



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πλοήγηση πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων

ΑΘΗΝΑ
ΜΠΙΡΙΝΤΑΚΗ

Επιβλέπων:

Νικολός Ιωάννης, Λέκτορας

Μέλη τριμελούς επιτροπής:

Βαλαβάνης Κίμων, Καθ.

Κουϊκόγλου Βασίλειος, Αν. Καθ.

Χανιά 2004

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το Δρ. Κίμων Βαλαβάνη διότι, χωρίς το ενδιαφέρον και τη συμπαράστασή του δε θα είχα ακολουθήσει το συγκεκριμένο τομέα έρευνας που αποδεικνύεται εξαιρετικής σημασίας για την ακαδημαϊκή πορεία μου και για το ευρύτερο ενδιαφέρον μου στην επιστήμη.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το Δρ. Ιωάννη Κ. Νικολό για την άριστη συνεργασία, την πολύτιμη συμβολή του, την αμέριστη υποστήριξη και το αδιάκοπο ενδιαφέρον που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μελέτης, στοιχεία τα οποία ήταν καθοριστικής σημασίας για την πορεία και την έκβασή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την εγκάρδια συμπαράσταση και κατανόηση που έδειξαν σε όλες τις αγωνίες και προβληματισμούς που κλήθηκα να αντιμετωπίσω κατά την περάτωση της συγκεκριμένης εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	4
1.1. Γενικά.....	4
1.2. Πλοήγηση	4
1.3. Σχηματοποιημένος χώρος (Configuration space, C-space)	6
1.4. Περιγραφή του προβλήματος.....	7
1.4.1 Γενικά.....	7
1.4.2. Περιορισμοί πλοήγησης.....	7
1.5 Βιβλιογραφική επισκόπηση	9
2. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι	33
2.1 Η βασική ιδέα των ΕΑ.	33
2.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι	34
2.2.1. Σύντομο ιστορικό της γενετικής, [Γιώργος Κολόμβος, 2001].	34
2.2.2. Ορολογία δανεισμένη από τη Βιολογία, [Γιώργος Κολόμβος, 2001].	35
2.2.3. Από την Φυσική στην Τεχνητή Ζωή.....	36
2.3 Αναλυτική περιγραφή λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων	38
2.3.1 Η διαδικασία	38
2.3.2 Τελεστές (operators)	39
2.4 Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους βελτιστοποίησης.	43
2.5 Περιγραφή του Εξελικτικού Αλγορίθμου που χρησιμοποιείται στο πρόβλημα που επιλύεται στην παρούσα εργασία	44
2.5.1 Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος	44
2.5.2 Το τροποποιημένο σχέδιο του δωρητή (donor)	46
2.5.3 Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών	47
3. Το πρόβλημα σχεδίασης της τροχιάς πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων.	48
3.1 Αντιμετώπιση του προβλήματος.....	48
3.1.1 Γενικά.....	48
3.1.2 Αναπαράσταση των λύσεων	48
3.2 Αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου	52
3.3 Λογικό διάγραμμα	57
3.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	60
3.4.1 Γενικά.....	60
3.4.2 Πρώιμες μορφές του μοντέλου	60
3.4.3 Τελική μορφή του μοντέλου	78
4. Αξιολόγηση του μοντέλου, συμπεράσματα, μελλοντική εργασία.....	87
4.1 Συμπεράσματα	87
4.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	88
Βιβλιογραφία	89

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Ένας από τους κυριότερους στόχους που έχει τεθεί στον τομέα της ρομποτικής είναι η δημιουργία αυτόνομων ρομποτικών οχημάτων. Οχήματα δηλαδή, που θα μπορούν να εκτελούν εργασίες υψηλού επιπέδου χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Θα είναι ικανά να λειτουργούν και να αντιδρούν σε διάφορες καταστάσεις, δεχόμενα πληροφορίες από τον άνθρωπο για το τι πρέπει να γίνει και όχι για το πώς αυτό θα επιτευχθεί. Ρομπότ είναι οποιαδήποτε ευπροσάρμοστη μηχανική διάταξη, εξοπλισμένη με μηχανισμό κίνησης και αισθητήρες, που λειτουργούν υπό τον έλεγχο κάποιου υπολογιστικού συστήματος [Jean-Claude Latombe].

Οι αυτόνομοι ρομποτικοί μηχανισμοί βρίσκουν πολλές εφαρμογές στον τομέα της παραγωγής, της ιατρικής, αλλά και σε περιβάλλοντα επικίνδυνα για τον άνθρωπο (παρουσία τοξικών αποβλήτων, υψηλών θερμοκρασιών, ραδιενέργειας, εκρηκτικών) καθώς, και σε συνθήκες απαγορευτικές για τον άνθρωπο όπως η εξερεύνηση του διαστήματος, ηφαιστείων, του βυθού και άλλα [Jean-Claude Latombe].

1.2. Πλοήγηση

Αναπτύσσοντας τεχνολογίες απαραίτητες για αυτόνομα ρομποτικά οχήματα, αξιοσέβαστη προϋπόθεση είναι ο αυτοματοποιημένος λογισμός, η αντίληψη και ο έλεγχος, βάση των οποίων ανακύπτουν πολλά σημαντικά προβλήματα. Ένα από αυτά είναι η πλοήγηση ή σχεδιασμός τροχιάς ενός αυτόνομα κινούμενου ρομποτικού οχήματος, που αναφέρεται στη διαδικασία, που θα οδηγήσει το ρομπότ στο να αποφασίσει τον τρόπο με τον οποίο θα πλησιάσει έναν προκαθορισμένο φυσικό στόχο. Ο συγκεκριμένος τεχνολογικός στόχος είναι εξαιρετικά σημαντικός, δεδομένου ότι τα ρομπότ θα απαιτείται να κινούνται σε πραγματικό περιβάλλον, με ελάχιστη απαίτηση την ικανότητα να εξάγουν την κίνησή τους [Jean-Claude Latombe].

Εκ πρώτης όψεως, η πλοήγηση δείχνει σχετικά απλό θέμα, αφού οι άνθρωποι το αντιμετωπίζουν διαρκώς και με επιτυχία στην καθημερινότητά τους. Η στοιχειώδης όμως λειτουργική νοημοσύνη, που οι άνθρωποι χρησιμοποιούν υποσυνείδητα κατά την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους, αποδεικνύεται εξαιρετικά δύσκολη υπόθεση για ένα αυτοματοποιημένο ρομποτικό όχημα.

Ο σχεδιασμός τροχιάς αφορά όχι μόνο τον έλεγχο πρόσκρουσης και την αποφυγή εμποδίων, αλλά εμπεριέχει ποικίλα θέματα, όπως το σχεδιασμό διαδρομών ελεύθερων από πιθανά κινούμενα εμπόδια, το συντονισμό της κίνησης πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων, το σχεδιασμό κινήσεων ολίσθησης και ώθησης, προκειμένου να εξαχθούν οι ακριβείς σχέσεις ανάμεσα στα αντικείμενα, τη διαχείριση της αβεβαιότητας και ανακρίβειας, ώστε να οικοδομηθούν αξιόπιστες στρατηγικές, βασισμένες στα δεδομένα των αισθητηριακών ρομποτικών οργάνων, καθώς και την εμπλοκή μοντέλων με φυσικές ιδιότητες όπως μάζα, βαρύτητα και τριβή. Για το λόγο αυτό κατά την πλοήγηση απαιτείται να λαμβάνονται υπ' όψιν πέραν των φυσικών περιορισμών και γεωμετρικοί καθώς και άλλοι προσωρινοί περιορισμοί για το εκάστοτε πρόβλημα [Jean-Claude Latombe].

Πιο αναλυτικά, ο σχεδιασμός τροχιάς αφορά τρεις ερωτήσεις: που βρίσκομαι, που πάω και πως θα πάω. Αρκεί λοιπόν, το ρομπότ να γνωρίζει τις απαντήσεις στις δύο πρώτες ερωτήσεις και να μπορεί να υπολογίσει με επιτυχία την τρίτη. Το σχέδιο πλοήγησης που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα πληροφορίας για το περιβάλλον στο οποίο κινείται (workspace) και τον τρόπο με τον οποίο κινείται. Το σχέδιο κίνησης μπορεί να είναι στατικό, όταν τα εμπόδια είναι στατικά ή δυναμικό, όταν τα εμπόδια κινούνται ή αλλάζουν σχήμα και μέγεθος. Το περιβάλλον μπορεί να είναι γνωστό, όταν οι τροχιές των εμποδίων είναι γνωστές εκ των προτέρων, ή άγνωστο ή τμηματικά γνωστό, όταν η τροχιά των εμποδίων είναι άγνωστη ή κατά τμήματα γνωστή. Τότε επιβάλλεται η χρήση των αισθητήρων του ρομπότ, ώστε να ανιχνευθούν τα εμπόδια, καθώς και η λειτουργία ενός συστήματος αποφυγής τους. Το ρομπότ έχει ως δεδομένα τη θέση του και τη θέση του στόχου (σε ειδικές βέβαια περιπτώσεις ο στόχος μπορεί να είναι άγνωστος). Στην περίπτωση που είναι πλήρως γνωστό και καθορισμένο το περιβάλλον κίνησης (καθώς και οι θέσεις των εμποδίων), ο σχεδιασμός της τροχιάς μπορεί να γίνει πριν το ρομπότ αρχίσει να κινείται στο χώρο (off-line). Στην περίπτωση όπου οι πληροφορίες για το περιβάλλον λαμβάνονται από αισθητήρες καθώς το ρομπότ κινείται μέσα σ' αυτό, ο σχεδιασμός της πορείας του γίνεται κατά την κίνηση του ρομποτικού οχήματος (on-line).

Συνήθως γίνεται συνδυασμός και υπάρχει μια αρχική πορεία, η οποία διορθώνεται καθώς το ρομπότ αρχίζει να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του.

Οι παράμετροι που αφορούν το σχεδιασμό της κίνησης περιλαμβάνουν:

- τον τρόπο μοντελοποίησης των εμποδίων και το είδος τους: ακίνητα (στατικά), κινούμενα (δυναμικά),
- την μοντελοποίηση του χώρου κίνησης (δύο διαστάσεων, τρισδιάστατος, χωρισμένος σε κελιά),
- το είδος της τροχιάς (καμπύλες, συνεχόμενα ευθύγραμμα τμήματα).

Η πλοήγηση ρομποτικού οχήματος διακρίνεται σε γενική (global) και τοπική (local). Η γενική πλοήγηση απαιτεί γενική πληροφορία για το περιβάλλον μέσα από κάποιου είδους χάρτη, ενώ η τοπική δεν προϋποθέτει ούτε χρησιμοποιεί καμία γενική πληροφορία, αλλά βασίζεται σε τοπικές πληροφορίες και σε πεπερασμένων αποστάσεων αισθητηριακές ανιχνεύσεις.

1.3. Σχηματοποιημένος χώρος (Configuration space, C-space)

Η ιδέα του C-space [Jean-Claude Latombe], χρησιμοποιείται προκειμένου να οργανώσει με το καλύτερο δυνατό τρόπο τις ποικίλες όψεις του προβλήματος της πλοήγησης. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα εργαλείο αναπαράστασης του ευρύτερου προβλήματος με σκοπό την ακριβή περιγραφή του και τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου αντιμετώπισής του. Αφορά τη σημειακή αναπαράσταση του ρομπότ και τη χαρτογράφηση των εμποδίων στο χώρο αυτόν, με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταθέτει το πρόβλημα πλοήγησης ενός δισδιάστατου οχήματος στο πρόβλημα πλοήγησης ενός σημείου. Με τον τρόπο αυτό απλοποιούνται και γίνονται σαφέστεροι οι περιορισμοί που αφορούν τη κίνηση των ρομποτικών μηχανισμών. Τέλος οι ποικίλες όψεις του προβλήματος (της πλοήγησης) μελετώνται με τρόπο ενιαίο, διευκολύνοντας έτσι την παρουσίαση και τη σύγκριση των διάφορων μεθόδων επίλυσής του.

1.4. Περιγραφή του προβλήματος

1.4.1 Γενικά

Το πρόβλημα αφορά την off-line πλοήγηση πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων με χρήση Εξελικτικών Αλγορίθμων και συγκεκριμένα ενός Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου (Differential Evolution - DE), [Ioannis K. Nikolos, 2004]. Τα εμπόδια είναι στατικά, ο χώρος κίνησης περιορισμένος. Οι πληροφορίες που δίνονται στα ρομπότ είναι η αρχική τους θέση και ταχύτητα, οι συντεταγμένες του στόχου που καλούνται να προσεγγίσουν, καθώς και η ταχύτητα με την οποία κάθε ρομπότ καλείται να προσεγγίσει τον στόχο.

Τα ρομποτικά οχήματα πρέπει να ακολουθήσουν ανεξάρτητες τροχιές που θα τα οδηγήσουν με όσο το δυνατόν μικρή χρονική διαφορά και τον μέγιστο δυνατό χωρικό διαχωρισμό, στην προσέγγιση του στόχου, εξασφαλίζοντάς τους ασφαλή πορεία, χωρίς σύγκρουση δηλαδή, με εμπόδια και με τους υπόλοιπους ρομποτικούς μηχανισμούς, καθώς και τη συντομότερη δυνατή διαδρομή. Η σχεδίαση της κάθε τροχιάς προκύπτει λύνοντας ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με την χρησιμοποίηση ενός Διαφορικού Εξελικτικού Αλγορίθμου.

Το προτεινόμενο σχέδιο πλοήγησης, το οποίο έχει στηριχτεί στις εργασίες των [Yan Ping et al.,] και [Ioannis K. Nikolos, 2004], συνδυάζει τις βασικές αρχές των Εξελικτικών Αλγορίθμων (EA), με συγκεκριμένη μοντελοποίηση των διαφορετικών και αντικρουόμενων απαιτήσεων του προβλήματος. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα υπό-προβλήματα ανακλάται στον προσδιορισμό της κατάλληλης συνάρτησης για καθένα από αυτά, ώστε να συντεθεί η συνολική συνάρτηση κόστους που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί από τον EA.

1.4.2. Περιορισμοί πλοήγησης

Στο πρόβλημα που εξετάζεται διαθέτουμε n ρομποτικά οχήματα, τα οποία αναχωρούν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από διαφορετικά αρχικά σημεία. Ζητείται να βρεθούν τα σημεία ελέγχου (way points, control points), τα σημεία δηλαδή από όπου θα περάσουν τα ρομποτικά οχήματα, προκειμένου να προσεγγίσουν τον στόχο τους, καθώς και τις αντίστοιχες ταχύτητες που θα έχουν, ώστε να φτάσουν

με όσο το δυνατόν μικρή χρονική διαφορά στο στόχο, με διαφορετικές διευθύνσεις, με το μέγιστο χωρικό διαχωρισμό και τον ελάχιστο χρόνο κίνησης. Οι ταχύτητες κίνησης κάθε ρομπότ θεωρούμε ότι μεταβάλλονται γραμμικά μεταξύ των σημείων ελέγχου, οπότε καθορίζοντας την τιμή τους σε κάθε σημείο ελέγχου έχουμε προσδιορίσει πλήρως τις ταχύτητες κίνησης σε κάθε σημείο της κάθε τροχιάς. Οι απαιτήσεις του προβλήματος συνοψίζονται στη συνέχεια:

- Ταυτόχρονη άφιξη στο στόχο: Επιδιώκουμε τα ρομπότ να φτάνουν στο στόχο με τη μικρότερη δυνατή χρονική διαφορά. Ο περιορισμός αυτός αυξάνει την πιθανότητα επιτυχίας της αποστολής.
- Αποφυγή εμποδίων. Τα ρομπότ θεωρούνται σημειακά, λόγω της υιοθέτησης της αρχής του C-Space.
- Αποφυγή σύγκρουσης μεταξύ των ρομποτικών οχημάτων: Κανένας ρομποτικός μηχανισμός δε πρέπει να βρίσκεται πολύ κοντά σε κάποιον άλλο. Επίσης, κάθε ρομπότ πρέπει να κρατάει μια απόσταση ασφαλείας d_s από τα άλλα καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησής τους, ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε μορφή σύγκρουσης. Έστω ότι η μικρότερη απόσταση μεταξύ των οχημάτων είναι d , έτσι ο περιορισμός αυτός εκφράζεται από τη σχέση:

$$d_s \leq d \quad (1.1)$$

- Τα ρομπότ επιδιώκουμε να καλύπτουν όσο είναι δυνατόν διαφορετικούς τομείς κατά την άφιξή τους στο στόχο, να έχουν δηλαδή, διαφορετικές διευθύνσεις και το μέγιστο δυνατό χωρικό διαχωρισμό, ώστε να προσεγγίζουν το στόχο «κυκλωτικά».
- Οι τροχιές θα πρέπει να έχουν το ελάχιστο δυνατό μήκος, ώστε να γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της δεδομένης ακτίνας δράσης κάθε ρομπότ.

Οι παραπάνω απαιτήσεις μεταφράστηκαν σε συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους, την οποία καλείται να ελαχιστοποιήσει ένας Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος. Η λύση μεταφράζεται στις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου κάθε τροχιάς και στις τιμές της ταχύτητας κίνησης σε κάθε σημείο ελέγχου. Τα σημεία εκκίνησης και ο κοινός στόχος είναι δεδομένα, καθώς και οι απαιτούμενες ταχύτητες στα εν λόγω σημεία.

1.5 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι, προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα της πλοήγησης αυτόνομων ρομποτικών οχημάτων. Οι υπολογιστικές τεχνικές (soft computing techniques), καθιστούν δυνατό το χειρισμό της ανακρίβειας και της αβεβαιότητας, που συχνά συναντάται κατά την επίλυση πρακτικών προβλημάτων που απαιτούν συλλογισμούς και εκμάθηση. Οι υπολογιστικές τεχνικές σχετίζονται με τα νευρωνικά δίκτυα (neural networks- NN), την ασαφή λογική (fuzzy logic- FL), τους γενετικούς αλγορίθμους (genetic algorithms- GA) και άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης. Με το πέρασμα των χρόνων οι ερευνητές, συνδέοντας τις παραπάνω τεχνικές διαπίστωσαν την καταλληλότητα των υβριδικών μεθόδων: GA-NN, FL-NN, FL-GA, GA-FL-NN και άλλων συνδυασμών. Ερευνητές και ειδικοί του χώρου, θεωρούν τις τεχνικές αυτές εξαιρετικά χρήσιμες σε μια πληθώρα προβλημάτων, όχι μόνο διότι είναι ενδιαφέρουσες, αλλά γιατί κυρίως εμπεριέχουν ικανότητες χειρισμού της ανακρίβειας και αβεβαιότητας με ένα εύλογο μέγεθος υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

Στο σημείο αυτό, θα αναφερθούμε εν συντομία στις πιο πρόσφατες ερευνητικές δραστηριότητες σχετικές με την πλοήγηση έντροχου ρομποτικού οχήματος. Οι [S. Sundar et al., 1997], εισήγαγαν μια καινοτόμο προσέγγιση, σχετικά με το πρόβλημα της on-line πλοήγησης, βασισμένη στην επίλυση της εξίσωσης Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) και απέδειξαν έναν επαρκή όρο βελτιστοποίησης για το πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου. Η λύση της HJB, που καλείται συνάρτηση επιστροφής (return function), αφορά στην ελάχιστη απόσταση που πρέπει να διανυθεί από το ρομπότ, προκειμένου να προσεγγίσει το στόχο από οποιοδήποτε σημείο εκκίνησης. Η βέλτιστη τροχιά υπολογίζεται ακολουθώντας την κατεύθυνση της πιο απότομης κατάβασης της συνάρτησης επιστροφής. Δεδομένου ότι η συνάρτηση επιστροφής έχει μοναδικό ελάχιστο στο στόχο, οι τροχιές που προκύπτουν ακολουθώντας το αρνητικό δυναμικό της συνάρτησης είναι ολικά βέλτιστες και εγγυώνται την προσέγγισή του από οποιοδήποτε αρχικό σημείο. Ωστόσο, στην περίπτωση που υπάρχουν πολλαπλά εμπόδια η παραπάνω συνάρτηση είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπολογίζεται κατά την on-line αποφυγή τους. Για το λόγο αυτό, πρότειναν την αποφυγή ενός εμποδίου κάθε χρονική στιγμή, ακολουθώντας το αρνητικό δυναμικό μιας προσσεγγιστικής συνάρτησης επιστροφής, την οποία καλούν pseudoreturn ή constrained return function.

Οι [Atsushi Fujimori et al., 1997], επικεντρώθηκαν στο πρόβλημα της τοπικής πλοήγησης (local navigation), λαμβάνοντας υπ' όψη τη δυναμική του ρομπότ. Ο στόχος που καλείται το ρομποτικό όχημα να προσεγγίσει είναι γνωστός, αλλά η γεωμετρία και η θέση των εμποδίων άγνωστη. Ο ρομποτικός μηχανισμός μπορεί να κινηθεί σε τρεις διευθύνσεις, μπροστά, αριστερά και δεξιά, ενώ διαθέτει τρεις αισθητήρες απόστασης, προκειμένου να ανιχνεύσει τα εμπόδια σε πραγματικό χρόνο. Με βάση τις αποστάσεις που ανιχνεύονται, ακολουθούνται συγκεκριμένοι κανόνες κίνησης για την αποφυγή των εμποδίων.

Οι [Huosheng Hu et al., 1997], ασχολήθηκαν με τη δυναμική, γενική (global) πλοήγηση έντροχων ρομποτικών οχημάτων με αβεβαιότητα σε δυναμικό εργοστασιακό περιβάλλον. Προκειμένου να μοντελοποιήσουν το μεταβαλλόμενο περιβάλλον, χρησιμοποίησαν έναν τοπολογικό χάρτη με βαθμονομημένες συναρτήσεις κόστους. Η βέλτιστη τροχιά προκύπτει χρησιμοποιώντας δυναμικό προγραμματισμό. Η βαθμονομημένη συνάρτηση κόστους αποτελείται από το αιτιοκρατικό κόστος για το γνωστό τμήμα του περιβάλλοντος κίνησης του ρομπότ και από το αβέβαιο κόστος για το άγνωστο τμήμα του.

Οι [Animesh Chakravarthy et al., 1998], προτείνουν μια προσέγγιση προσδιορισμού επικείμενων συγκρούσεων ανάμεσα στο ρομποτικό όχημα και σε εμπόδια ακανόνιστου σχήματος, που κινούνται σε δισδιάστατο δυναμικό περιβάλλον, που ονομάζεται στρατηγική του «κώνου πρόσκρουσης» (collision cone approach). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της πιθανότητας πρόσκρουσης ανάμεσα σε δύο αντικείμενα και το σχεδιασμό στρατηγικών αποφυγής.

- Το ρομπότ μπορεί να διατηρεί την κατεύθυνση της πορείας του σταθερή, αλλά να αλλάζει τη ταχύτητά του, έως ότου το διάνυσμα της ταχύτητάς του βρεθεί έξω από τον κώνο πρόσκρουσης.
- Το ρομπότ μπορεί να διατηρεί τη ταχύτητά του σταθερή, αλλά να αλλάζει την κατεύθυνση της πορείας του έως ότου το διάνυσμα της ταχύτητάς του βρίσκεται εκτός του κώνου πρόσκρουσης.

Το ρομπότ δύναται να αλλάζει είτε τη ταχύτητά του είτε την κατεύθυνση της πορείας του, έως ότου το διάνυσμα της ταχύτητάς του βρίσκεται εκτός του κώνου πρόσκρουσης.

Οι [S. S. Ge et al., 2000], περιέγραψαν το πρόβλημα των μη προσεγγίσεων στόχων, εξαιτίας των εμποδίων που υπάρχουν κοντά τους (GNRON), όταν το

πρόβλημα της πλοήγησης επιλύεται με τη μέθοδο των δυναμικών πεδίων (potential fields - PF). Στις περισσότερες απο τις προηγούμενες αναφορές της μεθόδου σε σχετικά προβλήματα, θεωρήθηκε ως δεδομένο ότι η θέση του στόχου βρίσκεται αρκετά μακριά απο εμπόδια. Στις περιπτώσεις αυτές, όταν το ρομπότ είναι κοντα στη θέση του στόχου του, η απωστική δύναμη εξαιτίας των εμποδίων είναι αμελητέα και το ρομπότ έλκεται απο το στόχο. Ωστόσο, σε πολλές πραγματικές εφαρμογές, η θέση του στόχου συμβαίνει να βρίσκεται αρκετά κοντά σε κάποιο εμπόδιο. Τότε, όταν το ρομπότ προσεγγίζει το στόχο του, ταυτόχρονα προσεγγίζει και το εμπόδιο που βρίσκεται κοντά σ'αυτό. Αν η ελκτική και η απωστική δύναμη έχουν καθοριστεί όπως συνήθως, τότε η απωστική δύναμη θα είναι πολύ μεγαλύτερη της ελκτικής και ο στόχος δε θα είναι το ολικό ελάχιστο του συνολικού δυναμικού. Έτσι, το ρομπότ δε θα μπορέσει τελικά να φτάσει το στόχο του, εξαιτίας του εμποδίου που βρίσκεται κοντά σ'αυτό. Για να υπερνικήσουν το GNRON πρόβλημα, τροποποίησαν την απωστική δύναμη, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψη τη σχετική απόσταση ανάμεσα στο ρομπότ και στο στόχο. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι το ρομπότ κινείται με σταθερή ταχύτητα και η συνολική δύναμη που εφαρμόζεται σ'αυτό καθορίζει μόνο την κατεύθυνση της κίνησής του. Η τροχιά που προκύπτει με τη μέθοδο αυτή στην πραγματικότητα είναι η αρνητική κλίση της ροής στο χώρο κίνησης του ρομπότ απο το σημείο εκκίνησής του εως την προσέγγιση του στόχου του. Με το τρόπο αυτό εξασφαλίζεται μια ασφαλή διαδρομή, ότι η συνολική δύναμη έχει ολικό ελάχιστο στη θέση του στόχου και ότι τελικά το ρομπότ φτάνει το στόχο του.

Οι [Wilson D. Esquivel et al., 2001], παρουσίασαν μια ασφαλή από προσκρούσεις σε εμπόδια μέθοδο για την πλοήγηση έντροχου ρομποτικού οχήματος. Η πλοήγηση απαντάται σε δομημένο περιβάλλον, παρουσία εμποδίων που έχουν μοντελοποιηθεί ως πολύγωνα. Το πρόβλημα προσδιορισμού τροχιάς υπό τον περιορισμό της ακτίνας καμπυλότητας επιλύεται σε τρία στάδια:

1. Αντιστάθμισμα του περιβάλλοντος των πολυγώνων: συνίσταται στον προσδιορισμό των εμποδίων του περιβάλλοντος κίνησης του ρομπότ και σ'ένα σύστημα ελέγχου και πρόληψης επικείμενων προσκρούσεων ανάμεσα τους.
2. Δημιουργία ομαλής τροχιάς: συνίσταται στη διασφάλιση ομαλής τροχιάς που θα ενώνει το σημείο εκκίνησης με το τελικό, ενώ θα λαμβάνει υπ' όψη τους περιορισμούς καμπυλότητας:
 - Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος βασισμένος σ' ένα σύνολο βασικών πινάκων, που περικλείουν την πληροφορία των

πολυγώνων του περιβάλλοντος και προέκυψε μια αρχική τροχιά (PA) ανάμεσα στο αρχικό και τελικό σημείο με ελάχιστο μήκος. Ωστόσο, η τροχιά αυτή ενώνει μόνο δύο θέσεις (x,y) και όχι το συνολικό σχηματισμό (x,y,θ) .

- Η PA τροχιά λειαίνεται με χρήση κατάλληλου τελεστή κατά μήκος όλων των κορυφών της τροχιάς, αντικαθιστώντας κάθε κορυφή της τροχιάς PA με κατάλληλο τόξο κύκλου ακτίνας R. Η ομαλή τροχιά που προκύπτει ονομάζεται PS και ικανοποιεί τους περιορισμούς καμπυλότητας.

3. Αρχικές και τελικές διαδικασίες: μια τελική τροχιά προκύπτει (PC) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Star.

Οι [Eduardo Zalama et al., 2002], πρότειναν ένα μοντέλο για τον έλεγχο έντροχων ρομπότ σε περιβάλλοντα παρουσία εμποδίων. Το ρομπότ είναι ικανό να μάθει διαφορετικές συμπεριφορές, μέσα από πληροφορίες που λαμβάνει από τους αισθητήρες του και να εξελίξει την πλοήγησή του σ' ένα μη δομημένο περιβάλλον. Αρχικά, το ρομπότ κινείται ανεπαρκώς μέσα στο περιβάλλον, βασιζόμενο σε αντανakλαστικές συμπεριφορές. Εν συνεχεία, η θετική και αρνητική ενίσχυση σημάτων εξελίσσουν τη συμπεριφορά του μέσω εκμάθησης κατά τη διάρκεια της κίνησής του.

Οι [Charles C. Chang et al., 1997], παρουσίασαν μια πρακτική εφαρμογή που επιτρέπει στο έντροχο ρομπότ να προβλέψει επικείμενες συμπεριφορές κινούμενων εμποδίων. Πρότειναν έναν ελεγκτή βασισμένο σε τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN) για να εξάγει τα αισθητηριακά δεδομένα. Η έξοδος του ANN είναι οι μελλοντικές πληροφορίες των αισθητήρων, για παράδειγμα αν εμπόδια είναι πιθανό να συγκρουστούν με το ρομπότ στην περίπτωση που η κίνηση του ρομπότ και των εμποδίων παραμείνει η ίδια. Χρησιμοποιώντας την πληροφορία αυτή, το ρομπότ δύναται να αντιδράσει και να προβλέψει αλλαγές στο περιβάλλον και να προκύψει έτσι καλύτερη απόδοση συγκρινόμενο με ένα σύστημα που δε διαθέτει καμία πληροφορία κίνησης.

Οι [Simon X. Yang et al., 1999], πρότειναν ένα μοντέλο για την on-line πλοήγηση ρομποτικού οχήματος σε στατικό περιβάλλον. Το θεμελιώδες σκεπτικό της προτεινόμενης μεθόδου είναι να αναπτυχθεί μια αρχιτεκτονική NN, της οποίας η δυναμική νευρωνική δραστηριότητα θα αναπαριστά τη δυναμική διαφοροποίηση του περιβάλλοντος. Καθορίζοντας κατάλληλα τα εξωτερικά δεδομένα του μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος και τις εσωτερικές νευρωνικές διασυνδέσεις,

εξασφαλίζεται ότι ο στόχος και τα εμπόδια θα παραμείνουν στην κορυφή και στη βάση αντίστοιχα της διαμορφωμένης δραστηριότητας του NN. Ο στόχος έλκει ολικά το ρομπότ στο συνολικό χώρο κίνησης μέσω της νευρωνικής δραστηριότητας, ενώ τα εμπόδια έχουν μόνο τοπική επίδραση σε μια μικρή περιοχή, για να αποφευχθεί με τον τρόπο αυτό οποιαδήποτε πρόσκρουση και να επιτευχθεί εκκαθάριση των ρομποτικών διαδρομών από εμπόδια. Επιλέγοντας μια κατάλληλη ισχύ εκκαθάρισης από εμπόδια, το προτεινόμενο NN μοντέλο δύναται να σχεδιάσει είτε τη συντομότερη διαδρομή από το σημείο εκκίνησης έως το στόχο (όταν δεν υπάρχουν εμπόδια), είτε μια άνετη διαδρομή (όταν έχει επιλεγθεί μέτρια δύναμη εκκαθάρισης εμποδίων), ή την ασφαλέστερη διαδρομή (όταν επιλέγεται ισχυρή δύναμη εκκαθάρισης εμποδίων). Το προτεινόμενο σχέδιο NN είναι ένας διακριτός τοπολογικός χάρτης που καθορίζει ποια θα είναι η επόμενη θέση του ρομπότ.

Οι [Chian-Han Lin et al., 1997], χρησιμοποίησαν μια μέθοδο ασαφούς λογικής για να προβλέψουν αν επίκειται μελλοντική σύγκρουση του ρομποτικού οχήματος με κινούμενα εμπόδια. Τα αποτελέσματα του ασαφούς ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν ως κανόνες πλοήγησης του ρομποτικού οχήματος. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος πλοήγησης συνίσταται από τα ακόλουθα ασαφή μοντέλα ελέγχου:

- Μοντέλο αποφυγής στατικών εμποδίων και κατεύθυνσης στόχου.
- Μοντέλο ανίχνευσης παγίδων: καθορίζει αν το ρομπότ κινείται προς κάποια παγίδα και τι είδους είναι αυτή (έχουν μοντελοποιηθεί δυο τύποι παγίδων).
- Μοντέλο ανάκαμψης (απο παγίδα): οδηγεί το ρομπότ να ξεφύγει από την παγίδα στρίβοντας προς το στόχο.
- Μοντέλο αποφυγής κινούμενων εμποδίων: έχει προταθεί ένας ασαφής least-mean-square error (LMSE) αλγόριθμος για την πρόβλεψη της θέσης κάθε κινούμενου εμποδίου και την αλλαγή της κατεύθυνσης του ρομποτικού οχήματος, προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκρούσεις με αυτά.

Στην αρχή κάθε κύκλου πλοήγησης, το ρομπότ ερευνά το περιβάλλον του για την ύπαρξη τυχόν κινούμενων εμποδίων μπροστά του. Αν κάποιο κινούμενο εμπόδιο ανιχνευθεί, τότε καλείται το μοντέλο αποφυγής του. Στην περίπτωση που δεν ανιχνευθεί κανένα, τότε καλείται το μοντέλο αποφυγής στατικών εμποδίων και κατεύθυνση προς το στόχο. Αν βρεθεί στατικό εμπόδιο και είναι κοντά στο ρομπότ χρησιμοποιείται μια μεγάλη τιμή βάρους για να αποφευχθεί. Διαφορετικά, μια

μεγαλύτερη τιμή βάρους το κατευθύνει προς το στόχο του. Στην περίπτωση όπου δεν ανιχνευθεί κανένα στατικό εμπόδιο ή αυτό είναι αρκετά μακριά από το ρομπότ, υποχρεώνεται να στρίψει προς την κατεύθυνση του στόχου του. Όταν το ρομποτικό όχημα κινείται σε άγνωστο περιβάλλον, τότε ενεργοποιείται το μοντέλο ανίχνευσης παγίδων και στην περίπτωση όπου ανιχνεύεται κάποια, καλείται το μοντέλο ανάκαμψης, για να οδηγήσει το όχημα να την αφήσει. Τελειώνοντας, αν ο στόχος δεν έχει προσεγγισθεί, ξεκινά ο επόμενος κύκλος πλοήγησης.

Οι [Jean Bosco Mbede et al., 1999], ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της αυτόνομης πλοήγησης σε γνωστό περιβάλλον, με άγνωστα και πιθανώς κινούμενα εμπόδια. Το πρόβλημα αυτό μοντελοποιήθηκε και επιλύθηκε στο διαμορφωμένο χώρο (C-space) και προτάθηκε ένα ασαφές σύστημα για να προσεγγισθεί το δυναμικό πεδίο. Το θεμελιώδες σκεπτικό των τεχνητών δυναμικών πεδίων (artificial potential fields, APF) είναι ότι τα σημεία κατά μήκος της τροχιάς του ρομπότ μπορούν να θεωρηθούν ελκτικές δυνάμεις, ενώ τα εμπόδια του περιβάλλοντος ως απωστικές δυνάμεις. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα APF, έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση στο ρομπότ μιας δύναμης που τείνει να το καθοδηγήσει κατά μήκος μιας ελεύθερης από εμπόδια διαδρομής. Πρότειναν έναν ασαφή ελεγκτή για τον έλεγχο της θέσης κάθε άρθρωσης του ρομποτικού οχήματος. Υπάρχει ένας ελεγκτής σε κάθε άρθρωση και παίρνει ως είσοδο την απόσταση (d), μεταξύ της άρθρωσης και του πλησιέστερου εμποδίου και το σφάλμα θέσης (e) και δίνει ως έξοδο την δύναμη (τ), που θα οδηγήσει το ρομπότ στο στόχο του (όταν $\tau > 0$ η ρομποτική άρθρωση κινείται προς τα δεξιά, αλλιώς προς τ'αριστερά).

Οι [Kimon P. Valavanis et al., 2000], πρότειναν για το πρόβλημα πλοήγησης έντροχου ρομποτικού οχήματος και αποφυγής εμποδίων σε δισδιάστατο δυναμικό περιβάλλον, τη μέθοδο των ηλεκτρικών δυναμικών πεδίων (electrostatic potential field, EPF). Τα βήματα της EPF μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- Δημιουργία χάρτη κτήσεως του περιβάλλοντος: το δυναμικό πεδίο στην ουσία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τροχιάς, ωστόσο για τη δημιουργία του χάρτη του περιβάλλοντος χρησιμοποιείται η μέθοδος των κελιών (cell decomposition). Ο χώρος μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα η κίνηση αρχικά είναι χαρτογραφημένος με τη μορφή κανονικού πλέγματος.
- Δημιουργία δικτυακής αντίστασης: μετά τη δημιουργία του χάρτη κτήσεως, κάθε κελί χαρτογραφείται πάνω σ' ένα δίκτυο αντιστάσεων, αντικαθιστώντας κάθε κελί

του χάρτη κτήσεως με ένα αριθμό από οκτώ αντιστάσεις (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW), όπου κάθε μια συνδέεται σ' ένα κεντρικό σημείο. Το δίκτυο των αντιστάσεων προκύπτει χρησιμοποιώντας τη μέθοδο x -norm. Κάθε αντίσταση συνδέεται με μια αντίσταση από τα οκτώ γειτονικά κελιά.

- Δημιουργία χάρτη αγωγιμότητας: η τιμή κάθε αντίστασης καθορίζεται από την αντίστοιχη τιμή του κελιού στο χάρτη κτήσεως και από τη χαρτογραφημένη συνάρτηση που αξιοποιεί την κτήση κάθε κελιού του χάρτη κτήσεως εντός της αγωγιμότητας κάθε κόμβου του δικτύου των αντιστάσεων. Τρεις περιοχές του χάρτη έχουν σημειωθεί για να δείξουν τα πιθανά στάδια ενός κόμβου. Αν η κτήση ενός κελιού συμπίπτει στην περιοχή *I*, τότε το κελί χαρακτηρίζεται ως άδειο, ελεύθερο και μια μέγιστη τιμή αγωγιμότητας του προσδίνεται. Αν η κτήση ενός κελιού συμπίπτει στην περιοχή *III*, τότε το κελί χαρακτηρίζεται ως γεμάτο, κατειλημμένο και του προσδίνεται η ελάχιστη τιμή αγωγιμότητας. Η περιοχή *II* αντιστοιχεί σε κελί ούτε γεμάτο, ούτε άδειο.
- Επίλυση του δικτύου των αντιστάσεων για να προκύψει το πεδίο που θα καθορίσει τη διαδρομή που θ' ακολουθήσει ο ρομποτικός μηχανισμός.

Οι [Kimon Valavanis et al., 2001], παρουσίασαν μια καινοτομική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος πλοήγησης αυτόνομου έντροχου ρομποτικού οχήματος στο 2-D περιβάλλον, συνδυάζοντας τον EPF πλοηγότη που παρουσιάσαμε παραπάνω με ένα δι-επίπεδο ασαφή ελεγκτή, για την εξαγωγή ασφαλούς από εμπόδια τροχιάς σε πραγματικό χρόνο. Αρχικά, δημιουργείται ο χάρτης κτήσεως του περιβάλλοντος και εν συνεχεία χαρτογραφείται πάνω σε δίκτυο αντιστάσεων, που χρησιμοποιείται για να εξάγει την EPF. Η EPF δημιουργεί σε πραγματικό χρόνο ελάχιστα κατειλημμένες τροχιές. Ο ελεγκτής προβάλλει μια μεγάλου εύρους συγχώνευση σημάτων που ερμηνεύουν τα PF αποτελέσματα συναρτήσει της τρέχουσας τοπικής κατάστασης του περιβάλλοντος, επιτρέποντας έτσι τις αντιδραστικές και ανακλαστικές κινήσεις για την πλοήγηση. Το μοντέλο ανίχνευσης εμποδίων έχει ως έξοδο τη θέση και την πιθανότητα επικείμενης πρόσκρουσης. Η πληροφορία αυτή συνδυάζεται με το μοντέλο ελέγχου κινήσεων και την έξοδο του συστήματος πλοήγησης. Αν κάποιο εμπόδιο μπλοκάρει τη σχεδιασμένη τροχιά, τότε λαμβάνεται απόφαση για την αποφυγή του εμποδίου, ώστε το ρομπότ να κινηθεί ελεύθερα προς την κατεύθυνση του στόχου του.

Προκειμένου, να αποκτήσουμε μια συνολική εικόνα των μεθόδων επίλυσης του προβλήματος πλοήγησης κάποιου ρομποτικού οχήματος, στο σημείο αυτό της παρούσας εργασίας, θα αναφερθούμε στις μεθόδους που χρησιμοποιούν Εξελικτικούς Αλγορίθμους, (Evolution Algorithms, EA).

Οι [Kazuo Sugihara et al.], ασχολήθηκαν με το σχεδιασμό της τροχιάς ενός αυτόνομου, έντροχου ρομποτικού οχήματος, σε δυναμικό περιβάλλον, με άγνωστα και πιθανώς κινούμενα εμπόδια. Χρησιμοποίησαν ως μέθοδο πλοήγησης τους Γενετικό Αλγόριθμο - ΓΑ, που αρχικά εφάρμοσαν για την επίλυση του 2-D προβλήματος και εν συνεχεία στο 3-D περιβάλλον, θεωρώντας πλέγμα διάστασης κ (όπου αν $\kappa=3$ τότε έχουμε 3-D). Ο 2-D χώρος προσεγγίστηκε με κανονικό πλέγμα χωρισμένο σε κελιά. Ο ΓΑ διατηρεί ένα πληθυσμό ατόμων, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια υποψήφια λύση του προβλήματος (δηλαδή, μια πιθανή τροχιά) και αναπαρίσταται με μια σταθερού μήκους δυαδική αλληλουχία.

Οι [Ibikunle Ashiru et al., 1996], ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο έντροχου ρομποτικού οχήματος σε στατικό και γνωστό περιβάλλον, με σκοπό να προκύψει μια ελεύθερη από εμπόδια τροχιά και το ρομπότ να φτάσει τελικά το στόχο του. Χρησιμοποιήθηκε ένας διακριτοποιημένος δυαδικός χάρτης απ' όπου εξήχθησαν πληροφορίες σχετικές με τη θέση και το σχήμα κάθε εμποδίου. Το χρωμόσωμα είναι μια αλληλουχία γονιδίων και αφορά μια πιθανή τροχιά. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε σταθερού μήκους χρωμόσωμα για να κρατήσει την πληροφορία των διαδρομών. Επίσης, χρησιμοποίησαν ένα συντονιστικό μηχανισμό αποτελούμενο από δύο τροχιακά σημεία, έναντι ενός ως τεχνική ελαχιστοποίησης της απόστασης. Για να ελαχιστοποιήσουν τον αριθμό των προσκρούσεων σε μια διαδρομή, ανέπτυξαν την τεχνική *directed flow avoidance*. Η τεχνική αυτή, διαχωρίζει αποτελεσματικά τα σημεία της τροχιάς, προσάπτοντας σε καθένα από αυτά μια τιμή, που αντιστοιχεί στο πόσο κοντά βρίσκονται σε μια ακμή ή σ'ένα συνδυασμό ακμών κάθε εμποδίου. Οι ΓΑ βασίζονται σε μια βαθμωτή συνάρτηση που αξιολογεί τη βιωσιμότητα κάθε ατόμου και δεν περιγράφει ένα τρόπο διαχείρισης πολλαπλών περιορισμών. Για το λόγο αυτό, οι συγγραφείς της παρούσας μελέτης, χρησιμοποίησαν μια τεχνική, η οποία υποστηρίζει την αριθμητική αναπαράσταση κάθε περιορισμού ξεχωριστά και έτσι τα χρωμοσώματα χαρακτηρίζονται τελικά με μία διανυσματική συνάρτηση προσαρμογής (fitness vector). Επίσης, προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα μιας κακής διαδρομής, καλούν έναν επιδιορθωτικό τελεστή (*path wrap repair operator*), που

υποστηρίζει τις καλές λύσεις και τέλος, προκειμένου να καθορίσουν πιο χρωμόσωμα αφορά άκυρες τροχίες, τα χρωμοσώματα ρυθμίζονται από ένα τελεστή φίλτρου, που παίρνει ως είσοδο την καλύτερη διαδρομή που έχει προκύψει από τον ΓΑ και εξάγει ως έξοδο την αντίστοιχη διαδρομή όπως έχει προκύψει από τη συνάρτηση προσαρμογής, τους περιορισμούς και την εφαρμογή των λοιπών τελεστών (*post processing filtering of paths*).

Ο [Frank Hoffmann 1996], παρουσίασε ένα ΓΑ ικανό να εκπαιδεύσει έναν ασαφή ελεγκτή, που επιτρέπει την εύρεση ικανοποιητικής κίνησης ελέγχου ακόμα και όταν οι πληροφορίες για το περιβάλλον κίνησης του ρομπότ είναι ανακριβείς και ελλιπείς. Σκοπός του προβλήματος είναι το ρομπότ να προσεγγίσει ένα συγκεκριμένο στόχο, ενώ παράλληλα να αποφύγει οποιαδήποτε πρόσκρουση με εμπόδια. Ο ΓΑ είναι ικανός να δημιουργεί χρωμοσώματα μ'ένα πολύ ελαστικό τρόπο, προκειμένου να αναπαριστά τη σχέση ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του ελεγκτή.

Οι [Jing Xiao et al., 1997], σχεδίασαν έναν εξελικτικό σχεδιαστή τροχιάς (evolutionary planner/navigator) ο οποίος έχει την ιδιότητα να αυτοβελτιώνει τις παραμέτρους του. Μάλιστα χρησιμοποίησαν τον ίδιο αλγόριθμο για την βελτιστοποίηση της διαδρομής του ρομπότ και σε γνωστά σενάρια (off-line), αλλά και στην επίλυση του προβλήματος σε πραγματικό χρόνο (on-line). Αρχικά, πριν ακόμα ξεκινήσει η κίνηση του ρομποτικού οχήματος (off-line), ο αλγόριθμος σχεδιάζει τη βέλτιστη διαδρομή, λαμβάνοντας υπ' όψιν όσα δεδομένα είναι γνωστά για το περιβάλλον. Όταν το ρομπότ μπαίνει σε κίνηση, ο ελεγκτής κάνει δύο παράλληλες λειτουργίες. Οδηγεί το ρομπότ στην ήδη σχεδιασμένη διαδρομή, ενώ ελέγχει το περιβάλλον για τυχόν εμφάνιση άγνωστων αντικειμένων και συνεχίζει να «τρέχει» τον αλγόριθμο για να βρει καλύτερες ακόμα λύσεις (διαδρομές), λαμβάνοντας υπ' όψη και τα νέα εμπόδια. Για την αξιολόγηση των λύσεων χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές συναρτήσεις προσαρμογής, ανάλογα με το αν το ρομπότ συναντά ή όχι εμπόδια κατά την κίνησή του. Αναλυτικότερα, όταν δεν υπάρχουν εμπόδια κατά μήκος της διαδρομής, η συνάρτηση προσαρμογής συνίσταται από το μήκος της διαδρομής, την ομαλότητά της και την απόσταση από τα εμπόδια. Όταν όμως κατά την κίνηση του ρομπότ ανιχνευθούν εμπόδια, τότε η συνάρτηση προσαρμογής είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, όπως ο αριθμός των συγκρούσεων με τα εμπόδια, ο αριθμός των εφικτών και ανέφικτων τμημάτων της τροχιάς, τα μήκη των τμημάτων αυτών κ.α. Επιπλέον, με τη βοήθεια κάποιων

σχέσεων, ελέγχεται η αποδοτικότητα ορισμένων παραμέτρων του ΓΑ και γίνεται σταδιακή προσπάθεια εύρεσης καλύτερων.

Οι [Ma de las Mercedes Gomez-Albarran et al., 1997], παρουσίασαν ένα ΓΑ που βελτιστοποιεί κλασσικούς αλγορίθμους που επιλύουν το πρόβλημα πλοήγησης και συγκεκριμένα τον αλγόριθμο Lee. Ο ΓΑ που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση του αλγορίθμου Lee (GALO), ερευνά για τον καλύτερο κόμβο μέσα σ' ένα δίκτυο, τους κόμβους δηλαδή με την καλύτερη πιθανότητα να συμμετάσχουν στη βέλτιστη διαδρομή και ψάχνει για τη συντομότερη διαδρομή ανάμεσα στους κόμβους αυτούς χωρίς όμως, να χρησιμοποιεί απαγορευμένες περιοχές, περιοχές δηλαδή που είναι κατειλημμένες από πολυγωνικά εμπόδια και δεν επιτρέπουν στο ρομπότ να περάσει μέσα από αυτές. Χρησιμοποιεί μεταβλητού μήκους χρωμοσώματα και ειδικούς τελεστές.

Οι [Noboru Noguchi et al., 1997], εφάρμοσαν μια τεχνική ελέγχου, συνδυάζοντας ένα ΓΑ και ένα ANN, που δύναται να προσδιορίσει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ρομπότ και να επιλύσει το πρόβλημα της πλοήγησης χρησιμοποιώντας μη γραμμικά μοντέλα. Ο σκοπός είναι να βρεθεί ένα σύνολο από βάρη, τέτοια ώστε για κάθε διάνυσμα εισόδου το διάνυσμα εξόδου, που υπολογίζεται από το ANN, να είναι ίδιο με το επιθυμητό. Ο ΓΑ χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει μια διαδρομή που θα ικανοποιεί τις αρχικές και τελικές συνθήκες του ρομπότ. Ο ΓΑ ερευνά τη βέλτιστη διαδρομή μέσω εξελικτικών υπολογισμών και χρησιμοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση των παραγόμενων διαδρομών.

Ο [Andreas C. Nearchou, 1998], παρουσίασε μια μέθοδο για την πλοήγηση αυτόνομου ρομποτικού οχήματος με τη χρήση δυαδικών εξελικτικών αλγορίθμων. Η μέθοδος αυτή έχει τ' ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. παράγει εφικτά μονοπάτια δημιουργώντας μια ακολουθία από ενέργειες που οδηγούν το όχημα προς τον επιθυμητό στόχο.
2. δε χρησιμοποιεί ένα ολικό μοντέλο του περιβάλλοντος και έτσι μπορεί να εφαρμοσθεί και σε άγνωστα περιβάλλοντα.
3. χρησιμοποιεί μεταβλητού μήκους χρωμοσώματα και μια απλοϊκή μέθοδο αξιολόγησής τους.

Το περιβάλλον χωρίζεται σε κελιά και το όχημα θεωρείται ότι δύναται να βλέπει μόνο ένα κελί μακριά προς την κατεύθυνση που κοιτάζει και αντιλαμβάνεται αν αυτό το κελί είναι κατειλημμένο από εμπόδιο ή όχι. Επίσης, μπορεί να εκτελέσει δύο μόνο ενέργειες: να προχωρήσει μπροστά ή να στρίψει αριστερά. Για την περιγραφή των

ενεργειών αυτών χρησιμοποιούνται δυαδικά χρωμοσώματα. Η συνάρτηση προσαρμογής ανταμείβει χρωμοσώματα τα οποία σχηματίζουν διαδρομές που δεν περιλαμβάνουν σύγκρουση με εμπόδια. Επίσης, χρησιμοποιούνται δύο ακόμα κριτήρια αξιολόγησης. Η απόσταση του τελικού σημείου της διαδρομής από το στόχο και το μήκος της διαδρομής.

Οι [Dilip Kumar Pratihari et al., 1998], παρουσίασαν ένα ασαφή ελεγκτή, που λύνει το πρόβλημα σχεδιασμού της κίνησης ενός ρομποτικού οχήματος, υπό την παρουσία κινούμενων εμποδίων. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε ένας ΓΑ για να συντονίσει τις μεταβλητές κατάστασης και τους κανόνες του ελεγκτή. Με τη βοήθεια του ελεγκτή σχεδιάζεται η συντομότερη δυνατή διαδρομή, ενώ με τη συμβολή του ΓΑ καθορίζονται ποιοι από τους κανόνες του ασαφούς ελεγκτή δίνουν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Ο ελεγκτής έχει ως είσοδο την απόσταση κάθε εμποδίου από το ρομπότ και τη γωνία μεταξύ του κοντινότερου εμποδίου του ρομπότ και της διεύθυνσης που οδηγεί στο στόχο. Η έξοδος είναι η απόκλιση από τη διεύθυνση που οδηγεί στο στόχο, ώστε ν'αποφευχθεί το εμπόδιο. Οι κινήσεις του ρομποτικού οχήματος πρέπει να είναι τέτοιες ώστε, η συνολική διαδρομή που θα διανύσει το όχημα να είναι η ελάχιστη δυνατή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ΓΑ με δυαδικά γονίδια, το καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σ'έναν από τους κανόνες του ασαφούς ελεγκτή. Η τιμή 0 του γονιδίου συνεπάγεται ότι ο συγκεκριμένος κανόνας (που έχει εισαχθεί από τον κατασκευαστή του ελεγκτή) δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί, ενώ η τιμή 1 σημαίνει ότι ο αντίστοιχος κανόνας παραμένει. Ο ΓΑ εφαρμόζεται αρχικά σε γνωστά σενάρια, πριν ξεκινήσει την κίνησή του το ρομπότ (off-line) για τη βελτιστοποίηση του ασαφούς ελεγκτή. Εν συνεχεία, ο βελτιστοποιημένος ελεγκτής εφαρμόζεται σε άγνωστα σενάρια, σε πραγματικό χρόνο (on-line). Το όχημα θεωρείται ότι έχει αρχική ταχύτητα μηδέν και επιταχύνει, στη συνέχεια διατηρεί σταθερή τη ταχύτητά του, ενώ λίγο πριν φτάσει στο στόχο του επιβραδύνει. Όλες οι αποφάσεις λαμβάνονται κάθε Δt χρονικές μονάδες, λαμβάνοντας υπ'όψη την προβλεπόμενη θέση κάθε εμποδίου. Ο ΓΑ χρησιμοποιήθηκε με 4 διαφορετικούς τρόπους, βελτιστοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους του ελεγκτή, ενώ οι συγγραφείς προτείνουν και κάποιες ακόμα παραλλαγές, που όπως φαίνεται δίνουν καλύτερα αποτελέσματα.

Οι [J.Gomez-Ortega D et al.], παρουσίασαν ένα ΓΑ που καθοδηγεί επίγεια ρομπότ σε δυναμικό περιβάλλον, με κινούμενα και με άγνωστη τροχιά εμπόδια. Ο

προτεινόμενος ΓΑ ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση προσαρμογής, η οποία τιμωρεί το ρομπότ εάν:

1. η προβλεπόμενη κάθε φορά μελλοντική του θέση είναι μακριά, συγκρινόμενη με την επιθυμητή,
2. αλλάζει απότομα την κατεύθυνση κίνησής του (ώστε να προκύπτει η ομαλότερη δυνατή πορεία),
3. βρίσκεται κοντά σε κάποιο εμπόδιο.

Οι μελλοντικές θέσεις είναι άγνωστες και εκτιμούνται με τη χρήση φίλτρου Kalman, ενώ τα εμπόδια κινούνται με μη γραμμικές άγνωστες τροχιές. Η βελτιστοποίηση γίνεται σε πραγματικό χρόνο, ενώ κάθε στιγμή υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης προσαρμογής, καθώς και για μελλοντικές χρονικές στιγμές, χρησιμοποιώντας τις προβλεπόμενες θέσεις του ρομπότ. Για να προκύψουν ταχύτερα αποτελέσματα, ο ΓΑ χρησιμοποιεί ως αρχικό πληθυσμό κάθε φορά (εκτός από τη στιγμή που ξεκινά την κίνησή του το ρομπότ, όπου τότε γίνεται με τυχαίο τρόπο) τον προηγούμενο καλύτερο πληθυσμό. Η εύρεση της βέλτιστης πορείας γίνεται σε δύο στάδια: Αρχικά, υπολογίζεται «χονδρικά» μια λύση, η οποία εν συνεχεία βελτιώνεται (fine tuning). Για τη βελτίωση της λύσης χρησιμοποιούνται οι τελεστές μη ομοιόμορφης μετάλλαξης (non uniform mutation) και ευρετικής διασταύρωσης (heuristic crossover), ενώ για τη «χονδρική» λύση χρησιμοποιούνται η τυχαία μετάλλαξη (random mutation) και η ολική αριθμητική διασταύρωση (whole arithmetical crossover). Τα γονίδια παίρνουν πραγματικές τιμές, ενώ εφαρμόζεται παράλληλα και μοντέλο ελιτισμού.

Προκειμένου, να λάβουμε μια συνολική εικόνα της έρευνας στο χώρο της πλοήγησης, θα αναφερθούμε σε μελέτες που επιλύουν το πρόβλημα σχεδιασμού τροχιάς πολλαπλών αυτόνομων ρομποτικών οχημάτων. Συχνά συναντάται με τον όρο Cooperative Mobile Robotics [Y. Uny Cao et al., 1997]. Η συνεργασιακή συμπεριφορά (cooperative behavior), βασίζεται στον προσδιορισμό της αρχιτεκτονικής υποδομής του συνόλου (group architecture). Τον προσδιορισμό δηλαδή, της ετερογένειας ή ομογένειας των οχημάτων, την ικανότητά τους ν' αναγνωρίζουν και ν' αναπαριστούν άλλα ρομποτικά οχήματα, την ικανότητα να μοιράζονται ένα περιβάλλον, ν' αντιλαμβάνονται και να διαχειρίζονται τα αντικείμενα που υπάρχουν σ' αυτό και φυσικά τη δυνατότητα και τον τύπο της μεταξύ τους επικοινωνίας. Η αρχιτεκτονική συνόλου ενός ρομποτικού συστήματος συνεργασίας, παρέχει την υποδομή κατά την οποία καθορίζονται οι συμπεριφορές

συνεργασίας καθώς και οι ικανότητες και τα όρια του συστήματος. Τα κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να προσδιοριστούν είναι: ο συγκεντρωτισμός/ αποκέντρωση, η διαφοροποίηση, η επικοινωνία και η ικανότητα μοντελοποίησης άλλων μηχανισμών. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει αρχικά να δοθεί απάντηση στο ερώτημα αν το σύστημα είναι συγκεντρωτικό ή αποκεντρωτικό, αν δηλαδή διαθέτει μονοδιάστατο ή όχι μηχανισμό ελέγχου. Η αποκεντρωτική αρχιτεκτονική κατηγοριοποιείται σε κατανεμημένη (distributed) και σε ιεραρχική (hierarchical). Στην πρώτη περίπτωση, όλοι οι μηχανισμοί είναι ισόβαθμοι και σέβονται τις απαιτήσεις ελέγχου, ενώ στη δεύτερη, οι μηχανισμοί είναι τοπικά συγκεντρωτικοί. Τα αποκεντρωτικά συστήματα πλεονεκτούν σε πολλά σημεία έναντι των συγκεντρωτικών συστημάτων.

Εν συνεχεία, επιβάλλεται ο προσδιορισμός της ομοιογένειας ή ετερογένειας των ρομποτικών μηχανισμών. Σε πρακτικό επίπεδο όταν πρόκειται για ετερογενή ρομποτικά οχήματα, αυξάνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος, η κατανομή των διάφορων ρομποτικών αποστολών γίνεται εξαιρετικά δύσκολη υπόθεση και τέλος γίνεται επιτακτική ανάγκη η δυνατότητα των ρομπότ να μοντελοποιούν τους υπόλοιπους ρομποτικούς μηχανισμούς της ομάδας τους.

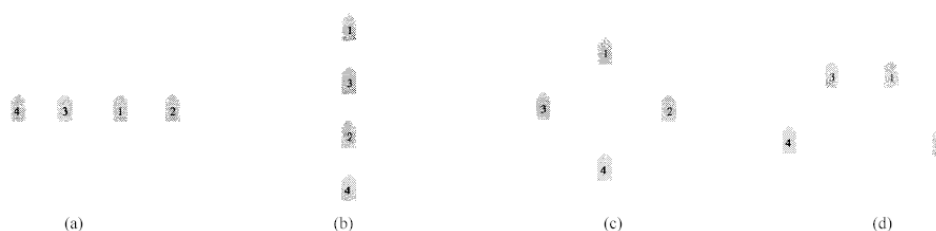
Επίσης, απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός του τύπου της επικοινωνιακής δομής του συστήματος, δηλαδή του τύπου των δια μηχανικών αλληλεπιδράσεών του. Έχουν υποστηριχθεί τρεις τύποι αλληλεπιδράσεων:

- Αλληλεπίδραση μέσω του περιβάλλοντος (interaction via environment): είναι η απλούστερη μορφή αλληλεπίδρασης και λαμβάνει χώρα όταν το ίδιο το περιβάλλον αποτελεί επικοινωνιακό μέσο (επιρροής, συμμετοχικής μνήμης).
- Αλληλεπίδραση μέσω αισθητήρων (interaction via sensing): αφορά στις επικείμενες τοπικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους ρομποτικούς μηχανισμούς, ως αποτέλεσμα των δεδομένων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες τους, χωρίς την ύπαρξη περαιτέρω επικοινωνίας. Αυτός ο τύπος αλληλεπιδράσεων απαιτεί την ικανότητα των ρομπότ να διακρίνουν τα άλλα οχήματα της ομάδας τους, καθώς και τα διάφορα αντικείμενα που δομούν το περιβάλλον κίνησής τους.
- Αλληλεπίδραση μέσω επικοινωνίας (interaction via communication): αφορά την περαιτέρω επικοινωνία (extent communication) ανάμεσα στα διάφορα ρομποτικά οχήματα που συνιστούν τη ρομποτική ομάδα του προβλήματος, μέσω άμεσων μηνυμάτων ή μέσω σημάτων που αυτά εκπέμπουν.

Τέλος, επιβάλλεται ο προσδιορισμός των προθέσεων, των ικανοτήτων, των κινήσεων και της γενικότερης κατάστασης των άλλων ρομποτικών μηχανισμών. Στόχος είναι, να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή συνεργασία ανάμεσα στα διάφορα ρομποτικά οχήματα που συνιστούν την εκάστοτε ρομποτική ομάδα επίλυσης οποιουδήποτε προβλήματος πλοήγησης.

Οι υπάρχουσες μέθοδοι επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Στη συγκεντρωτική προσέγγιση (centralized approach), όπου ο χώρος κίνησης του εκάστοτε ρομποτικού οχήματος ενώνεται και προκύπτει ένας σύνθετος χώρος όπου σ' αυτόν πραγματοποιείται η ανίχνευση βέλτιστης τροχιάς για το συνολικό σύνθετο σύστημα. Αντίθετα, στην αποσυζευγμένη προσέγγιση (decoupled approach) αρχικά υπολογίζονται διαφορετικές βέλτιστες διαδρομές λίγο πολύ ανεξάρτητες μεταξύ τους, για κάθε ένα ρομποτικό όχημα και εν συνεχεία, λαμβάνονται υπ' όψιν οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους ρομποτικούς μηχανισμούς και με τη χρήση διάφορων στρατηγιών επιλύονται οι πιθανές συγκρούσεις.

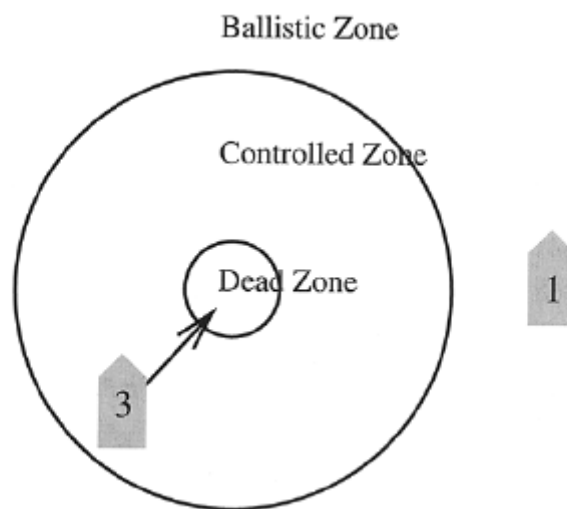
Αναλυτικότερα τώρα, οι [Tucker Balch et al., 1998], ανέπτυξαν νέες συμπεριφορές αντίδρασης για την πλοήγηση πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων. Προκειμένου, να είναι δυνατό η ρομποτική ομάδα να προσεγγίσει το στόχο της και να αποφύγει ενδεχόμενους κινδύνους, η δόμηση της συμπεριφοράς ολοκληρώνεται και με άλλους σχηματισμούς πλοήγησης. Έχουν θεωρηθεί οι ακόλουθοι σχηματισμοί για μια ομάδα τεσσάρων ρομποτικών οχημάτων: line, column, diamond και wedge.



Σχήμα 1.1: δυνατοί σχηματισμοί τεσσάρων ρομπότ: (a) line, (b) column, (c) diamond and (d) wedge. [Tucker Balch et al., 1998].

Κάθε ρομπότ έχει τη δική του συγκεκριμένη θέση σε κάθε σχηματισμό και αυτή εξαρτάται από τον αριθμό αναγνώρισής του (identification number-ID). Ο σκοπός κάθε ρομποτικού οχήματος είναι η ταυτόχρονη κίνηση στη θέση του στόχου, η

αποφυγή εμποδίων, η αποφυγή πρόσκρουσης με κάποιο άλλο ρομπότ και η διατήρηση της θέσης του στο σχηματισμό που ανήκει. Για κάθε ένα απο τους παραπάνω στόχους υπάρχει και το αντίστοιχο σχέδιο κίνησης: *move-to-goal*, *avoid-static-obstacle*, *avoid-robot* και *maintain-formation*, καθώς και ένα επιπλέον σχέδιο *noise* που ασχολείται με τοπικά ελάχιστα, μέγιστα και κυκλικές συμπεριφορές. Κάθε σχέδιο δημιουργεί ένα διάνυσμα που αναπαριστά την επιθυμητή αντίδραση συμπεριφοράς, σχετική με τη τρέχουσα κατάσταση του περιβάλλοντος. Μια αυξανόμενη τιμή χρησιμοποιείται για να υποδείξει τη σχετική σημασία της συμπεριφοράς κάθε ρομπότ. Από τη στιγμή που γίνεται γνωστή η επιθυμητή θέση σχηματισμού, καλείται το σχέδιο διατήρησής της, το οποίο δημιουργεί άμεσα ένα διάνυσμα κίνησης, που έχει την κατεύθυνση της επιθυμητής θέσης και μέγεθος που εξαρτάται απο το πόσο μακριά είναι το ρομπότ από αυτή. Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει τρεις ζώνες που ορίζουν την απόσταση από την επιθυμητή θέση και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μεγέθους του διανύσματος.



Σχήμα 1.2: ζώνες για τον υπολογισμό του μεγέθους για το σχέδιο διατήρησης.

[Tucker Balch et al., 1998].

Η ακτίνα κάθε ζώνης είναι παράμετρος του σχεδίου διατήρησης. Στο παραπάνω σχήμα 1.2 το ρομπότ 3, προσπαθεί να διατηρήσει τη θέση του αριστερά του ρομπότ 1. Το ρομπότ 3 βρίσκεται στη ζώνη ελέγχου και συνεπώς μια μετρίας έντασης δύναμη

εφαρμόζεται για να διατηρήσει την επιθυμητή θέση του. Η κατεύθυνση του σχηματισμού καθορίζεται με μια ευθεία από τη μονάδα κέντρου και του επόμενου σημείου πλοήγησης, τα οποία καθορίζουν το τοπικό σύστημα συντονισμού. Το τοπικό αυτό σύστημα συντονισμού υπολογίζεται διαρκώς σε κάθε βήμα της κίνησης.

Οι [Steven M. LaValle et al., 1998], ασχολήθηκαν με τη γεωμετρική επίλυση του προβλήματος πλοήγησης πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων. Εξέλιξαν τις παραδοσιακές decoupled και centralized τεχνικές και τις χρησιμοποίησαν ως τα αντίθετα άκρα ενός ευρύτερου φάσματος, στη μέση του οποίου βρίσκονται για παράδειγμα, οι ασθενέστεροι περιορισμοί κίνησης των ρομπότ, πριν ληφθούν υπ' όψιν οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποίησαν, βασίζεται στις αρχές του δυναμικού προγραμματισμού και δίνει πολλαπλές λύσεις σ'ένα μερικώς κατανεμημένο χώρο στρατηγικών κινήσεως και αφορά στην επίλυση τριών μερικών προβλημάτων:

1. συντονισμό κατά μήκος σταθερών ανεξάρτητων διαδρομών,
2. συντονισμό κατά μήκος ανεξάρτητων χάρτεων διαδρομών (roadmap)
3. γενική μη συντονισμένη πλοήγηση πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων.

Οι [Petr Svestka et al., 1998], ασχολήθηκαν με τη συγκεντρωτική (centralized) πλοήγηση πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων σε στατικό περιβάλλον. Θεωρώντας τα διάφορα απλά ρομπότ ως ένα σύνθετο ρομπότ, η προσέγγισή τους συνίσταται στην κατασκευή κάποιου χάρτη διαδρομής. Δημιουργείται δηλαδή, για το σύνθετο ρομπότ ένα δίκτυο με ελεύθερες από εμπόδια διαδρομές. Ο χάρτης αυτός δημιουργείται σε δύο βήματα. Αρχικά, κατασκευάζεται ένας χάρτης τροχιάς για ένα μόνο απλό ρομπότ και στη συνέχεια n παρόμοιοι χάρτες συνδυάζονται και προκύπτει ο χάρτης για το σύνθετο ρομπότ (που αποτελείται από n απλά ρομπότ). Ο σύνθετος αυτός χάρτης καλείται super- graph και κατασκευάζεται μια μόνο φορά για ένα δεδομένο στατικό περιβάλλον. Στην παρούσα μελέτη παρουσίασαν δύο διαφορετικές δομές για το super- graph: την flat super- graph και την multi- level super- graph.

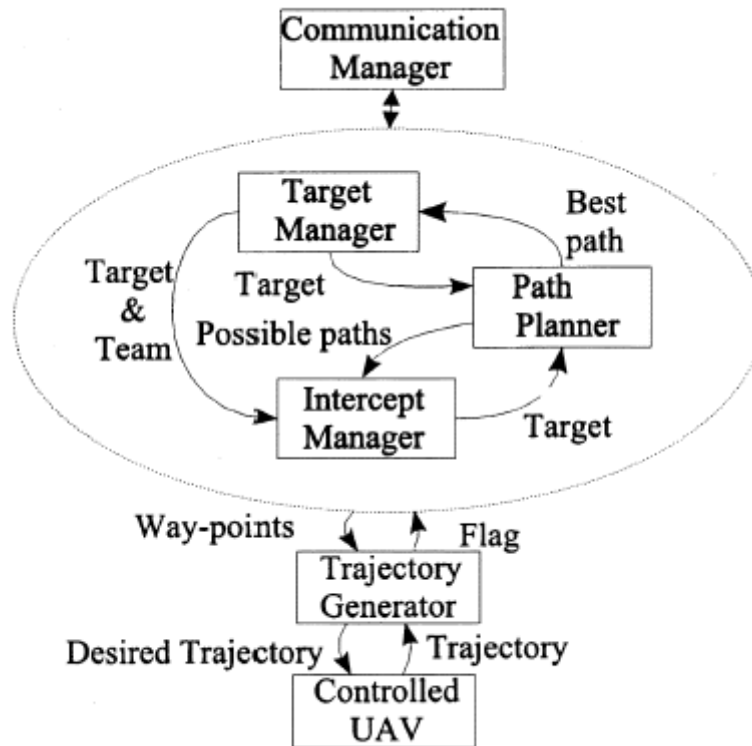
Οι [Maren Bennewitz et al., 2002], παρουσίασαν μια αποσυνζευγμένη (decoupled) μέθοδο εύρεσης βέλτιστων σχεδίων προτεραιότητας για συντονισμένες ρομποτικές ομάδες. Εκτελούν τυχαία hill-climbing αναζήτηση, χρησιμοποιώντας περιορισμούς ανάμεσα στα διαφορετικά ρομπότ που προκύπτουν από τις προδιαγραφές του στόχου. Η αναζήτηση ξεκινά με ένα αυθαίρετο αρχικό σχέδιο προτεραιότητας όπου εναλλάσσει τυχαία την προτεραιότητα δύο ρομπότ στο συγκεκριμένο σχέδιο. Εφόσον η νέα διάταξη δώσει καλύτερη από την υπάρχουσα

λύση, δηλ. συντομότερη διαδρομή, η αναζήτηση συνεχίζει ακολουθούμενη τη διάταξη αυτή. Αν όμως παγιδευτεί σε τοπικό ελάχιστο, εκτελεί τυχαία επανακκίνηση, χρησιμοποιώντας διαφορετική αρχική διάταξη των ρομπότ. Ο αριθμός των επανακκινήσεων και της εναλλαγής προτεραιοτήτων ελέγχεται από δύο παραμέτρους.

Οι [Randal W. Beard et al., 2002], παρουσίασαν μια μέθοδο επίλυσης του προβλήματος πλοήγησης πολλαπλών ρομποτικών εναέριων οχημάτων (UAVs). Θεωρούν το σενάριο κατά το οποίο διαθέτουν M εναέρια ρομπότ που καλούνται να προσεγγίσουν N γνωστές θέσεις στόχου. Αναλύουν το πρόβλημα σε υπό προβλήματα:

1. Δεδομένης της ύπαρξης M UAVs με N στόχους, καλούνται να αναθέσουν σε κάθε όχημα το στόχο του, με τρόπο τέτοιο ώστε αν είναι δυνατό, κάθε στόχος να προσεγγίζεται από μια ομάδα UAV.
2. Για κάθε ομάδα από UAVs για ένα συγκεκριμένο στόχο, να καθοριστεί ο τελικός χρόνος προσέγγισής του (estimated time over target, TOT).
3. Για κάθε ομάδα UAVs, να καθοριστεί μια ασφαλή διαδρομή, ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιείται ο περιορισμός της ταχύτητας (μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής) και να επιτευχθεί μέσα στον προκαθορισμένο χρόνο (TOT).
4. Μετασχηματισμό κάθε σημείου ελέγχου μιας διαδρομής σε μια ελεύθερη από εμπόδια τροχιά για κάθε ρομποτικό μηχανισμό, ικανοποιώντας πάντα τους περιορισμούς του προβλήματος.
5. Ανάπτυξη γενικών σταθερών ελεγκτών για κάθε όχημα, με τρόπο τέτοιο ώστε, κάθε UAV να ακολουθεί μια διαφορετική, προκαθορισμένη τροχιά.

Το προτεινόμενο αρχιτεκτονικό μοντέλο φαίνεται στο σχήμα 1.3 που ακολουθεί:



Σχήμα 1.3: το αρχιτεκτονικό μοντέλο για ένα UAV. [Randal W. Beard et al., 2002].

Στο συγκεκριμένο αρχιτεκτονικό σύστημα, συνεργάζονται τα μοντέλα: διαχείρισης στόχου (target manager), σχεδιασμού τροχιάς (path planning) και αναχαίτησης (intercept manager), προκειμένου να εξαχθούν τα σημεία ελέγχου για κάθε UAV. Αναλυτικότερα, ο σχεδιαστής τροχιάς δημιουργεί ένα πλήθος δυνατών διαδρομών για το συγκεκριμένο UAV προς τον προκαθορισμένο στόχο του. Επίσης, επιστρέφει πληροφορίες σχετικές με τις διαδρομές αυτές, που αφορούν στις εκτιμημένες δαπάνες καθώς και την εκτιμημένη έκθεση σε επικείμενους κινδύνους. Ο ρόλος του διαχειριστή του στόχου (target manager) είναι η ανάθεση στόχου σε κάθε UAV. Ο ρόλος του intercept manager, είναι ο έλεγχος και η επιβεβαίωση της ταυτόχρονης προσέγγισης του στόχου από την προκαθορισμένη ομάδα UAVs. Η δημιουργία τροχιάς (trajectory generation) λαμβάνει ένα πλήθος σημείων ελέγχου που προδιαγράφουν επιθυμητές τροχιές για κάθε UAV. Τέλος, το μοντέλο επικοινωνίας (communication manager) διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών UAVs. Δεδομένου ότι, κάθε UAV θεωρείται ότι διαθέτει διαφορετικό target manager,

intercept manager και path planner, επιβάλλεται ο συγχρονισμός των διάφορων αποφάσεων.

Οι [Thierry Simeon et al., 2002], ασχολήθηκαν με το πρόβλημα συντονισμού πολλαπλών ρομποτικών διαδρομών. Θεωρούν n έντροχα ρομποτικά οχήματα που μοιράζονται τον ίδιο χώρο κίνησης και καλούνται να βρουν n ανεξάρτητες διαδρομές, τέτοιες ώστε κάθε ρομπότ να προσεγγίζει το στόχο του, χωρίς όμως να συγκρούεται με τα υπόλοιπα. Η προτεινόμενη τεχνική συνίσταται στην ανίχνευση λύσης εντός n -διάστατου σύνθετου διαγράμματος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός αποδοτικού αλγορίθμου, που ερευνά το σύνθετο διάγραμμα, χωρίς να υπολογίζει το ακριβές σχήμα των εμποδίων. Δε χρησιμοποιούν κανονικοποιημένο πλέγμα, αλλά ένα δυσδιάστατο διάγραμμα. Επίσης, θεωρούν πολυγωνικά ρομπότ που κινούνται κατά μήκος διαδρομών (SA), ορισμένες από ευθύγραμμα τμήματα (S) και κυκλικά τόξα (A). Τα ρομπότ κατά την κίνησή τους αφήνουν ίχνη (traces) και δεδομένου ότι έχουν πολυγωνικό σχήμα, τα ίχνη των SA διαδρομών είναι επίσης πολυγωνικά (μια ακολουθία από ευθύγραμμα τμήματα και κυκλικά τόξα). Για το συντονισμό της κίνησης δύο ρομπότ, απαραίτητος είναι ο υπολογισμός της διατομής των ιχνών τους.

Οι [Natsuki Miyata et al., 2002], μελέτησαν ένα μοντέλο αρχιτεκτονικής για συνεργατική μεταφορά αντικειμένων από πολλαπλά ρομποτικά οχήματα σε άγνωστο στατικό περιβάλλον. Το συγκεκριμένο μοντέλο αρχιτεκτονικής πρέπει να ικανοποιεί τρία χαρακτηριστικά: να αντιμετωπίζει ποικίλες αποστολές σε συγκεκριμένο χρόνο και χώρο και υπό την παρουσία πολλαπλών ρομποτικών μηχανισμών να δύναται να αποφασίζει σε πραγματικό χρόνο. Οι συγγραφείς αντιμετώπισαν το παρόν πρόβλημα, θεωρώντας ένα τμήμα της αποστολής ως το έργο που πρέπει να γίνει από ένα ρομπότ σε συγκεκριμένο χρόνο. Βασιζόμενοι στις πληροφορίες που εξάγονται από το περιβάλλον, τα διάφορα τμήματα της γενικότερης αποστολής που πρέπει να γίνουν προκύπτουν δυναμικά, χρησιμοποιώντας οδηγούς έργου (task templates). Η προτεραιότητα αυτών εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων ρομποτικών οχημάτων και από τη διάταξη του χώρου κίνησής τους. Το κυρίως μέρος του αρχιτεκτονικού μοντέλου αποτελείται από δύο ελεγκτές πραγματικού χρόνου: ενός μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού για την εξαγωγή του σχεδίου προτεραιότητας των τμηματικών αποστολών και ενός μοντέλου κίνησης.

Οι [Atsushi Yamashita et al., 2003], πρότειναν μια μέθοδο επίλυσης του προβλήματος πλοήγησης πολλαπλών έντροχων ρομποτικών οχημάτων σε τρισδιάστατο περιβάλλον. Σκοπός είναι η επίτευξη βέλτιστης συνεργασίας των

ρομποτικών μηχανισμών για τη μεταφορά αντικειμένου μεγάλων διαστάσεων. Το πρόβλημα αυτό αναλύεται σε υπό-προβλήματα, όπως είναι η αποφυγή των εμποδίων και η διατήρηση σταθερών χειρισμών και ρομποτικών ελιγμών. Τα ρομπότ δηλαδή, πρέπει να μπορούν να χειρίζονται το αντικείμενο που μεταφέρουν με ευκολία και να μπορούν να αλλάζουν τη θέση τους όταν επιβάλλεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο κινούνται, για παράδειγμα όταν ο διάδρομος κίνησης είναι πολύ στενός. Προκειμένου, να μειώσουν τον υπολογιστικό χρόνο επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος, δε χρησιμοποίησαν έναν ελεγκτή πλοήγησης, αλλά σχεδίασαν και συνένωσαν ένα ελεγκτή γενικής πλοήγησης (global path planer) και ένα τοπικό ελεγκτή για τους ρομποτικούς χειρισμούς (local manipulation planer). Με τον ελεγκτή γενικής πλοήγησης αποφασίζεται πότε και που θα γίνει ο ρομποτικός ελιγμός του αντικειμένου, καθώς και το είδος του ελιγμού, που βασίζεται παράλληλα και στα αποτελέσματα που δίνει ο τοπικός ελεγκτής. Ο γενικός ελεγκτής, δίνει ως έξοδο την τροχιά για τα ρομπότ και για τα αντικείμενα, υπολογίζοντας παράλληλα, την αποφυγή πρόσκρουσης στα εμπόδια που δομούν το περιβάλλον κίνησης των ρομποτικών μηχανισμών. Ο τοπικός ελεγκτής δίνει ως έξοδο τις πληροφορίες που αφορούν τους ρομποτικούς χειρισμούς. Το είδος των ελιγμών υποδεικνύει τις κινήσεις του αντικειμένου που πρέπει να γίνουν και τη δυνατότητα των ρομπότ να αλλάζουν τη θέση του αντικειμένου με ασφάλεια. Οι πληροφορίες σχετικά με τους ρομποτικούς ελιγμούς δηλώνουν το χώρο διαχείρισής τους, την περιοχή δηλαδή, διαχείρισης του αντικειμένου, το κόστος διαχείρισης και τον απαιτούμενο χρόνο ολοκλήρωσης των ελιγμών. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που καλούνται να επιλύσουν σχετικά με το γενικό ελεγκτή πλοήγησης είναι η δραματική αύξηση του υπολογιστικού χρόνου που προκύπτει από το πολυδιάστατο (high-dimensional) C-space. Για το λόγο αυτό, αναδόμησαν το C-space, μειώνοντας τις διαστάσεις του, λαμβάνοντας υπ' όψη τα χαρακτηριστικά της μεταφερόμενης αποστολής από τους ρομποτικούς μηχανισμούς. Επιπλέον, χρησιμοποίησαν δυναμικό πεδίο (potential field), ψάχνοντας τη λύση στο μειωμένης διάστασης C-space. Για τον τοπικό ελεγκτή διαχείρισης χρησιμοποίησαν μια τεχνική χειρισμών, που είναι κατάλληλη για τον έλεγχο της θέσεως των ρομπότ. Υπολόγισαν τις συνθήκες κατά τις οποίες ένα αντικείμενο είναι ασταθές και εξήγαγαν τις κινήσεις κάθε ρομποτικού μηχανισμού, λαμβάνοντας υπ' όψη το σφάλμα θέσεως για κάθε ένα από αυτά καθώς και τους ασαφείς παράγοντες από το στάδιο σχεδίασης.

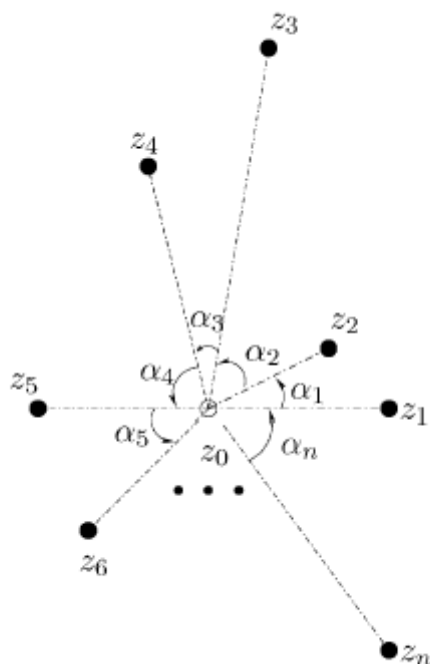
Οι [Abha Moitra et al., 2003], παρουσίασαν μια καινοτομική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος πλοήγησης πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων, που στη συγκεκριμένη μελέτη είναι ρομποτικά ελικόπτερα. Ανέπτυξαν ένα δυναμικό αλγόριθμο εύρεσης βέλτιστων διαδρομών για πολλαπλούς ρομποτικούς μηχανισμούς, χρησιμοποιώντας τον τύπο αλληλεπίδρασης μέσω επικοινωνίας (interaction via communication). Στόχος είναι η εξασφάλιση ενός συντονισμένου σχεδίου πλοήγησης από μια ομάδα ρομποτικών ανιχνευτών σε μια γεωγραφική περιοχή. Η περιοχή αυτή παρουσιάζεται με κελιά πλέγματος, που την καλύπτουν ολόκληρη. Κάθε κελί χαρακτηρίζεται από δύο παράγοντες, την ανύψωση (elevation) και το κόστος χαρτογράφησης (MapCost). Η ανύψωση είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια κάλυψης ενός κελιού, ενώ το κόστος αφορά τον κίνδυνο που εγκυμονεί σε ένα κελί. Το κόστος παίρνει μη αρνητικές πραγματικές τιμές, ενώ οι μεγάλες τιμές του υποδεικνύουν την ύπαρξη υψηλού κινδύνου. Η ομάδα των ρομποτικών ανιχνευτών αποτελείται συνήθως από δύο έως τρεις ρομποτικούς μηχανισμούς. Κάθε όχημα διαθέτει αισθητήρες, με τη χρήση των οποίων γίνεται η ανίχνευση. Οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται από την ακτίνα ανίχνευσης, το όριο απόστασης και το ίχνος (footprint) για τη διαδικασία της ανίχνευσης, τη γωνία ανίχνευσης, την κατεύθυνση ανίχνευσης, η οποία καθορίζεται από την κατεύθυνση που έχει το όχημα και το αισθητηριακό του όργανο, καθώς και τον χρόνο ανίχνευσης, ο οποίος αφορά στον απαιτούμενο χρόνο για μια αποστολή ανίχνευσης.

Οι [Robert L. Dollarhide et al., 2003], παρουσίασαν σε προσομοιωμένο περιβάλλον την πλοήγηση ομάδας ρομποτικών οχημάτων σε αποστολές έρευνας και διάσωσης (search and rescue). Αναπτύξαν ένα γραφικό πρόγραμμα προσομοίωσης χρησιμοποιώντας Open GL και προγραμματίζοντας σε C++. Ο προσομοιωτής εφοδιάστηκε με ένα πλήθος παραμέτρων προκειμένου να διευκρινίσει το σκοπό του πειράματος και να επιδείξει τις κινήσεις των ρομπότ. Σε κάθε χρονικό βήμα, το ρομπότ χρησιμοποιεί τους αισθητήρες του για να ανιχνεύσει αντικείμενα και εν συνεχεία τα δεδομένα των αισθητήρων χαρτογραφούν το σκετ των κανόνων. Η απόδοση της ρομποτικής ομάδας αποτιμάται από το ποσοστό των συνολικών δωματίων (που δομούν την επιτρεπτή περιοχή κίνησης των οχημάτων) και του προκαθορισμένου χρονικού ποσοστού. Ομάδες που αποκτούν το 100% της κάλυψης, ελέγχονται για το χρόνο που χρειάστηκαν να το επιτύχουν. Από τη στιγμή που καθορίζονται οι παράμετροι των ρομπότ, ο χρήστης επιλέγει το είδος του χώρου κίνησης των οχημάτων. Υπάρχει δυνατότητα τριών επιλογών: χώρος σπιτιού, χώρος

γραφείου και χώρος ξενοδοχείου ή σύνθετου σπιτιού, με πολλά δηλαδή δωμάτια. Στη συνέχεια ο χρήστης πρέπει να καθορίσει τον επιθυμητό χρόνο κάλυψης του χώρου από τη ρομποτική ομάδα. Η ολοκλήρωση της αποστολής πρέπει να γίνει μέσα σ' αυτό το καθορισμένο χρονικό διάστημα και η αξιολόγηση της τρέχουσας ρομποτικής ομάδας γίνεται βάση του συγκεκριμένου χρόνου και του ποσοστού των καλυμμένων δωματίων (των δωματίων δηλαδή που έχουν ανιχνευθεί από τους ρομποτικούς μηχανισμούς). Εν συνεχεία, το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη την χρησιμοποίηση ή όχι ΓΑ για την βελτιστοποίηση της κίνησης της ρομποτικής ομάδας. Εάν επιλεγεί η χρήση ΓΑ, τότε αυτομάτως δημιουργείται μια βάση κανόνων στηριζόμενη στη διαδικασία της εξέλιξης. Καθορίζεται το μέγεθος του πληθυσμού και ο αριθμός των γενεών (επαναλήψεων). Για ένα πληθυσμό n μελών, ο αλγόριθμος δίνει n σετ κανόνων. Αρχικοποιεί την προσομοίωση για το πρώτο μέλος του πληθυσμού, χρησιμοποιώντας το πρώτο τυχαία δημιουργημένο σετ κανόνων. Με την περάτωση του χρονικού ορίου, μια νέα προσομοίωση αρχίζει για το επόμενο μέλος του πληθυσμού, χρησιμοποιώντας το τυχαία δημιουργημένο σετ κανόνων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου προσομοιωθούν και εκτιμηθούν όλα τα μέλη του πληθυσμού. Όταν ολοκληρωθεί η πρώτη γενιά, ο ΓΑ δημιουργεί νέο πληθυσμό, βασιζόμενος στην συνάρτηση προσαρμογής του πρώτου, για την επόμενη γενιά προσομοίωσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα μέλη του πληθυσμού και για όλες τις προορυθμισμένες γενιές, έως ότου βρεθεί η καλύτερη γενιά, με το βέλτιστο πληθυσμό και συνεπώς με το βέλτιστο σετ κανόνων. Αν τώρα, επιλεγθεί η μη χρήση ΓΑ, τότε ο χρήστης δύναται να χρησιμοποιήσει ένα προκαθορισμένο σετ κανόνων.

Οι [Zhiyun Lin et al., 2004], μελέτησαν το πρόβλημα επίτευξης συγκεκριμένων σχηματισμών μιας ομάδας έντροχων αυτόνομων μηχανισμών, με χρήση διανεμημένου ελέγχου. Εάν η σύγκλιση σε ένα σημείο είναι ορατή, συνεπάγεται η ύπαρξη επιτεύξιμων σχηματισμών. Έτσι το πρόβλημα ανάγεται στην επίτευξη σύγκλισης σε κάποιο σημείο. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος αναπτύχθηκαν τρεις μεθοδολογίες. Η κυκλική, η οποία είναι τεχνική αποσύζευξης (decentralized) και απαιτεί ένα ελάχιστο αριθμό επικοινωνιακών δεσμών (n δεσμοί για n μηχανισμούς), προκειμένου να δημιουργηθεί κάποιος σχηματισμός. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται σύγκλιση των μηχανισμών σε κάποιο σημείο. Επίσης, παρακινούμενοι από την ερώτηση εάν υπάρχουν επικείμενες προσκρούσεις, αναπτύσσεται και ένας σχηματισμός εξέλιξης, σύμφωνα με τον οποίο

αν οι ρομποτικοί μηχανισμοί αρχικά είναι διατεταγμένοι αριστερόστροφα (ή δεξιόστροφα) σχηματίζοντας αστέρι (star formation), τότε είναι πάντα τόσο τακτοποιημένοι που δεν προκύπτουν μεταξύ τους συγκρούσεις.



Σχήμα 1.4: αριστερόστροφος αστρικός σχηματισμός. [Zhiyun Lin et al., 2004].

Στη δεύτερη και τρίτη μεθοδολογία, κάθε μηχανισμός έχει περιορισμένο αισθητηριακό πεδίο και γνωρίζει την απόστασή του μόνο από τους γειτονικούς του μηχανισμούς (δύναται δηλαδή, να αισθανθεί μόνο κάποιους γειτονικούς του). Παρουσιάζεται μια γραμμική και μια μη γραμμική τεχνική γραφίματος για την επίλυση του προβλήματος σύγκλησης σε κάποιο σημείο.

Οι [Alejandro Lopez-Ortiz et al., 2004], παρουσιάζουν μια παράλληλη τεχνική επίλυσης του προβλήματος πλοήγησης πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων. Η παράλληλη τεχνική ανίχνευει m παράλληλες γραμμές για τη θέση του στόχου t από κάποια άγνωστη απόσταση από μια από τις m γραμμές. Δεδομένης μιας στρατηγικής S , η ανταγωνιστική αναλογία είναι ο λόγος του απαιτούμενου χρόνου που χρειάζεται

ένα ρομπότ να φτάσει το στόχο t , χρησιμοποιώντας τη στρατηγική S , προς το χρόνο που θα απαιτούταν εάν η θέση του στόχου ήταν εκ των πρωτέρων γνωστή. Απέδειξαν ότι ο βέλτιστος λόγος είναι $1 + 2(m/p - 1)(m/(m - p))^{m/p}$, όπου p : ο αριθμός των ρομποτικών μηχανισμών. Τα ρομπότ ανιχνεύουν τις γραμμές ακολουθούμενα κυκλική διάταξη.

2. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

2.1 Η βασική ιδέα των ΕΑ.

Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους εξελικτικούς αλγορίθμους είναι η μίμηση της φύσης, με τη φυσική επιλογή ως κύρια αρχή της εξέλιξης. Αυτό περιγράφεται με ένα γλαφυρό παράδειγμα από τον [Zbigniew Michalewicz, 1994]:

«Ας υποθέσουμε ότι μελετάμε έναν πληθυσμό από κουνέλια. Κάποια από αυτά είναι γρηγορότερα και εξυπνότερα από τα υπόλοιπα. Αυτά τα ταχύτερα και ευφυέστερα κουνέλια είναι πολύ πιθανό να επιζήσουν σε μια επιδρομή από αλεπούδες και να μπορέσουν έτσι να συνεχίσουν το έργο που γνωρίζουν καλύτερα από κάθε άλλο: να κάνουν κουνέλια. Αντίθετα, τα πιο αργά και λιγότερο έξυπνα κουνέλια κατά πάσα πιθανότητα θα αφανιστούν ύστερα από μια τέτοια επιδρομή, χωρίς βέβαια να αποκλείσουμε και το ενδεχόμενο ότι ορισμένα από αυτά θα επιζήσουν καθαρά επειδή στάθηκαν τυχερά. Ο πληθυσμός λοιπόν που θα επιζήσει της επιδρομής θα αρχίσει κάποτε να αναπαράγεται. Το γενετικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για το νέο πληθυσμό κουνελιών θα προέρχεται από τη μείξη κάποιων αργών με κάποια γρήγορα κουνέλια, κάποιων γρήγορων με γρήγορα, κάποιων έξυπνων με κάποια χαζά κ.ο.κ. Και στην κορυφή αυτών, η φύση κατά καιρούς παράγει και κάποιο κουνέλι-φαινόμενο (γένους, *Iepus*) μεταλλάσσοντας κατά κάποιο τρόπο το ήδη υπάρχον γενετικό υλικό. Είναι προφανές ότι οι απόγονοι θα είναι κατά μέσο όρο γρηγορότερα και εξυπνότερα κουνέλια από τα προηγούμενα. Φυσικά το ίδιο συμβαίνει και για τις αλεπούδες, γιατί διαφορετικά τα κουνέλια θα γίνονταν κάποια στιγμή εξυπνότερα από τις αλεπούδες με αποτέλεσμα να χαλάσει ο βιολογικός κύκλος. Οι γενετικοί αλγόριθμοι ακολουθούν βήμα προς βήμα μια διαδικασία όμοια με της παραπάνω ιστορίας».

Οι ΕΑ είναι μια τεχνική μετάβασης ενός πληθυσμού χρωμοσωμάτων σε ένα νέο πληθυσμό, χρησιμοποιώντας για την μετάβαση αυτή ένα είδος «φυσικής επιλογής», σε συνδυασμό με τους γενετικούς τελεστές της διασταύρωσης, της μετάλλαξης και της αντιστροφής (αν και ο τελευταίος δε χρησιμοποιείται συχνά).

Χρησιμοποιούνται διαδοχικές γενιές ατόμων – λύσεων, με σταθερό (συνήθως) πληθυσμό. Κάθε γενιά αξιολογείται και με βάση τον χρησιμοποιούμενο τελεστή επιλογής δημιουργείται μία ενδιάμεση νέα γενιά. Ο τελεστής που χρησιμοποιείται στην επιλογή, διαλέγει από τα χρωματοσώματα ενός πληθυσμού τα περισσότερο ικανά για επιβίωση, αυτά δηλαδή, που έχουν προσαρμοσθεί περισσότερο στο περιβάλλον τους.

Στη συνέχεια, η ενδιάμεση γενιά υπόκειται στις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης (πιο σπάνια και στη διαδικασία της αντιστροφής). Μέσω της διασταύρωσης, ανταλλάσσονται κάποια τμήματα των χρωματοσωμάτων μεταξύ διαφορετικών ατόμων κάθε γενιάς, μιμούμενα έτσι την αντίστοιχη φυσική διαδικασία. Η παραπάνω διαδικασία χαρακτηρίζεται ως *sexual*. Στη φάση της μετάλλαξης, μεταλλάσσονται τυχαία οι τιμές τυχαίων γονιδίων ή τμημάτων τους. Η μετάλλαξη χαρακτηρίζεται ως *asexual*.

Ανάλογα με το πρόβλημα και τον αλγόριθμο, χρησιμοποιούνται διαφορετικές μορφές των παραπάνω τελεστών, συχνά δε και πολλαπλές μορφές τους στον ίδιο κώδικα ταυτόχρονα. Υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί να απουσιάζει η μία από τις δύο κατηγορίες τελεστών.

Μετά το τέλος των φάσεων της διασταύρωσης και της μετάλλαξης προκύπτει η οριστική νέα γενιά, η οποία αξιολογείται βάση της συνάρτησης προσαρμογής προκειμένου, να προκύψει η νέα ενδιάμεση γενιά.

2.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

2.2.1. Σύντομο ιστορικό της γενετικής, [Γιώργος Κολόμβος, 2001].

Η βασική αρχή της φυσικής επιλογής ως κύρια αρχή εξέλιξης διατυπώθηκε από τον *C. Darwin* πολύ πριν την εφεύρεση των γενετικών μηχανισμών. Ο *Darwin* υπέθεσε ότι τα χαρακτηριστικά των γονέων αναμειγνύονται σαν ρευστά στον οργανισμό του απόγονου. Το 1865 ο *G. Mendel* ανακάλυψε τις βασικές αρχές της μεταβίβασης της κληρονομικότητας από γονέα σε απόγονο. Οι νόμοι αυτοί μελετήθηκαν από πολλούς και μόνο όταν όλοι συναίνεσαν με ανεξάρτητες έρευνες, έγιναν γνωστοί στην επιστημονική κοινότητα. Η γενετική αναπτύχθηκε πλήρως από τον *T. Morgan*

και τους συνεργάτες του, οι οποίοι απέδειξαν πειραματικά ότι τα χρωμοσώματα είναι οι κύριοι φορείς της κληρονομικότητας και ότι τα γονίδια, που αντιπροσωπεύουν τους κληρονομικούς παράγοντες, είναι διατεταγμένα στα χρωματοσώματα. Αργότερα, οι νόμοι του Mendel αποδείχτηκαν έγκυροι για όλους τους σεξουαλικά αναπαραγόμενους οργανισμούς. Γεγονός είναι ότι η θεωρία του Darwin και οι νόμοι του Mendel παρέμειναν ανεξάρτητοι μέχρι τη δεκαετία του 1920 όπου αποδείχτηκε ότι η γενετική του Mendel και η θεωρία του Darwin για τη φυσική επιλογή δεν ήταν αντικρουόμενες, αλλά αντίθετα ο συνδυασμός τους ανέδειξε τη θεωρία της εξέλιξης!

2.2.2. Ορολογία δανεισμένη από τη Βιολογία. [Γιώργος Κολόμβος, 2001].

Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί αποτελούνται από κύτταρα. Καθένα από τα οποία εμπεριέχει τον ίδιο αριθμό χρωμοσωμάτων, που μπορεί να είναι είτε ένα είτε περισσότερα. Το *χρωμόσωμα (chromosome)* είναι μια αλληλουχία χαρακτήρων του DNA και αποτελεί το «σχέδιο δράσης» με το οποίο θα αναπτυχθεί ο οργανισμός. Ένα χρωμόσωμα αποτελείται από πλήθος *γονιδίων (genes)*, τα οποία αφορούν τους θεμέλιους λίθους του DNA και κωδικοποιούν μια συγκεκριμένη πρωτεΐνη. Για χάρη απλότητας, ας φανταστούμε ένα γονίδιο να είναι υπεύθυνο για ένα χαρακτηριστικό μας γνώρισμα, ας υποθέσουμε το χρώμα των ματιών. Τα διαφορετικά πιθανά χρώματα ματιού ονομάζονται *αλληλόμορφα (alleles)* και αποτελούν τις διαφορετικές τιμές που μπορεί να πάρει κάθε γονίδιο. Κάθε γονίδιο είναι τοποθετημένο σε μια συγκεκριμένη θέση στο χρωμόσωμα (*locus*).

Πολλοί οργανισμοί έχουν πολλαπλά χρωμοσώματα σε κάθε κύτταρο. Η συνολική συλλογή από γενετικό υλικό (όλα τα χρωμοσώματα μαζί) ονομάζεται *γονιδίωμα (genome)* του οργανισμού. Ο όρος *γονότυπος (genotype)* αναφέρεται στο συγκεκριμένο σύνολο γονιδίων που περιέχονται σε ένα γονιδίωμα. Και τέλος ο γονότυπος ύστερα από την εμβρυική ανάπτυξη του οργανισμού δίνει τη θέση του στο *φαινότυπο (phenotype)*, στα σωματικά και πνευματικά του χαρακτηριστικά, όπως χρώμα ματιών, ύψος, μέγεθος εγκεφάλου, ευφυΐα κ.τ.λ.

Σε ορισμένους οργανισμούς τα χρωματοσώματα παρατάσσονται σε ζευγάρια και οι οργανισμοί ονομάζονται *διπλοειδείς (diploids)*, ενώ σε άλλους μόνα τους και καλούνται *απλοειδείς (haploids)*. Στη φύση τα περισσότερα

σεξουαλικά αναπαραγόμενα είδη ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, όπως ανήκει και ο άνθρωπος, ο οποίος διαθέτει 23 ζευγάρια χρωμοσωμάτων σε κάθε σωματικό του κύτταρο. Κατά τη διάρκεια της αναπαραγωγής λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της *διασταύρωσης (crossover)*. Σε κάθε γονέα ανταλλάσσονται γονίδια μεταξύ των ζευγαριών των χρωμοσωμάτων για να σχηματίσουν τον *γαμέτη (gamete)* -ένα απλό χρωμόσωμα- και έπειτα οι γαμέτες των δύο γονέων ζευγαρώνουν και δημιουργούν ένα πλήρες σύνολο χρωμοσωμάτων. Οι απόγονοι που προκύπτουν υφίστανται τη διαδικασία της *μετάλλαξης (mutation)*, κατά την οποία τα νουκλεοτίδια (πρωταρχικά στοιχεία του DNA) αλλάζουν από γονέα σε απόγονο εξαιτίας κάποιων λαθών που συνήθως λαμβάνουν χώρα. Η φόρμα ενός οργανισμού τυπικά προσδιορίζεται από την πιθανότητα αυτός ο οργανισμός να επιζήσει και να αναπαραχθεί, ή αποτελεί συνάρτηση του αριθμού των απογόνων που αυτός θα έχει (βιωσιμότητα και γονιμότητα αντίστοιχα).

2.2.3. Από την Φυσική στην Τεχνητή Ζωή

Για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ΕΑ για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης θα πρέπει αρχικά οι λύσεις του προβλήματος να περιγραφούν σε παραμετρική μορφή. Οι παράμετροι του προβλήματος μπορεί να βρίσκονται σε δυαδική μορφή (κλασικοί Γενετικοί Αλγόριθμοι), σε συμβολική μορφή, σε μορφή ακεραίου ή σε μορφή πραγματικού αριθμού (Υβριδικοί Εξελικτικοί αλγόριθμοι – Εξελικτικά προγράμματα).

Μία υποψήφια λύση περιγράφεται από ένα χρωμόσωμα, το οποίο είναι ουσιαστικά η ακολουθία των παραμέτρων του προβλήματος. Στους Ε.Α. χρησιμοποιούνται «οργανισμοί» ενός χρωμοσώματος (απλοειδή άτομα), σε αντίθεση με τη φύση. Για την περίπτωση περιγραφής της λύσης με πραγματικούς αριθμούς, μία παράμετρος είναι ένας αριθμός και ταυτόχρονα και ένα γονίδιο του χρωμοσώματος (π.χ. 34.66796). Για την περίπτωση κωδικοποίησης με δυαδικούς αριθμούς, μία παράμετρος είναι ένα γονίδιο το οποίο αποτελείται από μια σειρά 0 και 1 (π.χ. 0110001). Σε συγκεκριμένα προβλήματα μπορεί κάθε δυαδικός αριθμός να αντιπροσωπεύει ένα γονίδιο (π.χ. 1). Τα αλληλόμορφα αντιπροσωπεύουν την τιμή του ψηφίου (0 ή 1 δηλαδή για το προηγούμενο παράδειγμα). Βεβαίως οι επιλογές θα μπορούσαν να είναι περισσότερες από δύο. Η διασταύρωση συμβαίνει όταν

ανταλλάσσεται γενετικό υλικό ανάμεσα σε δύο απλοειδείς γονείς. Η μετάλλαξη λαμβάνει χώρα με αλλαγή κάποιου ψηφίου σε μια τυχαία επιλεγμένη θέση, ενώ αν πρόκειται για μεγαλύτερο αλφάβητο, αντικαθίσταται ένα τυχαία επιλεγμένο σε μια τυχαία επιλεγμένη θέση με ένα επίσης τυχαία επιλεγμένο ψηφίο. Στην περίπτωση κωδικοποίησης με πραγματικούς αριθμούς αλλάζει η τιμή τυχαίου γονιδίου με την νέα τιμή να επιλέγεται τυχαία μέσα από τον χώρο των λύσεων.

Γονότυπος ενός ατόμου είναι η αλληλουχία των ψηφίων στο χρωμόσωμα του ατόμου αυτού (π.χ. 0110-0101-0010-1000-1010-1000-0110-1111, όπου με – χωρίζονται τα γονίδια μεταξύ τους). Φαινότυπος είναι η υλοποίηση της λύσης στο συγκεκριμένο πρόβλημα με βάση τις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του γονότυπου. Ο φαινότυπος είναι που αξιολογείται (με κάποια κριτήρια ανάλογα με το πρόβλημα) και σε αυτόν δίδεται η τιμή της συνάρτησης προσαρμογής (fitness function) η οποία πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Η συνάρτηση προσαρμογής ουσιαστικά παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος στη φυσική επιλογή.

Παράδειγμα: Έστω ότι το πρόβλημά μας είναι η βελτιστοποίηση μιας τροχιάς. Το μήκος της αποτελεί τη συνάρτηση προσαρμογής στο πρόβλημά μας. Η τροχιά μπορεί να περιγραφεί παραμετρικά με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι η χρησιμοποίηση ευθύγραμμων τμημάτων, με τις συντεταγμένες των σημείων που τη συντάσσουν να είναι τα γονίδια του χρωμοσώματος. Έτσι (σε δύο διαστάσεις) αν τα σημεία (κόμβοι) απ' όπου παίρνει η τροχιά είναι 10, έχουμε ένα χρωμόσωμα με 20 πραγματικούς αριθμούς (πίνακας 20 στοιχείων), κάθε ένας από τους οποίους είναι η x ή η y συντεταγμένη ενός κόμβου της τροχιάς και ταυτόχρονα ένα γονίδιο του χρωμοσώματος. Η ίδια η ευθεία που σχηματίζεται από τις συντεταγμένες ενός χρωμοσώματος είναι ο φαινότυπος. Υπολογίζοντας το μήκος της, το οποίο αποτελεί τη συνάρτηση προσαρμογής του εν λόγω χρωμοσώματος και ταυτόχρονα του εν λόγω ατόμου (individual), μιας και έχουμε άτομα ενός χρωμοσώματος. Σκοπός μας είναι να βρούμε άτομα με γονότυπο που να αντιστοιχεί σε βέλτιστες τιμές της συνάρτησης προσαρμογής, σε βέλτιστα δηλαδή μήκη ευθειών στην περίπτωσή μας.

2.3 Αναλυτική περιγραφή λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων

2.3.1 Η διαδικασία

Τα βήματα που ακολουθεί ο ΓΑ για την επίλυση ενός προβλήματος περιγράφονται στη συνέχεια.

Αρχικά παράγεται ένας τυχαίος πληθυσμός ατόμων (initial population), που ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος. Παράγονται δηλαδή, γονίδια τα οποία παίρνουν τυχαίες τιμές από ένα σύνολο επιτρεπτών τιμών (search space). Τα άτομα του πληθυσμού μπορούν να έχουν είτε σταθερό αριθμό γονιδίων είτε μεταβλητό - όταν δηλαδή, τα χρωμοσώματα αποτελούνται από διαφορετικό, τυχαίο αριθμό γονιδίων.

Για την αξιολόγηση κάθε ατόμου του πληθυσμού, χρησιμοποιείται μία συνάρτηση προσαρμογής (fitness function), η οποία επιλέγεται με τέτοιο τρόπο που να δίνει μεγάλες τιμές όταν εφαρμόζεται σ' ένα χρωμόσωμα με «επιθυμητά» χαρακτηριστικά και μικρές τιμές σε χρωμοσώματα με μη επιθυμητά χαρακτηριστικά, στην περίπτωση βέβαια που καλούμαστε να μεγιστοποιήσουμε τη δεδομένη συνάρτηση (το αντίθετο κατά τη διαδικασία της ελαχιστοποίησης). Έτσι με τον τρόπο αυτό γίνεται η αξιολόγηση των λύσεων που θα διατηρηθούν και θα δώσουν απογόνους και εκείνων όπου τελικά απορρίπτονται.

Για τη δημιουργία του επόμενου πληθυσμού (γενιά0, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

Με κάποια μέθοδο επιλογής (π.χ. μέθοδο της «ρουλέτας»), επιλέγονται τα άτομα που θα δώσουν απογόνους, με κριτήριο την τιμή της συνάρτησης προσαρμογής (φυσική επιλογή). Όσο μεγαλύτερη η τιμή της συνάρτησης προσαρμογής ενός ατόμου, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να επιλεγεί για να δώσει απογόνους στην επόμενη γενιά.

Στη συνέχεια, στον επιλεγμένο πληθυσμό εφαρμόζονται ορισμένοι τελεστές (operators), των οποίων η λειτουργία μοιάζει με τις πραγματικές λειτουργίες της διασταύρωσης (crossover) και μετάλλαξης (mutation) γενετικού υλικού που πραγματοποιούνται στη φύση. Με τη διασταύρωση επιτυγχάνεται ανταλλαγή γονιδίων μεταξύ των ατόμων, ώστε να παραχθούν άτομα με γονίδια που έχουν δανειστεί από διάφορους προγόνους τους. Μέσα από τη διαδικασία της επιλογής εξασφαλίζεται ότι η νέα γενιά θα έχει άτομα με καλύτερα γονίδια και θα περάσει από

την ίδια διαδικασία για να δώσει με τη σειρά της έναν καινούριο πληθυσμό ατόμων. Μετά από μερικές επαναλήψεις και με την συνεχή βελτίωση των χρωμοσωμάτων, θα προκύψουν, ύστερα από έναν αριθμό γενεών, πολύ καλές λύσεις και επιλέγοντας την καλύτερη από αυτές θα βρεθεί τελικά μία πολύ κοντινή στη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Κατά τη διαδικασία της βελτίωσης των γενεών είναι πιθανό ο αλγόριθμος να οδηγηθεί σε τοπικά βέλτιστα. Έτσι με τη χρήση του τελεστή της μετάλλαξης σε συνδυασμό με τον τελεστή της διασταύρωσης μπορούμε να τα παρακάμψουμε, δίνοντας στον πληθυσμό τη δυνατότητα τυχαίων αλλαγών στο γονιδίωμα, με προκαθορισμένη πιθανότητα και πάντα εντός του προκαθορισμένου χώρου λύσεων.

2.3.2 Τελεστές (operators)

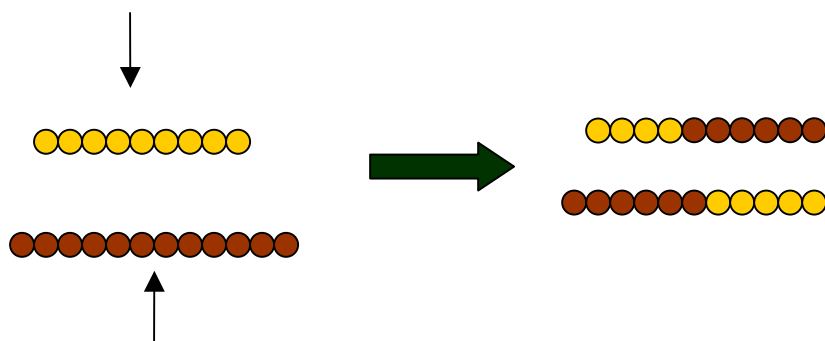
Μετά την αρχική δημιουργία της επόμενης γενιάς ακολουθεί η εφαρμογή συγκεκριμένων τελεστών στα χρωμοσώματα που επιλέχθηκαν. Οι τελεστές που χρησιμοποιούνται στους ΓΑ είναι πολλοί και ο προγραμματιστής μπορεί να επιλέξει, να τροποποιήσει ή και να επινοήσει τελεστές ανάλογα με το πρόβλημα που καλείται να επιλύσει.

Διασταύρωση(crossover)

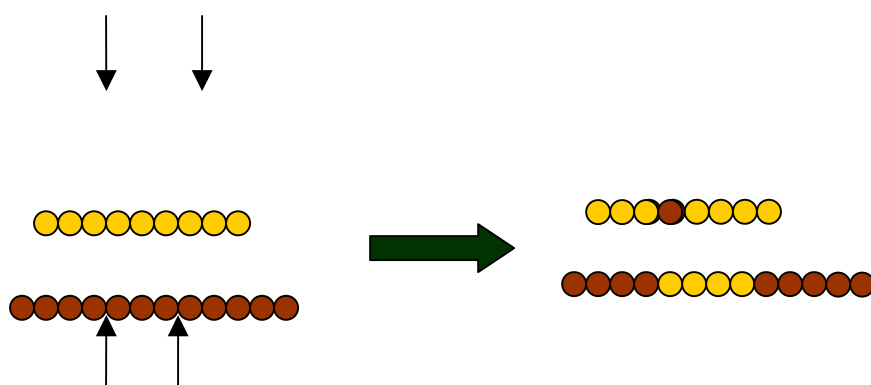
Θεωρείται το πιο σημαντικό στοιχείο ενός ΓΑ και υπάρχουν πολλές παραλλαγές του. Ανασυνδυάζει τα χρωμοσώματα δυο ατόμων γονείς (parents), της προηγούμενης γενιάς, σχηματίζοντας δυο νέα άτομα που καλούνται γόνοι (offsprings) και που διαθέτουν γενετικό υλικό και από τους δύο γονείς.

Οι παραλλαγές του τελεστή της διασταύρωσης αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό διάκρισης ΓΑ. Στην απλή του μορφή ο τελεστής αυτός εφαρμόζεται σε ένα μόνο σημείο του χρωμοσώματος (single point). Επιλέγεται το σημείο διασταύρωσης σε κάθε γονέα και ακολουθεί ανταλλαγή των τμημάτων μετά το σημείο αυτό για τον σχηματισμό δυο νέων απογόνων: έστω ότι οι γονείς αναπαρίστανται από πέντε αλφαριθμητικά στοιχεία $(0\ 0\ 0\ 0\ 0)$ και $(1\ 1\ 1\ 1\ 1)$ τότε οι απόγονοι που θα προκύψουν από διασταύρωση στο δεύτερο σημείο, θα είναι $(0\ 0\ 1\ 1\ 1)$ και $(1\ 1\ 0\ 0\ 0)$. Άλλοι τρόποι διασταύρωσης είναι, δυο σημείων, cyclic και uniform crossover.

Η πιθανότητα εφαρμογής της διασταύρωσης σ'ένα χρωμόσωμα είναι προκαθορισμένη. Επομένως, κατά τη φάση δημιουργίας της νέας γενιάς, κάποια άτομα θα περάσουν στην επόμενη γενιά αφού πρώτα ανταλλάξουν τα γονίδιά τους με άλλα άτομα, ενώ κάποια άλλα δε θα υποστούν αυτή την αλλαγή.



Σχήμα 2.1: Απλή διασταύρωση ενός σημείου.



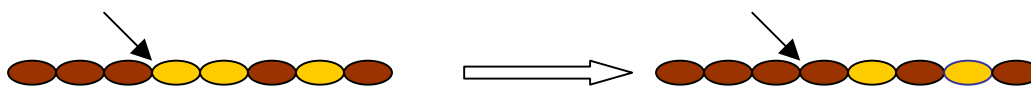
Σχήμα 2.2: Διασταύρωση δύο σημείων.

Μετάλλαξη (mutation)

Ένα από τα βασικά προβλήματα που παρουσιάζονται στις μεθόδους βελτιστοποίησης, είναι η πιθανή παγίδευση της λύσης σε τοπικό βέλτιστο, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει δυνατότητα διερεύνησης των άλλων πιθανών βέλτιστων και έτσι η λύση που προκύπτει να μην είναι η επιθυμητή. Η μετάλλαξη είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα γονίδιο του χρωμοσώματος

μεταβάλλει τυχαία την τιμή του μέσα στα επιτρεπτά όρια. Στην περίπτωση της δυαδικής αναπαράστασης του χρωμοσώματος η αλλαγή γίνεται από 0 σε 1 και αντίστροφα. Συνήθως η μετάλλαξη συμβαίνει μετά την διαδικασία της διασταύρωσης με σκοπό να βελτιωθεί η τιμή της συνάρτησης προσαρμογής των ατόμων του πληθυσμού της νέας γενιάς.

Μία παραλλαγή του παραπάνω τελεστή είναι η μη ομοιόμορφη μετάλλαξη (non uniform mutation), κατά την οποία η νέα τυχαία τιμή που θα πάρει το γονίδιο βρίσκεται μέσα σε κάποια όρια γύρω από την προηγούμενη τιμή του και τα οποία στενεύουν καθώς δημιουργούνται καινούριες γενιές. Αυτό συμβαίνει διότι, μια καλύτερη λύση είναι πιο πιθανό να βρίσκεται κόντα στην ήδη υπάρχουσα.

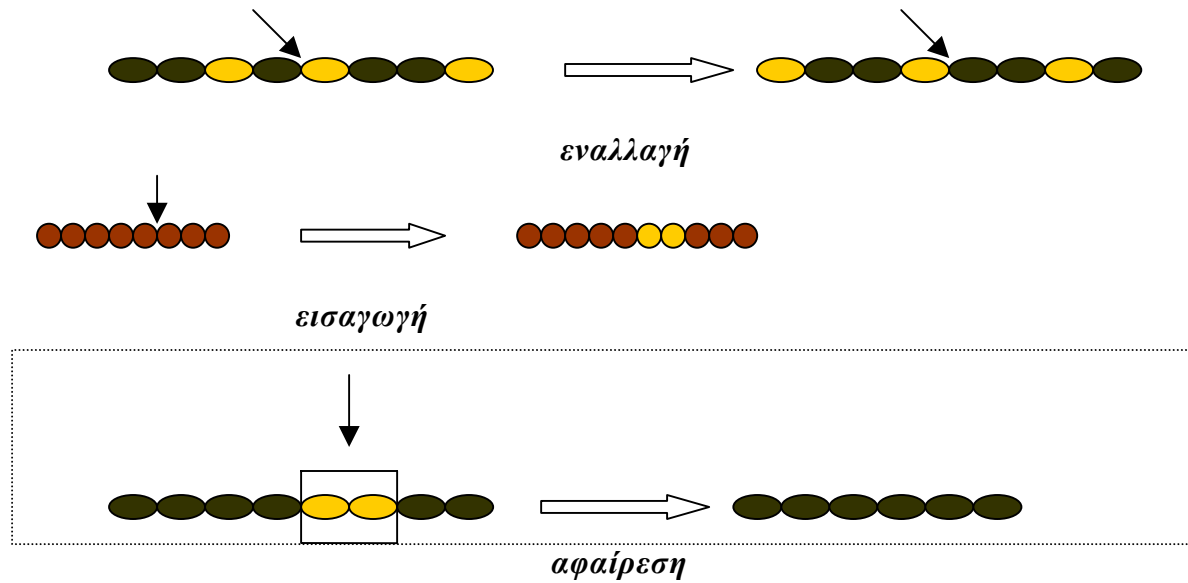


Σχήμα 2.3: Απλή mutation: Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σ' ένα διαφορετικό αριθμό.

Εναλλαγή (swap) : Το χρωμόσωμα χωρίζεται σε δύο μέρη τα οποία αλλάζουν θέση μεταξύ τους .

Εισαγωγή (insertion) : προστίθενται ένα ή περισσότερα καινούργια γονίδια σε μια τυχαία θέση ενός χρωμοσώματος.

Αφαίρεση(deletion) : αφαιρούνται ένα ή περισσότερα γονίδια από μια τυχαία θέση ενός χρωμοσώματος.



Σχήμα 2.4: Οι τελεστές εναλλαγής, εισαγωγή και αφαίρεση.

Τελειώνοντας με την περιγραφή των ΓΑ πρέπει να τονιστεί ότι σημαντικό ρόλο για τη σωστή λειτουργία και απόδοσή τους παίζουν οι τιμές των παραμέτρων του αλγορίθμου. Πρέπει να καθορίζεται δηλαδή, ένα σύνολο από παραμέτρους που θα ελέγχουν τον τρόπο που θα συνδυασθούν τα στοιχεία ενός γ.α καθώς και την λειτουργία αυτού. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι:

- Μέγεθος πληθυσμού
- Αριθμός γενεών μέχρι την περάτωση του αλγορίθμου
- Πιθανότητα εφαρμογής διασταύρωσης
- Πιθανότητα εφαρμογής μετάλλαξης

Ο καθορισμός των παραπάνω παραμέτρων προϋποθέτει σημαντική πείρα.

2.4 Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους βελτιστοποίησης.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι διαφέρουν από τις συμβατικές διαδικασίες αναζήτησης σε τέσσερα σημεία σύμφωνα με τον [Goldberg D. E., 1989]:

- Δουλεύουν με κωδικοποίηση κάποιων παραμέτρων και όχι με αυτές καθαυτές τις παραμέτρους (στους γενετικούς αλγορίθμους).
- Αναζητούν λύση μέσα από ένα πληθυσμό σημείων και όχι από ένα μοναδικό σημείο.
- Χρησιμοποιούν πληροφορίες παρμένες από την αντικειμενική συνάρτηση (την οποία και προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν) και όχι από παραγώγους και άλλα βοηθήματα.
- Χρησιμοποιούν κανόνες μετάβασης μη αιτιοκρατικούς, βασισμένους σε πιθανότητες.

Οι κύριοι λόγοι της μεγάλης επιτυχίας τους είναι:

- Παρουσιάζουν μία πρωτοφανή ισορροπία (σε σχέση με του υπόλοιπους τυχαίους αλγορίθμους) μεταξύ της ικανότητας εξερεύνησης του πεδίου λύσεων (exploration) και της πίεσης για εύρεση της βέλτιστης λύσης (exploitation). Το χαρακτηριστικό αυτό τους δίνει μεγάλη ευστάθεια.
- Είναι από τη φύση τους παράλληλοι αλγόριθμοι, κάτι που τους δίνει τη δυνατότητα μεγάλης επιτάχυνσης.
- Έχουν μεγάλη προσαρμοστικότητα στα διαφορετικά προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν.
- Είναι πολύ εύκολο να τροποποιηθούν οι τελεστές διαφοροποίησης των χρωμοσωμάτων, και να προσαρμοσθούν στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εκάστοτε προβλήματος.

2.5 Περιγραφή του Εξελικτικού Αλγορίθμου που χρησιμοποιείται στο πρόβλημα που επιλύεται στην παρούσα εργασία

2.5.1 Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος

Μια άλλη μέθοδος ολικής βελτιστοποίησης, που προτάθηκε αρχικά από τους [Storn R., 1995] και [Storn R. Et al., 1995], είναι ο Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος ΔΕΑ (Differential Evolution algorithm- DE). Ο ΔΕΑ διαφαίνεται ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνική ολικής βελτιστοποίησης, αρκετά αποδοτική και εύρωστη. Ο ΔΕΑ που χρησιμοποιείται στο παρόν πρόβλημα στηρίχθηκε στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε από τον [Ioannis K. Nikolos, 2004].

Θεωρούμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης που διατυπώνεται από τη σχέση:

$$\min_x = f(x) \quad (2.1)$$

όπου X είναι ένα $n \times 1$ διάνυσμα, το οποίο αναπαριστά ένα χρωμόσωμα και f η συνάρτηση προσαρμογής όπου επιδιώκουμε να ελαχιστοποιήσουμε. Σε κάθε γενιά G , ένας πληθυσμός από N_p υποψήφιες λύσεις υποβάλλονται σε ειδικές διεργασίες και διατυπώνονται από τη φράση:

$$X_{i,G}, \text{ όπου } i = 1, \dots, N_p \text{ και } G = 1, \dots, mgens \quad (2.2)$$

όπου $mgens$ είναι ο μέγιστος αριθμός των γενεών και το N_p παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Στο πρόβλημα που εξετάζεται το διάνυσμα X αναπαριστά παραμέτρους πραγματικών αριθμών, διότι προβάλλουν μια καλύτερη αναπαράσταση των ενδιάμεσων κόμβων, απο όπου θα περάσουν τα ρομπότ για να φτάσουν στο στόχο τους. Επιπρόσθετα, δύο σημεία που είναι κοντά στο φυσικό χώρο, είναι επίσης κοντά και στον χώρο αναπαράστασης (κωδικοποίηση γονότυπου), κ.ο.κ. Με τον τρόπο αυτό κωδικοποίησης οι κατευθυνόμενες τεχνικές ελέγχου διαθέτουν φυσική απεικόνιση και είναι εύκολα εφαρμόσιμες. Ωστόσο, οι ΔΕΑ δύναται να επεκταθούν και στη χρήση διακριτών ή ακέραιων μεταβλητών.

Ο ΔΕΑ ξεκινά γεννώντας τυχαία, με ομοιόμορφη πιθανότητα, τον αρχικό πληθυσμό, με τα γονίδιά του να πέρνουν τιμές εντός του προκαθορισμένου χώρου.

Ως κανόνα, θεωρούμε για όλες τις τυχαίες αποφάσεις πιθανότητες ομοιόμορφης κατανομής. Οι χαμηλότεροι και υψηλότεροι περιορισμοί για κάθε γονίδιο επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται συγκεκριμένες μη επιθυμητές λύσεις, (π.χ. πρόσκρουση σε κάποιο εμπόδιο). Παρότι, η συντόμευση του χώρου αναζήτησης της λύσης, μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο, μπορεί να οδηγήσει σε τοπικά βέλτιστες λύσεις και ιδίως όταν γνωρίζουμε ελάχιστα για τον χώρο λύσεων.

Η κρίσιμη ιδέα που υπάρχει πίσω από τον ΔΕΑ είναι ένα νέο σχέδιο μετάλλαξης, σύμφωνα με το οποίο γεννιέται μια δοκιμαστική υποψήφια λύση, από την πρόσθεση της βαθμονομημένης διανυσματικής διαφοράς δύο μελών του πληθυσμού σ' ένα τρίτο μέλος, που καλείται δωρητής (donor). Η διαδικασία της μετάλλαξης εφαρμόζεται σε όλα τα μέλη του πληθυσμού. Για κάθε άτομο του πληθυσμού το σχέδιο της μετάλλαξης ξεκινά επιλέγοντας τυχαία τρία άτομα από τον πληθυσμό, τα οποία συντάσσουν μια τριάδα (triplet). Στην τριάδα αυτή το ένα μέλος επιλέγεται τυχαία να είναι ο δωρητής, ενώ τα άλλα δύο συμμετέχουν στο να δημιουργήσουν μια διαταραχή (perturbation) στο δωρητή. Έτσι το i^{th} διαταραγμένο άτομο γεννιέται ως:

$$V_{i,G+1} = X_{r3,G} + F(X_{r1,G} - X_{r2,G}) \quad (2.3)$$

όπου τα,

$$r1, r2, r3 \in \{1, \dots, N_p\} \text{ και } r1 \neq r2 \neq r3 \neq i \quad (2.4)$$

επιλέγονται τυχαία ανάμεσα από τις υποψήφιες λύσεις του τρέχοντος πληθυσμού. Η βαθμωτή παράμετρος F , είναι παράμετρος ελέγχου του ΔΕΑ, τίθεται από τον χρήστη και παίρνει τιμές στο μεσοδιάστημα:

$$F \in [0.1+] \quad (2.5)$$

Η F είναι σταθερή καθ' όλη την εξελικτική διαδικασία και ελέγχει την ενίσχυση της προστιθέμενης διαταραχής στο δωρητή. Πιο συγκεκριμένα, ρυθμίζει την επιθετικότητα του αλγορίθμου. Είναι δηλαδή, υπεύθυνη για την ισορροπία μεταξύ της εξερεύνησης του συνολικού χώρου των λύσεων και για της ώθησης των λύσεων προς το βέλτιστο. Στη συνέχεια, το διαταραγμένο άτομο $V_{i,G+1}$ και το μέλος του αρχικού

πληθυσμού $X_{i,G}$ υπόκεινται στη διαδικασία της διασταύρωσης και γεννούν τον ενδιάμεσο πληθυσμό των δοκιμαστικών διανυσμάτων $U_{i,G+1}$.

Έστω,

$$\begin{aligned} X_{i,G} &= (x_{1,i,G}, \dots, x_{n,i,G})^T, \\ V_{i,G+1} &= (v_{1,i,G+1}, \dots, v_{n,i,G+1})^T, \\ U_{i,G+1} &= (u_{1,i,G+1}, \dots, u_{n,i,G+1})^T \end{aligned} \quad (2.6)$$

τότε,

$$u_{j,i,G+1} = \begin{cases} v_{j,i,G+1} & \text{if } rand_j \leq C_r \quad \forall j = k \\ x_{j,i,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.7)$$

όπου, $j=1, \dots, n$ και $k \in \{1, \dots, n\}$ είναι ένας τυχαίος δείκτης, που επιλέγεται μια φορά για όλα τα N_p μέλη του πληθυσμού. Η παράμετρος της διασταύρωσης C_r , όπου $C_r \in [0,1]$, είναι η δεύτερη παράμετρος ελέγχου που τίθεται από τον χρήστη. Τα άτομα που θα δώσουν την επόμενη γενιά επιλέγονται από τον τρέχοντα πληθυσμό και από τα αντίστοιχα δοκιμαστικά διανύσματα σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα:

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} U_{i,G+1} & \text{if } f(U_{i,G+1}) \leq f(X_{i,G}) \\ X_{i,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.8)$$

2.5.2 Το τροποποιημένο σχέδιο του δωρητή (donor)

Ένα πρόσφατο προτεινόμενο σχέδιο που καθορίζει τον δωρητή για τη διαδικασία της μετάλλαξης και επιταχύνει το ποσοστό σύγκλισης του αλγορίθμου, παρουσιάζεται από τους [Fan Hui- Yuan et al., 2003]. Στο σχέδιο αυτό, ο δωρητής επιλέγεται τυχαία, με ομοιόμορφη κατανομή, από την περιοχή του «υπέρ-τριγώνου», που σχηματίζεται από τα τρία μέλη που συντάσσουν την τριάδα (triplet):

$$donor = \sum_{i=1}^3 \left(\lambda_i / \sum_{j=1}^3 \lambda_j \right) X_{ri,G}, \quad \lambda_j = rand_j[0,1] \quad (2.9)$$

όπου $rand_j[0,1]$ υποδηλώνει μια ομοιόμορφα κατανομημένη πιθανότητα στο διάστημα $[0,1]$. Με το σχέδιο αυτό ο δωρητής εμπεριέχει τη τοπική πληροφορία για όλα τα μέλη της τριάδας, παρέχοντας έτσι ένα καλύτερο σημείο εκκίνησης για τη διαδικασία της μετάλλαξης και συνεπώς, καλύτερης κατανομής των δοκιμαστικών διανυσμάτων. Όπως αναφέρεται στο [Fan Hui- Yuan et al., 2003], το βελτιωμένο σχέδιο του δωρητή επιταχύνει το ποσοστό σύγκλισης του ΔΕΑ, χωρίς όμως να θυσιάζει την ακρίβεια και την ευρωστία της λύσεως.

2.5.3 Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών

Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών (με ομοιόμορφη πιθανότητα) βασίζεται στον αλγόριθμο που προτάθηκε από τους [Marse, et al., 1983], οι οποίοι υπολόγισαν το υπόλοιπο των διαιρέσεων των ακέραιων εκείνων με μήκος μεγαλύτερο από 32-bit. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, χρησιμοποιώντας έναν αρχικό σπόρο, παράγει έναν νέο σπόρο και έναν τυχαίο αριθμό.

Σε κάθε διαφορετική διαδικασία εντός του DE αλγορίθμου που απαιτεί έναν τυχαίο αριθμό γενεών, παράγεται μια διαφορετική ακολουθία από τυχαίους αριθμούς, χρησιμοποιώντας ένα διαφορετικό αρχικό σπόρο για κάθε εφαρμογή και ξεχωριστή αποθήκευση για τους αντίστοιχους παραγόμενους σπόρους. Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους αρχικούς σπόρους για κάθε διαδικασία, εξασφαλίζεται ότι η κάθε ακολουθία θα διαφέρει κατά 100000 νούμερα.

3. Το πρόβλημα σχεδίασης της τροχιάς πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων.

3.1 Αντιμετώπιση του προβλήματος

3.1.1 Γενικά

Το πρόβλημα της πλοήγησης πολλαπλών ρομπότ αντιμετωπίστηκε αποκλειστικά σε περιβάλλον προσομοίωσης. Ως κώδικας βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ένας έτοιμος Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος (DE) [Ioannis K. Nikolos, 2004]. Στην προσομοίωση θεωρούνται γνωστά για τα ρομποτικά οχήματα, πριν αυτά αρχίσουν να κινούνται στο χώρο, πόσα εμπόδια υπάρχουν, τις ακριβείς θέσεις τους, καθώς και τη θέση του στόχου που καλούνται να προσεγγίσουν. Ο χώρος που κινούνται τα ρομπότ είναι περιορισμένος, με δυνατότητα στο χρήστη να μεταβάλλει το μέγεθός του ανάλογα με τις προδιαγραφές του προβλήματος που καλείται να επιλύσει. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει τον αριθμό των ρομποτικών οχημάτων που θα κινηθούν στον επιτρεπτό χώρο, καθώς και τις συντεταγμένες των σημείων εκκίνησης. Επίσης, δύναται να ρυθμίσει την ακριβή θέση του στόχου, η οποία μπορεί να είναι κοινή για όλα τα ρομπότ ή διαφορετική για κάθε ένα από αυτά. Επιπλέον, ο χρήστης ορίζει τις ταχύτητες εκκίνησης και τις ταχύτητες προσέγγισης στο στόχο για κάθε όχημα. Τα εμπόδια έχουν μοντελοποιηθεί ως πολύγωνα, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η περιγραφή πολύπλοκων αντικειμένων. Πριν την επίλυση του προβλήματος ορίζεται ο αριθμός τους, καθώς και το πλήθος και οι συντεταγμένες των κορυφών τους (των εμποδίων). Τέλος, ορίζεται ο αριθμός των ενδιάμεσων κόμβων από όπου θα περάσουν τα ρομπότ, ο αριθμός των επαναλήψεων που θα εκτελέσει ο DE, καθώς και το μέγεθος του πληθυσμού που θα χρησιμοποιηθεί.

3.1.2 Αναπαράσταση των λύσεων

Ζητείται να βρεθούν οι τροχιές εκείνες που μπορούν να οδηγήσουν τα έντροχα αυτοματοποιημένα οχήματα από κάποια αρχική θέση, στη θέση του στόχου,

χωρίς όμως να συγκρουσθούν με εμπόδια και μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα επιβάλλεται η ικανοποίηση των περιορισμών του προβλήματος. Οι τροχιές είναι ευθύγραμμα τμήματα και η περιγραφή τους με σημεία ελέγχου μπορεί να συνδυαστεί ιδανικά με τη λύση του προβλήματος με χρήση εξελικτικών μεθόδων. Κάθε γονίδιο, παίρνει μια πραγματική τιμή, η οποία αντιπροσωπεύει είτε τις δύο συντεταγμένες που περιγράφουν τη θέση ενός σημείου ελέγχου, είτε τη ταχύτητα που επιβάλλεται να έχει το όχημα στο συγκεκριμένο σημείο ελέγχου (η ταχύτητα μεταξύ διαδοχικών σημείων ελέγχου μεταβάλλεται γραμμικά). Έτσι, κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από τις συντεταγμένες μιας αλυσίδας σημείων ελέγχου και από τις αντίστοιχες ταχύτητες για όλα τα ρομποτικά οχήματα. Δύο από τα σημεία της κάθε τροχιάς είναι σταθερά: το πρώτο και το τελευταίο, που ορίζουν το σημείο εκκίνησης και το τελικό σημείο του στόχου (για κάθε όχημα). Οι ταχύτητες επίσης στα συγκεκριμένα σημεία είναι δεδομένες, οπότε οι ταχύτητες και οι συντεταγμένες των αρχικών και τελικών σημείων κάθε τροχιάς δεν συμπεριλαμβάνονται στο χρωμόσωμα. Οποιοδήποτε άλλο σημείο μπορεί να πάρει οποιαδήποτε θέση (μέσα στον επιτρεπτό χώρο) και συνεπώς, να ορίσει μια διαφορετική διαδρομή. Οι ταχύτητες στα εσωτερικά σημεία ελέγχου παίρνουν τιμές μεταξύ ορίων που ορίζονται από τον χρήστη

Αναλυτικότερα, εάν πρόκειται για την κίνηση τριών ρομποτικών οχημάτων, που κάθε ένα από αυτά θα περάσει από δύο ενδιάμεσα σημεία ελέγχου, προκειμένου να προσεγγίσουν το στόχο τους, το χρωμόσωμα αποτελείται από 18 γονίδια ($nvars=18$):

X1 Y1 V1 X2 Y2 V2 X3 Y3 V3 X4 Y4 V4 X5 Y5 V5 X6 Y6 V6

Όπου:

X1, Y1 είναι η πρώτη θέση από όπου θα περάσει το ρομπότ 1 με ταχύτητα V1,
 X2, Y2 είναι η δεύτερη θέση από όπου θα περάσει το ρομπότ 1 με ταχύτητα V2,
 X3, Y3 είναι η πρώτη θέση από όπου θα περάσει το ρομπότ 2 με ταχύτητα V3,
 X4, Y4 είναι η δεύτερη θέση από όπου θα περάσει το ρομπότ 2 με ταχύτητα V4,
 X5, Y5 είναι η πρώτη θέση από όπου θα περάσει το ρομπότ 3 με ταχύτητα V5,
 X6, Y6 είναι η δεύτερη θέση από όπου θα περάσει το ρομπότ 3 με ταχύτητα V6.

Αρχικός πληθυσμός:

Ο Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος ξεκινά γεννώντας τυχαία, με ομοιόμορφη πιθανότητα τον αρχικό πληθυσμό λύσεων, με το κάθε γονίδιο να παίρνει πραγματικές τιμές εντός των προκαθορισμένων ορίων. Τα όρια για τις συντεταγμένες είναι τα φυσικά όρια του χώρου κίνησης των οχημάτων, ενώ τα όρια για τις ταχύτητες καθορίζονται από το χρήστη με βάση τα χαρακτηριστικά των οχημάτων που προσομοιώνονται. Θεωρούμε ως επιθυμητό πεδίο τιμών για τα σημεία ελέγχου των τροχιών ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Η αλλαγή των διαστάσεων του επιτρεπτού χώρου γίνεται κατά βούληση από τον χρήστη. Τα εμπόδια στην κίνηση των οχημάτων περιγράφονται ως πολύγωνα, με δεδομένες τις συντεταγμένες των κορυφών τους.

Η μοντελοποίηση του προβλήματος:

Για κάθε όχημα, ξεκινώντας από κάποιο δεδομένο σημείο εκκίνησης και με δεδομένο τελικό στόχο, ορίζεται, με βάση το χρωμόσωμα μία τροχιά που αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα. Επίσης είναι γνωστές οι ταχύτητες που θα έχει το όχημα σε κάθε σημείο της τροχιάς, αφού αυτές μεταβάλλονται γραμμικά μεταξύ των σημείων ελέγχου της τροχιάς. Το κάθε όχημα περιγράφεται ως σημείο στον δισδιάστατο χώρο και ο πεπερασμένος όγκος του λαμβάνεται υπόψη με την κατάλληλη διόγκωση των εμποδίων και την επιβολή ελάχιστης απόστασης ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων. Τα εμπόδια που καλούνται τα οχήματα να αποφύγουν είναι γνωστά και περιγράφονται από τις κορυφές πολυγώνων.

Οι τροχιές που θα παραχθούν θα πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Οι τροχιές δεν θα πρέπει να τέμνουν κανένα εμπόδιο. Αυτό υλοποιείται με τον έλεγχο της τομής όλων των ευθυγράμμων τμημάτων που συνθέτουν κάθε τροχιά με όλα τα ευθύγραμμα τμήματα που συνθέτουν κάθε εμπόδιο.
2. Οι αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων δεν θα πρέπει να μειωθούν κάτω από μία ελάχιστη απόσταση ασφαλείας. Η απόσταση αυτή λαμβάνεται για να ληφθεί υπόψη ο πεπερασμένος όγκος κάθε οχήματος, αλλά και για λόγους αποφυγής συγκρούσεων. Για τον συγκεκριμένο έλεγχο θα πρέπει να γνωρίζουμε τη θέση κάθε οχήματος κάθε χρονική στιγμή, οπότε απαιτείται να γίνει προσομοίωση της κίνησης όλων των οχημάτων.

3. Το μήκος της τροχιάς κάθε οχήματος θα πρέπει να είναι το ελάχιστο δυνατό. Η απαίτηση πηγάζει από την ανάγκη εξοικονόμησης πόρων του οχήματος. Για τα αυτόνομα οχήματα η ακτίνα δράσης είναι συνήθως περιορισμένη και η κατασπατάληση ενεργειακών πόρων σε άχρηστες περιηγήσεις είναι μη αποδεκτή.
4. Τα οχήματα κατά την άφιξή τους στον στόχο θα πρέπει να έχουν τον μέγιστο δυνατό χωρικό διαχωρισμό, θα πρέπει δηλαδή να προσεγγίζουν τον στόχο από όσο το δυνατόν πιο διαφορετικές διευθύνσεις, ώστε να μεγιστοποιείται η αποτελεσματικότητα της αποστολής που αναλαμβάνουν. Η απαίτηση σημαίνει ότι οι γωνίες που σχηματίζουν τα τελικά ευθύγραμμα τμήματα των τροχιών θα πρέπει να είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους, να χωρίζουν δηλαδή τον κύκλο με κέντρο τον στόχο σε ίσους τομείς..
5. Η τελευταία απαίτηση είναι τα οχήματα να φτάνουν στον στόχο με τον ελάχιστο δυνατό χρονικό διαχωρισμό. Η απαίτηση αυτή επιβάλλεται για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της κοινής τους αποστολής.

Η συνάρτηση κόστους:

Η υλοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων πραγματοποιείται εισάγοντας μία συνάρτηση κόστους για κάθε μία απαίτηση. Η συνολική συνάρτηση κόστους προκύπτει ως το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους συναρτήσεων. Η συνολική συνάρτηση κόστους, που καλούμαστε να ελαχιστοποιήσουμε, αποτελεί τη συνάρτηση προσαρμογής (fitness function) του Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου και δίδεται:

$$f = w_1 \times length + w_2 \times penalty1 + w_3 \times penalty3 + w_4 \times penalty4 + w_5 \times penalty5 \quad (3.1)$$

όπου

length: είναι το αδιάστατο άθροισμα των μηκών όλων των τροχιών. Το άθροισμα των μηκών των τροχιών αδιαστατοποιείται με το άθροισμα των μηκών των ευθυγράμμων τμημάτων που ενώνουν κάθε αρχικό σημείο με τον στόχο.

penalty1: συνδέεται με την περίπτωση που μία τροχιά τέμνει κάποιο εμπόδιο. Κάθε φορά που ανιχνεύεται μία τέτοια κατάσταση, η τιμή του αυξάνεται κατά ένα σταθερό ποσό. Είναι η συνάρτηση κόστους με τις μεγαλύτερες τιμές, ώστε να εξασφαλίζονται τροχιές ελεύθερες εμποδίων.

penalty3: συνδέεται με την απαίτηση για το μέγιστο χωρικό διαχωρισμό των οχημάτων, όταν προσεγγίζουν τον στόχο. Όσο μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζουν οι σχετικές γωνίες από τη βέλτιστη, τόσο μεγαλύτερη η τιμή της συγκεκριμένης συνάρτησης κόστους.

penalty4: συνδέεται με την απόσταση ασφαλείας μεταξύ των οχημάτων. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της ταυτόχρονης κίνησής τους, κάθε φορά που μία από τις μεταξύ τους αποστάσεις μειωθεί κάτω από την προδιαγεγραμμένη απόσταση ασφαλείας, προστίθεται μία σταθερή ποσότητα στη συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους.

penalty5: αφορά στον χρονικό διαχωρισμό των οχημάτων κατά την προσέγγιση στον στόχο. Η τιμή της είναι ανάλογη του αθροίσματος των χρονικών αποστάσεων των οχημάτων από αυτό που φθάνει πρώτο στον στόχο.

Οι συντελεστές στάθμισης w_i , παίρνουν τέτοιες τιμές προκειμένου, να σταθμίσουν τους επιμέρους όρους, ώστε αυτοί να έχουν τελικά παραπλήσιες τιμές. Αν κάποιος από τους όρους της συνάρτησης προσαρμογής θεωρείται εξαιρετικά σημαντικός, τότε στον αντίστοιχο συντελεστή στάθμισης δίνεται μεγαλύτερη τιμή, προκειμένου, να δειχθεί και να ληφθεί υπ' όψη η φυσική του σημασία. Η επιλογή των συντελεστών στάθμισης έγινε με πειραματικές δοκιμές, συγκρίνοντας την ποιότητα των εκάστοτε αποτελεσμάτων.

Η συνολική συνάρτηση κόστους που απαρτίζεται από το άθροισμα των σταθμισμένων επιμέρους συναρτήσεων, αποτελεί την συνάρτηση προσαρμογής του Διαφορικού Εξελικτικού Αλγορίθμου (ΔΕΑ). Σκοπός του ΔΕΑ είναι η εύρεση υποψήφιων λύσεων που ελαχιστοποιούν τη συγκεκριμένη συνάρτηση.

3.2 Αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου

Αρχεία εισόδου

Ο Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε έχει τη δυνατότητα να καλεί εξωτερικά προγράμματα για τον υπολογισμό της συνάρτησης προσαρμογής της κάθε υποψήφιας λύσης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε Visual Basic, για τον υπολογισμό της συνάρτησης προσαρμογής που αντιστοιχεί σε τυχαίο χρωμόσωμα που περιγράφει τις τροχιές των ρομποτικών οχημάτων.

Ο Πρόγραμμα που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί 3 αρχεία εισόδου και 1 αρχείο εξόδου, στο οποίο τυπώνεται η τιμή της συνάρτησης. Αναλυτικότερα, οι είσοδοι είναι:

- το αρχείο “Robot. txt” όπου ορίζουμε τον αριθμό των ρομποτικών μηχανισμών (NR) που θα κινηθούν στον επιτρεπτό χώρο, ορίζουμε τη μεταξύ τους απόσταση ασφαλείας ($dsafe$), τις συντεταγμένες της θέσης εκκίνησης και του στόχου για κάθε ρομποτικό όχημα και τέλος την αρχική και τελική ταχύτητα για κάθε όχημα.
- το αρχείο “obstacle. txt” όπου καθορίζουμε τον αριθμό των εμποδίων (NO) που υπάρχουν μέσα στον επιτρεπτό χώρο κίνησης, το πλήθος των κορυφών για κάθε εμπόδιο ($NP(j)$) καθώς, και τις συντεταγμένες κάθε μιας από αυτές ($XP(i,j)$, $YP(i,j)$).
- το αρχείο “chromosome. txt” που περιέχει το χρωμόσωμα της υποψήφιας λύσης και παράγεται από τον DEA. Στη συγκεκριμένη εργασία τα γονίδια του χρωμοσώματος είναι τα σημεία ελέγχου και οι αντίστοιχες ταχύτητες των οχημάτων στα σημεία αυτά. Στο αρχείο αυτό δίνεται στην αρχή ο αριθμός των γονιδίων, των ελεύθερων δηλαδή παραμέτρων του προβλήματος. Όλες οι τροχιές έχουν τον ίδιο αριθμό σημείων ελέγχου που προκύπτει από τον αριθμό των γονιδίων και τον αριθμό NR των ρομποτικών οχημάτων.

Έλεγχος τομής τροχιάς με εμπόδιο

Έστω, οι ευθείες που ορίζονται από τα σημεία $(X1,Y1)(X2,Y2)$ και $(X3,Y3)(X4,Y4)$, οι οποίες παριστούν η μεν πρώτη το εκάστοτε ευθύγραμμο τμήμα της τροχιάς και η δεύτερη το ευθύγραμμο τμήμα κάθε πλευράς πολυγωνικού εμποδίου. Υπολογίζουμε στη συνέχεια τους συντελεστές διεύθυνσης κάθε ευθείας, a και b αντίστοιχα. Μελετώνται όλες οι δυνατές περιπτώσεις ώστε, να προσδιοριστούν όλα τα πιθανά σενάρια τομής των ευθειών:

- ❖ Για την περίπτωση όπου $X2 \neq X1$ και $X3 \neq X4$:
 - αν $Y1 = Y2$, $Y3 = Y4$ και $Y1 \neq Y3$, τότε οι ευθείες είναι παράλληλες και οριζόντιες και δεν ορίζεται τομή μεταξύ τους.
 - αν $Y1 = Y2$, $Y3 = Y4$ και $Y1 = Y3$, τότε έχουμε τομή.
 - αν $Y1 \neq Y2$ και $Y3 = Y4$, τότε ισχύει:

$$b = 0$$

$$a = (Y2 - Y1) / (X2 - X1)$$

$$Y_0 = Y_3$$

$$X_0 = X_1 + (1/a) * (Y_0 - Y_1)$$

και γίνεται έλεγχος αν το σημείο X_0, Y_0 , που αντιπροσωπεύει το σημείο τομής των δύο ευθειών, βρίσκεται εντός των ορίων που καθορίζουν οι δύο ευθείες. Αν βρίσκεται εντός τότε έχουμε τομή, διαφορετικά όχι.

- αν $Y_1 = Y_2$ και $Y_3 \neq Y_4$, τότε

$$a = 0$$

$$b = (Y_4 - Y_3) / (X_4 - X_3)$$

$$Y_0 = Y_1$$

$$X_0 = X_3 + (1/b) * (Y_0 - Y_3)$$

γίνεται ο έλεγχος με το σημείο (X_0, Y_0) .

- Στην περίπτωση που δεν ισχύουν τα παραπάνω, ορίζουμε τους συντελεστές διεύθυνσης των δύο ευθειών:

$a = (Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1)$ και $b = (Y_4 - Y_3) / (X_4 - X_3)$ και εξετάζουμε την περίπτωση όπου $Y_1 \neq Y_2$ και $Y_3 \neq Y_4$, όπου έχουμε

$$X_0 = (a * X_1 - Y_1 - b * X_3 + Y_3) / (a - b)$$

Και

$$Y_0 = a * X_0 - a * X_1 + Y_1$$

και ελέγχουμε αν το (X_0, Y_0) , βρίσκεται εντός των ορίων που καθορίζουν οι δύο ευθείες. Αν βρίσκεται, τότε έχουμε τομή, διαφορετικά όχι.

- ❖ Για την περίπτωση όπου $X_2 = X_1, X_3 = X_4$ και $X_1 \neq X_3$, τότε οι δύο ευθείες είναι παράλληλες και κάθετες και δεν ορίζεται τομή μεταξύ τους.
- ❖ Για την περίπτωση όπου $X_2 = X_1, X_3 = X_4$ και $X_1 = X_3$, τότε οι δύο ευθείες συμπίπτουν και συνεπώς έχουμε τομή.
- ❖ Για την περίπτωση όπου $X_2 = X_1$ και $X_3 \neq X_4$, τότε:

- αν $Y_1 \neq Y_2$ και $Y_3 \neq Y_4$, τότε έχουμε

$$X_0 = X_1$$

$$Y_0 = b * X_0 - b * X_3 + Y_3$$

και κάνουμε τον έλεγχο με το σημείο (X_0, Y_0) .

- αν $Y_1 \neq Y_2$ και $Y_3 = Y_4$, τότε έχουμε

$$b = 0$$

$$X_0 = X_1$$

$$Y_0 = Y_3$$

και γίνεται ο έλεγχος με το σημείο (X_0, Y_0) .

- ❖ Για την περίπτωση που $X_2 \neq X_1$ και $X_3 = X_4$ έχουμε:

- αν $Y_1 \neq Y_2$ και $Y_3 \neq Y_4$, τότε:

$$X_0 = X_3$$

$$a = (Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1)$$

$$Y_0 = a * X_0 - a * X_1 + Y_1$$

και ελέγχουμε αν το (X_0, Y_0) βρίσκεται εντός των ορίων που καθορίζουν οι δύο ευθείες. Αν βρίσκεται, τότε έχουμε τομή, διαφορετικά όχι.

- $Y_1 = Y_2$ και $Y_3 \neq Y_4$, τότε:

$$a = 0$$

$$X_0 = X_3$$

$$Y_0 = Y_1$$

και κάνουμε τον έλεγχο με το σημείο τομής (X_0, Y_0) .

- ❖ Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση δεν ορίζεται τομή μεταξύ των δύο ευθειών.

Για τον υπολογισμό του *penalty* εφαρμόζεται η παραπάνω διαδικασία για κάθε τμήμα τροχιάς και για κάθε τμήμα εμποδίου. Κάθε φορά που ανιχνεύεται τομή, προστίθεται μία σταθερή ποσότητα στο *penalty*.

Προσομοίωση κίνησης ρομπότ

Για να ελεγχθεί η εγγύτητα μεταξύ των οχημάτων και η χρονική διαφορά κατά την άφιξη στο στόχο, πρέπει να γνωρίζουμε τη θέση κάθε οχήματος κάθε χρονική στιγμή. Η προσομοίωση της κίνησης γίνεται θεωρώντας σταθερά χρονικά βήματα $dt = 0.1 \text{ sec}$. Ξεκινώντας από τα σημεία εκκίνησης (για ταυτόχρονη εκκίνηση) είναι γνωστή η ταχύτητα κάθε οχήματος και η διεύθυνση κίνησης. Άρα για το δεδομένο χρονικό βήμα υπολογίζεται η νέα θέση κάθε οχήματος. Στη νέα θέση υπολογίζεται η νέα ταχύτητα (που μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των σημείων ελέγχου), οπότε μπορεί να υπολογιστεί μια νέα μετατόπιση κ.ο.κ. Κάθε φορά γίνεται έλεγχος εάν το όχημα ξεπέρασε το επόμενο σημείο ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή αλλάζει η διεύθυνση κίνησης. Αν στον έλεγχο διαπιστωθεί ότι ξεπέρασε τον στόχο, τότε το

συγκεκριμένο όχημα τερματίζει την κίνησή του και η προσομοίωση παρακολουθεί τα υπόλοιπα.

Σε κάθε χρονική στιγμή γίνεται έλεγχος εγγύτητας μεταξύ των ρομπότ και συγκρίνεται η μεταξύ τους απόσταση με την απόσταση (*dsafe*). Κάθε φορά που γίνεται η πρώτη μικρότερη της δεύτερης προστίθεται μία σταθερή ποσότητα στο *penalty4*.

Μετά την άφιξη και του τελευταίου οχήματος στον στόχο υπολογίζονται οι διαφορές στους χρόνους άφιξης, μεταξύ του πρώτου και των υπολοίπων.

$$dt_curr(k) = t_max - t_curr(k) \quad (3.2)$$

Οι διαφορές αυτές αθροίζονται και δίνουν το *penalty5*.

Χωρικός διαχωρισμός στον στόχο

Αρχικά υπολογίζουμε τη βέλτιστη γωνία *thetaopt* που θα πρέπει να σχηματίζουν μεταξύ τους οι διαδοχικές τροχιές, η οποία ισούται με:

$$thetaopt = \frac{2\pi}{NR} \quad (3.3)$$

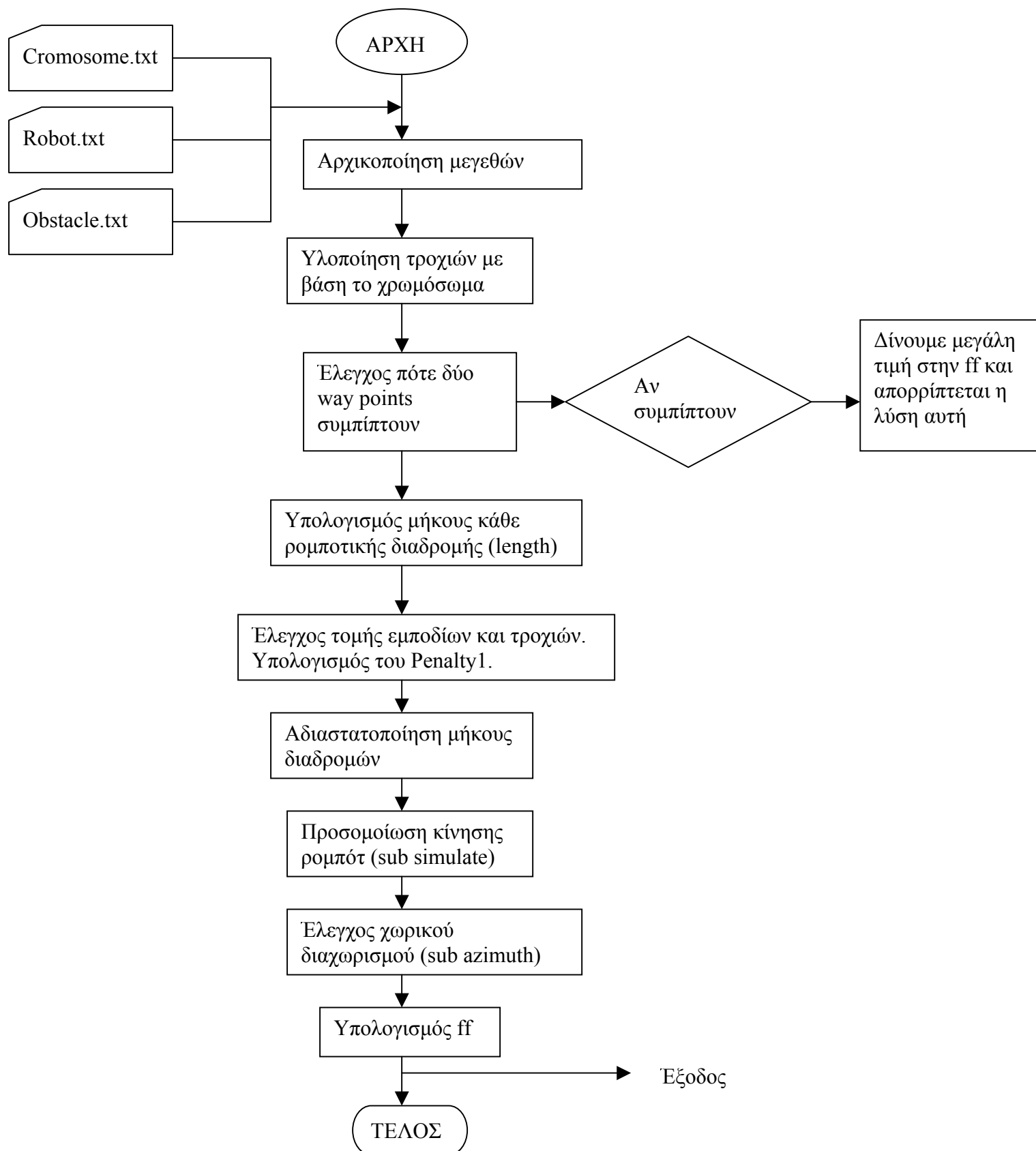
Υπολογίζουμε για όλα τα ρομπότ ($k = 1$ to NR) τις γωνίες (αζιμούθιο) του τελικού τμήματος της τροχιάς τους *thetaz(k)*. Στη συνέχεια ταξινομούμε τις γωνίες κατά αύξουσα σειρά *dumthetaz(l)*. Εν συνεχεία, υπολογίζουμε όλες τις διαφορές διαδοχικών γωνιών, οπότε προκύπτουν οι περιεχόμενες γωνίες μεταξύ διαδοχικών τροχιών:

$$deltath(l) = dumthetaz(l+1) - dumthetaz(l) \quad (3.4)$$

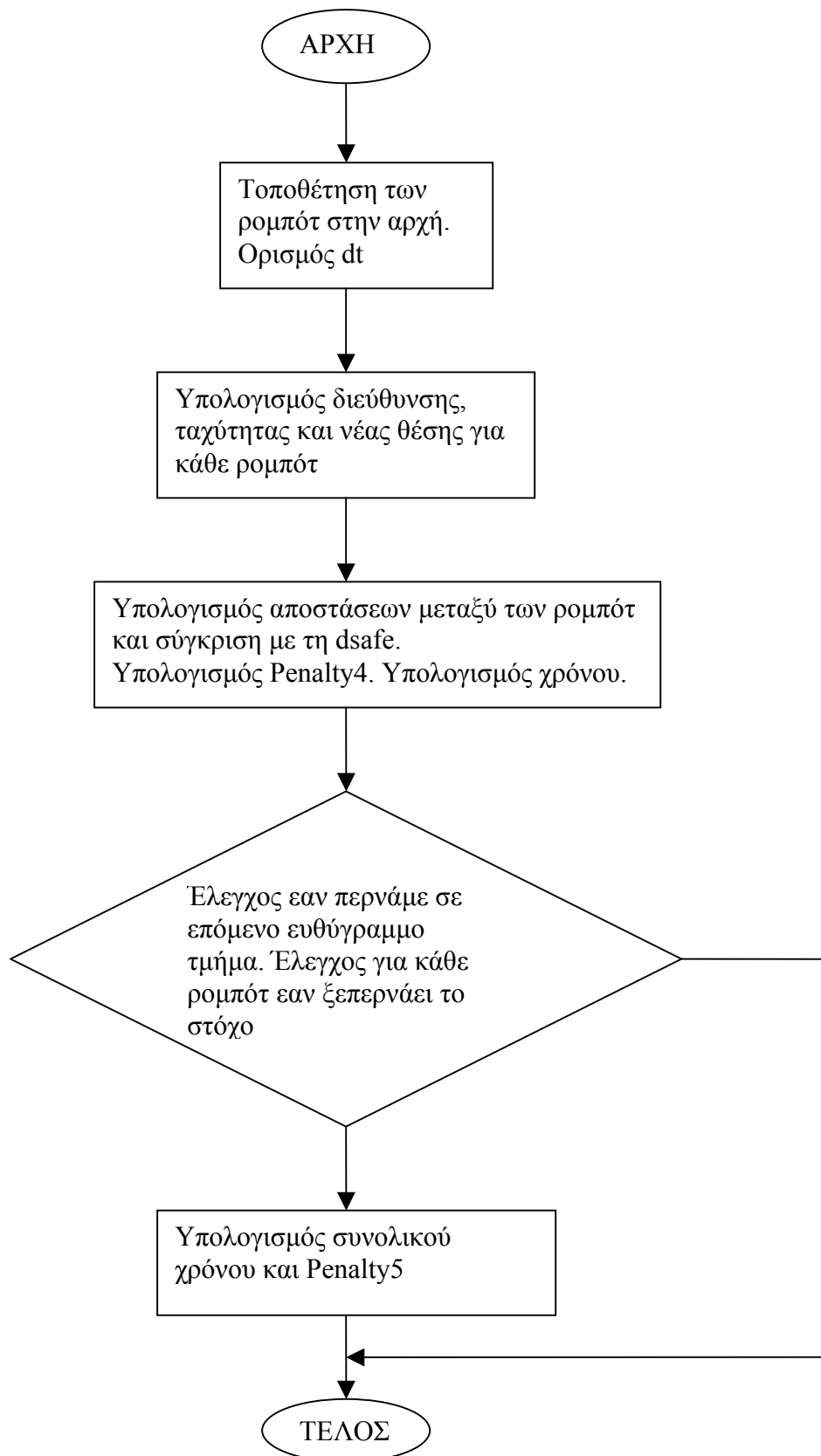
Το *penalty3* υπολογίζεται ως

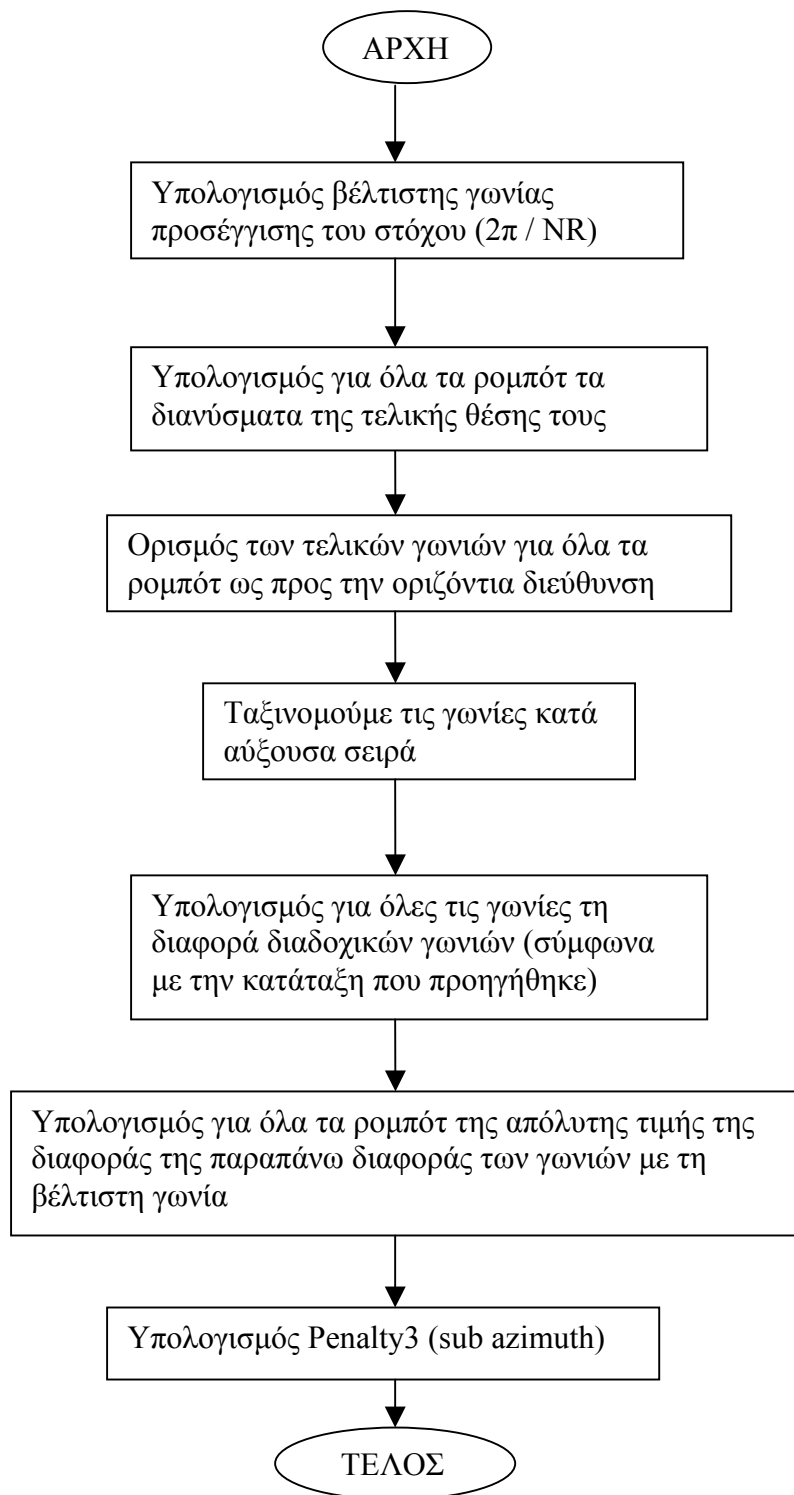
$$penalty3 = \sum_{l=1}^{NR} |deltath(l) - thetaopt| \quad (3.5)$$

3.3 Λογικό διάγραμμα



Simulate





3.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

3.4.1 Γενικά

Στο σημείο αυτό της παρούσας μελέτης, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την off-line σχεδίαση τροχιάς. Τα ρομποτικά οχήματα θεωρούνται σημειακά και στη μοντελοποίηση των πολυγωνικών εμποδίων έχουν συνυπολογισθεί οι διαστάσεις των ρομποτικών μηχανισμών, ώστε οι προκύπτουσες διαδρομές να είναι οι ασφαλέστερες δυνατές.

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε κάποιες πρώιμες δοκιμές, οι οποίες έγιναν όταν το μοντέλο δε βρισκόταν στην τελική μορφή του, προκειμένου να φανεί η σταδιακή βελτίωσή του και οι λόγοι που οδήγησαν σ' αυτή.

3.4.2 Πρώιμες μορφές του μοντέλου

Μοντέλο Α.

Στη πρώτη αυτή μορφή του μοντέλου, δεν έχει εφαρμοσθεί ο περιορισμός του μέγιστου χωρικού διαχωρισμού, ο περιορισμός που αφορά στην ταυτόχρονη προσέγγιση του στόχου από τους ρομποτικούς μηχανισμούς, καθώς και ο περιορισμός που ελέγχει το κατά πόσο τα ρομπότ τηρούν τη μεταξύ τους απόσταση ασφαλείας. Ωστόσο, στο συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζονται ο περιορισμός που αφορά στην αποφυγή σύγκρουσης με τα εμπόδια του προβλήματος (*penalty1*), καθώς και ένας περιορισμός που εμποδίζει τους ρομποτικούς μηχανισμούς να πλησιάσουν πολύ μεταξύ τους (*penalty2*). Τέλος οι συντελεστές στάθμισης έχουν τιμές:

$$w_i = 1 \quad (3.6)$$

Η συνάρτηση προσαρμογής για το συγκεκριμένο μοντέλο έχει την ακόλουθη μορφή:

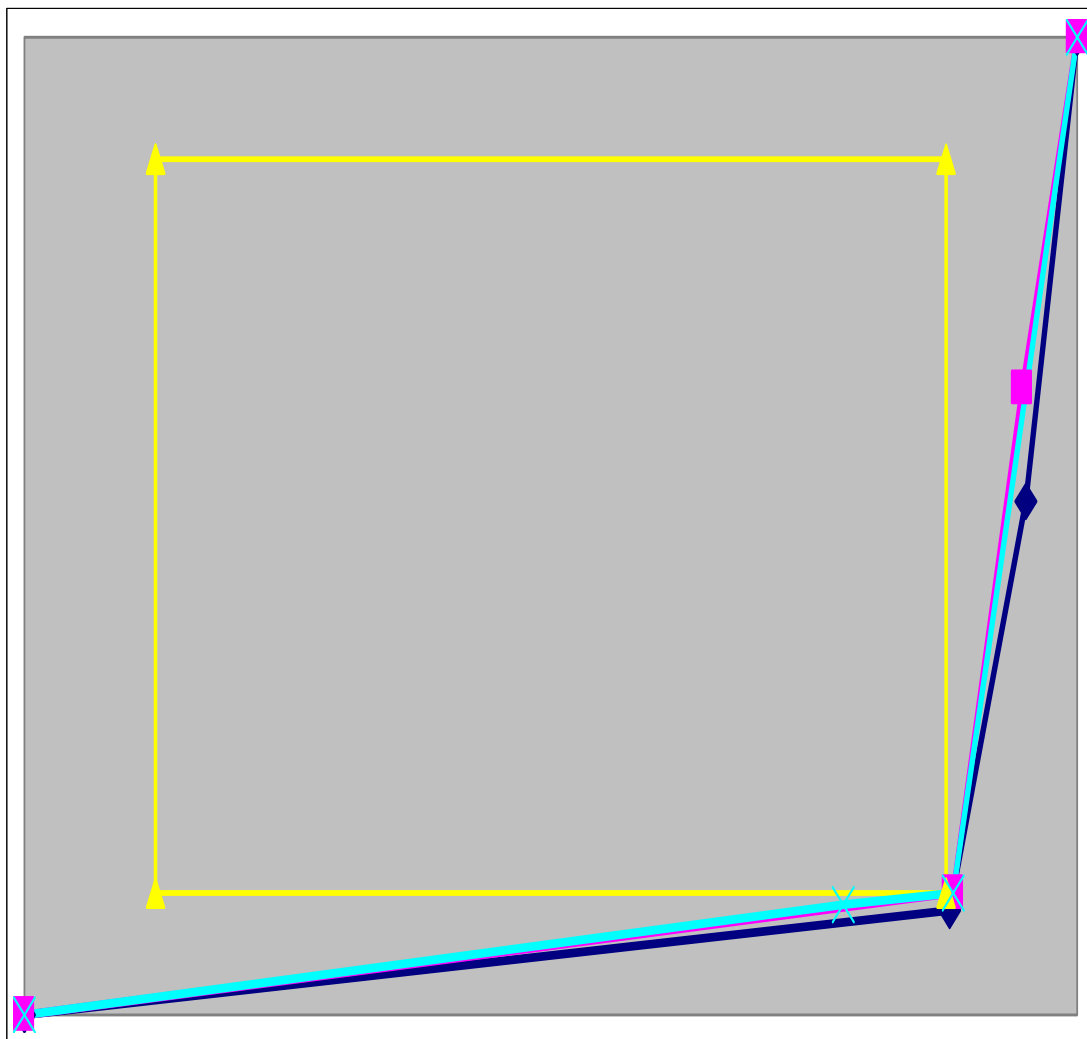
$$f = length + penalty1 + penalty2 \quad (3.7)$$

όπου, το *penalty2* αφορά στην τιμωρία των ρομποτικών εκείνων διαδρομών που απέχουν πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους. Για τον υπολογισμό του αθροίζονται όλες οι αποστάσεις των ρομπότ σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης και αδιαστατοποιούνται με κατάλληλο μήκος. Η συγκεκριμένη συνάρτηση εγκαταλείφθηκε στη συνέχεια.

Σενάριο 1Α

Διαθέτουμε τρία ρομποτικά οχήματα, τα οποία έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης το $(-2,-2)$ και θέλουμε να φτάσουν στη θέση $(2,2)$ του στόχου. Στο χώρο κίνησης υπάρχει ένα εμπόδιο με 4 κορυφές και συντεταγμένες:

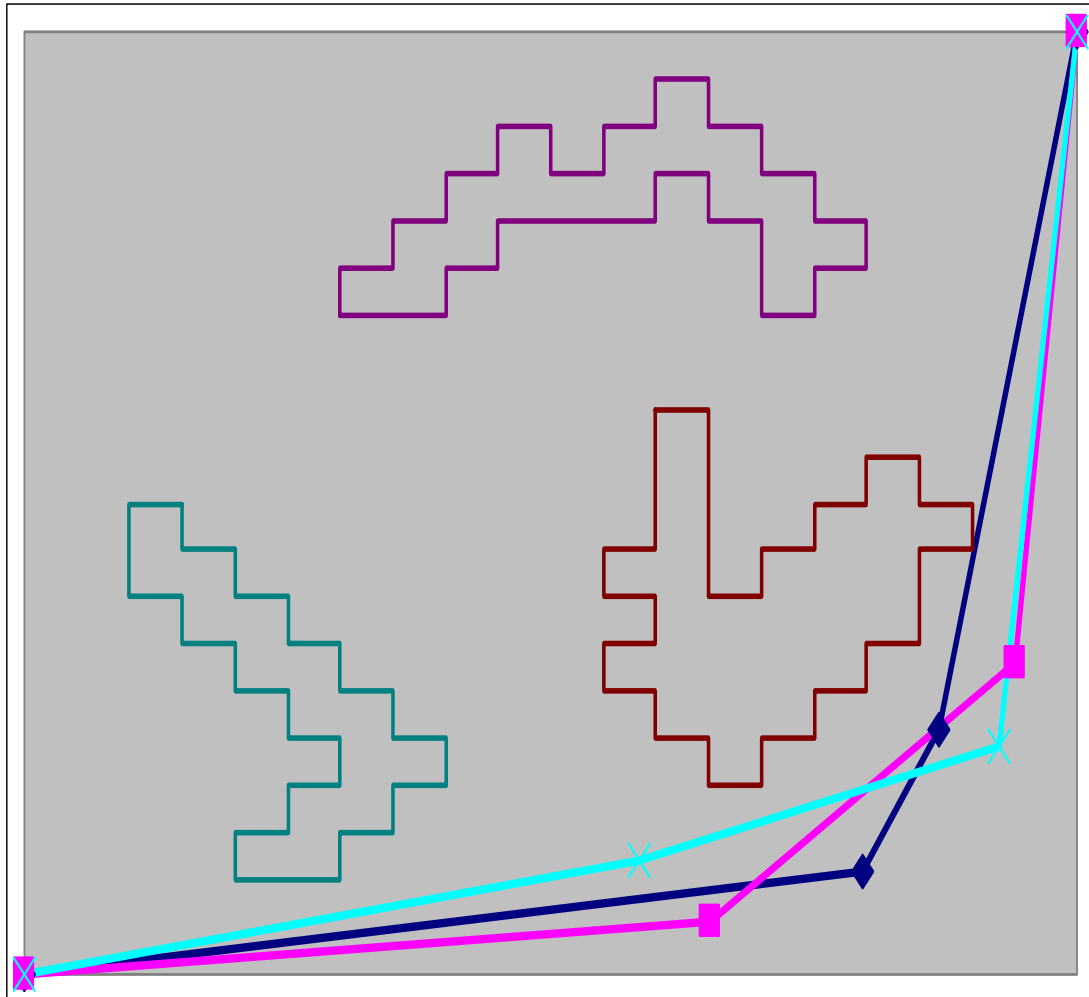
$(-1.5, 1.5)$, $(1.5,1.5)$, $(1.5,-1.5)$ και $(-1.5,-1.5)$. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 500 επαναλήψεις, με μέγεθος πληθυσμού 40 και το χρωμόσωμα να δομείται από 18 γονίδια, δηλαδή να δίνει δύο σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομπότ. Οι βέλτιστες τροχιές που προέκυψαν δίδονται στο σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1: σενάριο 1, μοντέλου Α.

Σενάριο 2Α

Διαθέτουμε τρία ρομποτικά οχήματα, τα οποία έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης το $(-2,-2)$ και θέλουμε να φτάσουν στη θέση $(2,2)$ του στόχου. Στο χώρο κίνησης υπάρχουν τρία εμπόδια με αριθμό κορυφών 30, 32 και 34.

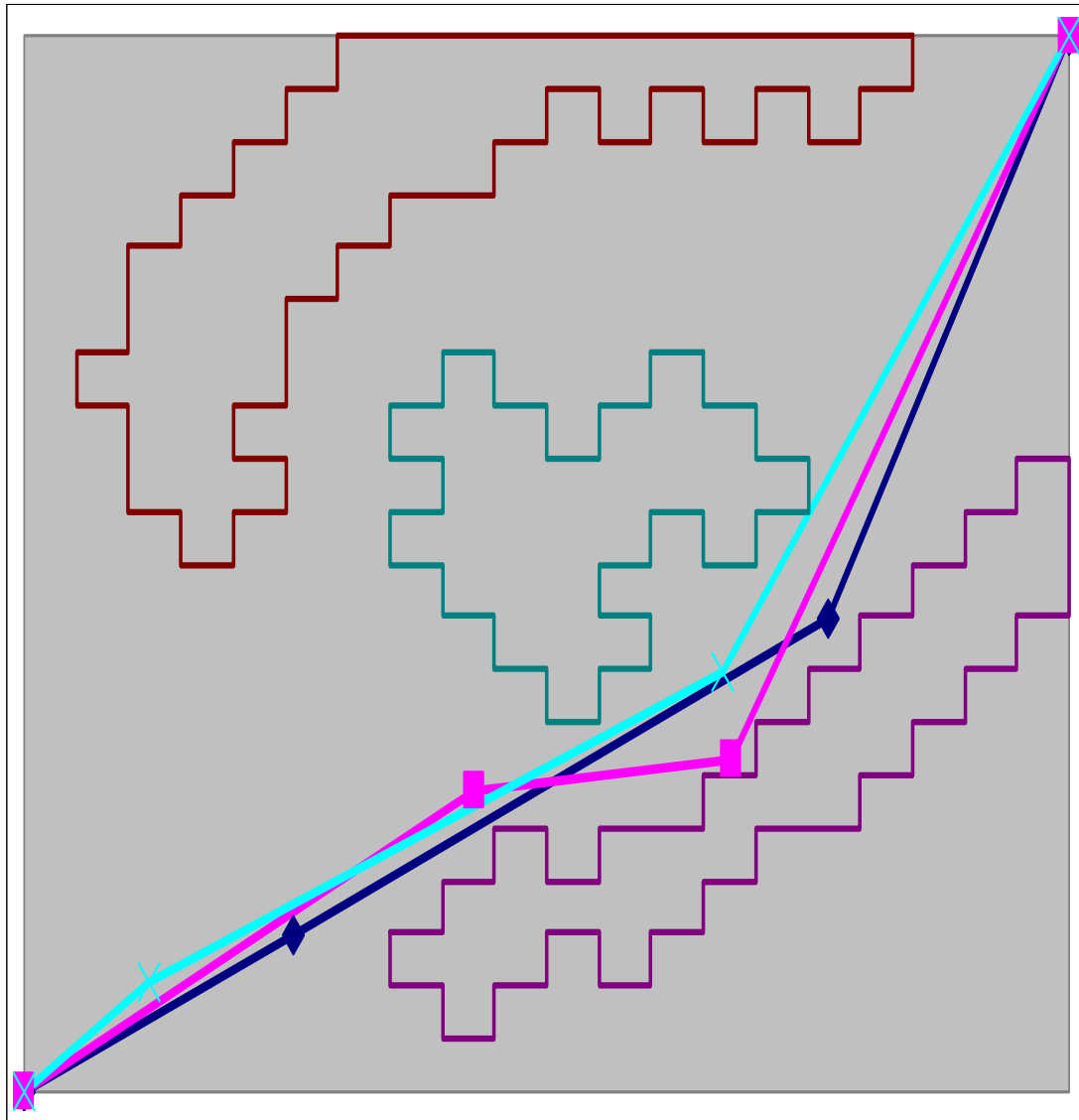


Σχήμα 3.2: σενάριο 2, μοντέλου Α.

Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 500 επαναλήψεις, με μέγεθος πληθυσμού 40 και το χρωμόσωμα να δομείται από 18 γονίδια, δηλαδή να δίνει δύο σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομπότ. Τα αποτελέσματα δίδονται στο σχήμα 3.2

Σενάριο 3Α

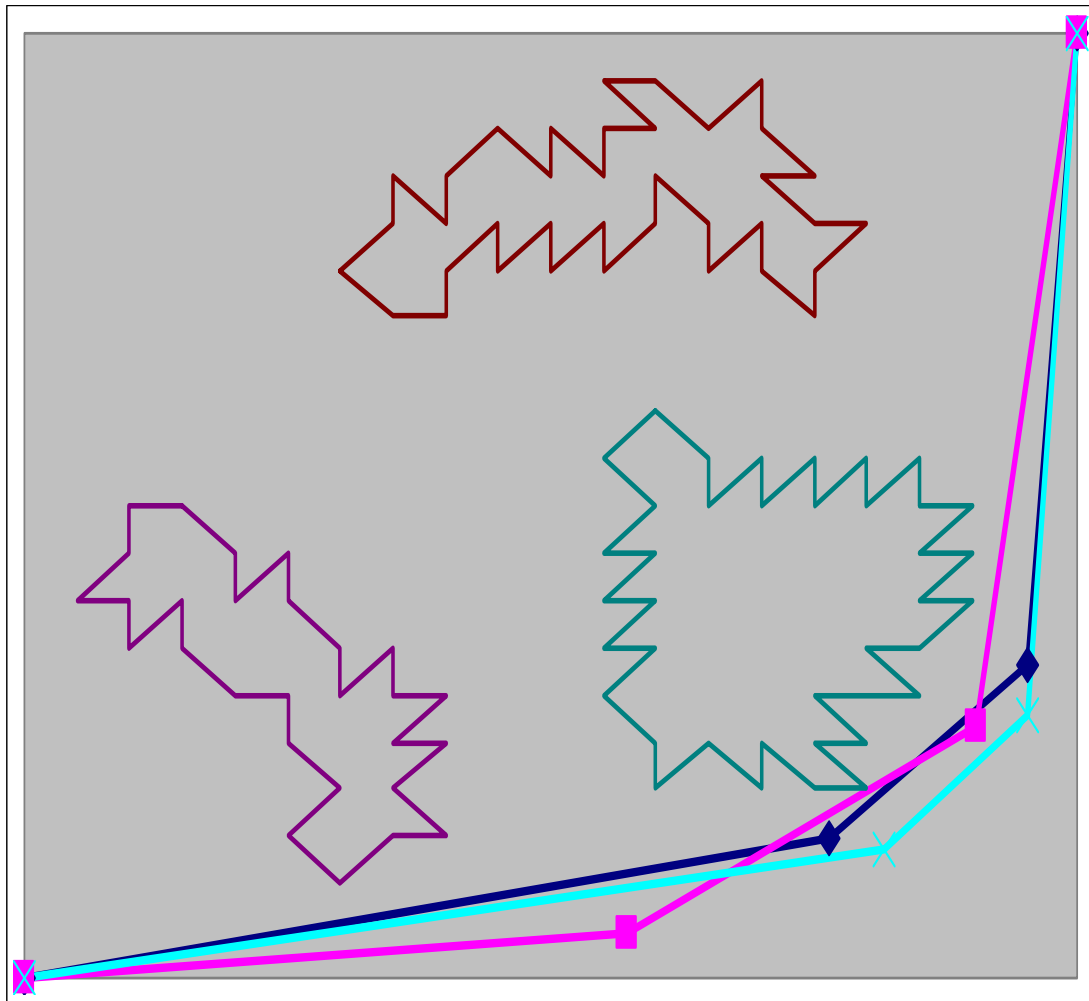
Ομοίως με το προηγούμενο σενάριο με τη διαφορά ότι τα εμπόδια έχουν αριθμό κορυφών 48, 46 και 40. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 900 επαναλήψεις, το μέγεθος του πληθυσμού 50 και το χρωμόσωμα να δομείται από 18 γονίδια, δηλαδή να δίνει δύο σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομπότ. Τα αποτελέσματα δίδονται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: σενάριο 3, μοντέλου Α.

Σενάριο 4Α

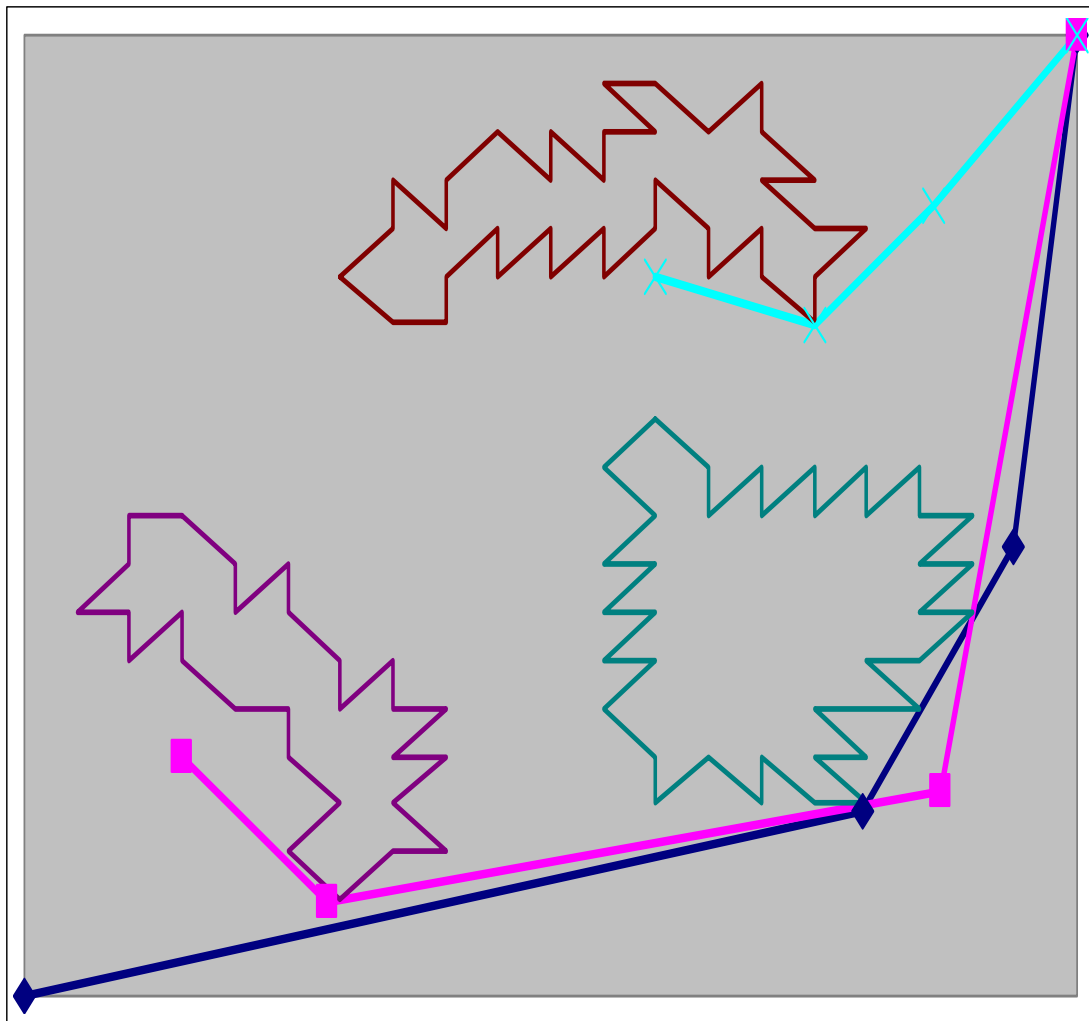
Ομοίως, με το προηγούμενο σενάριο με τη διαφορά ότι τα εμπόδια έχουν αριθμό κορυφών 28, 37 και 38. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 300 επαναλήψεις, το μέγεθος του πληθυσμού 40 και το χρωμόσωμα να δομείται από 18 γονίδια, δηλαδή να δίνει δύο σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομπότ. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: σενάριο 4, μοντέλου Α.

Σενάριο 5Α

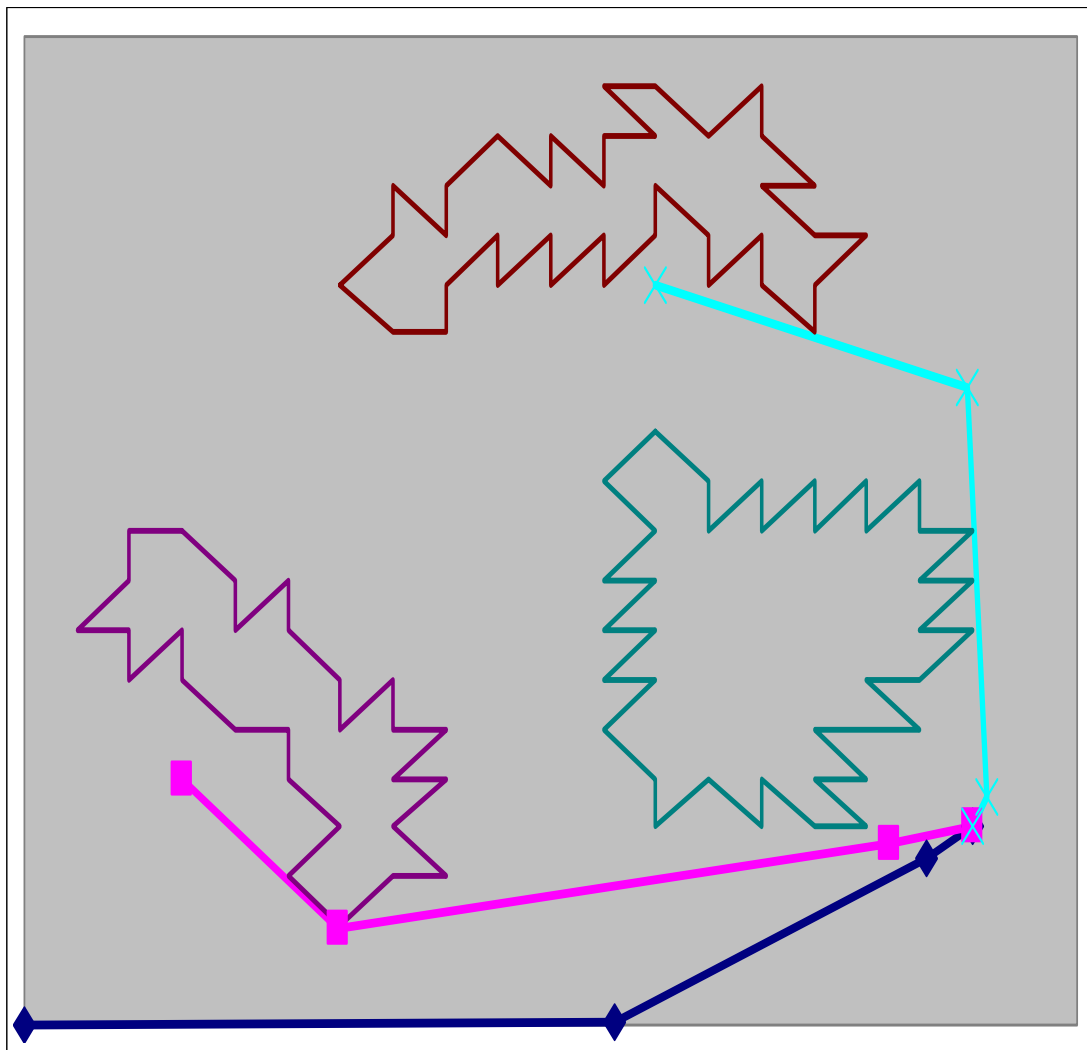
Διαθέτουμε τρία ρομπότ με σημεία εκκίνησης $(-2,-2)$, $(-1.4,-1)$ και $(0.4,1)$. Η θέση του στόχου είναι ίδια για όλα τα ρομπότ και είναι $(2,2)$. Έχουμε τρία εμπόδια με αριθμό κορυφών 28, 37 και 38. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 500 επαναλήψεις, το μέγεθος του πληθυσμού 40 και το χρωμόσωμα να δομείται από 18 γονίδια, δηλαδή να δίνει δύο σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομπότ. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: σενάριο 5, μοντέλου Α.

Σενάριο 6Α

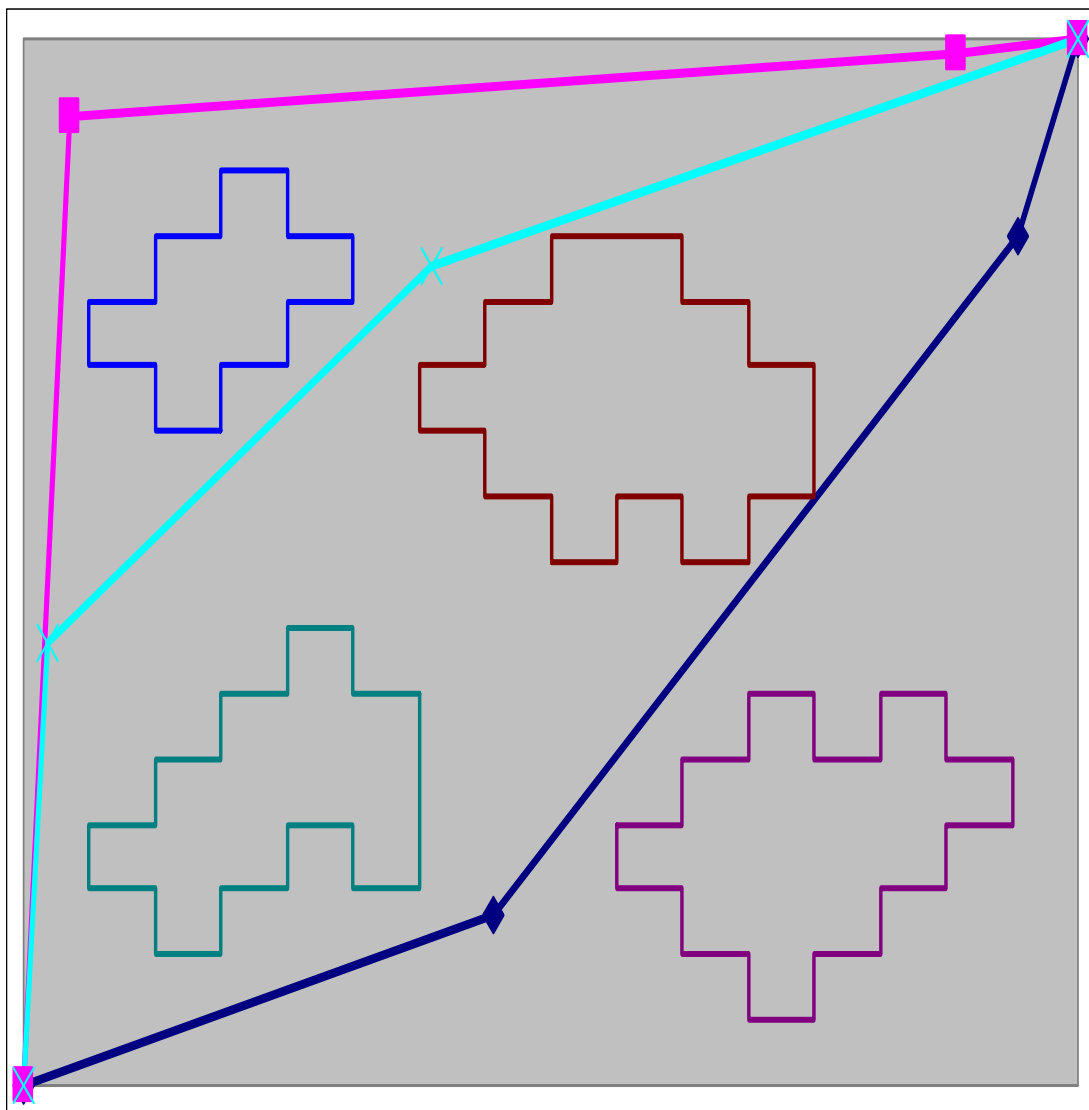
Διαθέτουμε τρία ρομπότ με σημεία εκκίνησης $(-2,-2)$, $(-1.4,-1)$ και $(0.4,1)$. Η θέση του στόχου είναι ίδια για όλα τα ρομπότ και είναι $(1.6,-1.2)$. Έχουμε τρία εμπόδια με αριθμό κορυφών 28, 37 και 38. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 500 επαναλήψεις, το μέγεθος του πληθυσμού 40 και το χρωμόσωμα να δομείται από 18 γονίδια, δηλαδή να δίνει δύο σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομπότ. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: σενάριο 6, μοντέλου Α.

Σενάριο 7Α

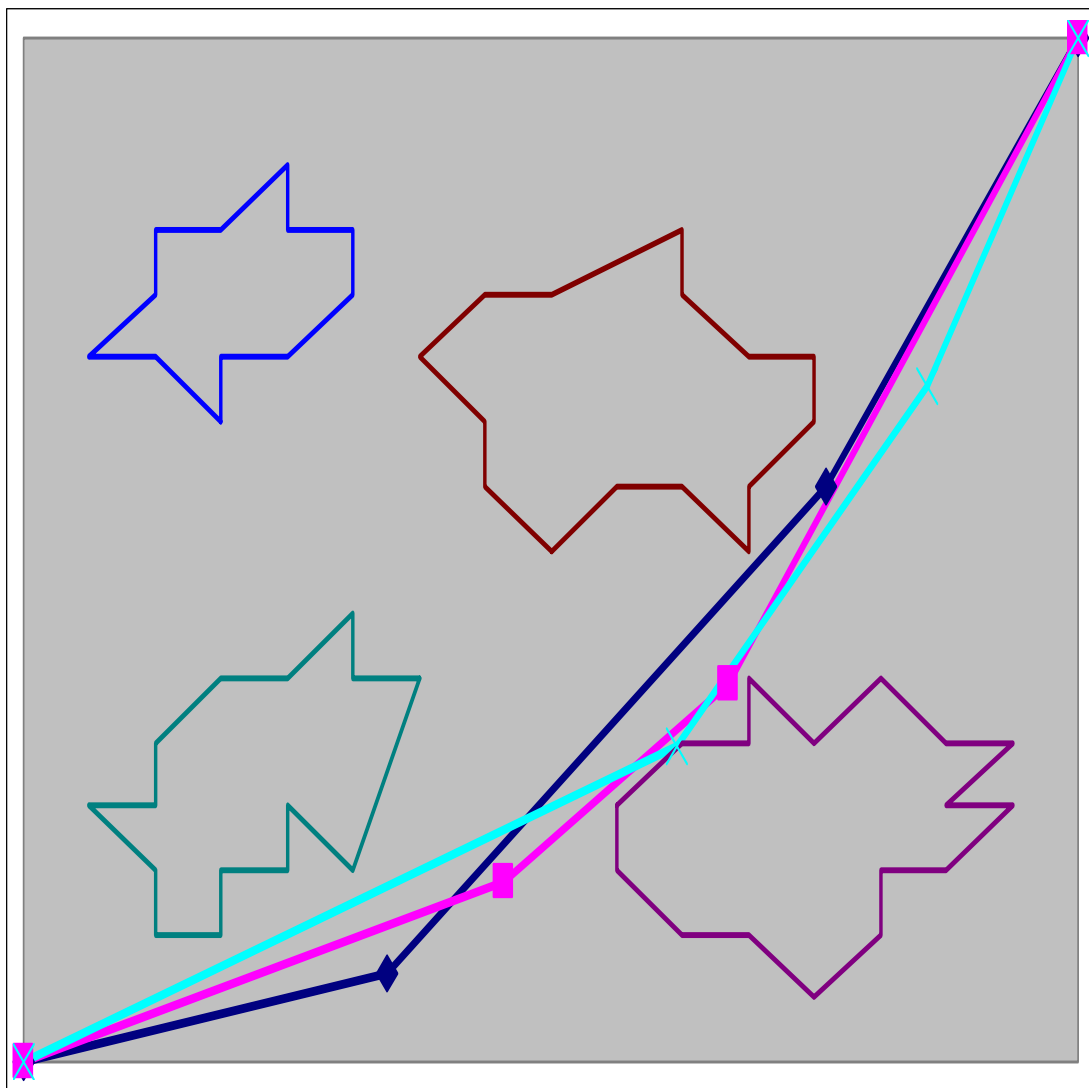
Διαθέτουμε τρία ρομποτικά οχήματα, τα οποία έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης το $(-2,-2)$ και θέλουμε να φτάσουν στη θέση $(2,2)$ του στόχου. Στον επιτρεπτό χώρο κίνησης υπάρχουν τέσσερα εμπόδια με αριθμό κορυφών 16, 20, 22 και 24. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 500 επαναλήψεις, το μέγεθος του πληθυσμού 40 και το χρωμόσωμα να δομείται από 18 γονίδια, δηλαδή να δίνει δύο σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομπότ. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: σενάριο 7, μοντέλου Α.

Σενάριο 8Α

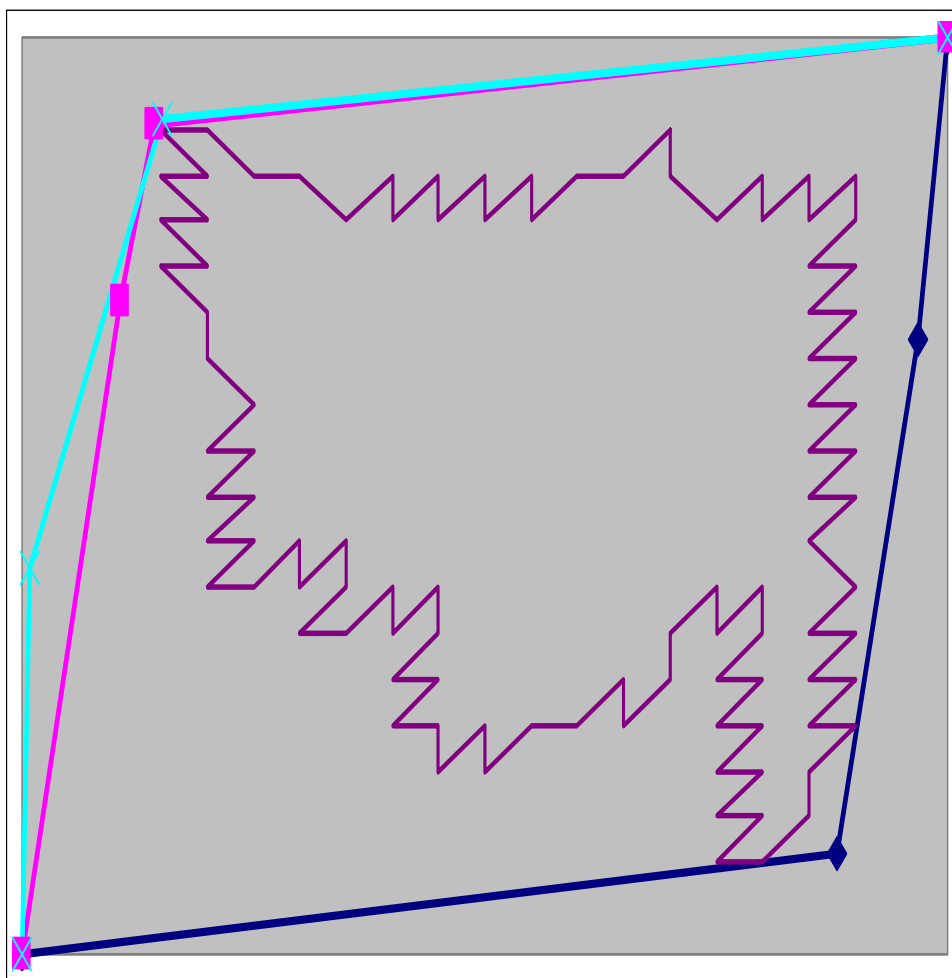
Διαθέτουμε τρία ρομποτικά οχήματα, τα οποία έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης το $(-2,-2)$ και θέλουμε να φτάσουν στη θέση $(2,2)$ του στόχου. Στον επιτρεπτό χώρο κίνησης υπάρχουν τέσσερα εμπόδια με αριθμό κορυφών 12, 15, 15 και 17. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 300 επαναλήψεις, το μέγεθος του πληθυσμού 40 και το χρωμόσωμα να δομείται από 18 γονίδια, δηλαδή να δίνει δύο σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομπότ. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: σενάριο 8, μοντέλου Α.

Σενάριο 9Α

Διαθέτουμε τρία ρομποτικά οχήματα τα οποία έχουν το ίδιο σημείο εκκίνησης το $(-2,-2)$ και θέλουμε να φτάσουν στη θέση $(2,2)$ του στόχου, διαγράφοντας τη συντομότερη δυνατή διαδρομή, χωρίς να προσκρούσουν στο εμπόδιο και χωρίς να συγκρουσθούν μεταξύ τους. Στο σενάριο αυτό έχουμε θεωρήσει την ύπαρξη ενός μόνου εμποδίου με 99 κορυφές. Ο ΔΕΑ δίνει δύο σημεία ελέγχου και προγραμματίστηκε να εκτελέσει 500 επαναλήψεις, με μέγεθος πληθυσμού 40 και χρωμόσωμα να δομείται από 18 γονίδια. Τα αποτελέσματα δίδονται στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: σενάριο 9, μοντέλου Α.

Σε όλες τις περιπτώσεις του Μοντέλου Α, ο ΔΕΑ κατάφερε να βρει λύσεις που ελαχιστοποιούν το μήκος τη τροχιάς, χωρίς να τέμνονται εμπόδια. Παρ' όλα αυτά οι τροχιές δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως οι καλύτερες δυνατές από άποψη διαχωρισμού μεταξύ των οχημάτων.

Μοντέλο Β

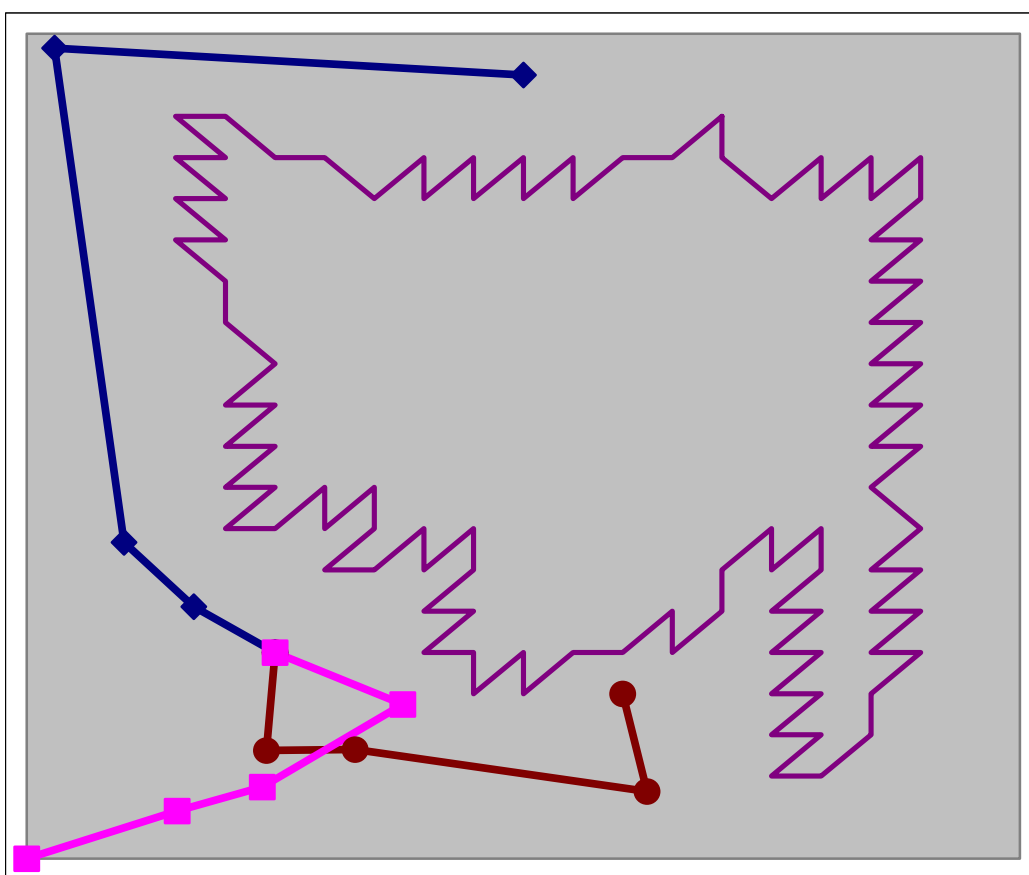
Το μοντέλο αυτό είναι ένα στάδιο πριν το τελικό. Έχει προστεθεί ο περιορισμός που περιγράφει τη δυνατότητα των ρομποτικών μηχανισμών να διαιρούν τη χωρική περιοχή του στόχου (ανάλογα με το πλήθος τους) με τέτοιο τρόπο ώστε, να τον προσεγγίζουν «κυκλωτικά». Ωστόσο, υπολείπεται η εφαρμογή του περιορισμού διατήρησης της απόστασης ασφαλείας μεταξύ των ρομποτικών μηχανισμών καθώς, και η εφαρμογή του περιορισμού που αφορά στον ελάχιστο δυνατό χρονικό διαχωρισμό κατά την προσέγγιση του στόχου.

Η συνάρτηση προσαρμογής για το μοντέλο Β έχει την ακόλουθη μορφή:

$$f = w_1 \times length + w_2 \times penalty1 + w_3 \times penalty2 + w_4 \times penalty3 \quad (3.8)$$

Σενάριο1B

Διαθέτουμε τρία ρομποτικά οχήματα με σημεία εκκίνησης $(0.4,-1.2)$, $(0,1.8)$ και $(-2,-2)$. Η θέση του στόχου είναι $(-1,-1)$. Στο χώρο κίνησης υπάρχει ένα πολύπλοκο εμπόδιο με 99 κορυφές. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 600 επαναλήψεις, με μέγεθος πληθυσμού 60. Το χρωμόσωμα δομείται από 27 γονίδια, δηλαδή δίνει τρία σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομποτικού μηχανισμού. Οι συντελεστές στάθμισης πέρνουν την τιμή 1. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.10. Όπως είναι φανερό, η λύση που προτείνεται επιτυγχάνει πολύ καλό χωρικό διαχωρισμό των οχημάτων γύρω από τον στόχο.



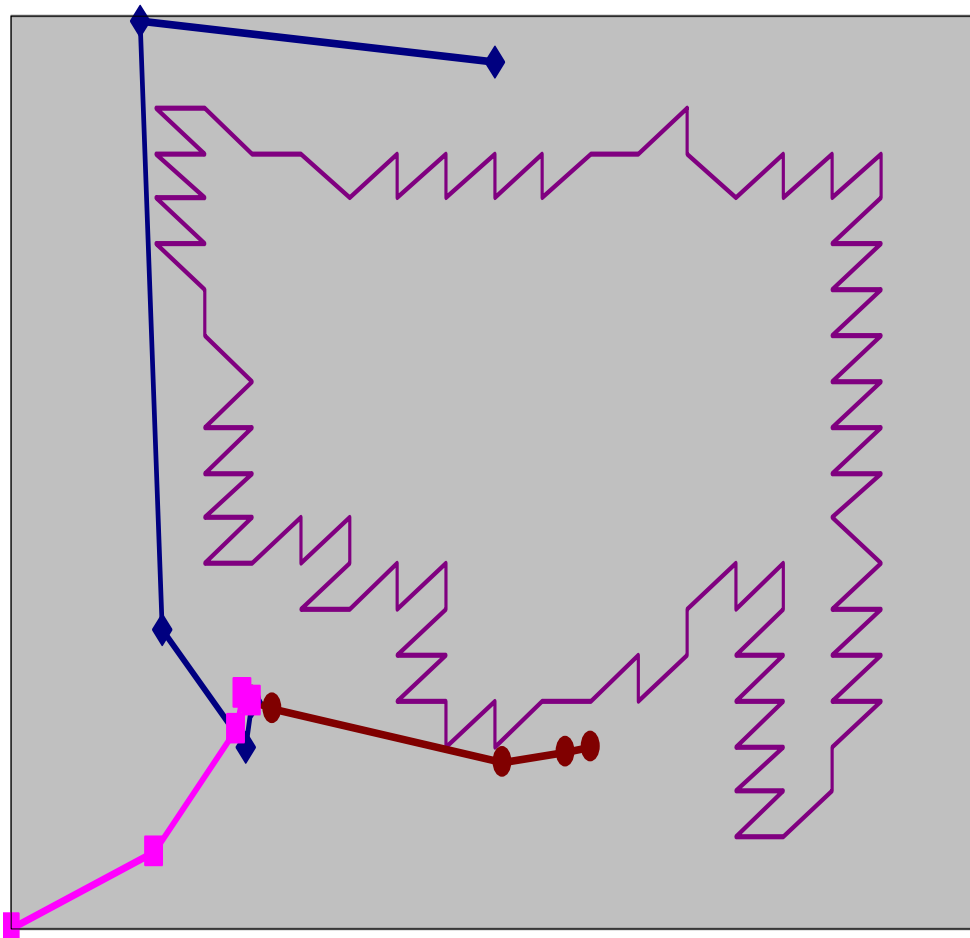
Σχήμα 3.10: σενάριο 1, μοντέλου B.

Σενάριο 2B

Το συγκεκριμένο πείραμα αποτελεί προσπάθεια βελτίωσης του προηγούμενου σεναρίου. Αυξάνουμε τον αριθμό των επαναλήψεων από 600 σε 1000 με μέγεθος πληθυσμού 60. Μεταβάλλουμε τους συντελεστές στάθμισης δίνοντας στην συνάρτηση προσαρμογής την ακόλουθη μορφή:

$$f = 2 \times length + 1 \times penalty1 + 1 \times penalty2 + 1 \times penalty3 \quad (3.9)$$

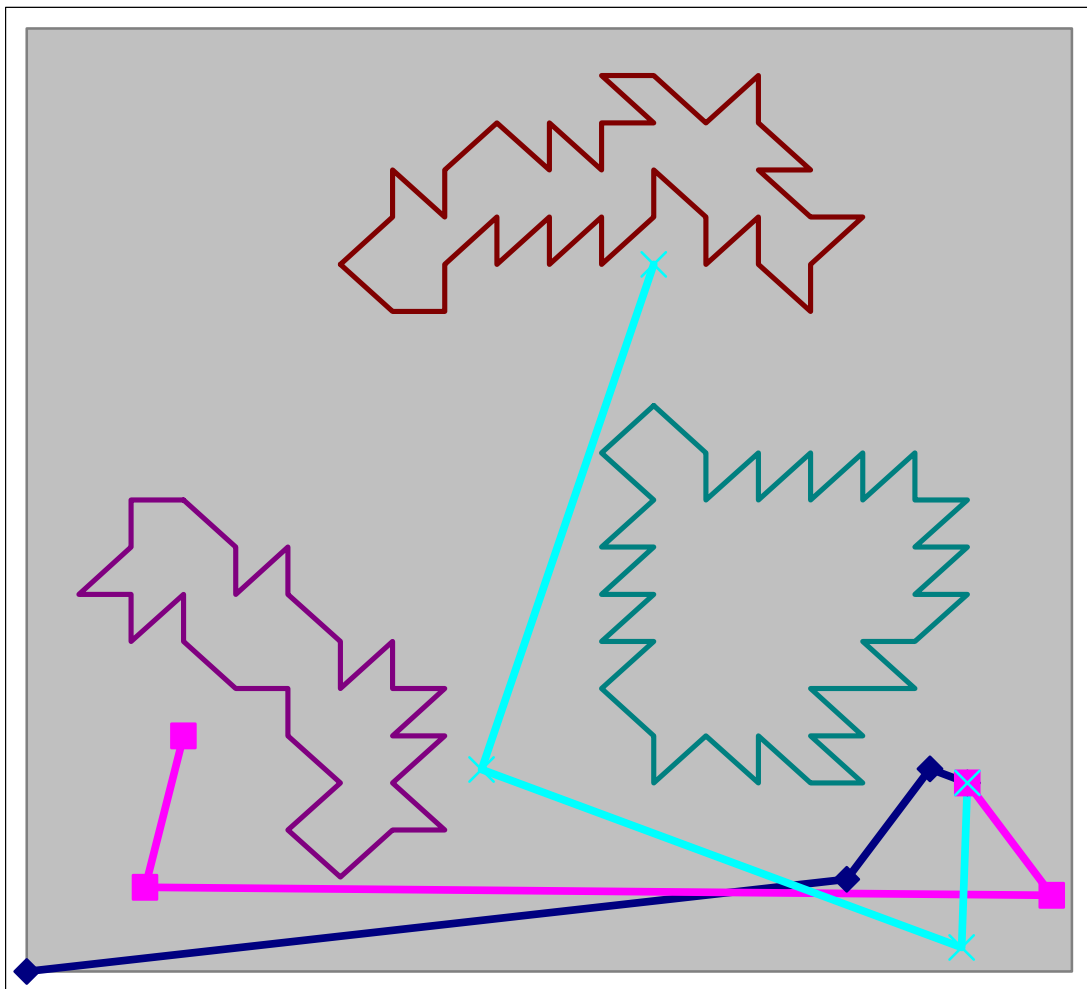
Παρατηρούμε, στο σχήμα 3.11, ότι βελτιώνεται αρκετά το μήκος των ρομποτικών διαδρομών καθώς, και ο χωρικός διαχωρισμός στην περιοχή του στόχου.



Σχήμα 3.11: σενάριο 2, μοντέλο B.

Σενάριο 3B

Διαθέτουμε τρία ρομποτικά οχήματα με σημεία εκκίνησης $(-2,-2)$, $(-1.4,-1)$ και $(0.4,1)$. Η θέση του στόχου είναι $(1.6,-1.2)$. Στο χώρο κίνησης έχουν μοντελοποιηθεί τρία εμπόδια με αριθμό κορυφών 28, 37 και 38. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 200 επαναλήψεις, με μέγεθος πληθυσμού 50. Το χρωμόσωμα δομείται από 18 γονίδια, δηλαδή δίνει δύο σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομποτικού οχήματος. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.12.



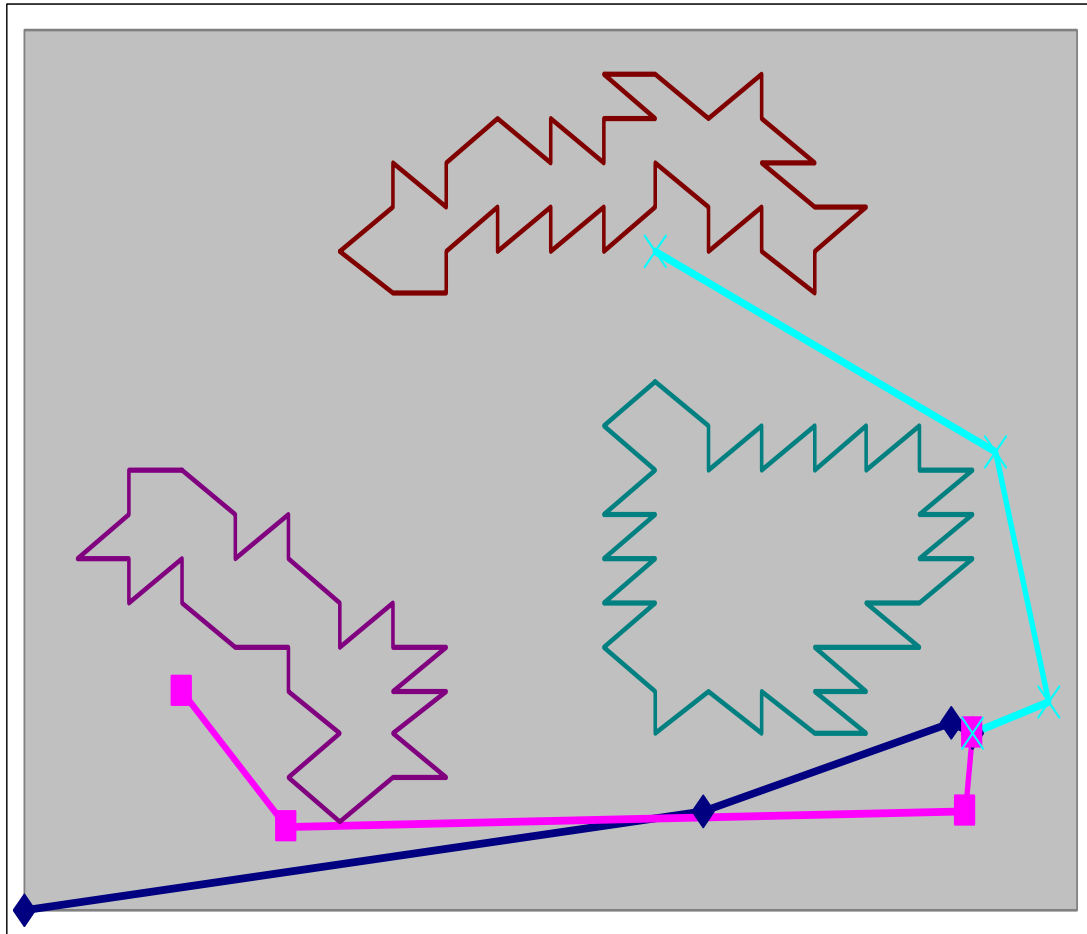
Σχήμα 3.12: σενάριο3, μοντέλου B.

Σενάριο 4B

Το συγκεκριμένο πείραμα αποτελεί προσπάθεια βελτίωσης του σεναρίου 3, μοντέλο Β. Ο ΔΕΑ προγραμματίστηκε να εκτελέσει 500 επαναλήψεις, με μέγεθος πληθυσμού 50. Η συνάρτηση προσαρμογής έχει, την ακόλουθη μορφή:

$$f = 2 \times length + 1 \times penalty1 + 1 \times penalty2 + 1 \times penalty3 \quad (3.10)$$

Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.13.

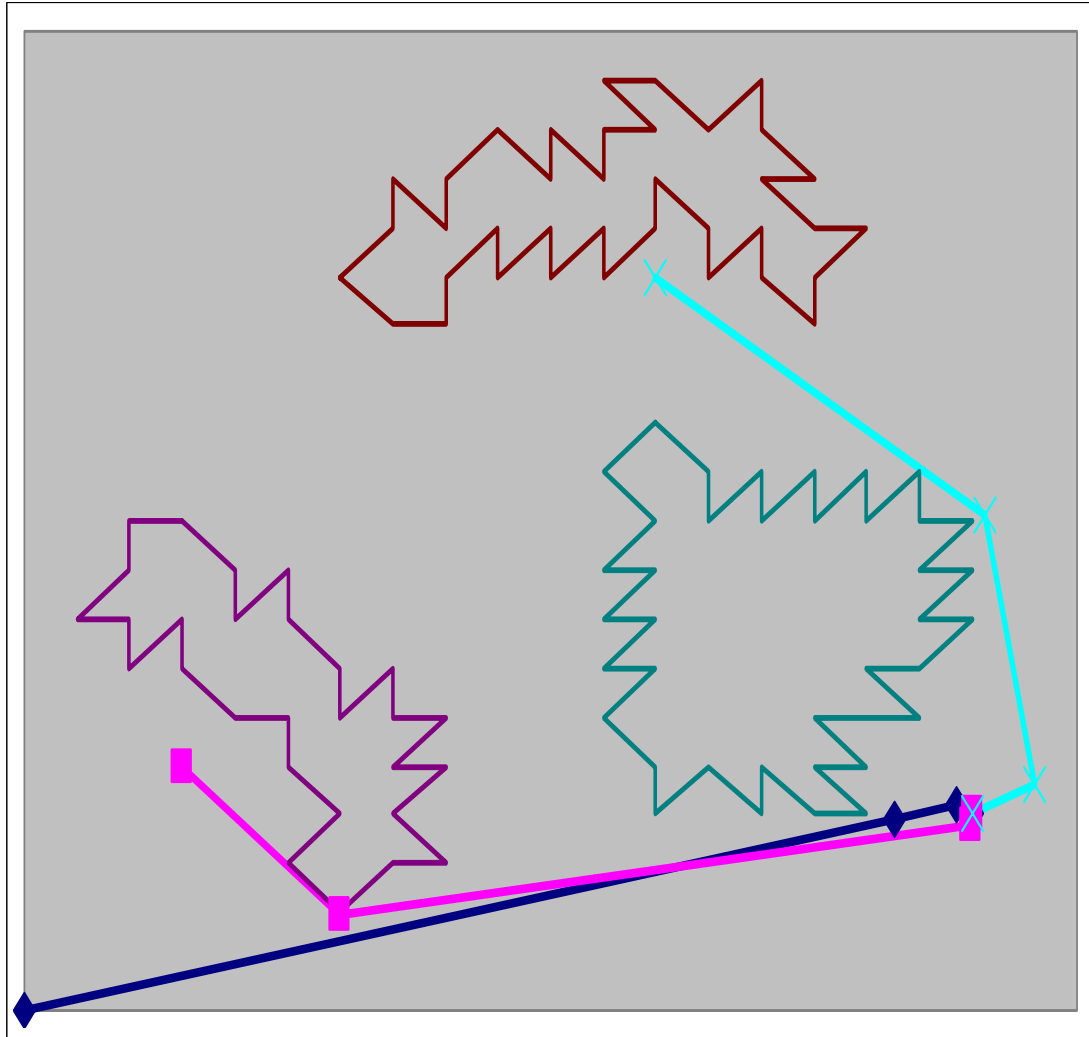


Σχήμα 3.13: σενάριο 4, μοντέλο Β.

Παρατηρούμε, ότι παρότι το μήκος των ρομποτικών διαδρομών των δύο συγκρινόμενων σεναρίων δεν διαφέρει σημαντικά, στο παρόν σενάριο υπάρχει σημαντική βελτίωση στο χωρικό διαχωρισμό στον στόχο.

Σενάριο 5B

Το παρόν σενάριο αφορά μια προσπάθεια βελτιστοποίησης του προηγούμενου πειράματος. Για το λόγο αυτό αυξήσαμε τις επαναλήψεις του αλγορίθμου από 500 στις 1000, ενώ διατηρήσαμε σταθερό το μέγεθος του πληθυσμού, 50.



Σχήμα 3.14: σενάριο 5, μοντέλο B.

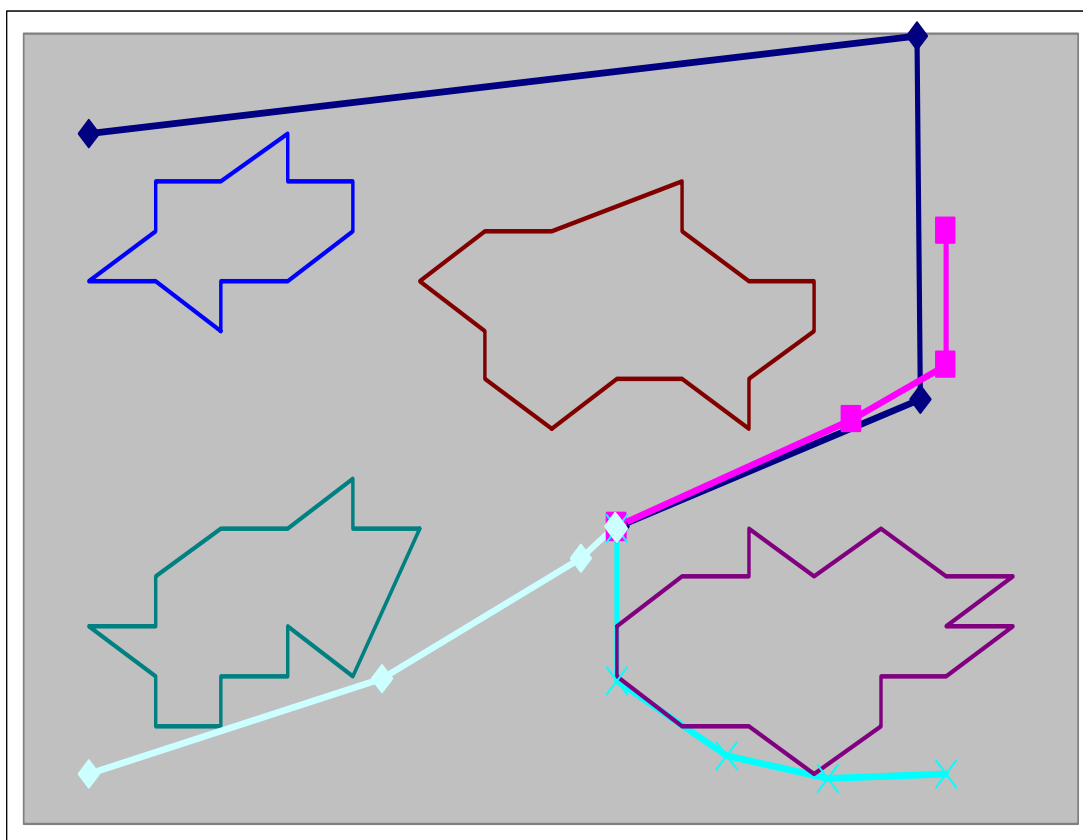
Παρατηρούμε, ότι ελαττώθηκε σημαντικά το μήκος των ρομποτικών διαδρομών, ενώ ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζουν τα ρομπότ το στόχο παρέμεινε ικανοποιητικός.

Σενάριο 6B

Διαθέτουμε τέσσερις ρομποτικούς μηχανισμούς με σημεία εκκίνησης $(-1.75, 1.5)$, $(1.5, 1.0)$, $(1.5, -1.75)$ και $(-1.75, -1.75)$. Η θέση του στόχου είναι $(0.25, -0.5)$. Στον επιτρεπτό χώρο κίνησης έχουν μοντελοποιηθεί τέσσερα εμπόδια με πλήθος κορυφών 12, 15, 15 και 17. Ο ΔΕΑ έχει εκτελέσει 2000 επαναλήψεις με μέγεθος πληθυσμού 80. Το χρωμόσωμα δομείται από 36 γονίδια, κάθε δηλαδή ρομπότ θα περάσει από τρία ενδιάμεσα σημεία ελέγχου προκειμένου να προσεγγίσει το στόχο του. Η συνάρτηση προσαρμογής έχει την ακόλουθη μορφή:

$$f = 2 \times \text{length} + 1 \times \text{penalty1} + 5 \times \text{penalty2} + 1/5 \times \text{penalty3} \quad (3.11)$$

Τα αποτελέσματα δίδονται στο σχήμα 3.15.



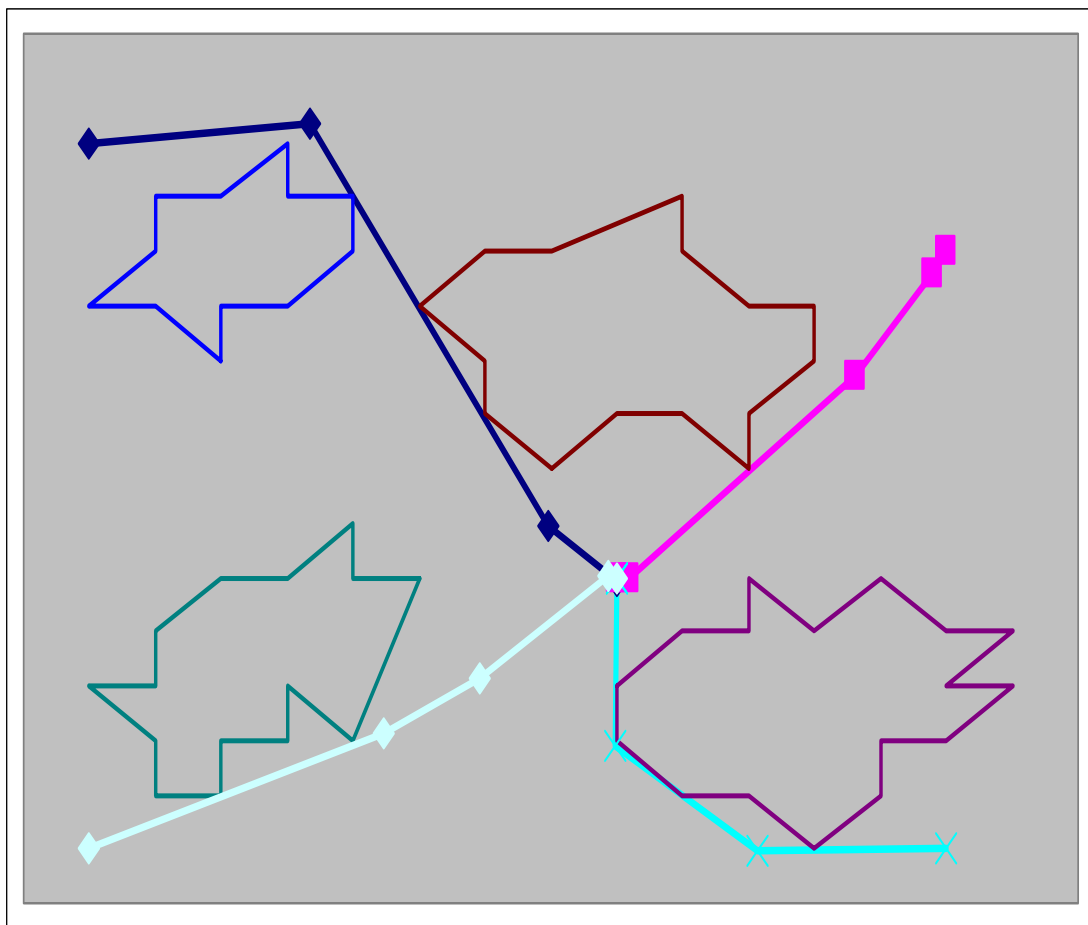
Σχήμα 3.15: σενάριο 6, μοντέλο B.

Σενάριο 7B

Το παρόν πείραμα αποτελεί προσπάθεια βελτίωσης του προηγούμενου σεναρίου (σενάριο 6, μοντέλο B). Μεταβάλλουμε τους συντελεστές στάθμισης προκειμένου να επιτύχουμε καλύτερα αποτελέσματα, ενώ διατηρούμε σταθερό τον αριθμό των επαναλήψεων και το μέγεθος του πληθυσμού. Η συνάρτηση προσαρμογής παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$f = 10 \times length + 1 \times penalty1 + 5 \times penalty2 + 1 \times penalty3 \quad (3.12)$$

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16: σενάριο 7, μοντέλο B.

Παρατηρούμε, σημαντική βελτίωση του μήκους των ρομποτικών διαδρομών, καθώς και του χωρικού διαχωρισμού κοντά στο στόχο.

3.4.3 Τελική μορφή του μοντέλου

Μοντέλο Γ

Στο μοντέλο αυτό η συνάρτηση προσαρμογής παίρνει την τελική της μορφή:

$$f = w_1 \times length + w_2 \times penalty1 + w_3 \times penalty3 + w_4 \times penalty4 + w_5 \times penalty5 \quad (3.13)$$

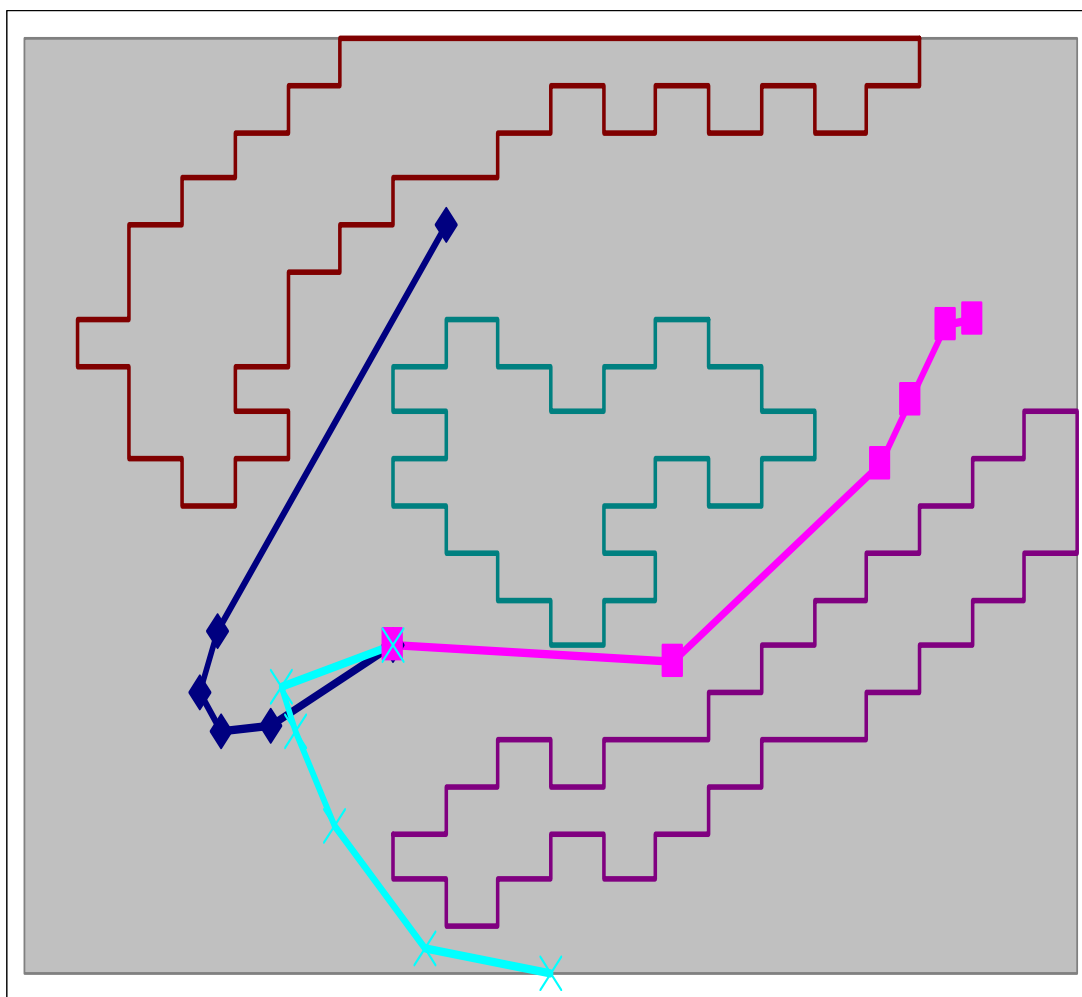
έχουν δηλαδή, μοντελοποιηθεί όλοι οι περιορισμοί που αφορούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα πλοήγησης (οι περιορισμοί αυτοί έχουν παρουσιασθεί αναλυτικά στην αρχή του κεφαλαίου 3). Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση υπολείπεται ο περιορισμός που αφορά την τιμωρία με *penalty2*. Αυτό προέκυψε διότι, μελετώντας τα αποτελέσματα που έδινε ο αλγόριθμος, συμπεριλαμβανομένου του *penalty2*, διαπιστώθηκε ότι επιβαρυνόταν αρκετά η διαδικασία σύγκλισης του αλγορίθμου και δεν προέκυπταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στο σημείο αυτό, εφαρμόζοντας το συγκεκριμένο μοντέλο (μοντέλο Γ) θα παρουσιάσουμε διάφορα πειράματα. Θα μεταβάλουμε σταδιακά τους συντελεστές στάθμισης, καθώς και το πλήθος των επαναλήψεων που εκτελεί ο αλγόριθμος προκειμένου, να μελετήσουμε το μηχανισμό σύγκλισής του και να καταλήξουμε στα απαραίτητα συμπεράσματα για την αξιολόγηση του μοντέλου Γ.

Σενάριο 1Γ

Διαθέτουμε τρία ρομποτικά οχήματα με σημεία εκκίνησης $(-0.4, 1.2)$, $(1.6, 0.8)$ και $(0.8, -2.0)$. Η θέση του στόχου είναι το σημείο $(-1.0, -0.8)$. Ο επιτρεπτός χώρος κίνησης των ρομπότ διαθέτει τρία εμπόδια με πλήθος κορυφών 40, 46 και 48. Το χρωμόσωμα δομείται από 36 γονίδια και δίνει τέσσερα σημεία ελέγχου για την κίνηση κάθε ρομποτικού μηχανισμού. Ο ΔΕΑ εκτελεί 2000 επαναλήψεις με μέγεθος πληθυσμού 80 ατόμων.

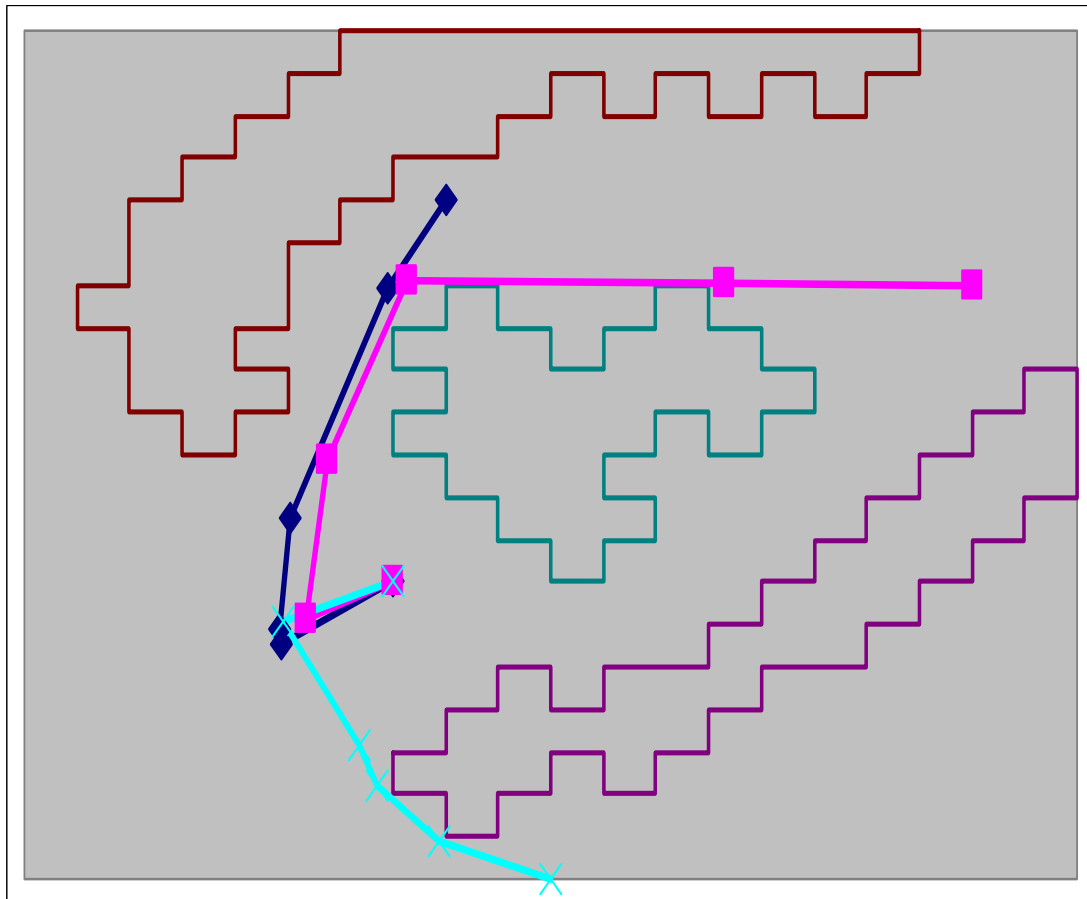
Μελετώντας τα αποτελέσματα του σχήματος 3.17 παρατηρούμε ότι το μήκος δεν είναι το ελάχιστο δυνατό ($\text{length} = 5,68$), ο χωρικός διαχωρισμός δεν είναι ο μέγιστος δυνατός (οι γωνίες που σχηματίζουν μεταξύ τους οι τροχιές είναι deltath : 122, 119 και 117) ενώ ο χρονικός διαχωρισμός δεν είναι ο ελάχιστος δυνατός (dt_curr : 4.19, 2.09, 0.0). Συνεπώς, επιβάλλεται η βελτίωση των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.17: σενάριο 1, μοντέλο Γ.

Σενάριο 2Γ

Προκειμένου να βελτιώσουμε το μήκος των ρομποτικών διαδρομών, αυξάνουμε το πρώτο βάρος από 10 σε 20, ενώ διατηρούμε σταθερούς τους υπόλοιπους συντελεστές στάθμισης.

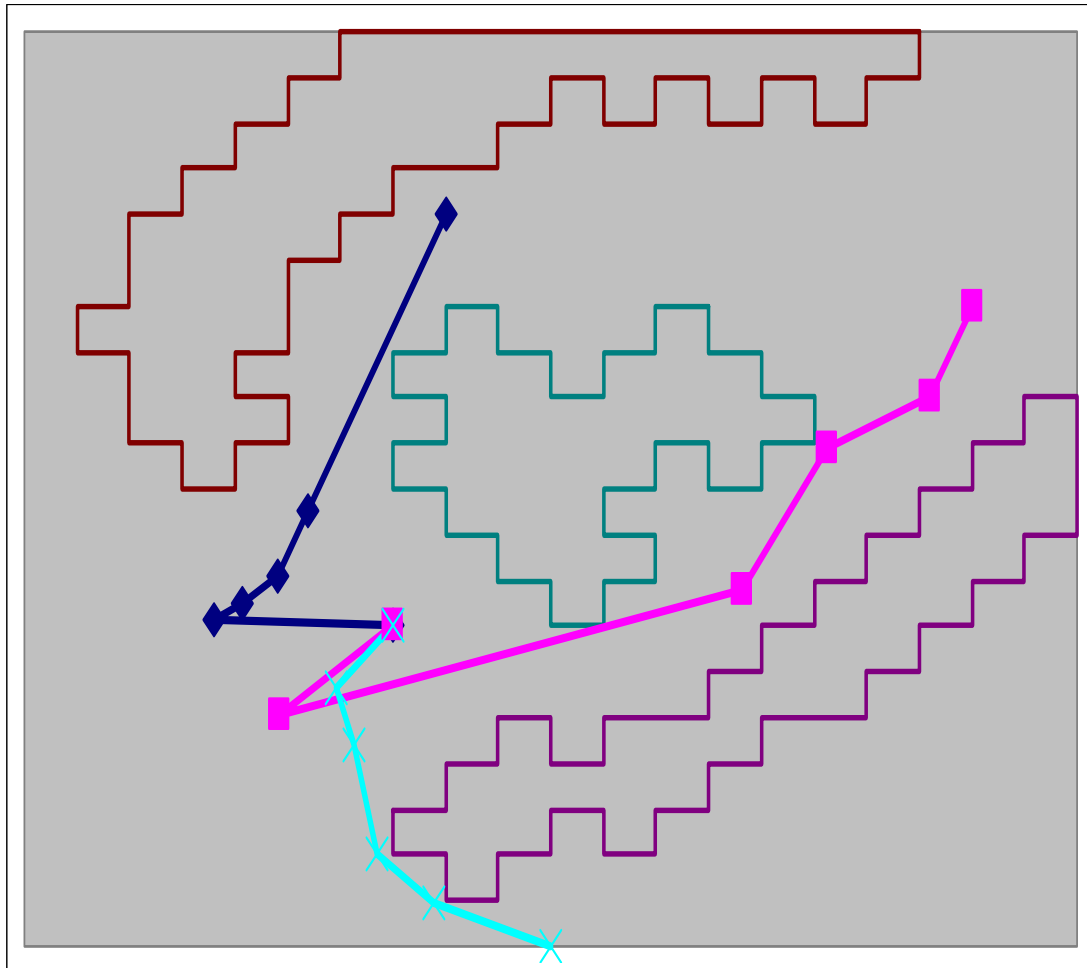


Σχήμα 3.18: σενάριο 2, μοντέλο Γ.

Παρατηρούμε, μια μικρή βελτίωση του μήκους ($length = 3.59$) και του χρονικού διαχωρισμού ($dt_curr: 2.09, 0.59, 0.$), ενώ ο χωρικός διαχωρισμός επιβαρύνθηκε αρκετά ($deltath: 116, 121, 122$), πράγμα που συνιστά την αύξηση του συντελεστή στάθμισής του.

Σενάριο 3Γ

Αυξάνοντας το w_3 από 2 σε 4 και διατηρώντας τους υπόλοιπους συντελεστές σταθερούς έχουμε το αποτέλεσμα του σχήματος 3.19.



Σχήμα 3.19: σενάριο 3, μοντέλο Γ.

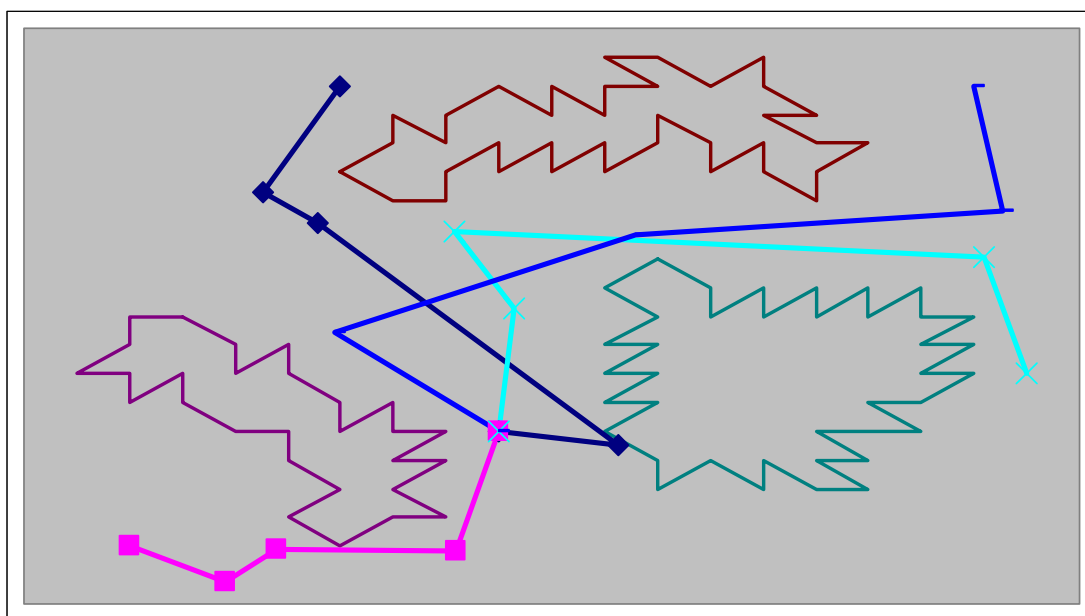
Παρατηρούμε, μια μικρή βελτίωση του μήκους (length= 3.57) και των γωνιών που σχηματίζουν μεταξύ τους οι τροχιές (deltath: 125, 115,122). Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο σενάριο είναι αρκετά δύσκολο, δεδομένου ότι το σημείο του στόχου βρίσκεται πολύ κοντά στα εμπόδια και δυσκολεύει σημαντικά το εγχείρημα των ρομποτικών μηχανισμών να προσεγγίσουν το στόχο τους, έχοντας το μέγιστο δυνατό χωρικό διαχωρισμό.

Σενάριο 4Γ

Διαθέτουμε τέσσερις ρομποτικούς μηχανισμούς με σημεία εκκίνησης (-0.8, 1.6), (-1.6, -1.6), (1.8, -1.6) και (1.6, 1.6). Η θέση του στόχου είναι (-0.2, -0.8). Στον επιτρεπτό χώρο κίνησης έχουν μοντελοποιηθεί τρία εμπόδια με πλήθος κορυφών 28, 37 και 38. Ο ΔΕΑ έχει εκτελέσει 2000 επαναλήψεις με μέγεθος πληθυσμού 80. Το χρωμόσωμα δομείται από 36 γονίδια, κάθε δηλαδή ρομπότ θα περάσει από τρία ενδιάμεσα σημεία ελέγχου προκειμένου να προσεγγίσει το στόχο του. Η συνάρτηση προσαρμογής έχει την ακόλουθη μορφή:

$$f = 10 \times \text{length} + 1 \times \text{penalty1} + 2 \times \text{penalty3} + 1 \times \text{penalty4} + 1 \times \text{penalty5} \quad (3.14)$$

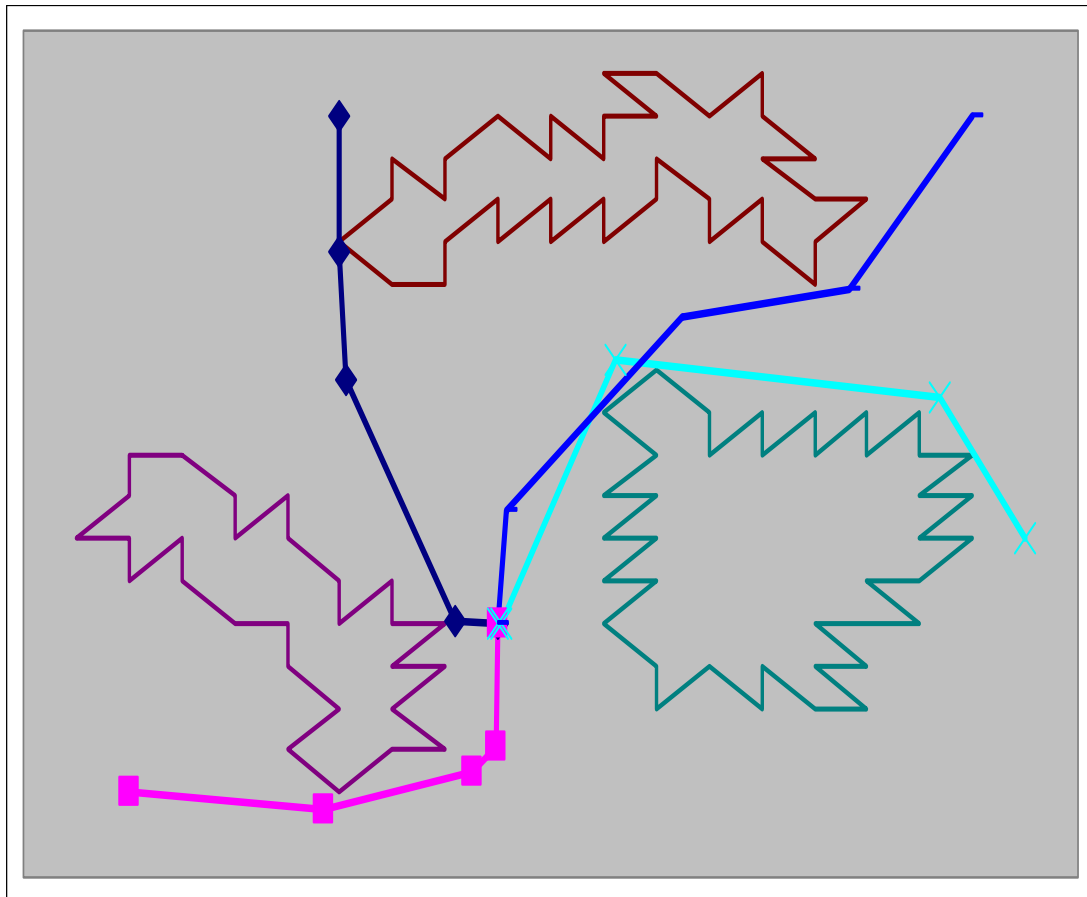
Τα αποτελέσματα δίδονται στο σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: σενάριο 4, μοντέλο Γ.

Παρατηρούμε ότι, το μήκος δεν το βέλτιστο δυνατό (length= 8.85), καθώς και ο χρονικός διαχωρισμός δεν είναι ο επιθυμητός (dt_curr: 4.79, 6.59, 0, 2.99). Σχετικά τώρα με τις γωνίες που σχηματίζουν μεταξύ τους οι τροχιές, είναι σχετικά καλές (55, 52, 139, 113).

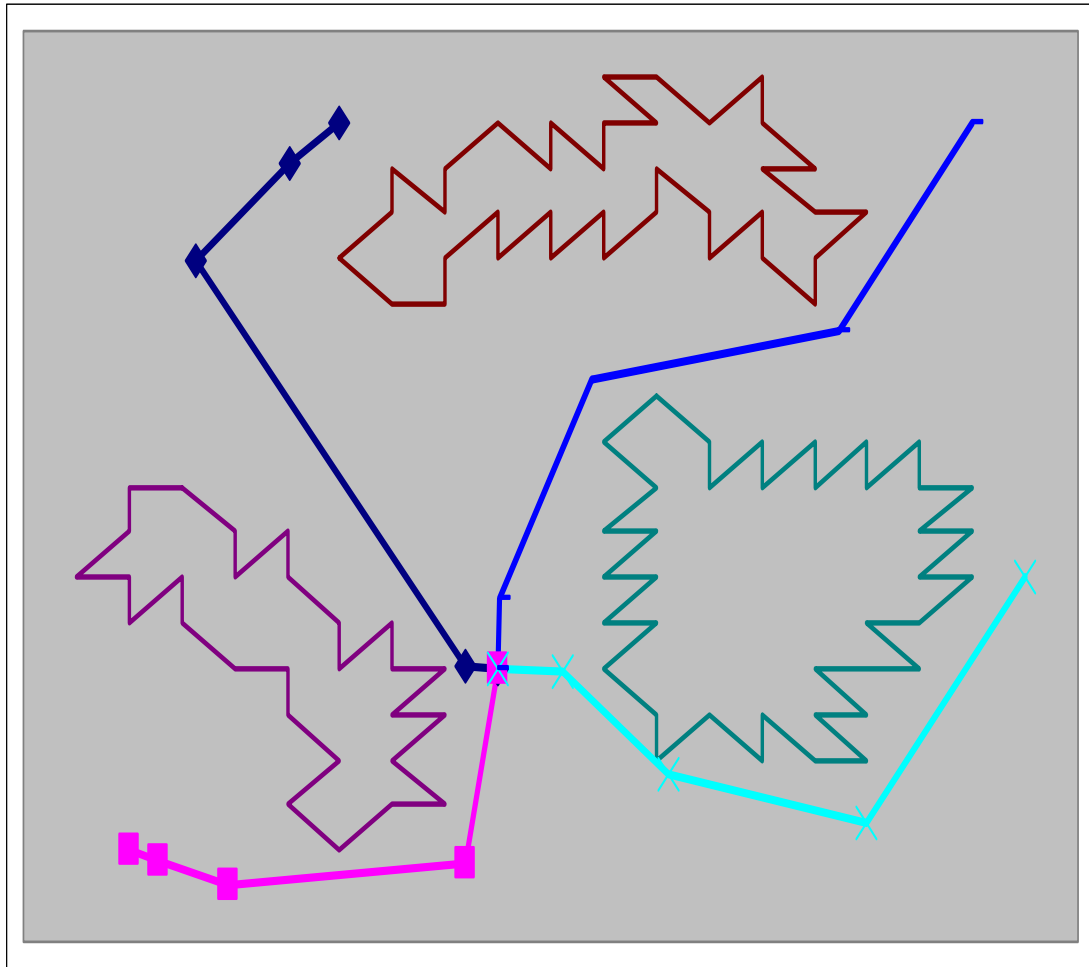
Στην προσπάθειά μας να βελτιώσουμε το μήκος αυξήσαμε το w_1 από 10 σε 20, ενώ διατηρήσαμε σταθερούς τους υπόλοιπους συντελεστές στάθμισης. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης δίδεται στο σχήμα 3.21.



Παρατηρούμε αρκετή βελτίωση του μήκους των διαδρομών, ενώ παράλληλα ικανοποιείται και ο περιορισμός που αφορά το μέγιστο χωρικό διαχωρισμό. Ωστόσο, για να είναι περισσότερο αληθοφανές το σενάριο θα έπρεπε η τρικουάζ τροχιά να βρίσκεται κάτω από το εμπόδιο, για το λόγο αυτό θα επιχειρήσουμε να αυξήσουμε κι άλλο το πρώτο βάρος, ώστε να μειωθεί το μήκος των τροχιών.

Σενάριο 6Γ

Διπλασιάζοντας το πρώτο βάρος προκύπτουν οι τροχιές του σχήματος 3.22.



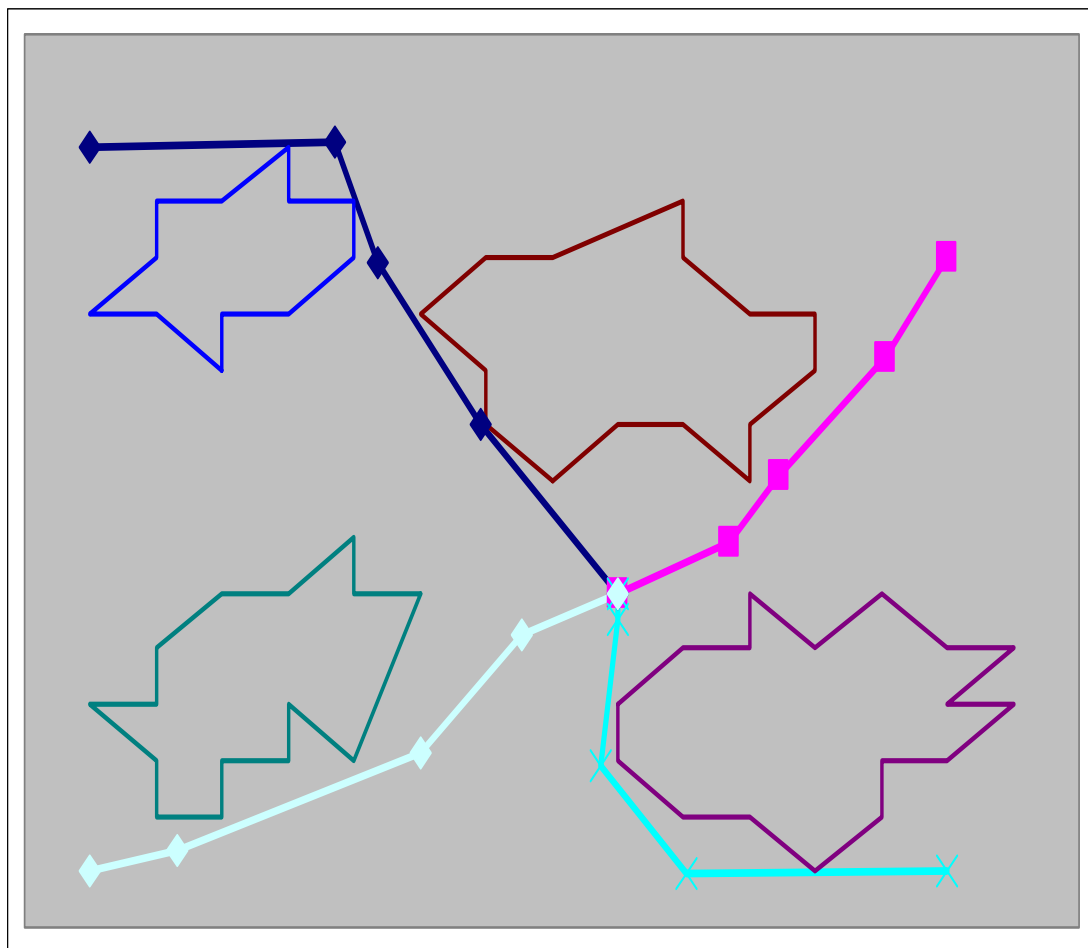
Σχήμα 3.22: σενάριο 6, μοντέλο Γ.

Σενάριο 7Γ

Διαθέτουμε τέσσερις ρομποτικούς μηχανισμούς με σημεία εκκίνησης $(-1.75, 1.5)$, $(1.5, 1.0)$, $(1.5, -1.75)$ και $(-1.75, -1.75)$. Η θέση του στόχου είναι $(0.25, -0.5)$. Στον επιτρεπτό χώρο κίνησης έχουν μοντελοποιηθεί τρία εμπόδια με πλήθος κορυφών 12, 15 και 17. Ο ΔΕΑ έχει εκτελέσει 2000 επαναλήψεις με μέγεθος πληθυσμού 80. Το χρωμόσωμα δομείται από 36 γονίδια, κάθε δηλαδή ρομπότ θα περάσει από τρία ενδιάμεσα σημεία ελέγχου προκειμένου να προσεγγίσει το στόχο του. Η συνάρτηση προσαρμογής έχει την ακόλουθη μορφή:

$$f = 20 \times length + 1 \times penalty1 + 2 \times penalty3 + 1 \times penalty4 + 1 \times penalty5 \quad (3.15)$$

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: σενάριο 7, μοντέλο Γ.

Όπως παρατηρούμε με τις συγκεκριμένες τιμές βαρών στις δύο τελευταίες προσομοιώσεις επιτυγχάνονται καλές λύσεις, όσον αφορά στο μήκος των τροχιών και τον τελικό χωρικό διαχωρισμό των οχημάτων. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη τιμή του πρώτου βάρους σε σχέση με τα υπόλοιπα, ώστε να επιτευχθούν τροχιές μικρού μήκους, ενώ διατηρείται ο τελικός χωρικός διαχωρισμός.

4. Αξιολόγηση του μοντέλου, συμπεράσματα, μελλοντική εργασία.

4.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη αντιμετωπίσαμε το πρόβλημα της off-line πλοήγησης πολλαπλών ρομποτικών μηχανισμών σε 2D περιβάλλον. Η μέθοδος επίλυσης στηρίχθηκε στην εφαρμογή ενός Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου (ΔΕΑ - DE). Επιλέξαμε τη χρήση ΔΕΑ, διότι αφενός επιδεικνύει καλύτερο μηχανισμό σύγκλισης εν συγκρίσει με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης και αφετέρου δύναται να αντιμετωπίζει προβλήματα με πολλές μεταβλητές, υπό την παρουσία πολλαπλών περιορισμών και τέλος, διότι παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης συνεχών, ακέραιων και διακριτών μεταβλητών.

Εφαρμόσαμε ποικίλους περιορισμούς για την περιγραφή του προβλήματος και εκτελέσαμε αρκετά πειράματα για να μελετήσουμε τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι, τα σενάρια που χρησιμοποιήσαμε είναι ιδιαίτερα απαιτητικά. Ο χώρος κίνησης των ρομποτικών μηχανισμών είναι αρκετά περιορισμένος, τα εμπόδια που μοντελοποιήσαμε είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα, με συνέπεια, να περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή ο χώρος των βέλτιστων λύσεων. Στόχος ήταν να εξετάσουμε περιπτώσεις που να προσεγγίζουν πολύπλοκα πραγματικά σενάρια, ώστε να προκύψει η φυσική προέκταση της παρούσας μελέτης.

Μελετώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική δοκιμή του τελικού μοντέλου παρατηρούμε ότι:

- Κάθε πειραματικό σενάριο έχει διαφορετικό βαθμό δυσκολίας. Έτσι, ο αριθμός των επαναλήψεων, το μέγεθος του πληθυσμού και οι συντελεστές στάθμισης των όρων της συνάρτησης προσαρμογής, δε δύναται να είναι σταθεροί σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια.
- Το βάρος που σταθμίζει τον όρο του μήκους των ρομποτικών διαδρομών, δίνει βέλτιστα αποτελέσματα όταν βρίσκεται εντός των ακόλουθων ορίων:

$$20 \leq w_1 \leq 25 \quad (4.1)$$

- Όταν ισχυροποιήσουμε πολύ τον περιορισμό που αφορά στο μέγιστο δυνατό χωρικό διαχωρισμό, δηλαδή όταν αυξήσουμε πολύ το συντελεστή στάθμισης w_3 , τότε εξασθενεί αρκετά ο περιορισμός που αφορά στην αποφυγή πρόσκρουσης σε

εμπόδια, με αποτέλεσμα η λύση που προκύπτει να χτυπάει πάνω σε κάποιο εμπόδιο.

- Επίσης, για την καλύτερη δυνατή σύγκλιση του αλγορίθμου, απαιτούνται 1000 επαναλήψεις και πάνω, ενώ για πολύ δύσκολα σενάρια ξεπερνούν τις 2000.
- Ο μεγάλος αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων αποθαρρύνει για τη χρησιμοποίηση του αλγορίθμου σε on-line προβλήματα πλοήγησης.

4.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

- Το προτεινόμενο μοντέλο αντιμετωπίζει το πρόβλημα πλοήγησης off-line, έτσι εύλογος στόχος είναι η on-line εφαρμογή του, ίσως όμως με άλλη μέθοδο βελτιστοποίησης που να απαιτεί μικρότερο αριθμό επαναλήψεων.
- Επίσης, στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με την αποφυγή στατικών εμποδίων, έτσι το προτεινόμενο μοντέλο θα μπορούσε να επεκταθεί και στην αντιμετώπιση δυναμικών εμποδίων, ώστε να γίνει περισσότερο ρεαλιστικό.
- Πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ για την off-line πλοήγηση σε στατικό περιβάλλον ο ΔΕΑ έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, η επέκταση του προτεινόμενου μοντέλου σε on-line δυναμικό περιβάλλον απαιτεί μια ταχύτερη μέθοδο βελτιστοποίησης. Έτσι, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια τεχνική εκπαίδευσης του ΔΕΑ όπως για παράδειγμα, είναι η χρήση των Νευρωνικών Δικτύων.

Βιβλιογραφία

[Ibikunle Ashiru et al., 1996] Ibikunle Ashiru, Chris Czarnecki and Tom Routen, “Characteristics of a Genetic Based Approach to Path Planning for Mobile Robots”, Journal of Network and Computer Applications 19, 1996.

[Bagley et al., 1967] Bagley, J.D., “The Behaviour of Adaptive Systems which Employ Genetic and Correlation Algorithms”, Doctoral Dissertation, University of Michigan, Dissertation Abstracts International, 28(12), 5106B, University Microfilms No. 68-7556, 1967.

[Tucker Balch et al., 1998] Tucker Balch and Ronald C. Arkin, “Behavior-Based Formation Control for Multirobot Teams”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.14, No.6, December 1998.

[Randal W. Beard et al., 2002] Randal W. Beard, Timothy W. McLain, Michael A. Goodrich and Erik P. Anderson, “Coordinated Target Assignment and Intercept for Unmanned Air Vehicles”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 18, NO. 6, December 2002.

[Box, 1957] Box, G.E.P., “Evolutionary Operation: A method for increasing Industrial productivity”, Journal of the Royal Statistical Society, C, 6(2), pp.81-101, 1957.

[Maren Bennewitz et al., 2002] Maren Bennewitz, Wolfram Burgard and Sebastian Thrun, “Finding and optimizing solvable priority schemes for decoupled path planning techniques for teams of mobile robots”, Robotics and Autonomous Systems 41 (2002) 89-99.

[Y. Uny Cao et al., 1997] Y. Uny Cao, Alex S. Fukunaga and Andrew B. Kahng, “Cooperative Mobile Robotics. Antecedents and Directions”, Autonomous Robots, 4, 1-23, (1997), Kluwer Academic Publishers, Boston. Manufactured in the Netherlands.

[Animesh Chakravarthy et al., 1998] Animesh Chakravarthy and Debasish Ghose, “Obstacle Avoidance in a Dynamic Environment: A Collision Cone Approach”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part A: Systems and Humans, vol. 28, no. 5, September 1998.

[Charles C. Chang et al., 1997] Charles C. Chang and Kai-Tai Song, “Environment Prediction for a Mobile Robot in a Dynamic Environment”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 13, no. 6, December 1997.

[Davis L., 1987], Davis L., (ed), “Genetic Algorithms and Simulated Annealing”, London: Pitman, 1987.

[Robert L. Dollarhide et al., 2003] Robert L. Dollarhide and Arvin Agah, “Simulation and control of distributed robot search teams”, Computers and Electrical Engineering 29 (2003) 625-642.

[Wilson D. Esquivel et al., 2002] Wilson D. Esquivel and Luciano E. Chiang, “Nonholonomic Path Planning Among Obstacles Subject to Curvature Restrictions”, Robotica, 2002, vol. 20, pp. 49-50. 2002 Cambridge University Press.

[Atsushi Fujimori et al., 1997] Atsushi Fujimori, Peter N. Nikiforuk and Madam M. Gupta, “Adaptive Navigation of Mobile Robots with Obstacle Avoidance”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 13, No. 4, August 1997.

[S. S. Ge et al., 2000] S. S. Ge and Y. J. Cui, “New Potential Functions for Mobile Robot Path Planning”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 16, no. 5, October 2000.

[Goldberg D. E., 1989] Goldberg D. E., “Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning”, Addison-Wesley, 1989.

[Ma de Las Mercedes Gomez-Albarran et al., 1997] Ma de Las Mercedes Gomez-Albarran, Ana Ma Fernandez-Pampillon-Cesteros and Juan Manuel Sanchez-Perez, “A Routing Strategy Based on Genetic Algorithms”, *Microelectronics Journal* 28, 1997.

[J. Gomez-Ortega et al.] J. Gomez-Ortega, D. R. Ramirez, D. Limon and E. F. Camacho, “Genetic Algorithms Based Predictive Control for Mobile Robot Navigation in Changing Environments”, *Departamento de Ingenieria de Sistemas y Automatica, Universidad de Sevilla*.

[Frank Hoffmann et al., 1997] Frank Hoffmann and Gerd Pfister, “Evolutionary Design of a Fuzzy Knowledge Base for a Mobile Robot”, *International Journal of Approximate Reasoning*, 17, 1997.

[Holland J. H., 1992] Holland J. H., “Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence”, MIT Press, 1992.

[Huosheng Hu et al., 1997] Huosheng Hu and Michael Brady, “Dynamic Global Path Planning with Uncertainty for Mobile Robots in Manufacturing”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 5, October 1997.

[Teijiro Isokawa et al., 2002] Teijiro Isokawa, Nobuyuki Matsui, Haruhiko Nishimura and Ferdinand Peper, “Coping With No stationary Environments: A Genetic Algorithm Using Neutral Variation”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part A: Systems and Humans*, vol. 32, no. 4, July 2002.

[Κοράκη Ευδοκία, 2002] Κοράκη Ευδοκία, «Εφαρμογή Γενετικού Αλγορίθμου για την πλοήγηση έντροχου ρομπότ σε άγνωστο στατικό περιβάλλον», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2002.

[Γιώργος Κολόμβος, 2001] Γιώργος Κολόμβος, «Επίλυση του προβλήματος κατασκευής ωρολογίου προγράμματος εργαζομένων για την περίπτωση του Πολυτεχνείου Κρήτης με χρήση Εξελικτικών Αλγορίθμων», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2001.

[Κωστάρας Ανάργυρος, 2001] Κωστάρας Ανάργυρος, «Σχεδίαση 3D τροχιάς για την πλοήγηση μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος με χρήση γενετικών αλγορίθμων», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2001.

[Jean-Claude Latombe] Jean-Claude Latombe, “Robot Motion Planning”, Kluwer Academic Publishers.

[Roy B., 1975] Roy B., (ed), “Combinatorial Programming: Methods and Application”, pp.3-27, 1975.

[Steven M. LaValle et al., 1998] Steven M. LaValle and Seth A. Hutchinson, “Optimal Motion Planning for Multiple Robots Having Independent Goals”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.14, No. 6, December 1998.

[Chia-Han Lin et al., 1997] Chia-Han Lin and Ling-Ling Wang, “Intelligent Collision Avoidance by Fuzzy Logic Control”, Robotics and Autonomous Systems 20, 1997.

[Zhiyun Lin et al., 2004] Zhiyun Lin, Mireille Broucke and Bruce Francis, “Local Control Strategies for Groups of Mobile Autonomous Agents”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 49, No. 4, April 2004.

[Alejandro Lopez-Ortiz et al., 2004] Alejandro Lopez-Ortiz and Sven Schuierer, “On-line parallel heuristics, processor scheduling and robot searching under the competitive framework”, Theoretical Computer Science 310 (2004) 527-537.

[Marse et al., 1983] Marse, K., and Roberts, S.D., “Implementing a portable Fortran uniform (0,1) generator, Simulation” ,41:135, 1983.

[Jean Bosco Mbede et al., 2000] Jean Bosco Mbede, Xinhan Huang and Min Wang, “Fuzzy Motion Planning Among Dynamic Obstacles Using Artificial Potential Fields for Robot Manipulators”, Robotics and Autonomous Systems 32, 2000.

[Abha Moitra et al., 2003] Abha Moitra, Robert M. Matheyses, Virginia A. Didomizio, Louis J. Hoebel, Robert J. Szczerba and Boris Yamrom, “Multivehicle Reconnaissance Route and Sensor Planning”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39, No. 3, July 2003.

[Zbigniew Michalewicz, 1994] Zbigniew Michalewicz, “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”, Second, Extended Edition, 1994.

[Melanie Mitchell, 1996] Melanie Mitchell, “An Introduction To Genetic Algorithms”, Mit Press: Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 1996.

[Natsuki Miyata et al., 2002] Natsuki Miyata, Jun Ota, Tamio Arai and Hajime Asama, “Cooperative Transport by Multiple Mobile Robots in Unknown Static Environments Associated With Real-Time Task Assignment”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.18, No. 5, October 2002.

[Andreas C. Nearchou, 1999] Andreas C. Nearchou, “Adaptive Navigation of Autonomous Vehicles Using Evolutionary Algorithms”, Artificial Intelligence in Engineering 13, 1999.

[Ioannis K. Nikolos et al., 2003] Ioannis K. Nikolos, Kimon P. Valavanis, and Nikos Tsourveloudis, “Evolutionary Algorithm Based Off-line/ On-line Path Planner for UAV Navigation, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part B: Cybernetics, Vol. 33, No. 6, December 2003.

[Ioannis K. Nikolos, 2004] Ioannis K. Nikolos, “Inverse Design of Aerodynamic Shapes Using Differential Evolution Coupled with Artificial Neural Network”, Design Optimization International Conference, March 31- April 2 2004, Athens, Greece.

[Noboru Noguchi et al., 1997] Noboru Noguchi and Hideo Terao, “Path Planning of an Agricultural Mobile Robot by Neural Network and Genetic Algorithm”, Computers and Electronics in Agriculture 18, 1997.

[Yan Ping et al.,] Yan Ping, Ding Mingyue, Zhou Chengping and Zheng Changwen, “Coordinated Route Planning via Nash Equilibrium and evolutionary algorithm”.

[Dilip Kumar Pratihar et al., 1999] Dilip Kumar Pratihar, Kalyanmoy Dep and Amitabha Ghosh, “A Genetic-Fuzzy Approach for Mobile Robot Navigation Among Moving Obstacles”, International Journal of Approximate Reasoning 20, 1999.

[Rechenberg I., 1973] Rechenberg, I., “Evolution strategies”, Stuttgart: Frommann-Holzboog, 1973.

[Rosenberg, 1967] Rosenberg, R.S., “Simulation of Genetic Populations with Biochemical Properties”, Doctoral Dissertation, University of Michigan, Dissertation Abstracts International, 28(7), 2732B, University Microfilms No. 67-17,836, 1967.

[Thierry Simeon et al., 2002] Thierry Simeon, Stephane Leroy and Jean-Paul Laumond, “Path Coordination for Multiple Mobile Robots: A Resolution-Complete Algorithm”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.18, No. 1, February 2002.

[Storn R., 1995] Storn R., Differential Evolution Design of an IIR-Filter with Requirements for Magnitude and Group Delay, Technical Report TR-95-026, ICSI, June 1995.

[Storn R., et al., 1995] Storn, R., Price K., DE, “a Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continues Space”, Technical Report TR-95-012, ICSI, March 1995.

[S. Sundar et al., 1997] S. Sundar and Z. Shiller, “Optimal Obstacle Avoidance Based on the Hamilton-Jacobi-Bellman Equation”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 13, no. 2, April 1997.

[Kazuo Sugihara et al.,] Kazuo Sugihara and John Smith, “A Genetic Algorithm for 3-D Path Planning of a Mobile Robot”, Department of Information and Computer Sciences, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, U.S.A.

[Petr Svestka et al., 1998] Petr Svestka and Mark H. Overmars, “Coordinated path planning for multiple robots”, Robotics and Autonomous Systems 23 (1998) 125-152.

[Hebert G. Tanner et al., 2003] Hebert G. Tanner, Savvas G. Loizou and Kostas Kyriakopoulos, “Nonholonomic Navigation and Control of Cooperating Mobile Manipulators”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.19, No. 1, February 2003.

[Kimon P. Valavanis et al., 2000] Kimon P. Valavanis, Timothy Hebert, Ramesh Kolluru and Nikos Tsourveloudis, “Mobile Robot Navigation in 2-D Dynamic Environments Using an Electrostatic Potential Field”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part A: Systems and Humans, vol. 30, no. 2, March 2000.

[Kimon P. Valavanis et al., 2001] Kimon P. Valavanis, Timothy Hebert and Nikos Tsourveloudis, “Autonomous Vehicle Navigation Utilizing Electrostatic Potential Fields and Fuzzy Logic”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 17, no. 4, August 2001.

[Jink Xiao et al.,] Jink Xiao, Zbigniew Michalewich, Lixin Zhang and Krzysztof Trojanowski, “Adaptive Evolutionary Planner/ Navigator for Mobile Robots”, Department of Computer Science, University of North Carolina, Charlotte, NC 28223, USA and Institute of Computer Science, Polish Academy of Sciences, ul. Ordona 21, 01-237 Warsaw.

[Atsushi Yamashita et al., 2003] Atsushi Yamashita, Tamio Arai, Jun Ota and Hajime Asama, “Motion Planning of Multiple Mobile Robots for Cooperative Manipulation and Transportation”, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 19, NO. 2, April 2003.

[Simon X. Yang et al., 2000] Simon X. Yang and Max Meng, “An Efficient Neural Network Method for Real-time Motion Planning with Safety Consideration”, Robotics and Autonomous Systems 32, 2000.

[Fan Hui-Yuan et al., 2003] Fan Hui-Yuan, Lampinen J., Dulikravich G.S., “Improvements to Mutation Donor Formulation of Differential Evolution, EUROGEN 2003, Barcelona, Spain, 2003.

[Eduardo Zalama et al., 2002] Eduardo Zalama, Jaime Gomez, Mariano Paul and Jose Ramon Peran, “Adaptive Behavior Navigation of a Mobile Robot”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part A: Systems and Humans, vol. 32, no. 1, January 2002.