έχουμε περιγράψει στο Κεφάλαιο 2, διευκολύνει εκ φύσεως τη λειτουργία των ρομπότ.

Ένα παράδειγμα ιδανικού διαχωρισμού της αρχικής περιοχής με ελάχιστο αριθμό στροφών απεικονίζεται στην Εικόνα 24. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι σε ρεαλιστικές καταστάσεις όπου χρησιμοποιούνται περισσότερα από δύο μη ρομπότ, και το περιβάλλον είναι ακανόνιστου σχήματος και περιέχει αρκετά εμπόδια, οι τυπικοί αλγόριθμοι διαχωρισμού περιοχής και οι αλγόριθμοι υπολογισμού ΕΔΚ δεν μπορούν να παράγουν αποδοτικά αποτελέσματα.

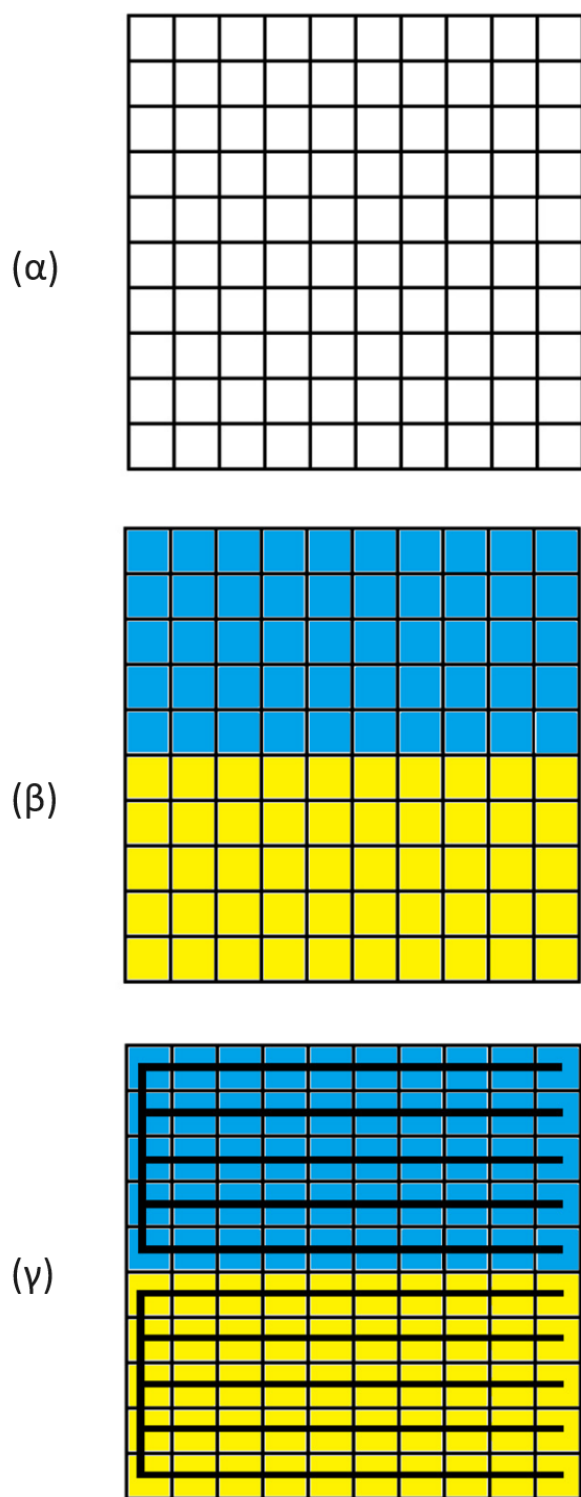
Ο προτεινόμενος αλγόριθμος, επιτυγχάνει τη μείωση του αριθμού των στροφών σε κάθε υποπεριοχή. Η μείωση αυτή οδηγεί σε μια αποτελεσματική, απλουστευμένη διαδρομή κάλυψης για κάθε ρομπότ, οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, αυξημένη παραγωγικότητα και συνολική απόδοση του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί, βέβαια, ότι ακόμη και σε υποπεριοχές ίσου

μεγέθους, τα παραγόμενα Δέντρα Επικάλυψης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε δυνητικά περισσότερες ή λιγότερες στροφές για τα ρομπότ (Εικόνα 25).



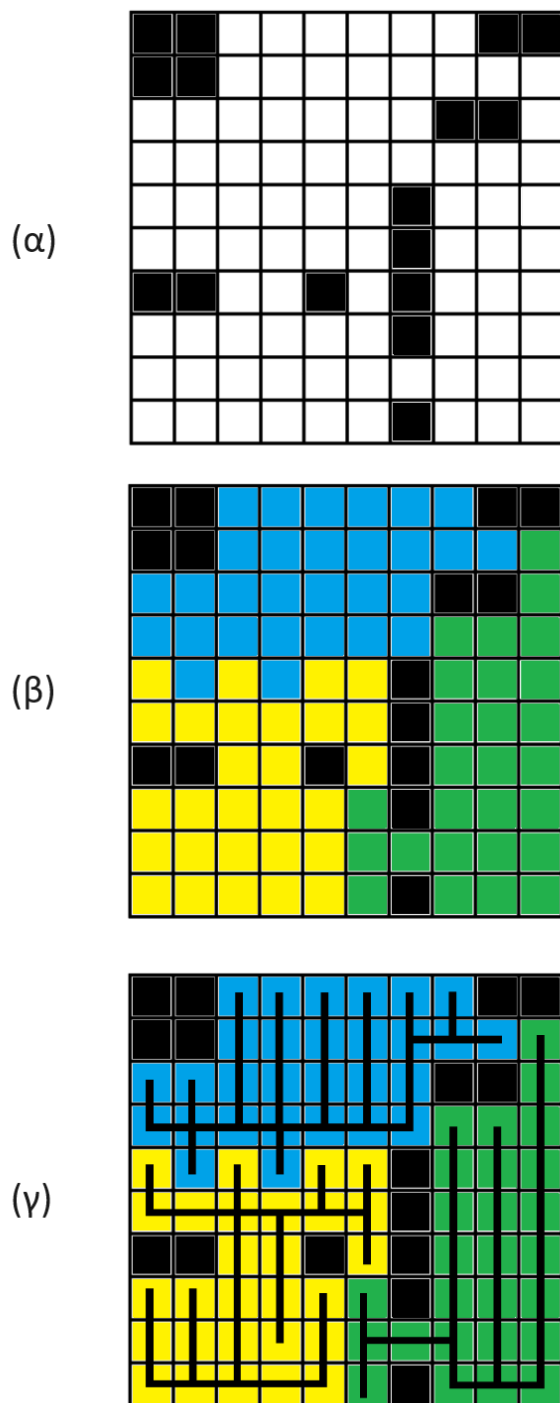
Εικόνα 22 – Σχηματική απεικόνιση αλγορίθμου.

Τα δεδομένα εισόδου περιέχουν όλες τις πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον και τα ρομπότ, όπως περιγράφονται στην ενότητα 3. Η τελική έξοδος του αλγορίθμου περιλαμβάνει τις βελτιωμένες περιοχές, καθώς και τις τελικές διαδρομές των ρομπότ.



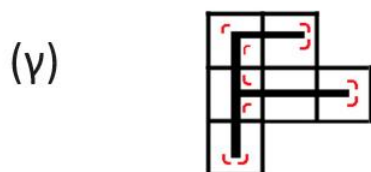
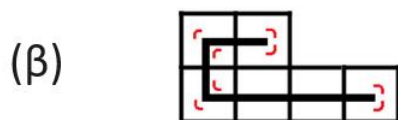
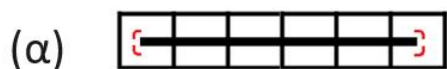
Εικόνα 23 – Παράδειγμα διαμοιρασμού περιοχής σε 2 ρομπότ.

Ένα ιδανικό δυαδικό περιβάλλον 10×10 (όπως ορίζεται στην ενότητα 2) όπου δεν υπάρχουν εμπόδια (α). Κάθε λευκό κελί είναι μια προσβάσιμη περιοχή. Στο (β), η αρχική περιοχή χωρίζεται σε δυο όμοια ρομπότ. Στο (γ), βλέπουμε τα τελικά παραγόμενα ΔΚΧ με τη χρήση του αλγορίθμου Kruskal. Αυτά τα ΔΚΧ δεν είναι μόνο ελάχιστα (ΕΔΚ), αλλά έχουν επίσης και ελάχιστο αριθμό στροφών.



Εικόνα 24 – Παράδειγμα διαμοιρασμού περιοχής σε 3 ρομπότ.

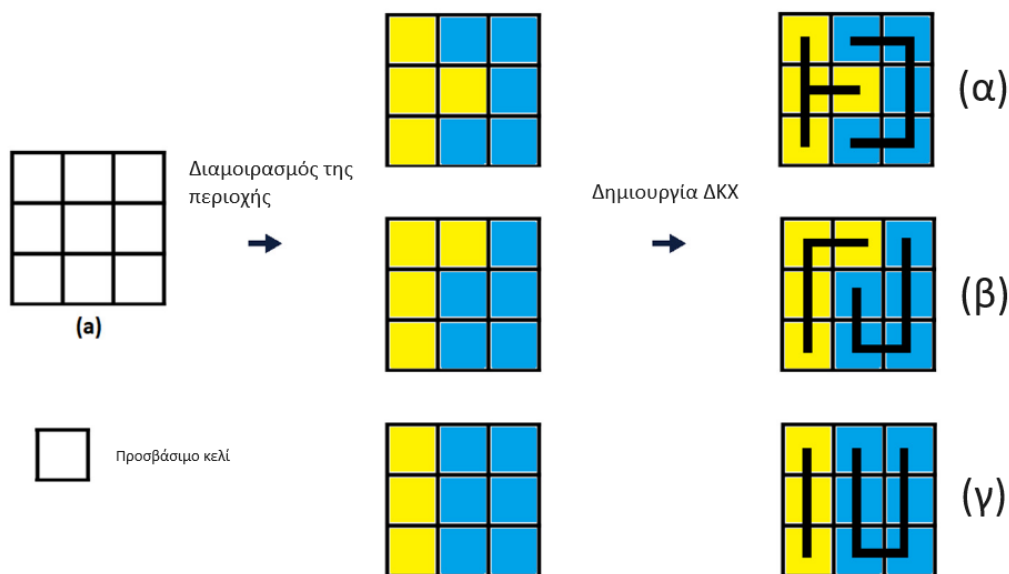
Μια οπτική αναπαράσταση ενός παραδείγματος δυαδικού περιβάλλοντος 10×10 (όπως ορίζεται στην ενότητα 2) - τα μαύρα κελιά υποδηλώνουν ένα εμπόδιο και τα λευκά κελιά υποδηλώνουν μια προσβάσιμη περιοχή (α). Στο (β), η αρχική περιοχή διαιρείται σε τρία όμοια ρομπότ, με τη χρήση του αλγορίθμου AP (ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε αλγόριθμος διαχωρισμού περιοχής με ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα βάσει των παραμέτρων). Στο (γ), μπορούμε να δούμε τα τελικά παραγόμενα MSTs χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Kruskal.



Εικόνα 25 – Επιρροή του χώρου στο πλήθος των στροφών του ΔΚΧ.

Μια οπτική αναπαράσταση του πώς διαφορετικά διαμορφωμένες (αλλά εξίσου μεγάλες) περιοχές μπορούν δυνητικά να περιέχουν διαδρομές με διαφορετικό αριθμό στροφών. Όλες οι περιοχές (α-γ) έχουν τον ίδιο αριθμό κελιών, αλλά το σχήμα τους επηρεάζει τα παραγόμενα ΔΚΧ και επομένως τον αριθμό των στροφών.

Ο κύριος στόχος της λεπτομερούς επεξεργασίας των υποπεριοχών είναι η μείωση ενός φαινομένου, που είναι γνωστό ως «ανάμειξη περιοχών». Κατά το διαχωρισμό της αρχικής περιοχής, η ανάμειξη περιοχών αναφέρεται στον αριθμό των κελιών που ανήκουν σε μια συγκεκριμένη υποπεριοχή, αλλά τα γειτονικά τους κελιά ανήκουν σε άλλη υποπεριοχή. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί συνήθως σε δυσμενείς διαδρομές για τα ρομπότ, καθώς μπορεί να χρειαστεί να εκτελέσουν περισσότερες στροφές κατά τη διάρκεια της διαδρομής τους, αυξάνοντας έτσι το ενεργειακό κόστος και το χρόνο λειτουργίας. Στην Εικόνα 26 απεικονίζεται ένα παράδειγμα ενός περιβάλλοντος 3×3 με ανάμειξη περιοχών.



Εικόνα 26 – Παράδειγμα μεταβολής πλήθους στροφών.

Μια οπτική αναπαράσταση ενός περιβάλλοντος 3×3 . Στο (α), απεικονίζεται το αρχικό περιβάλλον (δεν υπάρχουν εμπόδια, οπότε κάθε κελί είναι προσβάσιμο). Στο (β), η αρχική περιοχή χωρίζεται σε δύο υποπεριοχές, μία για κάθε ρομπότ. Τα ΔΚΧ αποτελείται από οκτώ στροφές και για τα δύο ρομπότ. Στο (γ), ο αριθμός των κελιών που ανατίθενται σε κάθε μη επανδρωμένο όχημα εδάφους παραμένει ο ίδιος, αλλά το κελί αλλάζει θέση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έξι στροφές για το κίτρινο ρομπότ και οκτώ στροφές για το μπλε ρομπότ. Στο (δ), αντί να μετατοπιστεί η θέση του κελιού, αυτό ανατίθεται εκ νέου στο μπλε ρομπότ. Παρόλο που η κατανομή της περιοχής δεν είναι τώρα ισομερώς κατανεμημένη, ο αριθμός των στροφών είναι ο μικρότερος: τέσσερις για το κίτρινο ρομπότ και οκτώ για το μπλε ρομπότ.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, το μοντέλο βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί μια στρατηγική ανακατανομής κελιών, με βάση τα χαρακτηριστικά γειτνίασης κάθε κελιού. Συγκεκριμένα, τα κελιά για τα οποία οι τρεις από τους τέσσερις γείτονες ανήκουν σε άλλη υποπεριοχή, ανακατανέμονται. Αυτό το κριτήριο διασφαλίζει ότι αναδιανέμονται μόνο αυτά τα κελιά, προκειμένου να διατηρηθεί η αρχική κατάταξη των υποπεριοχών που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο στάδιο από τον αλγόριθμο διαμοιρασμού της αρχικής περιοχής (Αλγόριθμος 5).

Αυτή η διαδικασία βελτιστοποίησης επαναλαμβάνεται επαναληπτικά έως ότου δεν εντοπίζονται περαιτέρω ωφέλιμες ανακατανομές. Παρόλο που αυτή η διαδικασία βελτιστοποίησης προσθέτει έναν βαθμό πολυπλοκότητας, είναι απαραίτητη για τη συνολική επίτευξη του στόχου. Το αποτέλεσμα, είναι η σημαντική μείωση της ανάμειξης περιοχών, που οδηγεί σε πιο αποδοτικές διαδρομές κάλυψης και συνεπώς στη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.

Αλγόριθμος 6. Μείωση τις ανάμειξης στο αρχικά διαιρεμένο περιβάλλον

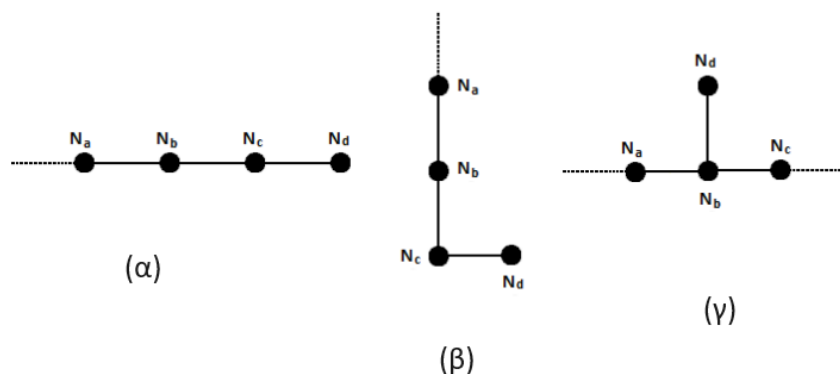
1. Είσοδος: Περιβάλλον A , υποπεριοχές S
 2. Έξοδος: Περιβάλλον A' , υποπεριοχές S'
 3. Συνάρτηση `reduce_blending`
 4. για i από 1 έως X
 5. για j από 1 έως Y
 6. κελί = $A[i, j]$
 7. ελεγχος για γειτονικά κελιά.
 8. αν $i > 1$ και $i < X$ και $j > 1$ και $j < Y$ τότε
 9. πλήθος υποπεριοχών = 0
 10. για k από -1 έως 1
 11. για l από -1 έως 1
 12. αγνόηση του ίδιου του κελιού
 13. αν ($k \neq 0$ και $l \neq 0$) τότε
 14. γειτονική υποπεριοχή = $A[i + k, j + l]$
 15. αν η γειτονική υποπεριοχή περιέχεται στο πλήθος των
 16. υποπεριοχών, τότε:
 17. πλήθος υποπεριοχών [γειτονική υποπεριοχή] += 1
 18. αλλιώς
 19. πλήθος υποπεριοχών [γειτονική υποπεριοχή] = 1
 20. μέγιστος αριθμός υποπεριοχών = $\max(\text{πλήθος υποπεριοχών})$
 21. Έλεγχος αν η μέγιστη γειτονική υποπεριοχή έχει 3 γείτονες
 22. αν $\text{max_cluster} \neq \text{κελί}$ και $\text{πλήθος υποπεριοχών}[\text{max_cluster}] \geq 3$
 23. τότε:
 24. $A[i, j] = \text{max_cluster}$
 25. Τέλος συνάρτησης
-

4.4.2 Ανταλλαγή κόμβων

Παρόλο που η διαδικασία που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα πραγματοποιεί μια λεπτομερή αναδιαμόρφωση των υποπεριοχών, με αποτέλεσμα την μείωση του φαινομένου της ανάμειξης των κελιών, οι νέες υποπεριοχές δεν εξασφαλίζεται ότι θα έχουν τον ελάχιστο δυνατό αριθμό στροφών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 25, οι υποπεριοχές διαφορετικού σχήματος μπορούν να έχουν μεγαλύτερο ή μικρότερο αριθμό στροφών. Αυτή η ενότητα αποσκοπεί στον εντοπισμό προβληματικών σημείων εντός των ΔΚΧ, και στην ανταλλαγή τους με κάποιο γειτονικό ΔΚΧ. Αυτή η ανταλλαγή, μπορεί να μειώσει περαιτέρω το πλήθος των στροφών ενός μονοπατιού, και άρα να μειώσει περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας του ρομπότ.

Σε κάθε ΔΚΧ, μόνο ένας τελικός κόμβος (ΤΚ) μπορεί να ανταλλαχθεί. Ανάλογα με το σχήμα του εκάστοτε ΔΚΧ, οι ΤΚ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής (Εικόνα 27Εικόνα 26):

- **Γραμμικός Τερματικός Κόμβος (ΓΤΚ):** Σε αυτή τη διάταξη, ο κόμβος έχει ως αποτέλεσμα συνολικά δύο αλλαγές κατεύθυνσης. Κατά την αφαίρεσή του, η διαδρομή εξακολουθεί να διατηρεί τον ίδιο αριθμό στροφών, υποδεικνύοντας ότι δεν υπάρχει καμία αλλαγή στον συνολικό αριθμό στροφών.
- **Γωνιακός Κόμβος (ΓΚ):** Αρχικά, αυτή η δομή κόμβου έχει ως αποτέλεσμα συνολικά τέσσερις αλλαγές κατεύθυνσης. Ωστόσο, όταν ο συγκεκριμένος κόμβος απομακρύνεται από τη διαδρομή, ο συνολικός αριθμός στροφών μειώνεται σε δύο, γεγονός που καταδεικνύει μείωση του συνολικού αριθμού στροφών.
- **Κόμβος Διασταύρωσης (ΚΔ):** Αυτή η διαμόρφωση κόμβου οδηγεί σε τέσσερις αλλαγές κατεύθυνσης στην αρχική διαδρομή. Είναι ενδιαφέρον, ότι η εξάλειψη αυτού του κόμβου έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη εξάλειψη των στροφών, μειώνοντας έτσι τον συνολικό αριθμό στροφών στο μηδέν.



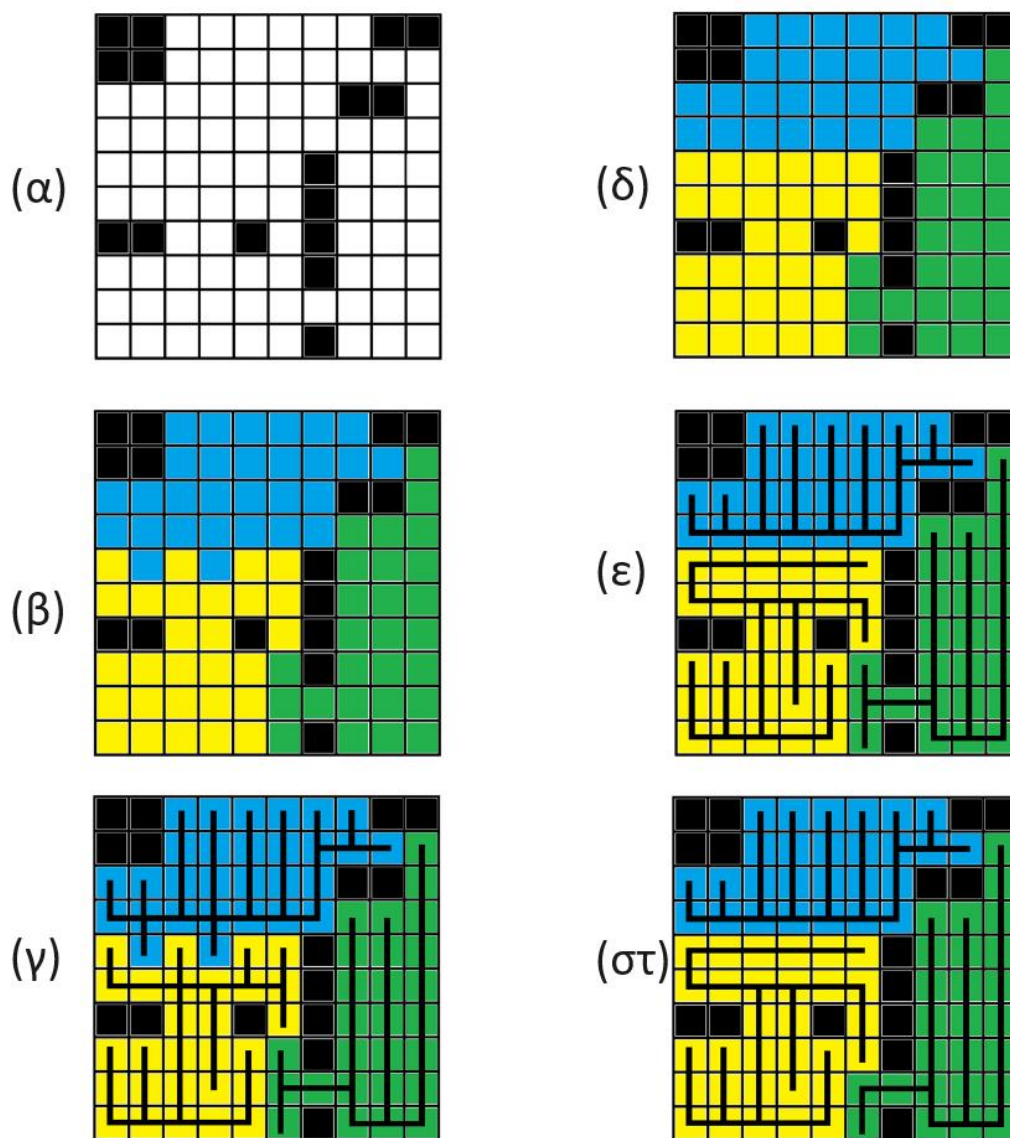
Εικόνα 27 – Πλήθος στροφών σε ΔΚΧ

Μια οπτική αναπαράσταση των διαφόρων τύπων τερματικών κόμβων σε ΔΚΧ. Η εικόνα (α), απεικονίζει το ΓΤΚ, η εικόνα (β) απεικονίζει το ΓΚ και η εικόνα (γ) απεικονίζει το ΚΔ. Η σειρά προτεραιότητας με την οποία θέλουμε να αντικαταστήσουμε τους κόμβους είναι (φθίνουσα): ΚΔ, ΓΚ, ΓΤΚ.

Για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των στροφών στα μονοπάτια που προκύπτουν, ο μηχανισμός ανταλλαγής κόμβων λαμβάνει ως είσοδο τα παραγόμενα Δέντρα Επικάλυψης και εκτελεί την ακόλουθη διαδικασία:

1. Κάθε ανταλλαγή κόμβου, υποδηλώνει ότι μια υποπεριοχή εγκαταλείπει έναν τελικό κόμβο, ο οποίος στη συνέχεια υιοθετείται από μια διαφορετική (γειτονική) υποπεριοχή.
2. Κατά τη διαδικασία διαγραφής των κόμβων αποδίδεται σειρά προτεραιότητας, όπου πρώτα διαγράφονται οι ΚΔ και στη συνέχεια οι ΓΚ. Ο απορριπτόμενος κόμβος, που τώρα αφομοιώνεται από μια γειτονική υποπεριοχή, ενσωματώνεται σε ένα νέο Δέντρο Επικάλυψης, σχηματίζοντας ένα τροποποιημένο σχήμα στον τελικό κόμβο. Ιδανικά, προτιμώνται οι ΓΤΚ, ενώ οι ΓΚ είναι η αμέσως καλύτερη επιλογή, και οι ΚΔ θεωρούνται οι λιγότερο επιθυμητές για την ελαχιστοποίηση του αριθμού στροφών. Η διαδικασία διαγραφής των κόμβων από μια υποπεριοχή, και η ενσωμάτωσή τους από μια γειτονική υποπεριοχή συνεχίζεται κυκλικά. Μετά την ολοκλήρωση ενός κύκλου, ο αριθμός των κόμβων που σχετίζονται με τη σχετική υποπεριοχή προσεγγίζει το (n/nr) . Εάν ο αριθμός των στροφών δεν ικανοποιεί την εξίσωση (16), ο τρέχων κύκλος ανταλλαγής απορρίπτεται και ξεκινά ένας νέος.
3. Κάθε κόμβος που είναι επιλέξιμος για ανταλλαγή σε μια υποπεριοχή υποβάλλεται σε ανταλλαγή πριν προχωρήσει στην επόμενη υποπεριοχή.
4. Η διαδικασία ΝΕ τερματίζεται όταν οι περαιτέρω ανταλλαγές παύουν να μειώνουν τον συνολικό αριθμό στροφών εντός της καθορισμένης περιοχής ενδιαφέροντος ή όταν επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων.

Η γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας ανταλλαγής κόμβων απεικονίζεται στην Εικόνα 28 (μαζί με τα προηγούμενα βήματα).



Εικόνα 28 – Συνολική οπτική αναπαράσταση του αλγορίθμου.

Μια οπτική αναπαράσταση των διαφόρων βημάτων για τρία πανομοιότυπα ρομπότ: Η εικόνα (α) απεικονίζει το αρχικό περιβάλλον, όπου τα λευκά κελιά υποδηλώνουν προσβάσιμες περιοχές και τα μαύρα κελιά υποδηλώνουν εμπόδια - Η εικόνα (β) δείχνει την αρχική περιοχή που χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές για κάθε ρομπότ - Η εικόνα (γ) παρουσιάζει τα ΔΚΧ όπως προκύπτουν με τη χρήση του αλγορίθμου Prim ή του αλγορίθμου Kruskal. Αντι να παραχθούν απευθείας τα ΔΚΧ μόλις διαμοιραστεί η περιοχή, ο προτεινόμενος αλγόριθμος ανακατανέμει τα κατάλληλα κελιά για να μειώσει την ανάμειξη περιοχών (δ). Στη συνέχεια, στην εικόνα (ε), παράγονται τα νέα ΔΚΧ. Στο τελευταίο μέρος της διαδικασίας, η ανταλλαγή κόμβων πραγματοποιείται μόλις παραχθούν τα ΔΚΧ. Οι επιλέξιμοι κόμβοι ανταλλάσσονται. Σε αυτό το παράδειγμα, ένας κόμβος ήταν επιλέξιμος για ανταλλαγή. Τα τελικά ΔΚΧ απεικονίζονται στην εικόνα (στ). Σε αυτό το παράδειγμα, το κίτρινο ρομπότ είχε μείωση του αριθμού των στροφών κατά 22,2%, το μπλε ρομπότ είχε μείωση κατά 18,6% και, τέλος, το πράσινο ρομπότ είχε μείωση κατά 10,5%. Η μείωση του αριθμού των στροφών βασίζεται στο μέγεθος του περιβάλλοντος, στον αριθμό των ρομπότ και στον αριθμό και τη θέση των εμποδίων. Γενικά, τα πιο περίπλοκα περιβάλλοντα έχουν τη δυνατότητα για περισσότερες βελτιστοποιήσεις.

4.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των εκτεταμένων δοκιμών του προτεινόμενου μοντέλου. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα σταθμό εργασίας εξοπλισμένο με επεξεργαστή Intel Core i7 8700K με 16 gigabytes RAM, παρέχοντας την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ για την εκτέλεση των προσομοιώσεων.

Το προτεινόμενο μοντέλο αποδείχθηκε ικανό στην αναδιάταξη των υποπεριοχών σε προβλήματα ΣΔΚ χώρου πολλαπλών ρομπότ, καθώς και στη βελτιστοποίηση των παραγόμενων ΔΚΧ για την ελαχιστοποίηση του αριθμού των στροφών εντός μιας διαδρομής. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με το A*-DARP+STC [108] και [118]. Το περιβάλλον προσομοίωσης που υιοθετήθηκε ήταν παρόμοιο με αυτό που παρουσιάζεται στην εργασία [90], και αποτελούνταν από τρεις χώρους παρόμοιου μεγέθους (64×64), ο καθένας από τους οποίους παρουσίαζε συγκεκριμένα μοναδικά χαρακτηριστικά. Τα ποσοστά εμποδίων των περιβαλλόντων (α), (β) και (γ) ήταν 10,1%, 29,6% και 43,5% αντίστοιχα. Αυτά τα περιβάλλοντα δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας μια ψευδο-τυχαία διαδικασία, με αποτέλεσμα ένα ξεχωριστό μείγμα προσβάσιμων περιοχών και εμποδίων. Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα ευρήματα των προσομοιώσεων.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Περιβάλλον	Πλήθος Ρομπότ	A *-DARP+STC [108]	[118]	AP + Kruskal + Βελτιστοποίηση Περιοχών	
				Συνολικές Στροφές Διαδρομής	Αλλαγή Κελιών Και κόμβων
a	3	522	545	485	12
	4	510	532	476	8
	5	469	459	430	7
b	3	564	543	492	13
	4	530	489	470	14
	5	523	435	493	8
c	3	456	498	401	7
	4	440	464	405	8
	5	442	540	424	5

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3, τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία ξεπερνά σταθερά την απόδοση των κλασσικών

μεθόδων όσον αφορά τη μείωση του συνολικού αριθμού στροφών. Για παράδειγμα, στο περιβάλλον α με τρία ρομπότ, το οποίο είχε αναλογία εμποδίων 10,1%, η μεθοδολογία μας πέτυχε συνολικά 485 στροφές, ξεπερνώντας την A*-DARP+STC και τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στο [108], οι οποίες οδήγησαν σε 522 και 545 στροφές, αντίστοιχα. Επιπλέον, είναι αξιοσημείωτο ότι αυτές οι βελτιώσεις στη μείωση των στροφών επιτεύχθηκαν με έναν μικρό μόνο αριθμό ανακατανομών κελιών, υπογραμμίζοντας την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης που εφαρμόσαμε. Παρόμοια μοτίβα καλύτερης απόδοσης του αλγορίθμου παρατηρήθηκαν σε όλα τα περιβάλλοντα που εξετάστηκαν.

Η χωρική κατανομή των εμποδίων και η αρχική τοποθέτηση των ρομπότ, ιδίως σε αλγορίθμους που υποστηρίζουν τον αρχικό προσδιορισμό των θέσεων, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού της περιοχής και του υπολογισμού των Δέντρων Επικάλυψης. Αυτές οι μεταβλητές επηρεάζουν σημαντικά την ικανότητα των σημερινών αλγορίθμων να μειώνουν τον αριθμό των στροφών των διαδρομών. Υπάρχουν περιπτώσεις, στις οποίες, λόγω της περίπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ της διάταξης των εμποδίων και της αρχικής τοποθέτησης των ρομπότ, δεν είναι δυνατή η περαιτέρω μείωση των στροφών. Αν και αυτό είναι δύσκολο να αποδειχθεί, μπορεί να οπτικοποιηθεί ένα παράδειγμα μιας τέτοιας περίπτωσης. Το γεγονός αυτό, υπογραμμίζει τον κρίσιμο ρόλο που διαδραματίζουν αυτοί οι παράγοντες στη διαδικασία σχεδιασμού, καθώς και την ανάγκη οι αλγόριθμοι αυτοί να είναι ικανοί να χειρίζονται μια μεγάλη ποικιλία διαμορφώσεων εδάφους και αρχικών συνθηκών. Τέτοιες επιπλοκές ενισχύουν την ανάγκη για ισχυρές, προσαρμοστικές και ευφυείς μεθοδολογίες σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης πολλαπλών ρομπότ, όπως αυτή που προτείνεται σε αυτό το κεφάλαιο.

4.6 ΜΕΙΩΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στο πλαίσιο του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης πολλαπλών ρομπότ, η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί μια σύνθετη και πολύπλευρη πρόκληση. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς τρόπους κίνησης οχημάτων, όπου η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται κυρίως από την απόσταση ή την ταχύτητα, τα ρομποτικά οχήματα, ιδίως σε εφαρμογές σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης, παρουσιάζουν ένα ξεχωριστό προφίλ κατανάλωσης ενέργειας. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται από διάφορους σύνθετους παράγοντες, όπως η φύση της κίνησης

(ευθεία ή στροφή), τα χαρακτηριστικά του εδάφους και οι ξαφνικές αλλαγές στο επιχειρησιακό τοπίο.

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε αυτό το πλαίσιο απαιτεί την κατανόηση της αλληλεπίδρασης αυτών των παραγόντων και τον σχεδιασμό μιας λύσης που τους λαμβάνει αποτελεσματικά υπόψη. Κατά την προτεινόμενη προσέγγισή, επιδιώχθηκε να αντιμετωπιστεί αυτή η πολυπλοκότητα με στόχο τη μείωση του αριθμού των στροφών στις τελικές διαδρομές κάλυψης των ρομπότ. Η στρατηγική αυτή βασίζεται σε μια βασική διαπίστωση: τα περισσότερα ρομποτικά συστήματα, κατά βάση, καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια όταν πραγματοποιούν μια στροφή σε σχέση με όταν κινούνται σε ευθεία γραμμή. Η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια των στροφών οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι ελιγμοί αυτοί συνήθως απαιτούν από τα ρομπότ να επιβραδύνουν, να σταματήσουν και στη συνέχεια να επιταχύνουν ξανά.

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε δύο μονοπάτια κάλυψης ίσης απόστασης D. Το ένα μονοπάτι περιέχει X στροφές και το άλλο Y στροφές, όπου $X > Y$. Συχνά, η κατανάλωση ενέργειας της διαδρομής με X στροφές θα είναι υψηλότερη λόγω της πρόσθετης ενεργειακής δαπάνης κατά τη διάρκεια της στροφής. Το ακριβές ποσό ενέργειας που εξοικονομείται με τη μείωση του αριθμού των στροφών μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις προδιαγραφές του εκάστοτε ρομπότ. Τα ρομπότ με μεγαλύτερη αναλογία ενέργειας στροφής προς ευθεία κίνηση θα επωφεληθούν περισσότερο από την ελαχιστοποίηση των στροφών, ενώ άλλα μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα με μικρότερη αναλογία θα επωφεληθούν λιγότερο. Ένα παράδειγμα ρομπότ με μεγαλύτερα οφέλη είναι τα μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα που χρησιμοποιούνται σε γεωργικές εφαρμογές. Λόγω της φύσης του εδάφους, αυτά τα οχήματα έχουν υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις κατά τις στροφές από ό,τι όταν κινούνται σε ευθείες γραμμές.

Ένας μαθηματικός τύπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ποσοτικοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ανά διαδρομή ενός ρομπότ είναι ο ακόλουθος:

$$E = E_{cs} \times D_{cs} + E_T \times D_T \quad (3)$$

όπου E_{cs} είναι η κατανάλωση ενέργειας του ρομπότ κατά την ταχύτητα πλευσης, D_{cs} είναι η απόσταση (πλήθος κελιών) που έχει διανυθεί σε ταχύτητα πλευσης, E_T είναι η κατανάλωση ενέργειας του ρομπότ κατά τη διάρκεια μιας στροφής, και D_T είναι το πλήθος των στροφών που πραγματοποίησε το ρομπότ. Ένας πιο εξειδικευμένος τύπος που θα απέδιδε ακριβέστερους ενεργειακούς υπολογισμούς, θα μπορούσε να λαμβάνει υπόψη την επιτάχυνση και την επιβράδυνση του μη επανδρωμένου οχήματος εδάφους και την κατανάλωση ενέργειας στις ακόλουθες καταστάσεις:

$$E = E_{cs} \times D_{cs} + E_{DS} \times D_{DS} + E_{AS} \times D_{AS} + E_T \times D_T \quad (4)$$

όπου E_{DS} είναι η κατανάλωση ενέργειας του ρομπότ κατά την επιβράδυνση (όταν προετοιμάζεται για στροφή), D_{DS} είναι η απόσταση (κελιά) που διανύεται κατά την επιβράδυνση, E_{AS} είναι η κατανάλωση ενέργειας του μη επανδρωμένου επίγειου οχήματος κατά την επιτάχυνση (μετά από στροφή), και D_{AS} είναι η απόσταση που διανύεται (κελιά) κατά την επιτάχυνση.

Η διαφοροποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγκειται στην ενσωμάτωση μιας συνάρτησης κόστους που λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με μια ευέλικτη διαδικασία επανασχεδιασμού διαδρομής. Αυτά τα στοιχεία ενσωματώνουν με συνοχή τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ενέργεια για να σχεδιάσουν διαδρομές που ενδεχομένως καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας της διαδρομής ενός ρομπότ, με την προϋπόθεση ότι το ρομπότ έχει μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση κατά όταν πραγματοποιεί ελιγμούς για μια στροφή. Αν και η παρούσα μελέτη δεν προσφέρει ρητά ποσοτικά μέτρα ενεργειακής αποτελεσματικότητας, οριοθετεί μια θεμελιώδη βάση για μελλοντικές έρευνες. Συνεπώς, η προτεινόμενη προσέγγιση σηματοδοτεί ένα κρίσιμο ορόσημο προς την κατανόηση και εκτέλεση στρατηγικών σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης με επίκεντρο την ενέργεια σε περιβάλλοντα πολλαπλών ρομπότ.

4.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μια διαφορετική προσέγγιση για την αντιμετώπιση του προβλήματος ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, με ιδιαίτερη έμφαση στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, η οποία βασίζεται στη βελτιστοποίηση των υποπεριοχών των ρομπότ και των παραγόμενων Δέντρων Επικάλυψης, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση. Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει ουσιαστικές συνεισφορές στον τομέα του σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης και παρέχει μια πολλά υποσχόμενη βάση για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες που αποσκοπούν στην περαιτέρω αύξηση της αποτελεσματικότητας.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ανήκει στην κατηγορία των offline αλγορίθμων. Επομένως, οι ίδιοι περιορισμοί που ισχύουν για όλους τους offline αλγορίθμους ισχύουν και για αυτόν. Ο κύριος περιορισμός είναι ότι απαιτεί γνώση του περιβάλλοντος και των εμποδίων και δεν μπορεί να διαχειριστεί δυναμικές αλλαγές στο περιβάλλον. Ωστόσο, μια πιθανή βελτίωση που θα μπορούσε να γίνει είναι η επέκταση του αλγορίθμου ώστε να εξυπηρετεί περιβάλλοντα με προβλέψιμα κινούμενα εμπόδια. Μια τέτοια τροποποίηση θα απαιτούσε την εισαγωγή της μεταβλητής χρόνου στον αλγόριθμο σχεδιασμού. Αξιολογώντας τις δυνατότητες των ρομπότ, ιδίως τις ταχύτητες κίνησης και στροφής τους, ο αλγόριθμος θα μπορούσε να σχεδιαστεί ώστε να προβλέπει τη θέση ενός συγκεκριμένου εμποδίου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, εξασφαλίζοντας έτσι ότι η προσχεδιασμένη διαδρομή είναι πάντα ασφαλής από εμπόδια. Αυτή η προσαρμογή θα απαιτούσε πιθανότατα ουσιαστικές τροποποιήσεις της τρέχουσας προσέγγισής μας, ιδίως όσον αφορά τον αλγόριθμο δημιουργίας δέντρων διάσχισης και τη διαδικασία ανταλλαγής κόμβων. Με την ενσωμάτωση της διάστασης του χρόνου στον αλγόριθμο σχεδιασμού, θα είναι δυνατό να ξεκλειδώσουμε νέα πεδία ευελιξίας για τον σχεδιασμό διαδρομής κάλυψης χώρου πολλαπλών ρομπότ, ανοίγοντας το δρόμο για ακόμη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και προσαρμοστικότητα σε πολύπλοκα και δυναμικά επιχειρησιακά σενάρια.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Καθώς το ταξίδι στις ρομποτικές εφαρμογές φτάνει στο τέλος του, αυτό το κεφάλαιο έχει ως στόχο να συνοψίζει τις ανακαλύψεις, τις ιδέες και τους προβληματισμούς που αποκαλύφθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια. Με τον κόσμο να εξελίσσεται διαρκώς μέσω της τεχνολογικής προόδου, ο ρόλος της ρομποτικής έχει αποδειχθεί τόσο μετασχηματιστικός όσο και καθοριστικός. Αυτό το κεφάλαιο, παρέχει μια περίληψη των σημαντικότερων ευρημάτων, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις καινοτομίες και τις προκλήσεις που αφορούν την πλοήγηση των ρομποτικών συστημάτων, και πιο συγκεκριμένα τον Σχεδιασμό Διαδρομής Κάλυψης (ΣΔΚ). Επιπλέον, θα συζητηθούν προβληματισμοί σχετικά με τους ερευνητικούς στόχους που τέθηκαν στο Κεφάλαιο 1, καθώς και τον βαθμό στον οποίο επιτεύχθηκαν. Θα τονιστούν οι γνώσεις και οι νέες ανακαλύψεις που επιτεύχθηκαν, καθώς και οι τυχόν πιθανές επιπτώσεις των ευρημάτων στον ευρύτερο τομέα της ρομποτικής. Θα παρουσιαστούν επίσης συστάσεις για μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες, με βάση τα κενά ή τα νέα ερωτήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της έρευνας.

5.1 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΑΓΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

Η ραγδαία εξέλιξη της ρομποτικής, η οποία είναι συνυφασμένη με την προσπάθειά μας για ολοένα και περισσότερη αυτοματοποίηση, έχει οδηγήσει σε ραγδαία εξάπλωση των ρομπότ, τα οποία χρησιμοποιούνται σε συνεχώς πιο πολύπλοκα περιβάλλοντα. Στην προσπάθειά μας να επιτύχουμε υψηλότερα επίπεδα αυτονομίας, η πλοήγηση και ο ΣΔΚ έχουν έρθει στο προσκήνιο. Παρόλα αυτά, η αποτελεσματική αξιοποίηση των ρομπότ, η πλοήγηση τους σε πολύπλοκα εδάφη και η διασφάλιση της πλήρους κάλυψης σε προβλήματα ΣΔΚ, έχει φέρει στην επιφάνεια πολύπλευρες προκλήσεις. Αυτές οι περιπλοκές του σχεδιασμού διαδρομής δεν είναι απλώς θεωρητικές ανησυχίες, αλλά έχουν άμεσες επιπτώσεις στην επιχειρησιακή αποδοτικότητα, την κατανάλωση ενέργειας και την ίδια τη βιωσιμότητα πολλών ρομποτικών εφαρμογών.

Οι σύγχρονες ρομποτικές εφαρμογές, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα χρήσεων, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 1 και στο Κεφάλαιο 2. Αυτές οι εφαρμογές, θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής κατηγορίες:

1. **Οικιακά ρομπότ:** Σε αυτά περιλαμβάνονται οικείες οντότητες όπως τα αυτόματα ρομπότ σκούπας, ή οι χλοοκοπτικές μηχανές, τα οποία πρέπει να καλύπτουν κάθε σπιθαμή ενός καθορισμένου χώρου, είτε πρόκειται για ένα δωμάτιο εντός του σπιτιού είτε για πρόκειται για έναν κήπο.
2. **Βιομηχανικά ρομπότ:** Λειτουργώντας σε δομημένα αλλά και δυναμικά περιβάλλοντα, αυτά τα ρομπότ μπορεί να πραγματοποιούν περίπλοκες εργασίες, από τη συναρμολόγηση και το βάψιμο ενός οχήματος, μέχρι τη συγκόλληση μικρό-ηλεκτρονικών στοιχείων σε μια εκτυπωμένη πλακέτα PCB.
3. **Γεωργικά ρομπότ:** Στο συγκεκριμένο κλάδο, παρατηρείται η χρήση τόσο των επίγειων αυτόνομων οχημάτων (UGV) όσο και των εναέριων αυτόνομων οχημάτων (UAV). Τα UGVs, που πλέον χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε ομαδικές εργασίες, αναλαμβάνουν διαδικασίες όπως το όργωμα ενός χωραφιού, η λίπανση και η συγκομιδή. Ενώ τα UAVs χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες όπως η λήψη εικόνων για τον εντοπισμό ασθενειών ή ακόμη και η επιτήρησή ενός χωραφιού για λόγους ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο.

4. **Εμπορικά ρομπότ:** Τοποθετημένα σε εμπορικά κέντρα, ξενοδοχεία ή εστιατόρια, τα εμπορικά ρομπότ αναλαμβάνουν συνήθως εργασίες όπως ο καθαρισμός ή η παράδοση αντικειμένων σε μεγάλους χώρους όπως οι αποθήκες.
5. **Εξειδικευμένα ρομπότ:** Αυτά τα ρομποτικά συστήματα είναι σχεδιασμένα για συγκεκριμένα περιβάλλοντα με συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Είτε πρόκειται για την εξερεύνηση των υποθαλάσσιων περιοχών, είτε για την εύρεση πληγέντων μέσα στα ερείπια μετά από φυσικές καταστροφές, είτε ακόμη και για αποστολές εξερεύνησης του διαστήματος, η σημαντικότητα αυτών των ρομπότ καθώς και της αποτελεσματικής τους λειτουργίας είναι υψίστης σημασίας.

Η εξάπλωση των ρομποτικών εφαρμογών και η ενσωμάτωσή τους στην καθημερινή μας ζωή και στις βιομηχανίες, υπογραμμίζει την επιτακτική ανάγκη για βελτίωση και καινοτομία στο πεδίο του ΣΔΚ. Τα προηγμένα έθνη, οι τεχνολογικοί κόμβοι (tech hubs) και τα πρωτοποριακά ερευνητικά ιδρύματα εργάζονται συστηματικά για την εξέλιξη και την ανάπτυξη σύγχρονων ρομποτικών συστημάτων. Ωστόσο, όπως έχει αναλυθεί και στα προηγούμενα Κεφάλαια, χωρίς αποτελεσματικούς αλγορίθμους πλοήγησης, αυτά τα ρομπότ δεν θα είναι σε θέση να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητές τους.

Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει δύο καίριες προκλήσεις για το μέλλον της ρομποτικής. Η πρώτη είναι η ανάγκη να διασφαλιστεί ότι τα ρομπότ μπορούν να πλοηγούνται και να καλύπτουν αποτελεσματικά περίπλοκους χώρους, διασφαλίζοντας ότι οι αποστολές τους εκτελούνται ολοκληρωμένα. Η δεύτερη υπογραμμίζει την ανάγκη για συνεχή εξέλιξη των αλγορίθμων ΣΔΚ ώστε να ανταποκρίνονται στις συνεχώς εξελισσόμενες πολυπλοκότητες των πραγματικών περιβαλλόντων

Όσον αφορά την πρώτη σημαντική πρόκληση στον τομέα της ρομποτικής, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την πλοήγηση συστημάτων πολλαπλών ρομπότ είναι συχνά ανεπαρκείς όσον αφορά τον διαμοιρασμό της περιοχής στα επιμέρους ρομπότ. Οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι αντιμετωπίζουν ως επί το πλείστον το έργο της κάλυψης περιοχής ως μια μονολιθική πρόκληση, χωρίς να διαιρούν επιμελώς τον χώρο βάσει τα χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητές του. Αυτή η προσέγγιση, συχνά οδηγεί σε αναποτελεσματικό διαμοιρασμό της περιοχής, και άρα σε αναποτελεσματική κάλυψη, με τα ρομπότ να επαναλαμβάνουν διαδρομές, να αλληλεπικαλύπτονται οι διαδρομές τους ή ακόμη και να υπάρχουν σημεία του

χώρου που να παραλείπονται εξολοκλήρου. Η παρούσα διατριβή θέτει μια νέα προοπτική παρουσιάζοντας για καλύτερο διαμοιρασμό της περιοχής σε προβλήματα ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ. Με τον έξυπνο διαμοιρασμό του χώρου βάσει των γεωγραφικών του χαρακτηριστικών, όπως ο τύπος εδάφους και το υψόμετρο, και την ανάθεση συγκεκριμένων υποπεριοχών στα ρομπότ, η προσέγγιση που παρουσιάζεται στη παρούσα διατριβή βελτιώνει την κάλυψη, διασφαλίζοντας ότι κάθε ρομπότ εργάζεται σε παράλληλη χωρίς πλεονασμούς. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο επιταχύνει την ταχύτητα κάλυψης, αλλά και ενισχύει την αποτελεσματικότητα και τη πληρότητα της εργασίας.

Αντιμετωπίζοντας τη δεύτερη πρόκληση, η κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με την πλοήγηση των ρομπότ αποτελεί ιστορικά έναν περιοριστικό παράγοντα, ιδίως σε επιχειρήσεις μεγάλης κλίμακας ή παρατεταμένης διάρκειας. Οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης, ενώ είναι αποτελεσματικοί στην επίτευξη κάλυψης, συχνά παραμελούν την κρίσιμη πτυχή της ενεργειακής βελτιστοποίησης. Βάζοντας τα ρομπότ να διανύουν διαδρομές με περισσότερες στροφές και αναστροφές, ή να επαναλαμβάνουν μέρος της διαδρομής τους, οι ενεργειακοί πόροι εξαντλούνται γρήγορα, οδηγώντας σε διακοπές, ατελείς αποστολές ή την ανάγκη για συχνή επαναφόρτιση. Στην παρούσα διατριβή, παρουσιάζεται μια πρωτοποριακή προσέγγιση, η οποία εστιάζει στη βελτιστοποίηση της περιοχής με γνώμονα την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Βελτιστοποιώντας τις περιοχές ώστε να περιλαμβάνουν λιγότερες στροφές σε προβλήματα πολλαπλών ρομπότ, ελαχιστοποιούνται οι ενεργειακές δαπάνες χωρίς να υπάρχουν συμβιβασμοί στην ποιότητα της κάλυψης. Αυτή η βελτιωμένη ενεργειακή προσέγγιση επιτρέπει στα ρομπότ να καλύπτουν μεγαλύτερες περιοχές με λιγότερες διακοπές, ενώ μπορεί να φανεί ιδιαίτερα σημαντική σε καταστάσεις όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες ή είναι περιορισμένες οι πηγές ενέργειας.

Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε στη παρούσα διατριβή, κατέστη προφανές ότι ο κόσμος της ρομποτικής και της πλοήγησης είναι τεράστιος, με διαφορετικούς αλγόριθμους που καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες. Ο ΣΔΚ, όπως διερευνήθηκε, μπορεί να ταξινομηθεί κατά βάση σε **online** και **offline** αλγόριθμους.

Οι **online** αλγόριθμοι, και πιο συγκεκριμένα αλγόριθμοι τύπου SLAM, προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν στα ρομπότ να πλοηγηθούν και να

χαρτογραφήσουν το επιχειρησιακό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε δυναμικά ή άγνωστα περιβάλλοντα, όπου μπορεί να μην υπάρχουν διαθέσιμοι προϋπάρχοντες χάρτες πλοήγησης. Ωστόσο, αυτοί οι αλγόριθμοι απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ, γεγονός που τους καθιστά λιγότερο αποδοτικούς σε σενάρια όπου το περιβάλλον είναι γνωστό και αμετάβλητο. Το μεγαλύτερο τους μειονέκτημα, ωστόσο, είναι ότι αδυνατούν να εγγυηθούν ότι η τελική διαδρομή κάλυψης χώρου που θα υπολογίσουν θα είναι **πλήρης και αποτελεσματική**. Αυτοί οι περιορισμοί που γίνονται εμφανής στους online αλγορίθμους, όπως αναφέρθηκε αναλυτικότερα στην ενότητα 1.3.2, είναι καίριας σημασίας. Επομένως, γίνεται κατανοητό πως αυτοί οι αλγόριθμοι πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά βάση σε επιχειρήσεις ΣΔΚ όπου η εκ των προτέρων γνώση του περιβάλλοντος δεν είναι διαθέσιμη, και μια οποιαδήποτε λύση ΣΔΚ (που ενδεχομένως να περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες διαδρομές και παράλειψη κάλυψης ορισμένων σημείων) είναι καλύτερη από τη μη ύπαρξης λύσης. Τέτοιου τύπου αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης σε προβλήματα ΣΔΚ πραγματικού κόσμου όπου η ταχύτητα της κάλυψης του χώρου από τα ρομπότ δεν είναι κρίσιμος παράγοντας, όπως για παράδειγμα μια ρομποτική σκούπα που καθαρίζει το πάτωμα ενός σπιτιού. Σε αυτή τη περίπτωση, η καθυστέρηση της συνολικής κάλυψης του χώρου κατά μερικά λεπτά δεν θα παίζει καθοριστικό ρόλο.

Από την άλλη πλευρά, οι **offline** αλγόριθμοι προϋποθέτουν την εκ των προτέρων γνώση του περιβάλλοντος και όλων των χαρακτηριστικών του, όπως για παράδειγμα τα προσπελάσιμα σημεία, το πλήθος και τις τοποθεσίες των εμποδίων, τις ανωμαλίες του εδάφους και τα υψομετρικά του χαρακτηριστικά. Οι offline αλγόριθμοι δεν συνεπάγονται απαραίτητα ένα στατικό περιβάλλον που δεν αλλάζει-απαιτούν όμως τη γνώση της κατάστασης του με ντετερμινιστικό τρόπο κάθε χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, μπορεί σε ένα πρόβλημα πλοήγησης ή ΣΔΚ να υπάρχουν κινούμενα εμπόδια, όπως για παράδειγμα μια πόρτα που ενώνει δύο δωμάτια σε μια αποθήκη που ή οποία ανοιγοκλείνει κάθε μερικά λεπτά. Ένας αλγόριθμος που έχει προγραμματιστεί ενσωματώνοντας την έννοια του χρόνου, και γνωρίζει τις ταχύτητες των εκάστοτε ρομπότ, θα μπορούσε δυνητικά να προβλέψει την κατάσταση της πόρτας σε κάθε μελλοντική χρονική στιγμή και να υπολογίσει το κατάλληλο δρομολόγιο κάλυψης χώρου. Έτσι, το ρομπότ που θα εκτελεί «τυφλά» το δρομολόγιο, θα μπορέσει να περάσει μέσα από την πόρτα την πόρτα και να μεταβεί

από το ένα δωμάτιο στο άλλο. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, έχει υλοποιηθεί ένας αλγόριθμος ανάθεσης εργασιών για αυτόνομα επίγεια οχήματα (UGVs) σε μοντέρνες αποθήκες που λειτουργεί με αυτό τον τρόπο. Τα πειραματικά αποτελέσματα που διεξήχθησαν σε προσομοιώσεις πραγματικών αποθηκών, δείχνουν ότι μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να λειτουργήσει και να επιφέρει βελτίωση στην αποδοτικότητα της αποθήκης.

Στη συνέχεια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, βρέθηκε πως οι offline αλγόριθμοι χωρίζονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες: την κυτταρική αποσύνθεση, τους γεωμετρικούς αλγορίθμους και τους αλγορίθμους βασισμένους σε πλέγμα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε προβλήματος ΣΔΚ, πρέπει να χρησιμοποιηθεί και ο αντίστοιχος τύπος αλγορίθμου. Το σχήμα του ρομπότ και η δυνατότητα του να κάνει στροφές και ελιγμούς μέσα στο χώρο, καθώς και η μορφολογία του περιβάλλοντος παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του βέλτιστου αλγορίθμου. Σε περιπτώσεις που το ρομπότ έχει σχήμα ρόμβου ή κύκλου (όπως συμβαίνει συχνά με τα ρομπότ σκούπες), η κυτταρική αποσύνθεση του χώρου σε πολύγωνα ενδέχεται να μπορεί να παρέχει πιο αποδοτικές λύσεις στο πρόβλημα του ΣΔΚ. Ενώ αντίστοιχα σε περιπτώσεις όπου το έδαφος είναι τετραγωνισμένο, όπως για παράδειγμα σε ένα χωράφι, η αναπαράσταση του χώρου σε μορφή πλέγματος μπορεί να είναι πιο αποδοτική. Τέλος, οι γεωμετρικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται συνήθως σε προβλήματα όπου η απλότητα και η ταχύτητα του υπολογισμού της διαδρομής κάλυψης έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα από την ποιότητα της λύσης.

Η έμφαση της παρούσας διατριβής είναι οι αλγόριθμοι που αναπαριστούν το περιβάλλον σε μορφή πλέγματος. Παρόλο που η αναπαράσταση αυτή δεν είναι η πιο αποδοτική για όλα τα προβλήματα και όλους τους χώρους, έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα: επιτρέπει την ενσωμάτωση επιπλέον στοιχείων που χαρακτηρίζουν το περιβάλλον, όπως το υψόμετρο και ο τύπος εδάφους. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα για καλύτερη και πιο ρεαλιστική αναπαράσταση του χώρου. Τετραγωνισμένα περιβάλλοντα που μπορούν να αναπαρασταθούν σε μορφή πλέγματος, όπως χωράφια ή ορισμένες αποθήκες, μπορούν να επωφελούνται από έναν καλύτερο και πολλές φορές πιο αποδοτικό ΣΔΚ, χωρίς να εκτοξεύεται το υπολογιστικό κόστος.

5.2 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

5.2.1 Διαμοιρασμός της περιοχής στα ρομπότ

Η πρώτη συνεισφορά της παρούσας διατριβής είναι η εφαρμογή του αλγορίθμου ομαδοποίησης Affinity Propagation (AP) για τον διαμοιρασμό της περιοχής στο πρόβλημα το ΣΔΚ χώρου πολλαπλών ρομπότ. Παραδοσιακά, ο διαμοιρασμός της περιοχής στα επιμέρους ρομπότ για την ταυτόχρονη πλοήγηση τους αποτελούσε μια διαρκή πρόκληση στη ρομποτική. Η πρόκληση αυτή γίνεται ακόμη μεγαλύτερη όταν εξετάζουμε ετερογενή εδάφη, όπου το καθένα έχει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Αναγνωρίζοντας τη σημασία αυτής της πρόκλησης, η διατριβή εισάγει μια νέα προσέγγιση ενσωματώνοντας κρίσιμες περιβαλλοντικές παραμέτρους - συγκεκριμένα, το υψόμετρο και τον τύπο του δαπέδου - απευθείας στη διαδικασία ομαδοποίησης, διασφαλίζοντας ότι οι υποπεριοχές που δημιουργούνται είναι όχι μόνο συνεχείς, αλλά και προσαρμοσμένες για πιο αποδοτική διέλευση.

Στις συμβατικές μεθόδους διαμοιρασμού περιοχής, συχνά επιλέγεται «τυχαία» το πλήθος των ρομπότ που θα χρησιμοποιηθούν για τη πλήρη κάλυψη του χώρου. Αυτή η αυθαίρετη επιλογή συνήθως δεν ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα, ειδικά σε μεγαλύτερα και πιο σύνθετα περιβάλλοντα. Αξιοποιώντας ωστόσο τις εγγενείς δυνατότητες του αλγορίθμου AP, η αυθαίρετη και τυχαία επιλογή του πλήθους των ρομπότ και των υποπεριοχών μπορεί να παραληφθεί. Η χρήση του AP στο πρόβλημα ΣΔΚ επιτρέπει τον δυναμικό υπολογισμό των υποπεριοχών, και συνεπώς και του πλήθους των ρομπότ, διασφαλίζοντας έτσι ότι τα ρομπότ δεν θα «υποαπασχοληθούν» ούτε θα «υπεραπασχοληθούν» προκειμένου να φέρουν εις πέρας το πρόβλημα κάλυψης χώρου. Αυτό που καθιστά την εφαρμογή του AP σημαντική, είναι η προσαρμοστικότητα που προσφέρει. Αντί η διαίρεση του χώρου να βασίζεται σε γενικές διαιρέσεις (βάσει μόνο του πλήθους των κελιών που ανατίθενται σε κάθε ρομπότ) ο αλγόριθμος διακρίνει τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, όπως το υψόμετρο ή διαφορετικά υλικά εδάφους, και προσαρμόζει τις διαιρούμενες υποπεριοχές αναλόγως.

Για παράδειγμα, μια περιοχή με σύνθετα εδάφη (που περιλαμβάνουν πολλαπλούς τύπους εδάφους) θα απαιτούσε διαφορετική προσέγγιση σε σύγκριση με μια επίπεδη, ομοιόμορφη περιοχή. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα στοιχεία, ο

διαμοιρασμός της περιοχής στα ρομπότ με βάση τον AP διασφαλίζει ότι τα ρομπότ ανατίθενται σε περιοχές που ταιριάζουν καλύτερα στις δυνατότητές τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αποτελεσματικότερη κάλυψη, μειώνει τις πιθανότητες πλεονασμού ή επικάλυψης ρομπότ και εξασφαλίζει μια πιο απλοποιημένη και ενεργειακά αποδοτική διαδικασία κάλυψης. Η παρούσα διατριβή αποτελεί απόδειξη της αρμονικής ένωσης των προηγμένων αλγορίθμων ομαδοποίησης (όπως ο AP), με τις ρεαλιστικές ανάγκες της ρομποτικής πλοήγησης, ανοίγοντας το δρόμο για πιο έξυπνα, ευέλικτα και αποδοτικά συστήματα πολλαπλών ρομπότ στο μέλλον.

5.2.2 Βελτιστοποίηση των περιοχών για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας

Η δεύτερη συνεισφορά αυτής της διατριβής είναι η μεθοδική βελτιστοποίηση των υποπεριοχών των ρομπότ με στόχο την ελαχιστοποίηση του αριθμού των στροφών στις διαδρομές τους. Το σκεπτικό πίσω από αυτή τη διαδικασία είναι σαφές: κάθε στροφή που πραγματοποιεί ένα ρομπότ δεν συνεπάγεται μόνο μια μηχανική ενέργεια, αλλά μεταφράζεται και σε κατανάλωση ενέργειας. Με την πάροδο του χρόνου, ειδικότερα σε καταστάσεις πολλαπλών ρομπότ, αυτές οι στροφές μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική κατανάλωση ενέργειας, περιορίζοντας δυνητικά τον χρόνο λειτουργίας και την αποδοτικότητα των ρομπότ.

Κατανοώντας την επιτακτική ανάγκη της ενεργειακής απόδοσης, ιδίως σε μακροχρόνιες επιχειρήσεις κάλυψης χώρου, η παρούσα διατριβή παρουσιάζει μια καινοτόμα στρατηγική για τη βελτίωση των διαδρομών των ρομπότ εντός των καθορισμένων υποπεριοχών τους. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ΣΔΚ συχνά δεν συνυπολογίζουν τις ενεργειακές επιπτώσεις των αλλαγών κατεύθυνσης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδοτικές διαδρομές με συχνές στροφές και ζιγκ-ζαγκ.

Αντίθετα, η προσέγγιση που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή προσπαθεί ενεργά να δώσει λύση σε αυτό το πρόβλημα. Αντί να αντιμετωπίζει το πρόβλημα εύρεσης διαδρομής ως ένα πρόβλημα που αφορά απλώς την απόσταση, αυτή η προσέγγιση ενσωματώνει το κόστος των στροφών στην εξίσωση. Αυτή η διπλή εξέταση τόσο της απόστασης όσο και της συχνότητας στροφών εξασφαλίζει διαδρομές που δεν είναι απλώς σύντομες, αλλά και ομαλές και με λιγότερες ενεργειακές απώλειες.

Μια τέτοια στρατηγική καθίσταται ζωτικής σημασίας σε περιβάλλοντα όπου η εξοικονόμηση ενέργειας είναι υψίστης σημασίας. Όσο λιγότερες στροφές πρέπει να

κάνει ένα ρομπότ, τόσο περισσότερη ενέργεια εξοικονομεί, παρατείνοντας έτσι τη λειτουργική του διάρκεια ζωής και μειώνοντας την ανάγκη για συχνές επαναφορτίσεις ή ανεφοδιασμό με καύσιμα. Δεν πρόκειται μόνο για τη φυσική εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και για την ενίσχυση της λειτουργικής αποδοτικότητας: λιγότερες στροφές σημαίνουν επίσης μειωμένη φθορά, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερους κύκλους συντήρησης και αυξημένη διάρκεια ζωής του ρομπότ.

Η ενσωμάτωση αυτής της λογικής μείωσης των στροφών στους αλγόριθμους πλοήγησης οδηγεί σε ομαλότερες, πιο άμεσες διαδρομές που όχι μόνο εξασφαλίζουν ολοκληρωμένη κάλυψη, αλλά το κάνουν με τρόπο που εξοικονομεί ενέργεια. Πρόκειται για μια απόδειξη του απρόσκοπτου συνδυασμού της αλγοριθμικής φινέτσας με τις ρεαλιστικές επιχειρησιακές ανάγκες, διασφαλίζοντας ότι το μέλλον των συστημάτων πολλαπλών ρομπότ δεν θα είναι μόνο έξυπνο αλλά και βιώσιμο.

5.2.3 Απάντηση των ερευνητικών ερωτημάτων που τέθηκαν στην εισαγωγή

1. Ποιες είναι οι ιδιαιτερότητες της πλοήγησης των ρομπότ και γιατί σχεδιασμός διαδρομής κάλυψης αναδεικνύεται ως κεντρική στρατηγική;

Η πλοήγηση ρομπότ είναι διαδικασία κατά την οποία ένα ρομπότ αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του με σκοπό να κινηθεί από ένα σημείο εκκίνησης σε μια θέση-στόχο. Περιλαμβάνει διάφορες διαδικασίες, όπως η αποφυγή εμποδίων, ο εντοπισμός, η χαρτογράφηση και η λήψη αποφάσεων, διασφαλίζοντας ότι το ρομπότ κινείται με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Μεταξύ των αμέτρητων προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται στην πλοήγηση των ρομπότ, ο ΣΔΚ αναδεικνύεται ως μια από τις βασικότερες. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι, σε αντίθεση με την απλή πλοήγηση από σημείο σε σημείο, ο ΣΔΚ αποσκοπεί στο να επισκεφθεί το ρομπότ κάθε σημείο σε έναν καθορισμένο χώρο ή περιοχή, εξασφαλίζοντας πλήρη και ενδεδειγμένη κάλυψη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μια πληθώρα εφαρμογών, από απλά ρομπότ καθαρισμού, μέχρι ρομπότ που χρησιμοποιούνται σε επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης σε πληγείσες περιοχές, όπου η παράλειψη ενός σημείου θα μπορούσε να έχει πολύ σοβαρές επιπτώσεις.

2. Ποιες είναι οι εγγενείς προκλήσεις και οι περιορισμοί των υφιστάμενων αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής κάλυψης σε διαφορετικά και σύνθετα περιβάλλοντα;

Οι υπάρχοντες αλγόριθμοι ΣΔΚ έχουν σημειώσει αξιοσημείωτες επιτυχίες, ωστόσο αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις, ειδικά όταν εφαρμόζονται σε σύνθετα και μεγάλα περιβάλλοντα. Συχνά, οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι προϋποθέτουν στατικά, γνωστά περιβάλλοντα, τα οποία δεν αντικατοπτρίζουν πάντα τις συνθήκες του πραγματικού κόσμου. Οι εγγενείς πολυπλοκότητες, όπως τα μεταβαλλόμενα εδάφη, τα απρόβλεπτα εμπόδια και οι μεταβολές στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως το υψόμετρο και ο τύπος του εδάφους, μπορούν να εμποδίσουν αυτούς τους αλγορίθμους από το να βρουν μια ικανοποιητική λύση. Επιπλέον, πολλοί αλγόριθμοι λειτουργούν υπό την προϋπόθεση ενός ιδανικού σεναρίου και μπορεί να μην λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς του υλικού των ρομπότ, τους ενεργειακούς περιορισμούς ή τις διαφοροποιήσεις του συντονισμού πολλαπλών ρομπότ. Σε περιβάλλοντα με ακανόνιστα σχήματα, πολυάριθμα εμπόδια ή ποικίλα εδάφη, η εξασφάλιση ολοκληρωμένης κάλυψης χωρίς πλεονασμούς γίνεται δύσκολο έργο για πολλούς υπάρχοντες αλγορίθμους.

3. Μπορούν νέες καινοτόμες στρατηγικές και βελτιώσεις των αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομών κάλυψης να παρέχουν πιο ισχυρές λύσεις σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών;

Η παρούσα διατριβή επιβεβαιώνει ότι οι καινοτόμες στρατηγικές και οι βελτιώσεις των υφιστάμενων αλγορίθμων ΣΔΚ μπορούν πράγματι να προσφέρουν πιο ευέλικτες λύσεις σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών. Με την ενσωμάτωση της δυναμικής προσαρμοστικότητας, την εξέταση των περιορισμών του πραγματικού κόσμου και την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνικών διαχωρισμού του χώρου, τα ρομπότ μπορούν να επιτύχουν καλύτερη κάλυψη σε σύνθετα περιβάλλοντα. Για παράδειγμα, με τη μείωση των περιττών στροφών, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά, και με την έξυπνη διαίρεση περιοχών με βάση τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, τα ρομπότ μπορούν να εργάζονται παράλληλα χωρίς πλεονασμούς. Μέσα από τη διερεύνηση τέτοιων στρατηγικών, γίνεται φανερό ότι το μέλλον του ΣΔΚ βασίζεται σε αλγορίθμους που δεν είναι απλώς αποδοτικοί, αλλά είναι επίσης προσαρμόσιμοι, ευέλικτοι, και λαμβάνουν υπόψη τους την πολυπλοκότητα των πραγματικών συνθηκών.

5.3 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Συμπερασματικά, τα ερευνητικά ερωτήματα που διατυπώθηκαν στην αρχή της παρούσας διατριβής εξετάστηκαν αποτελεσματικά. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των υφιστάμενων αλγορίθμων και μεθόδων που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ρομποτικής πλοήγησης και ειδικότερα στο ΣΔΚ. Διαπιστώθηκε πως οι διάφοροι αλγόριθμοι ΣΔΚ που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, παρουσιάζουν ποικίλα οφέλη ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε προβλήματος πλοήγησης στο οποίο εφαρμόζονται. Αξιοποιώντας αυτούς τους αλγορίθμους, εμβαθύνουμε σε δύο πρωταρχικές προκλήσεις της σύγχρονης ρομποτικής: διαχωρισμό της περιοχής για τον ΣΔΚ πολλαπλών ρομπότ, και βελτιστοποίηση των διαδρομών των ρομπότ για εξοικονόμηση ενέργειας. Τα ευρήματα είναι εξαιρετικά ελπιδοφόρα, καταδεικνύοντας ότι η χρήση προηγμένων αλγορίθμων, όπως ο AP, όχι μόνο ενισχύει την αποδοτικότητα των συστημάτων πολλαπλών ρομπότ αλλά μπορεί να βελτιώσει και την κατανάλωση ενέργειας. Στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης διαδρομής, η μείωση του αριθμού των στροφών μεταφράζεται σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, παρατείνοντας έτσι τη λειτουργική διάρκεια ζωής και ενισχύοντας τη συνολική αποτελεσματικότητα των ρομποτικών λειτουργιών. Στη σημερινή εποχή, όπου η αυτοματοποίηση και η αποδοτικότητα των συστημάτων είναι υψίστης σημασίας, η παρούσα διατριβή επauξάνει το υπάρχον σώμα γνώσεων συνδέοντας εξελιγμένους αλγορίθμους με ρεαλιστικές ρομποτικές ανάγκες.

Βιβλιογραφία

- [1] Θ. Μάνιας, *Τα Άγνωστα Μεγαλουργήματα των Αρχαίων Ελλήνων*. Πύρινος Κόσμος, 1961.
- [2] Α. Ήρωνος, *Ονόματα Γεωμετρικών Όρων*. Ελληνική Μαθηματική Εταιρεία, 1995.
- [3] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, and R. Suman, “Substantial Capabilities of Robotics in Enhancing Industry 4.0 Implementation,” *Cognitive Robotics*, vol. 1, pp. 58–75, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.cogr.2021.06.001.
- [4] N. G. Hockstein, C. G. Gourin, R. A. Faust, and D. J. Terris, “A History of Robots: From Science Fiction to Surgical Robotics,” *J Robotic Surg*, vol. 1, no. 2, pp. 113–118, Jul. 2007, doi: 10.1007/s11701-007-0021-2.
- [5] S. M. Hazarika and U. S. Dixit, “Robotics: History, Trends, and Future Directions,” in *Introduction to Mechanical Engineering*, J. P. Davim, Ed., in Materials Forming, Machining and Tribology. , Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 213–239. doi: 10.1007/978-3-319-78488-5_7.
- [6] A. Gasparetto, “Robots in History: Legends and Prototypes from Ancient Times to the Industrial Revolution,” in *Explorations in the History of Machines and Mechanisms*, C. López-Cajún and M. Ceccarelli, Eds., in History of Mechanism and Machine Science. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 39–49. doi: 10.1007/978-3-319-31184-5_5.
- [7] M. Dirik, “Al-Jazari: The Ingenious Inventor of Cybernetics and Robotics,” *JSCAI*, vol. 1, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2020.
- [8] K. Dharma, *Mahabharata: The Greatest Spiritual Epic of All Time*. Simon and Schuster, 2020.
- [9] D. Martins, *Mula - Ramayana: The Original Ramayan*, 2015th edition. Jiva Institute, Vrindavan, 2015.
- [10] E. R. Truitt, *Medieval Robots: Mechanism, Magic, Nature, and Art*. University of Pennsylvania Press, 2015.
- [11] K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos, and P. J. Antsaklis, “Technology and Autonomous Mechanisms in the Mediterranean: From Ancient Greece to Byzantium,” in *2007 European Control Conference (ECC)*, Jul. 2007, pp. 263–270. doi: 10.23919/ECC.2007.7068808.
- [12] C. Iavazzo, X.-E. D. Gkegke, P.-E. Iavazzo, and I. D. Gkegkes, “Evolution of Robots Throughout History From Hephaestus to Da Vinci Robot,” *Acta medico-historica Adriatica : AMHA*, vol. 12, no. 2, Art. no. 2, 2014.
- [13] J. Wallén, *The History of the Industrial Robot*. Linköping University Electronic Press, 2008.
- [14] A. Gasparetto and L. Scalera, “A Brief History of Industrial Robotics in the 20th Century,” *Advances in Historical Studies*, vol. 8, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2019, doi: 10.4236/ahs.2019.81002.
- [15] J.-P. Merlet, “A Historical Perspective of Robotics,” in *International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings HMM 2000*, M. Ceccarelli, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 2000, pp. 379–386. doi: 10.1007/978-94-015-9554-4_43.
- [16] R. A. Brooks, “New Approaches to Robotics,” *American Association for the Advancement of Science*, vol. 253, no. 5025, pp. 1227–1232, 1991.

- [17] R. A. Brooks, “A Robot That Walks; Emergent Behaviors From a Carefully Evolved Network,” *Neural Computation*, vol. 1, no. 2, pp. 253–262, Jun. 1989, doi: 10.1162/neco.1989.1.2.253.
- [18] M. Minsky, *Society Of Mind*. Simon and Schuster, 1988.
- [19] H. Moravec, *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence*. Harvard University Press, 1988.
- [20] M. Minsky, “Steps Toward Artificial Intelligence,” *Proceedings of the IRE*, vol. 49, no. 1, pp. 8–30, Jan. 1961, doi: 10.1109/JRPROC.1961.287775.
- [21] J. Goetz, S. Kiesler, and A. Powers, “Matching Robot Appearance and Behavior to Tasks to Improve Human-Robot Cooperation,” in *The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003.*, Nov. 2003, pp. 55–60. doi: 10.1109/ROMAN.2003.1251796.
- [22] N. Pedrocchi, F. Vicentini, M. Matteo, and L. M. Tosatti, “Safe Human-Robot Cooperation in an Industrial Environment,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 1, p. 27, Jan. 2013, doi: 10.5772/53939.
- [23] H. Ben Amor, G. Neumann, S. Kamthe, O. Kroemer, and J. Peters, “Interaction Primitives for Human-Robot Cooperation Tasks,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2014, pp. 2831–2837. doi: 10.1109/ICRA.2014.6907265.
- [24] O. C. Schrempf, U. D. Hanebeck, A. J. Schmid, and H. Worn, “A Novel Approach to Proactive Human-Robot Cooperation,” in *ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005.*, Aug. 2005, pp. 555–560. doi: 10.1109/ROMAN.2005.1513838.
- [25] J. Angeles, Ed., “Kinetostatics of Simple Robotic Manipulators,” in *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms*, in Mechanical Engineering Series. , New York, NY: Springer, 2003, pp. 105–188. doi: 10.1007/978-0-387-22458-9_4.
- [26] G. A. Bekey and K. Y. Goldberg, *Neural Networks in Robotics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [27] W. Wang and K. Siau, “Artificial Intelligence, Machine Learning, Automation, Robotics, Future of Work and Future of Humanity: A Review and Research Agenda,” *JDM*, vol. 30, no. 1, pp. 61–79, Jan. 2019, doi: 10.4018/JDM.2019010104.
- [28] M. Kyrarini *et al.*, “A Survey of Robots in Healthcare,” *Technologies*, vol. 9, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2021, doi: 10.3390/technologies9010008.
- [29] Z. H. Khan, A. Siddique, and C. W. Lee, “Robotics Utilization for Healthcare Digitization in Global COVID-19 Management,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 11, Art. no. 11, Jan. 2020, doi: 10.3390/ijerph17113819.
- [30] S. Cosentino, E. I. S. Randria, J.-Y. Lin, T. Pellegrini, S. Sessa, and A. Takanishi, “Group Emotion Recognition Strategies for Entertainment Robots,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Oct. 2018, pp. 813–818. doi: 10.1109/IROS.2018.8593503.
- [31] E. Jochum, P. Millar, and D. Nuñez, “Sequence and Chance: Design and Control Methods for Entertainment Robots,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 87, pp. 372–380, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.robot.2016.08.019.

- [32] Y. Liu, E. Anderlini, S. Wang, S. Ma, and Z. Ding, “Ocean Explorations Using Autonomy: Technologies, Strategies and Applications,” in *Offshore Robotics*, S.-F. Su and N. Wang, Eds., in Offshore Robotics. Singapore: Springer, 2022, pp. 35–58. doi: 10.1007/978-981-16-2078-2_2.
- [33] Y. Gao and S. Chien, “Review on Space Robotics: Toward Top-Level Science Through Space Exploration,” *Science Robotics*, vol. 2, no. 7, p. eaan5074, Jun. 2017, doi: 10.1126/scirobotics.aan5074.
- [34] I. A. D. Nesnas, L. M. Fesq, and R. A. Volpe, “Autonomy for Space Robots: Past, Present, and Future,” *Curr Robot Rep*, vol. 2, no. 3, pp. 251–263, Sep. 2021, doi: 10.1007/s43154-021-00057-2.
- [35] G. Angelopoulos, N. Baras, and M. Dasygenis, “Secure Autonomous Cloud Brained Humanoid Robot Assisting Rescuers in Hazardous Environments,” *Electronics*, vol. 10, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2021, doi: 10.3390/electronics10020124.
- [36] J. Trevelyan, W. R. Hamel, and S.-C. Kang, “Robotics in Hazardous Applications,” in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds., in Springer Handbooks. , Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 1521–1548. doi: 10.1007/978-3-319-32552-1_58.
- [37] G. A. Bekey *et al.*, *Robotics: State Of The Art And Future Challenges*. World Scientific, 2008.
- [38] Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, and J. Norrish, “Recent Progress on Programming Methods for Industrial Robots,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 2, pp. 87–94, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.rcim.2011.08.004.
- [39] M. Hägele, K. Nilsson, J. N. Pires, and R. Bischoff, “Industrial Robotics,” in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds., in Springer Handbooks. , Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 1385–1422. doi: 10.1007/978-3-319-32552-1_54.
- [40] Ł. Sobaszek and A. Gola, “Perspective and Methods of Human-Industrial Robots Cooperation,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 791, pp. 178–183, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.791.178.
- [41] C. S. Franklin, E. G. Dominguez, J. D. Fryman, and M. L. Lewandowski, “Collaborative Robotics: New Era of Human–Robot Cooperation in the Workplace,” *Journal of Safety Research*, vol. 74, pp. 153–160, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jsr.2020.06.013.
- [42] R. R. Galin and R. V. Meshcheryakov, “Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration,” in *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms*, A. G. Kravets, Ed., in Studies in Systems, Decision and Control. , Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 55–63. doi: 10.1007/978-3-030-37841-7_5.
- [43] J. Arents and M. Greitans, “Smart Industrial Robot Control Trends, Challenges and Opportunities within Manufacturing,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, Art. no. 2, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12020937.
- [44] M. E. Moran, “Evolution of Robotic Arms,” *J Robotic Surg*, vol. 1, no. 2, pp. 103–111, Jul. 2007, doi: 10.1007/s11701-006-0002-x.
- [45] G. Nantzios, N. Baras, and M. Dasygenis, “Design and Implementation of a Robotic Arm Assistant with Voice Interaction Using Machine Vision,” *Automation*, vol. 2, no. 4, Art. no. 4, Dec. 2021, doi: 10.3390/automation2040015.

- [46] M. Keller, G. Baum, M. Schweizer, F. Bürger, U. Gommel, and T. Bauernhansl, “Optimized Robot Systems for Future Aseptic Personalized Mass Production,” *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 303–309, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.066.
- [47] A. Cherubini, R. Passama, A. Crosnier, A. Lasnier, and P. Fraisse, “Collaborative Manufacturing with Physical Human–Robot Interaction,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 40, pp. 1–13, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.rcim.2015.12.007.
- [48] S. Ruggeri, G. Fontana, V. Basile, M. Valori, and I. Fassi, “Micro-Robotic Handling Solutions for PCB (re-)Manufacturing,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 441–448, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.132.
- [49] D. B. Camarillo, T. M. Krummel, and J. K. Salisbury, “Robotic Technology in Surgery: Past, Present, and Future,” *The American Journal of Surgery*, vol. 188, no. 4, Supplement 1, pp. 2–15, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.amjsurg.2004.08.025.
- [50] A. Hussain, A. Malik, M. U. Halim, and A. M. Ali, “The Use of Robotics in Surgery: A Review,” *International Journal of Clinical Practice*, vol. 68, no. 11, pp. 1376–1382, 2014, doi: 10.1111/ijcp.12492.
- [51] B. S. Peters, P. R. Armijo, C. Krause, S. A. Choudhury, and D. Oleynikov, “Review of Emerging Surgical Robotic Technology,” *Surg Endosc*, vol. 32, no. 4, pp. 1636–1655, Apr. 2018, doi: 10.1007/s00464-018-6079-2.
- [52] C. Lytridis *et al.*, “An Overview of Cooperative Robotics in Agriculture,” *Agronomy*, vol. 11, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2021, doi: 10.3390/agronomy11091818.
- [53] L. F. P. Oliveira, A. P. Moreira, and M. F. Silva, “Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead,” *Robotics*, vol. 10, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2021, doi: 10.3390/robotics10020052.
- [54] A. Rejeb, A. Abdollahi, K. Rejeb, and H. Treiblmaier, “Drones in Agriculture: A Review and Bibliometric Analysis,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 198, p. 107017, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.107017.
- [55] M. Johnson-Roberson *et al.*, “High-Resolution Underwater Robotic Vision-Based Mapping and Three-Dimensional Reconstruction for Archaeology,” *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 625–643, 2017, doi: 10.1002/rob.21658.
- [56] E. Lakdawalla, *The Design and Engineering of Curiosity*. Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-68146-7.
- [57] F. Gul, W. Rahiman, and S. S. Nazli Alhady, “A Comprehensive Study for Robot Navigation Techniques,” *Cogent Engineering*, vol. 6, no. 1, p. 1632046, Jan. 2019, doi: 10.1080/23311916.2019.1632046.
- [58] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, and D. Wehe, “Mobile Robot Positioning: Sensors and Techniques,” *Journal of Robotic Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 231–249, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1097-4563(199704)14:4<231::AID-ROB2>3.0.CO;2-R.
- [59] H. Taheri and Z. C. Xia, “Slam; Definition and Evolution,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 97, p. 104032, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.engappai.2020.104032.
- [60] E. Galceran and M. Carreras, “A Survey on Coverage Path Planning for Robotics,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, no. 12, pp. 1258–1276, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.robot.2013.09.004.

- [61] T. M. Cabreira, L. B. Brisolara, and P. R. Ferreira Jr., “Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles,” *Drones*, vol. 3, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2019, doi: 10.3390/drones3010004.
- [62] T. Oksanen and A. Visala, “Coverage Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines,” *Journal of Field Robotics*, vol. 26, no. 8, pp. 651–668, 2009, doi: 10.1002/rob.20300.
- [63] Z. L. Cao, Y. Huang, and E. L. Hall, “Region Filling Operations With Random Obstacle Avoidance for Mobile Robots,” *Journal of Robotic Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 87–102, 1988, doi: 10.1002/rob.4620050202.
- [64] G. Gutin and A. P. Punnen, *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [65] M. Jünger, G. Reinelt, and G. Rinaldi, “Chapter 4 the Traveling Salesman Problem,” in *Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 7, in Network Models, vol. 7. , Elsevier, 1995, pp. 225–330. doi: 10.1016/S0927-0507(05)80121-5.
- [66] E. M. Arkin and R. Hassin, “Approximation Algorithms for the Geometric Covering Salesman Problem,” *Discrete Applied Mathematics*, vol. 55, no. 3, pp. 197–218, Dec. 1994, doi: 10.1016/0166-218X(94)90008-6.
- [67] E. M. Arkin, S. P. Fekete, and J. S. B. Mitchell, “Approximation Algorithms for Lawn Mowing and Milling,” *Computational Geometry*, vol. 17, no. 1, pp. 25–50, Oct. 2000, doi: 10.1016/S0925-7721(00)00015-8.
- [68] B. Donald, K. Lynch, and D. Rus, *Algorithmic and Computational Robotics: New Directions 2000 WAFR*. CRC Press, 2001.
- [69] S. M. LaValle, *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006.
- [70] T. C. Shermer, “Recent Results in Art Galleries (Geometry),” *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 9, pp. 1384–1399, Sep. 1992, doi: 10.1109/5.163407.
- [71] F. Li and R. Klette, “An Approximate Algorithm for Solving the Watchman Route Problem,” in *Robot Vision*, G. Sommer and R. Klette, Eds., in Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, pp. 189–206. doi: 10.1007/978-3-540-78157-8_15.
- [72] W.-P. Chin and S. Ntafos, “Shortest Watchman Routes in Simple Polygons,” *Discrete Comput Geom*, vol. 6, no. 1, pp. 9–31, Mar. 1991, doi: 10.1007/BF02574671.
- [73] 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,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 59, no. 10, pp. 801–812, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.robot.2011.06.002.
- [74] H. Choset, “Coverage for Robotics – A Survey of Recent Results,” *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, vol. 31, no. 1, pp. 113–126, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1016639210559.
- [75] N. Baras, G. Nantzios, D. Ziouzos, and M. Dasygenis, “Autonomous Obstacle Avoidance Vehicle Using LIDAR and an Embedded System,” in *2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*, May 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/MOCAST.2019.8742065.
- [76] E. U. Acar, H. Choset, A. A. Rizzi, P. N. Atkar, and D. Hull, “Morse Decompositions for Coverage Tasks,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 4, pp. 331–344, Apr. 2002, doi: 10.1177/027836402320556359.

- [77] V. J. Lumelsky, S. Mukhopadhyay, and K. Sun, "Dynamic Path Planning in Sensor-Based Terrain Acquisition," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 4, pp. 462–472, Aug. 1990, doi: 10.1109/70.59357.
- [78] H. Choset and P. Pignon, "Coverage Path Planning: The Boustrophedon Cellular Decomposition," in *Field and Service Robotics*, A. Zelinsky, Ed., London: Springer, 1998, pp. 203–209. doi: 10.1007/978-1-4471-1273-0_32.
- [79] H. Choset, K. M. Lynch, S. Hutchinson, G. A. Kantor, and W. Burgard, *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*. MIT Press, 2005.
- [80] J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, 1991 edition. Kluwer Academic, 1991.
- [81] H. Choset, E. Acar, A. A. Rizzi, and J. Luntz, "Exact Cellular Decompositions in Terms of Critical Points of Morse Functions," in *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, Apr. 2000, pp. 2270–2277 vol.3. doi: 10.1109/ROBOT.2000.846365.
- [82] H. Moravec and A. Elfes, "High Resolution Maps From Wide Angle Sonar," in *1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*, Mar. 1985, pp. 116–121. doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087316.
- [83] A. Elfes, "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 3, no. 3, pp. 249–265, Jun. 1987, doi: 10.1109/JRA.1987.1087096.
- [84] S. Thrun, "Learning Metric-Topological Maps for Indoor Mobile Robot Navigation," *Artificial Intelligence*, vol. 99, no. 1, pp. 21–71, Feb. 1998, doi: 10.1016/S0004-3702(97)00078-7.
- [85] J. A. Castellanos, J. D. Tardos, and G. Schmidt, "Building a Global Map of the Environment of a Mobile Robot: The Importance of Correlations," in *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, Apr. 1997, pp. 1053–1059 vol.2. doi: 10.1109/ROBOT.1997.614274.
- [86] S. Thrun, "Robotic Mapping: A Survey," in *Exploring artificial intelligence in the new millennium*, San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2003, pp. 1–35.
- [87] J. S. Oh, Y. H. Choi, J. B. Park, and Y. F. Zheng, "Complete Coverage Navigation of Cleaning Robots Using Triangular-Cell-Based Map," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 3, pp. 718–726, Jun. 2004, doi: 10.1109/TIE.2004.825197.
- [88] A. Zelinsky, *Planning Paths of Complete Coverage of an Unstructured Environment by a Mobile Robot*, vol. 13. 1993.
- [89] L. Xu, "Graph Planning for Environmental Coverage," Carnegie Mellon University, 2011.
- [90] Y. Gabriely and E. Rimon, "Spanning-Tree Based Coverage of Continuous Areas by a Mobile Robot," *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, vol. 31, no. 1, pp. 77–98, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1016610507833.
- [91] G.-Q. Gao and B. Xin, "A-STC: Auction-Based Spanning Tree Coverage Algorithm Formation Planning of Cooperative Robots," *Frontiers Inf Technol Electronic Eng*, vol. 20, no. 1, pp. 18–31, Jan. 2019, doi: 10.1631/FITEE.1800551.
- [92] N. Agmon, N. Hazon, and G. A. Kaminka, "Constructing Spanning Trees for Efficient Multi-Robot Coverage," in *Proceedings 2006 IEEE International*

- Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, May 2006, pp. 1698–1703. doi: 10.1109/ROBOT.2006.1641951.
- [93] J. Chleboun, T. Amorim, A. M. Nascimento, and T. P. Nascimento, “An Improved Spanning Tree-Based Algorithm for Coverage of Large Areas Using Multi-UAV Systems,” *Drones*, vol. 7, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/drones7010009.
 - [94] A. Ch. Kapoutsis, S. A. Chatzichristofis, and E. B. Kosmatopoulos, “DARP: Divide Areas Algorithm for Optimal Multi-Robot Coverage Path Planning,” *J Intell Robot Syst*, vol. 86, no. 3, pp. 663–680, Jun. 2017, doi: 10.1007/s10846-016-0461-x.
 - [95] E. Gonzalez, O. Alvarez, Y. Diaz, C. Parra, and C. Bustacara, “BSA: A Complete Coverage Algorithm,” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Apr. 2005, pp. 2040–2044. doi: 10.1109/ROBOT.2005.1570413.
 - [96] R. Tarjan, “Depth-First Search and Linear Graph Algorithms,” *SIAM J. Comput.*, vol. 1, no. 2, pp. 146–160, Jun. 1972, doi: 10.1137/0201010.
 - [97] A. Bundy and L. Wallen, “Breadth-First Search,” in *Catalogue of Artificial Intelligence Tools*, A. Bundy and L. Wallen, Eds., in Symbolic Computation., Berlin, Heidelberg: Springer, 1984, pp. 13–13. doi: 10.1007/978-3-642-96868-6_25.
 - [98] R. L. Graham and P. Hell, “On the History of the Minimum Spanning Tree Problem,” *Annals of the History of Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 43–57, Jan. 1985, doi: 10.1109/MAHC.1985.10011.
 - [99] M. Held and R. M. Karp, “The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees,” *Operations Research*, vol. 18, no. 6, pp. 1138–1162, Dec. 1970, doi: 10.1287/opre.18.6.1138.
 - [100] R. C. Prim, “Shortest Connection Networks and Some Generalizations,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 36, no. 6, pp. 1389–1401, Nov. 1957, doi: 10.1002/j.1538-7305.1957.tb01515.x.
 - [101] J. B. Kruskal, “On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem,” *Proc. Amer. Math. Soc.*, vol. 7, no. 1, pp. 48–50, 1956, doi: 10.1090/S0002-9939-1956-0078686-7.
 - [102] B. Ranjbar-Sahraei, G. Weiss, and A. Nakisae, “A Multi-robot Coverage Approach Based on Stigmergic Communication,” in *Multiagent System Technologies*, I. J. Timm and C. Guttmann, Eds., in Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, pp. 126–138. doi: 10.1007/978-3-642-33690-4_13.
 - [103] M. Darrah, M. M. Trujillo, K. Speransky, and M. Wathen, “Optimized 3D Mapping of a Large Area With Structures Using Multiple Multirotors,” in *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Jun. 2017, pp. 716–722. doi: 10.1109/ICUAS.2017.7991414.
 - [104] J. Li, X. Li, and L. Yu, “Multi-UAV Cooperative Coverage Path Planning in Plateau and Mountain Environment,” in *2018 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*, May 2018, pp. 820–824. doi: 10.1109/YAC.2018.8406484.
 - [105] J. M. Palacios-Gasós, Z. Talebpour, E. Montijano, C. Sagüés, and A. Martinoli, “Optimal Path Planning and Coverage Control for Multi-Robot Persistent Coverage in Environments With Obstacles,” in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2017, pp. 1321–1327. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989156.

- [106] J. Chen, C. Du, X. Lu, and K. Chen, "Multi-region Coverage Path Planning for Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles Systems," in *2019 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*, Apr. 2019, pp. 356–3565. doi: 10.1109/SOSE.2019.00060.
- [107] R. Almadhoun, T. Taha, L. Seneviratne, and Y. Zweiri, "A Survey on Multi-Robot Coverage Path Planning for Model Reconstruction and Mapping," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 8, p. 847, Jul. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-0872-y.
- [108] Y. Huang, M. Li, and T. Zhao, "A Multi-robot Coverage Path Planning Algorithm Based on Improved DARP Algorithm." arXiv, Apr. 19, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2304.09741.
- [109] X. Huang, M. Sun, H. Zhou, and S. Liu, "A Multi-Robot Coverage Path Planning Algorithm for the Environment With Multiple Land Cover Types," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 198101–198117, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027422.
- [110] J. Tang, C. Sun, and X. Zhang, "MSTC*: Multi-Robot Coverage Path Planning under Physical Constraint," in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2021, pp. 2518–2524. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561371.
- [111] L. Collins, P. Ghassemi, E. T. Esfahani, D. Doermann, K. Dantu, and S. Chowdhury, "Scalable Coverage Path Planning of Multi-Robot Teams for Monitoring Non-Convex Areas," in *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2021, pp. 7393–7399. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561550.
- [112] Y. Qin, L. Fu, D. He, and Z. Liu, "Improved Optimization Strategy Based on Region Division for Collaborative Multi-Agent Coverage Path Planning," *Sensors*, vol. 23, no. 7, Art. no. 7, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23073596.
- [113] N. A. Abd Rahman, K. S. M. Sahari, N. A. Hamid, and Y. C. Hou, "A Coverage Path Planning Approach for Autonomous Radiation Mapping With a Mobile Robot," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 19, no. 4, p. 17298806221116483, Jul. 2022, doi: 10.1177/17298806221116483.
- [114] B. J. Frey and D. Dueck, "Clustering by Passing Messages Between Data Points," *Science*, vol. 315, no. 5814, pp. 972–976, Feb. 2007, doi: 10.1126/science.1136800.
- [115] N. Hazon and G. A. Kaminka, "Redundancy, Efficiency and Robustness in Multi-Robot Coverage," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Apr. 2005, pp. 735–741. doi: 10.1109/ROBOT.2005.1570205.
- [116] X. Zheng, S. Jain, S. Koenig, and D. Kempe, "Multi-Robot Forest Coverage," in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Aug. 2005, pp. 3852–3857. doi: 10.1109/IROS.2005.1545323.
- [117] M. James, "Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations," presented at the Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, in 14, vol. 1. University of California Press, 1967, pp. 281–297.
- [118] O. Idir and A. Renzaglia, "Multi-Robot Weighted Coverage Path Planning: A Solution Based on the DARP Algorithm," in *2022 17th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, Dec. 2022, pp. 98–104. doi: 10.1109/ICARCV57592.2022.10004273.

- [119] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,” *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, vol. 4, no. 2, pp. 100–107, Jul. 1968, doi: 10.1109/TSSC.1968.300136.
- [120] A. M. Bagirov, R. M. Aliguliyev, and N. Sultanova, “Finding Compact and Well-Separated Clusters: Clustering Using Silhouette Coefficients,” *Pattern Recognition*, vol. 135, p. 109144, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.patcog.2022.109144.
- [121] D.-T. Dinh, T. Fujinami, and V.-N. Huynh, “Estimating the Optimal Number of Clusters in Categorical Data Clustering by Silhouette Coefficient,” in *Knowledge and Systems Sciences*, J. Chen, V. N. Huynh, G.-N. Nguyen, and X. Tang, Eds., in Communications in Computer and Information Science. Singapore: Springer, 2019, pp. 1–17. doi: 10.1007/978-981-15-1209-4_1.
- [122] H. Guo, J. Ma, and Z. Li, “Active Semi-Supervised K-Means Clustering Based on Silhouette Coefficient,” in *Advances in Intelligent, Interactive Systems and Applications*, F. Xhafa, S. Patnaik, and M. Tavana, Eds., in Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 202–209. doi: 10.1007/978-3-030-02804-6_27.
- [123] P. J. Rousseeuw, “Silhouettes: A Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 20, pp. 53–65, Nov. 1987, doi: 10.1016/0377-0427(87)90125-7.
- [124] H. B. Zhou and J. T. Gao, “Automatic Method for Determining Cluster Number Based on Silhouette Coefficient,” *Advanced Materials Research*, vol. 951, pp. 227–230, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.951.227.
- [125] P. Hijma, S. Heldens, A. Sclocco, B. van Werkhoven, and H. E. Bal, “Optimization Techniques for GPU Programming,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, no. 11, p. 239:1–239:81, Mar. 2023, doi: 10.1145/3570638.
- [126] P. Harish and P. J. Narayanan, “Accelerating Large Graph Algorithms on the GPU Using CUDA,” in *High Performance Computing – HiPC 2007*, S. Aluru, M. Parashar, R. Badrinath, and V. K. Prasanna, Eds., in Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, pp. 197–208. doi: 10.1007/978-3-540-77220-0_21.
- [127] J. Soman, K. Kishore, and P. J. Narayanan, “A Fast Gpu Algorithm for Graph Connectivity,” in *2010 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, Workshops and Phd Forum (IPDPSW)*, Apr. 2010, pp. 1–8. doi: 10.1109/IPDPSW.2010.5470817.
- [128] K. Fatahalian, J. Sugerman, and P. Hanrahan, “Understanding the Efficiency of Gpu Algorithms for Matrix-Matrix Multiplication,” in *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware*, in HWWS '04. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Aug. 2004, pp. 133–137. doi: 10.1145/1058129.1058148.
- [129] U. Farooq, Z. Marrakchi, and H. Mehrez, “FPGA Architectures: An Overview,” in *Tree-based Heterogeneous FPGA Architectures: Application Specific Exploration and Optimization*, U. Farooq, Z. Marrakchi, and H. Mehrez, Eds., New York, NY: Springer, 2012, pp. 7–48. doi: 10.1007/978-1-4614-3594-5_2.

- [130] D. Ziouzios, P. Kilintzis, N. Baras, and M. Dasygenis, “A Survey of FPGA Robotics Applications in the Period 2010 – 2019,” *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, doi: 10.25046/aj060344.
- [131] S. Bochkarev and S. L. Smith, “On Minimizing Turns in Robot Coverage Path Planning,” in *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Aug. 2016, pp. 1237–1242. doi: 10.1109/COASE.2016.7743548.
- [132] I. Vandermeulen, R. Groß, and A. Kolling, “Turn-Minimizing Multirobot Coverage,” in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2019, pp. 1014–1020. doi: 10.1109/ICRA.2019.8794002.
- [133] G. Laporte and Y. Nobert, “A Cutting Planes Algorithm for the m-Salesmen Problem,” *J Oper Res Soc*, vol. 31, no. 11, pp. 1017–1023, Nov. 1980, doi: 10.1057/jors.1980.188.
- [134] G. Laporte and Y. Nobert, “An Exact Algorithm for Minimizing Routing and Operating Costs in Depot Location,” *European Journal of Operational Research*, vol. 6, no. 2, pp. 224–226, Feb. 1981, doi: 10.1016/0377-2217(81)90212-5.
- [135] J. Gromicho, J. Paixão, and I. Bronco, “Exact Solution of Multiple Traveling Salesman Problems,” in *Combinatorial Optimization*, M. Akgül, H. W. Hamacher, and S. Tüfekçi, Eds., in NATO ASI Series. Berlin, Heidelberg: Springer, 1992, pp. 291–292. doi: 10.1007/978-3-642-77489-8_27.
- [136] D. E. Gomes, M. I. D. Iglésias, A. P. Proença, T. M. Lima, and P. D. Gaspar, “Applying a Genetic Algorithm to a m-TSP: Case Study of a Decision Support System for Optimizing a Beverage Logistics Vehicles Routing Problem,” *Electronics*, vol. 10, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2021, doi: 10.3390/electronics10182298.

Παράρτημα δημοσιεύσεων

Επιστημονικά περιοδικά

- **N. Baras** and M. Dasygenis, “UGV Coverage Path Planning: An Energy-Efficient Approach through Turn Reduction,” *Electronics*, vol. 12, no. 13, p. 2959, Jul. 2023, doi: 10.3390/electronics12132959.
- **N. Baras** and M. Dasygenis, “Area Division Using Affinity Propagation for Multi-Robot Coverage Path Planning,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 14, p. 8207, Jul. 2023, doi: 10.3390/app13148207.
- **N. Baras**, A. Chatzisavvas, D. Ziouzos, I. Vanidis, and M. Dasygenis, “Improving the Efficiency of Modern Warehouses Using Smart Battery Placement,” *Future Internet*, vol. 15, no. 11, p. 353, Oct. 2023, doi: 10.3390/fi15110353.

Επιστημονικά συνέδρια

- N. Baras, M. Dasygenis and N. Ploskas, "Multi-Robot Coverage Path Planning in 3-Dimensional Environments," 2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST), Thessaloniki, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCAST.2019.8741700.
- N. Baras, A. Chatzisavvas, I. Tabakis, and M. Dasygenis, “Area Allocation for Coverage Path Planning Using Affinity Propagation Clustering,” ETCEI 2023 - **Εγκρίθηκε για δημοσίευση**