

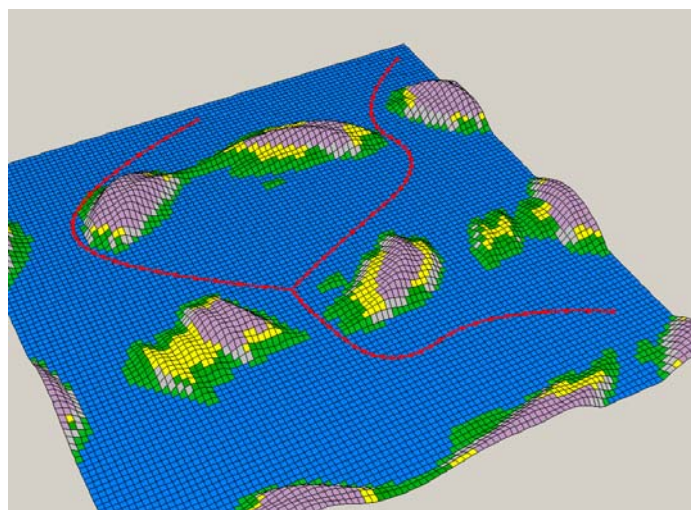


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

***«ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΕΝΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΟΜΑΔΑΣ
ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΥΦΥΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ»***



**Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση
των απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης
υπό της
ΑΘΗΝΑΣ Ν. ΜΠΡΙΝΤΑΚΗ**

ΧΑΝΙΑ - 2006

© Copyright υπό:

ΑΘΗΝΑ Ν. ΜΠΙΡΙΝΤΑΚΗ

2006

Η διατριβή της Αθηνάς Ν. Μπριντάκη εγκρίνεται από τους:

Ιωάννης Κ. Νικολός

Κίμων Π. Βαλαβάνης

Νικόλαος Χ. Τσουρβελούδης

Ευχαριστίες

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 υπήρξαν καθοριστικής σημασίας για την πορεία και την έκβασή της. Κυρίως όμως θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την προσπάθειά του ως δάσκαλος και καθοδηγητής της γνώσης να εμπλουτίσει τους φοιτητές του με το «μικρόβιο» αναζήτησης της γνώσης εις βάθος και της φυσικής θεώρησής της. Εργαλεία εξαιρετικής σημασίας είτε σε ακαδημαϊκό επίπεδο είτε για την ευρύτερη πορεία μας στη ζωή ως σκεπτόμενοι άνθρωποι με υψηλή απαίτηση σε συνειδητότητα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τον σύντροφό μου για την εγκάρδια συμπαράσταση και κατανόηση που έδειξαν σε όλες τις αγωνίες, δυσκολίες και προβληματισμούς που κλήθηκα να αντιμετωπίσω κατά την περάτωση της συγκεκριμένης μελέτης.

**στον πατέρα μου,
με όλη την αγάπη που με γεννά**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	7
1.1. Γενικά.....	7
1.2. Πλοήγηση.....	8
1.3. Σχηματοποιημένος χώρος (Configuration space, C-space)	10
1.4. Γενικά χαρακτηριστικά του προβλήματος που επιλύεται.....	11
1.5 Βιβλιογραφική επισκόπηση	12
2. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι	29
2.1 Η βασική ιδέα των ΕΑ.	29
2.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι	30
2.3 Αναλυτική περιγραφή λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων	33
2.3.1 Η διαδικασία	33
2.3.2 Τελεστές (operators)	35
2.4 Ο Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος	38
2.7.2 Το τροποποιημένο σχέδιο του δωρητή (donor)	40
2.7.3 Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών	41
3. Παραμετρική σχεδίαση	42
3.1 Απαιτήσεις συστημάτων γεωμετρικής απεικόνισης	42
3.2 Πεπλεγμένη και παραμετρική μορφή	42
3.3 Σύγκριση μεταξύ πεπλεγμένης και παραμετρικής απεικόνισης	43
4. Το πρόβλημα σχεδίασης για τη συντονισμένη πλοήγηση πολλαπλών μη επανδρωμένων εναέριων αεροσκαφών.....	59
4.1 Αντιμετώπιση του προβλήματος.....	59
4.1.1 Γενική περιγραφή του προβλήματος	59
4.1.2 Υποθέσεις, περιορισμοί και στόχοι πλοήγησης.....	60
4.1.3 Μοντελοποίηση των ρομποτικών διαδρομών μέσω της χρήσης καμπυλών B-Spline	61
4.1.4 Περιγραφή της συνάρτησης κόστους	63
4.1.5 Αναπαράσταση των λύσεων	67
4.2 Αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου.....	69
4.3 Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου.....	73
4.4 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας simulate	74
4.5 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας azimuth	75
5. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης	76
5.1 Γενικά.....	76
5.2 Παρουσίαση διάφορων σεναρίων	77
5.3 Παρουσίαση της σύγκλισης του αλγορίθμου και για τα τέσσερα εξεταζόμενα σενάρια.....	86
5.4 Συμπεράσματα	88
Βιβλιογραφία	90

1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Η ρομποτική ως ερευνητική πλατφόρμα και τεχνολογία εφαρμογής γνωρίζει μεγάλη άνθηση τις τελευταίες δεκαετίες. Η σύγχρονη εποχή μπορεί να θεωρηθεί ως η ωρίμανση και ενηλικίωσή της, πράγμα που γίνεται ιδιαίτερα αισθητό από την εξάπλωση των εφαρμογών της καθώς και από τα παραγόμενα ερευνητικά αποτελέσματα σε ποικίλους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Προηγμένες ερευνητικά και τεχνολογικά χώρες έχουν αναπτύξει και συνεχίζουν να στηρίζουν την έρευνα και την εφαρμογή των αρχών της ρομποτικής τόσο με οριζόντιες όσο και με κάθετες δράσεις. Οι λόγοι έχουν να κάνουν τόσο με τα οικονομικά οφέλη για τις εθνικές τους οικονομίες, που προκύπτουν από την αυτοματοποίηση και εν γένει τον εκσυγχρονισμό της παραγωγής, όσο και με τις προσδοκίες και προοπτικές που τροφοδοτούνται από τα αποτελέσματα σε επιστημονικό επίπεδο. Επιπλέον, εξαιρετικής σημασίας για την ταχεία εξάπλωση της ρομποτικής είναι η στενά εξαρτημένη και αλληλεπιδραστική σχέση της με τεχνολογίες αιχμής, όπως η πληροφορική, η ηλεκτρονική, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και τεχνητής νοημοσύνης, η τεχνολογία αισθητήρων, κ.α., που λειτουργεί πολλαπλασιαστικά αλλά και ταυτόχρονα πυροδοτεί εξελίξεις.

Ένας από τους κυριότερους στόχους που έχουν 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, 1990].

Οι αυτόνομοι ρομποτικοί μηχανισμοί βρίσκουν πολλές εφαρμογές στον τομέα της παραγωγής, της ιατρικής, στο σχεδιασμό φαρμάκων, 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, 1990].

1.2. Πλοήγηση

Αναπτύσσοντας τεχνολογίες απαραίτητες για αυτόνομα ρομποτικά οχήματα, σημαντική προϋπόθεση είναι ο αυτοματοποιημένος λογισμός, η αντίληψη και ο έλεγχος, κατά την ανάπτυξη των οποίων ανακύπτουν 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. Το συγκεκριμένο τεχνολογικό πρόβλημα είναι εξαιρετικά σημαντικό, δεδομένου ότι τα ρομπότ θα απαιτείται να κινούνται σε πραγματικό περιβάλλον, με ελάχιστη απαίτηση την ικανότητα να εξάγουν την κίνησή τους [Jean-Claude Latombe, 1990].

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 στον 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 που επιλύεται [Jean-Claude Latombe, 1990].

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 σχεδιασμός τροχιάς). 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 σχεδιασμός τροχιάς). Συνήθως γίνεται συνδυασμός των δύο: υπολογίζεται μια αρχική πορεία, η οποία διορθώνεται καθώς το ρομπότ κινείται και αντιλαμβάνεται το δυναμικά εξελισσόμενο περιβάλλον του.

Οι παράμετροι που αφορούν στο 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, διαδοχικά 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, 1990], 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 στη σημειακή αναπαράσταση του ρομπότ και στη χαρτογράφηση των εμποδίων στο χώρο αυτόν, με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταθέτει το πρόβλημα πλοήγησης ενός τριδιάστατου οχήματος στο πρόβλημα πλοήγησης ενός σημείου. Με τον τρόπο αυτό απλοποιούνται και γίνονται σαφέστεροι οι περιορισμοί που αφορούν στην 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. Γενικά χαρακτηριστικά του προβλήματος που επιλύεται

Το κίνητρο υλοποίησης της παρούσας μελέτης υπήρξε η πρόκληση της σχεδίασης και εφαρμογής ενός off-line ελεγκτή τροχιάς, κατάλληλου για τη συντονισμένη πλοήγηση πολλαπλών εναέριων μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs) και την αποφυγή κάθε μορφής συγκρούσεων σε γνωστό, στατικό, θαλάσσιο περιβάλλον, χαρακτηριζόμενο από αριθμό νήσων που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους.

Η χρήση των UAVs τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά σε πραγματικές εφαρμογές, διότι αφενός παρέχουν εξαιρετική δυνατότητα κατεύθυνσης και χειρισμού και αφετέρου διαθέτουν μικρό βάρος, χαμηλό ρίσκο και κόστος, συγκριτικά με κάθε τύπο επανδρωμένων αεροσκαφών. Ο σχεδιασμός της κίνησης ενός UAV αποτελεί ένα από τα προβλήματα που συναντώνται κατά τη μελέτη και ανάπτυξή τους. Ο ελεγκτής τροχιάς θα πρέπει να σχεδιάζει εφικτές πτήσεις, που θα ικανοποιούν κάθε τύπου χρονικών και χωρικών περιορισμών ή περιορισμών πόρων και διαθεσιμότητας, ανάλογα με το φάκελο πτήσης του αεροσκάφους καθώς και των ειδικών χαρακτηριστικών του προβλήματος που επιλύεται. Γίνεται φανερό ότι ο σχεδιασμός τροχιάς ουσιαστικά αφορά ένα πολυκριτήριο πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλές και σε αρκετές περιπτώσεις αντικρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις και επομένως εξαιρετικά δύσκολο και υπολογιστικά απαιτητικό. Ωστόσο, η συνθετότητα αυξάνεται με τη προσθήκη επιπλέον ρομποτικών οχημάτων καθώς ο ελεγκτής τροχιάς καλείται να λάβει υπόψη και τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση.

Η συγκεκριμένη μελέτη έχει αναπτυχθεί και υλοποιηθεί ως ένα πρόβλημα πολυκριτήριας βελτιστοποίησης με τη βέλτιστη λύση να αναζητείται μέσω της χρήσης ενός Διαφορικού Εξελικτικού Αλγορίθμου (Differential Evolution - DE), [Ioannis K. Nikolos, 2004]. Τα εμπόδια είναι στατικά, ο χώρος κίνησης περιορισμένος. Οι πληροφορίες που δίνονται στα αεροσκάφη είναι η αρχική τους θέση και ταχύτητα, οι συντεταγμένες του στόχου που καλούνται να προσεγγίσουν, καθώς και η ταχύτητα με την οποία καλούνται να προσεγγίσουν τον στόχο. Τα UAVs πρέπει να ακολουθήσουν ανεξάρτητες πτήσεις 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 τα υπόλοιπα UAVs, καθώς και τη συντομότερη δυνατή διαδρομή. Το προτεινόμενο σχέδιο πλοήγησης, το οποίο έχει στηριχτεί στις εργασίες των [Yan Ping et al.,] και [Ioannis K. Nikolos, 2004], αποτελεί τη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας [Athina Brintaki, et. al., 2005], κατά την οποία οι τροχιές πτήσης είχαν μοντελοποιηθεί με τη χρήση διαδοχικών ευθύγραμμων τμημάτων. Το κύριο μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου υπήρξε η απαίτηση μεγάλου πλήθους ευθύγραμμων τμημάτων για πολύπλοκες διαδρομές, με συνέπεια την απαίτηση πολλαπλών μεταβλητών σχεδίασης, επομένως και γενεών για τη σύγκλιση του Εξελικτικού Αλγορίθμου. Η παρούσα μελέτη συνδυάζει τις βασικές αρχές της θεωρίας των καμπυλών B-Spline και των Εξελικτικών Αλγορίθμων (EA), με συγκεκριμένη μοντελοποίηση των διαφορετικών και αντικρουόμενων απαιτήσεων του προβλήματος, ώστε το πολικριτήριο πρόβλημα βελτιστοποίησης να μοντελοποιηθεί ως μονοκριτήριο. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα υπό-προβλήματα έγκειται στον προσδιορισμό της κατάλληλης συνάρτησης προσαρμογής για καθένα από αυτά, ώστε να συντεθεί η συνολική συνάρτηση κόστους που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί από τον EA.

1.5 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος πλοήγησης αυτόνομων ρομποτικών μηχανισμών. Οι τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης που έχουν αναπτυχθεί καθιστούν δυνατό το χειρισμό της ανακρίβειας και της αβεβαιότητας, που συχνά συναντάται κατά την επίλυση πρακτικών προβλημάτων αυτού του είδους. Οι υπολογιστικές τεχνικές σχετίζονται με τα νευρωνικά δίκτυα (neural networks- NN), την ασαφή λογική (fuzzy logic- FL), τους γενετικούς αλγορίθμους (genetic algorithms- GA), καθώς και άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης. Με το πέρασμα των χρόνων οι ερευνητές, συνδέοντας τις παραπάνω τεχνικές διαπίστωσαν την καταλληλότητα των υβριδικών μεθόδων, όπως 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, διατηρώντας ένα αποδεκτό μέγεθος υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

Στο σημείο αυτό, θα αναφερθούμε εν συντομία στις πιο πρόσφατες ερευνητικές δραστηριότητες που μελετούν το πρόβλημα της συντονισμένης πλοήγησης 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 ενός ρομποτικού συστήματος συνεργασίας πρέπει να παρέχει την υποδομή μέσω της οποίας 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 μη 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 [Y. Uny Cao et al., 1997].

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, ενώ τέλος καθίσταται επιτακτική ανάγκη η δυνατότητα των ρομπότ να μοντελοποιούν και να αντιλαμβάνονται τους υπόλοιπους ρομποτικούς μηχανισμούς της ομάδας τους. Επίσης, απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός του τύπου της επικοινωνιακής δομής του συστήματος, δηλαδή του τύπου των αλληλεπιδράσεών του. Έχουν υποστηριχθεί τρεις τύποι αλληλεπιδράσεων [Y. Uny Cao et al., 1997]:

- **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 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 στην 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.

Οι υπάρχουσες μέθοδοι επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες [Y. Uny Cao et al., 1997]. Στη συγκεντρωτική προσέγγιση (centralized approach), όπου ο χώρος κίνησης του εκάστοτε ρομποτικού οχήματος ενώνεται και προκύπτει ένας σύνθετος χώρος, μέσα στον οποίο 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 επιλύονται οι πιθανές συγκρούσεις.

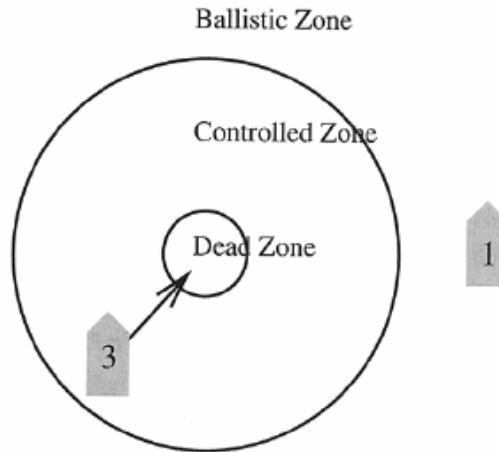
Αναλυτικότερα, οι [Tucker Balch et al., 1998], ανέπτυξαν νέες συμπεριφορές αντίδρασης για την πλοήγηση πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων. Προκειμένου, να καταστεί δυνατό η ρομποτική ομάδα να προσεγγίσει το στόχο της και να αποφύγει ενδεχόμενους κινδύνους, η δόμηση της συμπεριφοράς ολοκληρώνεται και με άλλους σχηματισμούς πλοήγησης. Στην παραπάνω εργασία έχουν εξεταστεί οι ακόλουθοι

σχηματισμοί για μια ομάδα τεσσάρων ρομποτικών οχημάτων: line, column, diamond και wedge (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Δυνατοί σχηματισμοί τεσσάρων ρομπότ: (a) γραμμής, (b) στήλης, (c) διαμαντιού και (d) σφήνας. [Tucker Balch et al., 1998].

Κάθε ρομπότ έχει τη δική του συγκεκριμένη θέση σε κάθε σχηματισμό, η οποία εξαρτάται από τον αριθμό αναγνώρισής του (identification number-ID). Ο σκοπός κάθε ρομποτικού οχήματος είναι η συντονισμένη κίνηση προς τη 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 έναν από 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, ανάλογα με τη τρέχουσα κατάσταση του περιβάλλοντος. Από τη στιγμή που ορίζεται η επιθυμητή θέση του σχηματισμού, καλείται το σχέδιο διατήρησής της, το οποίο δημιουργεί άμεσα ένα διάνυσμα κίνησης, που έχει την κατεύθυνση της επιθυμητής θέσης και μέγεθος που εξαρτάται από το πόσο απέχει το ρομπότ από αυτή. Το Σχήμα 1.2 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 μια μετρίας έντασης δύναμη εφαρμόζεται για να διατηρήσει την επιθυμητή θέση του. Η κατεύθυνση του σχηματισμού καθορίζεται με μια ευθεία που ορίζεται από το κέντρο και το επόμενο σημείο πλοήγησης, τα οποία καθορίζουν το τοπικό σύστημα συντονισμού. Το τοπικό αυτό σύστημα συντονισμού υπολογίζεται διαρκώς σε κάθε βήμα της κίνησης.

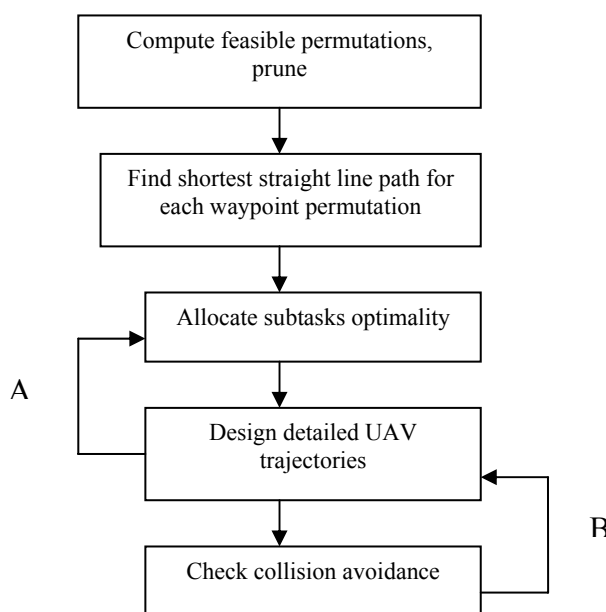
Οι [Steven M. LaValle et al., 1998] ασχολήθηκαν με τη γεωμετρική επίλυση του προβλήματος πλοήγησης πολλαπλών ρομποτικών οχημάτων. Ο αλγόριθμος που προτείνουν βασίζεται στις αρχές του δυναμικού προγραμματισμού και δίνει πολλαπλές λύσεις σε ένα μερικώς κατανεμημένο χώρο στρατηγικών κινήσεως και αφορά στην επίλυση τριών μερικών προβλημάτων:

1. συντονισμό κατά μήκος σταθερών ανεξάρτητων διαδρομών,
2. συντονισμό κατά μήκος ανεξάρτητων διαδρομών,
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 υπεργράφημα (super-graph), ενώ κατασκευάζεται μια μόνο φορά για ένα δεδομένο στατικό περιβάλλον. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσίασαν δύο διαφορετικές δομές για το υπεργράφημα: τη δομή flat super-graph και τη δομή multi-level super-graph.

Οι [Bellingham, et. al., 2001] παρουσίασαν ένα σχέδιο συντονισμένης πλοήγησης για στόλο μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV). Κύριο ζητούμενο στη μελέτη τους υπήρξε η αναζήτηση ανάπτυξης μιας αρχιτεκτονικής ελέγχου υπεύθυνης για τον βέλτιστο έλεγχο πτήσης του στόλου, αξιολόγηση της απόδοσης του σε πραγματικό χρόνο, καθώς και η δυνατότητα γρήγορου επανασχηματισμού στην περίπτωση ξαφνικών αλλαγών τόσο στο περιβάλλον κίνησης όσο και εντός του στόλου των αεροσκαφών. Το ευρύτερο σχέδιο της συντονισμένης πλοήγησης αποσυντίθεται στο σχέδιο συγκρότησης της ομάδας των αεροσκαφών (team composition), στο σχέδιο ανάθεσης στόχων (goal assignment), διανομής πόρων (resource allocation) και στο σχέδιο βελτιστοποίησης των εναέριων διαδρομών (trajectory optimization). Ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους, η οποία περιγράφει είτε το συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης της αποστολής του στόλου (completion time) είτε την πιθανότητα αποτυχίας της αποστολής (probability of mission failure). Τα κύρια μέρη του προτεινόμενου αλγορίθμου δίδονται στο Σχήμα 1.3, που ακολουθεί:



Σχήμα 1.3: βήματα του προτεινόμενου αλγορίθμου [Bellingham, et. al., 2001].

Αρχικά, δίνονται οι εντολές για κάθε UAV, ανάλογα με τις δυνατότητές τους. Εν συνεχεία, υπολογίζεται το μήκος της συντομότερης διαδρομής ως μια συλλογή ευθύγραμμων τμημάτων μεταξύ των waypoints και των εμποδίων για όλους τους δυνατούς σχηματισμούς. Για την κατασκευή των εναέριων ρομποτικών διαδρομών χρησιμοποιείται μια τεχνική αναζήτησης γράφου. Με την ολοκλήρωση εύρεσης της βέλτιστης διανομής αποστολών για τα UAVs που συνιστούν το στόλο, γίνεται, μέσω της χρήσης του χρόνου ολοκλήρωσης κάθε αποστολής, ο κινηματικός και δυναμικός υπολογισμός των ελεύθερων από εμπόδια εναέριων διαδρομών για κάθε αεροσκάφος.

Οι [Maren Bennewitz et al., 2002] παρουσίασαν μια αποσυνζευγμένη (decoupled) μέθοδο εύρεσης βέλτιστων σχεδίων προτεραιότητας για συντονισμένες ρομποτικές ομάδες. Χρησιμοποιούν τυχαία 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 ακολουθώντας 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 [Thierry Simeon et al., 2002] ασχολήθηκαν με το πρόβλημα συντονισμού πολλαπλών ρομποτικών διαδρομών. Θεωρούν n έντροχα ρομποτικά οχήματα, τα οποία 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 αλγορίθμου, που ερευνά το σύνθετο διάγραμμα, χωρίς να υπολογίζει το ακριβές σχήμα των εμποδίων. Δε χρησιμοποιούν κανονικοποιημένο πλέγμα, αλλά ένα διδιάστατο 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 τα ίχνη των SA διαδρομών είναι επίσης μια ακολουθία από ευθύγραμμα τμήματα και κυκλικά τόξα. Για το συντονισμό της κίνησης δύο ρομπότ είναι απαραίτητος 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 πρόβλημα θεωρώντας ένα τμήμα της αποστολής ως το έργο που πρέπει να πραγματοποιηθεί 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.

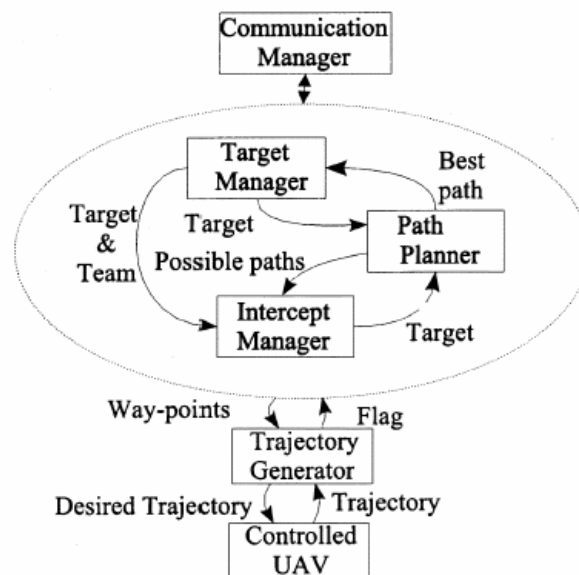
Οι [Theju Maddula, et. al., 2002] μελέτησαν το πρόβλημα πλοήγησης M UAVs σε N στόχους με ύπαρξη στο χώρο κίνησης P εμποδίων. Ζητούμενο είναι η βέλτιστη ανάθεση των στόχων στα UAVs με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται το ελάχιστο δυνατό μήκος των εναέριων διαδρομών, ασφαλείς πτήσεις, καθώς και ισοκατανομή του έργου κάθε αεροσκάφους. Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια. Στο πρώτο σχηματίζεται διάγραμμα Voronoi γύρω από τα εμπόδια για την περιγραφή των σημείων κατεύθυνσης (way points) και διαδρομών. Εν συνεχεία, τα τμήματα του διαγράμματος συστηματικά αφαιρούνται μέσω μιας τεχνικής κατωφλίου για την εύρεση εφικτών διαδρομών. Στο δεύτερο στάδιο, ερευνάται το απλοποιημένο γράφημα για τον προσδιορισμό μικρών διαδρομών μεταξύ των στόχων καθώς και μεταξύ των UAVs και των στόχων. Στο τρίτο στάδιο, κατασκευάζονται αρχικές τροχιές για κάθε UAV και λαμβάνει χώρα μια αρχική ανάθεση έργου σε κάθε αεροσκάφος. Τέλος, η αρχική ανάθεση βελτιώνεται μέσω της χρήσης των χωρικών περιορισμών του προβλήματος, που ρυθμίζουν την απαίτηση για ισοκατανομή του έργου ανάθεσης σε κάθε αεροσκάφος.

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 στα ακόλουθα υποπροβλήματα:

1. Δεδομένης της ύπαρξης M UAVs με N στόχους, καλούνται να αναθέσουν σε κάθε όχημα τον στόχο του με τρόπο τέτοιο ώστε αν είναι δυνατό κάθε στόχος να προσεγγίζεται από μια ομάδα UAVs.
2. Για κάθε ομάδα από UAVs για ένα συγκεκριμένο στόχο πρέπει να καθοριστεί ο τελικός χρόνος προσέγγισής του (estimated time over target, TOT).
3. Για κάθε ομάδα UAVs πρέπει να καθοριστεί μια ασφαλής διαδρομή, ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιείται ο περιορισμός της ταχύτητας (μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής) και να επιτευχθεί μέσα στον προκαθορισμένο χρόνο (TOT).
4. Μετασχηματισμός 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 1.4 που ακολουθεί:



Σχήμα 1.4: 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 αναχίτησης (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 στην 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, ο διαχειριστής 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.

Ένα χρόνο αργότερα οι [Timothy W. McLain and Randal W. Beard, 2003] μελέτησαν το πρόβλημα της συντονισμένης πλοήγησης υπό την ισχύ χρονικών περιορισμών. Το βασικό αξίωμα της προτεινόμενης μεθόδου είναι η απαίτηση διαχείρισης και καταμερισμού της γνώσης. Για τον επιτυχή συντονισμό των αεροσκαφών η γνώση δεσμεύεται στο διάνυσμα *coordination variable*. Εν συνεχεία, ορίζεται η *συνάρτηση συντονισμού (coordination function)* η οποία είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση των αντικειμενικών συναρτήσεων κάθε αεροσκάφους. Συγκεκριμένα περιγράφει το κόστος επίτευξης διαφορετικών τιμών της μεταβλητής συντονισμού (*coordination variable*) για κάθε UAV. Έτσι, ο συντονισμός των αεροσκαφών επιτυγχάνεται μέσω επικοινωνίας των συναρτήσεων συντονισμού και των μεταβλητών συντονισμού μεταξύ των UAVs. Για την εξαγωγή των βέλτιστων εναέριων διαδρομών απαιτούνται πληροφορίες σχετικές με το χρόνο κίνησης των αεροσκαφών. Οι πληροφορίες αυτές αποθηκεύονται στην *συνάρτηση συντονισμού*.

Οι [Atsushi Yamashita et al., 2003] πρότειναν μια μέθοδο επίλυσης του προβλήματος πλοήγησης πολλαπλών έντροχων ρομποτικών οχημάτων σε τρισδιάστατο περιβάλλον. Σκοπός τους 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 τον πολυδιάστατο C-space. Για το λόγο αυτό αναδόμησαν τον 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 στον 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 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 τους είναι η εξασφάλιση ενός συντονισμένου σχεδίου

πλοήγησης από μια ομάδα ρομποτικών ανιχνευτών σε μια γεωγραφική περιοχή. Η περιοχή αυτή παρουσιάζεται με κελιά πλέγματος. Κάθε κελί χαρακτηρίζεται από δύο μεταβλητές, την ανύψωση (elevation) και το κόστος χαρτογράφησης (MapCost). Η ανύψωση είναι σταθερή σε όλο το χώρο 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.

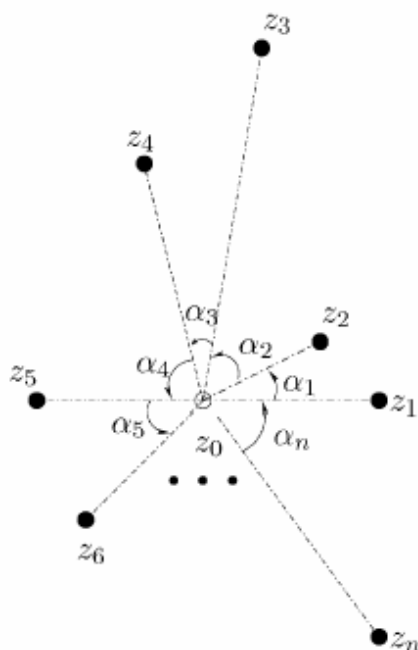
Οι [Robert L. Dollarhide et al., 2003] παρουσίασαν σε προσομοιωμένο περιβάλλον την πλοήγηση ομάδας ρομποτικών οχημάτων σε αποστολές έρευνας και διάσωσης (search and rescue). Αναπτύξαν ένα γραφικό πρόγραμμα προσομοίωσης χρησιμοποιώντας Open GL και προγραμματίζοντας σε C++. Ο προσομοιωτής εφοδιάστηκε με ένα πλήθος παραμέτρων, προκειμένου να διευκρινίσει τον σκοπό του πειράματος και να επιδείξει τις κινήσεις των ρομπότ. Σε κάθε χρονικό βήμα, το ρομπότ χρησιμοποιεί τους αισθητήρες του για να ανιχνεύσει αντικείμενα. Η απόδοση της ρομποτικής ομάδας αποτιμάται από το ποσοστό των συνολικών δωματίων (που δομούν την επιτρεπτή περιοχή κίνησης των οχημάτων) και του προκαθορισμένου χρονικού περιορισμού. Ομάδες που επιτυγχάνουν 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 επιτευχθεί 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 στον χρήστη της χρησιμοποίησης 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 την πρώτη τυχαία δημιουργημένη ομάδα 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 προρυθμισμένες γενιές, έως ότου βρεθεί η καλύτερη γενιά, με τον βέλτιστο πληθυσμό και συνεπώς τη βέλτιστη ομάδα κανόνων. Αν τώρα, επιλεχθεί η μη χρήση ΓΑ, τότε ο χρήστης δύναται να χρησιμοποιήσει μια προκαθορισμένη ομάδα κανόνων.

Οι [Jonathan How, et. al., 2004] επέκτειναν την προτεινόμενη ερευνητική μελέτη των [Bellingham, et. al., 2001] για την ανάπτυξη και δοκιμή ενός σχεδίου πτήσης στόλου συνιστάμενου από 8 UAVs. Για το σχέδιο ανάθεσης αποστολών (task assignment) επέκτειναν την *petal* μέθοδο και ανέπτυξαν το *σχέδιο ανάθεσης στόχων αποσυρόμενου ορίζοντα (a receding horizon task assignment algorithm, RHTA)* ώστε να δύναται ο δυναμικός επαναπροσδιορισμός των αποστολών σε πραγματικό χρόνο. Για το σχέδιο *βελτιστοποίησης τροχιάς (trajectory optimization)* χρησιμοποίησαν μέθοδο MILP που βασίζεται στον *ελεγκτή αποσυρόμενου ορίζοντα*. Τα πειραματικά τους αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι ο αλγόριθμος RHTA συντελεί σε αισθητή μείωση του υπολογιστικού χρόνου.

Οι [Zhiyun Lin et al., 2004], μελέτησαν το πρόβλημα επίτευξης συγκεκριμένων σχηματισμών μιας ομάδας έντροχων αυτόνομων μηχανισμών, με χρήση διανεμημένου ελέγχου. Εάν η σύγκληση σε ένα σημείο είναι ορατή, συνεπάγεται η ύπαρξη επιτεύξεων 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

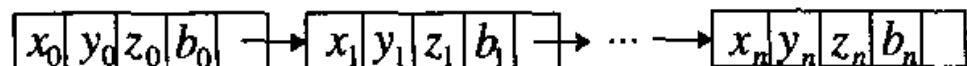
σημείο. Επίσης, παρακινούνται από την ερώτηση εάν υπάρχουν επικείμενες προσκρούσεις, αναπτύσσεται και ένας σχηματισμός εξέλιξης, σύμφωνα με τον οποίο αν οι ρομποτικοί μηχανισμοί αρχικά είναι διατεταγμένοι αριστερόστροφα (ή δεξιόστροφα) σχηματίζοντας αστέρι (star formation), τότε είναι πάντα τόσο τακτοποιημένοι που δεν προκύπτουν μεταξύ τους συγκρούσεις (Σχήμα 1.5).



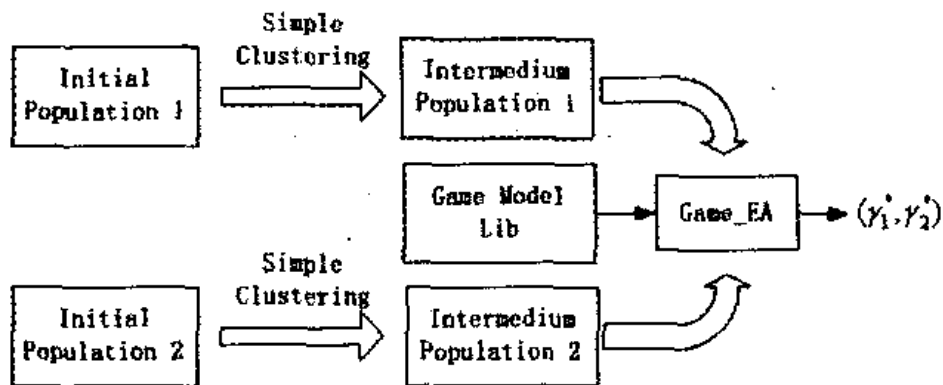
Σχήμα 1.5: Αριστερόστροφος αστρικός σχηματισμός. [Zhiyun Lin et al., 2004].

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 μηχανισμούς). Στην εργασία παρουσιάζεται μια γραμμική και μια μη γραμμική τεχνική γραφήματος για την επίλυση του προβλήματος σύγκλισης 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 προτέρων γνωστή.

Οι [Ping Yan, et. al., 2004] προσέγγισαν το πρόβλημα της συντονισμένης πλοήγησης μέσω της εφαρμογής της θεωρίας παιγνίων. Προτείνουν την εφαρμογή ενός ελεγκτή δύο σταδίων. Ο συγκεκριμένος ελεγκτής δύναται να συνδυάζει ποικίλα μοντέλα παιγνίου με τις βασικές αρχές των εξελικτικών μεθόδων υπολογισμού. Ζητούμενο είναι η εύρεση εφικτών διαδρομών για όλα τα αεροσκάφη. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως «παιχνίδι» με πολλαπλούς «παίκτες», κάθε ένας από τους οποίους στοχεύει στη βελτιστοποίηση του δικού του παιχνιδιού με ευρύτερο στόχο το σύστημα να οδηγηθεί στην επιθυμητή ισορροπία. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε «παίκτης» έχει τον ίδιο βαθμό προτεραιότητας για βελτιστοποίηση. Ως μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται ένας Εξελικτικός Αλγόριθμος. Το χρωμοσώμα αναπαριστά υποψήφιες ρομποτικές διαδρομές. Τα γονίδια περιγράφουν τη θέση κάθε way point κάθε αεροσκάφους καθώς και την κατάσταση μιας μεταβλητής b_i , υπεύθυνη για τη δήλωση τήρησης ή μη των περιορισμών του προβλήματος:



Σχήμα 1.6: δομή χρωμοσώματος [Ping Yan, et. al., 2004].



Σχήμα 1.7: αρχιτεκτονική του προτεινόμενου ελεγκτή δύο σταδίων, [Ping Yan, et. al., 2004].

Οι [George Vachtsevanos, et. al., 2004] παρουσίασαν μια αρχιτεκτονική ελέγχου για τη συντονισμένη πλοήγηση UAVs. Η προτεινόμενη μέθοδος διαφοροποιείται από άλλες μελέτες ως προς τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: α) στο υψηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας έχει τοποθετηθεί ο «κυβερνήτης» (commander) του συστήματος. Στο τρέχον επίπεδο αυτόματου ελέγχου, το σύστημα το οποίο

αναπτύσσεται λειτουργεί ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τον «κυβερνήτη».

β) Το προτεινόμενο αρχιτεκτονικό μοντέλο είναι γενικής χρήσεως και διευκολύνει τη σύντηξη ποικίλων τεχνολογιών. Η συγκεκριμένη ιεραρχική αρχιτεκτονική ελέγχου δομείται από τρία επίπεδα. Στο υψηλότερο επίπεδο, εισάγονται τα γενικά χαρακτηριστικά σχεδίασης της αποστολής για την ομάδα των UAVs. Στο μεσαίο επίπεδο εισάγονται τα χαρακτηριστικά που διαχειρίζονται την τοπική γνώση (local knowledge), τον έλεγχο ανάπτυξης/σχηματισμού (formation control) και το σχέδιο αποφυγής συγκρούσεων (obstacle avoidance). Στο κατώτατο επίπεδο ορίζονται οι αλληλεπιδράσεις με τους αισθητήρες και γενικότερα με το σύστημα εξοπλισμού κάθε αεροσκάφους.

Οι [K. Madhava Krishna, et. al., 2005] παρουσίασαν μια μεθοδολογία επίλυσης σε πραγματικό χρόνο του προβλήματος της συντονισμένης πλοήγησης UAVs σε άγνωστο εχθρικό περιβάλλον. Ο προτεινόμενος ελεγκτής παράγει μια αλληλουχία *way points* από τα οποία πρέπει να περάσουν τα UAVs προκειμένου να προσεγγίσουν το στόχο τους. Για την εύρεση της βέλτιστης αλληλουχίας των *way points* χρησιμοποιείται η μέθοδος A* search. Η συνάρτηση κόστους που ρυθμίζει την A* έρευνα δύναται ως το σταθμισμένο άθροισμα των επικείμενων κινδύνων κατά την πλοήγηση των UAVs στο εχθρικό περιβάλλον που μελετάται. Η μεταβολή των μεγεθών των βαρών οδηγεί στη δημιουργία ποικίλων ρομποτικών διαδρομών.

Οι [Barbara Pfeiffer, et. al., 2005] ανέπτυξαν ένα πιθανοκρατικό μοντέλο διαχείρισης του προβλήματος της συντονισμένης πλοήγησης. Ανέλυσαν το ευρύτερο πρόβλημα σε υποπροβλήματα διαχείρισης: α) υπολογισμού του ελάχιστου ρίσκου υπό την παρουσία ζωνών κινδύνου, β) εξερεύνησης της ανταλλαγής μεταξύ χρόνου και ρίσκου πτήσης, γ) υπόληψης καταστάσεων κατά των οποίων αυξάνονται τα επίπεδα κινδύνου.

Οι [Reid A. Larson, et. al., 2005] παρουσίασαν μια τεχνική δυναμικού προγραμματισμού και μια γεωμετρική μέθοδο επίλυσης του προβλήματος της συντονισμένης πλοήγησης. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα των δύο μεθόδων οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι ο γεωμετρικός τρόπος επίλυσης, ο οποίος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του χρόνου προσέγγισης του στόχου έχοντας τα αεροσκάφη σταθερή ταχύτητα και σταθερό ρυθμό στροφής, λειτουργεί μόνο για συγκεκριμένα σενάρια πλοήγησης. Αντίθετα, η τεχνική δυναμικής βελτιστοποίησης οδηγεί στην εύρεση εφικτών λύσεων ακόμα και σε περιπτώσεις ύπαρξης «σφικτών»

χρονικών περιορισμών, περιορισμών διαχείρισης των εναέριων πτήσεων καθώς και σχέδιο αποφυγής συγκρούσεων βασιζόμενο σε δεδομένα από ραντάρ.

Οι [Marc D. Richards, et. al., 2005] παρουσίασαν μια μέθοδο γενετικού προγραμματισμού ως τεχνική ανάπτυξης ελεγκτών για την πλοήγηση ομάδων UAVs. Εστίασαν τη μελέτη τους σε περιβάλλοντα άγνωστα και εχθρικά για τον άνθρωπο. Οι ελεγκτές περιγράφονται ως δέντρα αποφάσεων και προκύπτουν από την αξιολόγηση συναρτήσεων χαμηλού επιπέδου (set of low-level functions). Τα αναπτυσσόμενα δένδρα αποφάσεων είναι εύρωστα σε αλλαγές των αρχικών παραμέτρων και παρέχουν εφικτές λύσεις. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος περιγράφει τη διαδικασία απόφασης για την αλλαγή της κατεύθυνσης κάθε αεροσκάφους.

2. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

2.1 Η βασική ιδέα των ΕΑ.

Η βασική ιδέα υποκίνησης των εξελικτικών αλγορίθμων ως τεχνικές βελτιστοποίησης 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, *lepus*) 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 ενδιαμέση 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 ενδιαμέση 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 ενδιαμέση γενιά.

2.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

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.

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 χρωματοσωμάτων. 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).

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.

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 ρητούς περιορισμούς του προβλήματος. Παράγονται δηλαδή γονίδια τα οποία παίρνουν τυχαίες τιμές από ένα σύνολο επιτρεπτών τιμών εντός του χώρου έρευνας (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 (γενιά), ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

Με κάποια μέθοδο επιλογής 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. 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.

Initial Generation = 1

Initialize

Evaluate

Keep_the_Best

do Generation = 2, maxgens

Select

Crossover

Mutate

Report

Evaluate

Elitist

enddo

2.3.2 Τελεστές (operators)

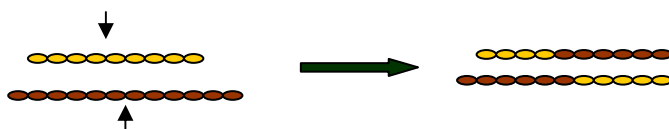
Μετά την αρχική δημιουργία της επόμενης γενιάς ακολουθεί η εφαρμογή συγκεκριμένων τελεστών στα χρωμοσώματα που επιλέχθηκαν. Οι τελεστές που χρησιμοποιούνται στους ΓΑ είναι πολλοί και ο προγραμματιστής μπορεί να επιλέξει, να τροποποιήσει ή και να επινοήσει τελεστές ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος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

Διασταύρωση - Επιχiasμός, (crossover)

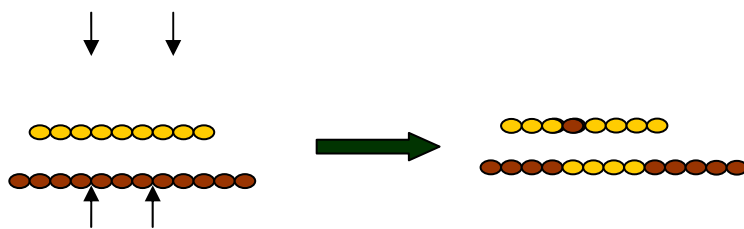
Θεωρείται από τους πιο σημαντικούς τελεστές σ' ένα ΓΑ και υπάρχουν πολλές παραλλαγές του. Η βασική λειτουργία του έγκειται στο ότι ανασυνδυάζει τα χρωμοσώματα δυο ατόμων που αντιπροσωπεύουν τους γονείς (parents), της προηγούμενης γενιάς, σχηματίζοντας δυο νέα άτομα που καλούνται γόνοι (offsprings) και που διαθέτουν γενετικό υλικό και από τους δύο γονείς.

Οι παραλλαγές του τελεστή της διασταύρωσης αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό διάκρισης των 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).

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.

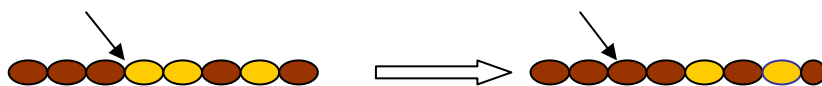


Σχήμα 2.2: Διασταύρωση δύο σημείων.

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 κοντά στην ήδη υπάρχουσα.

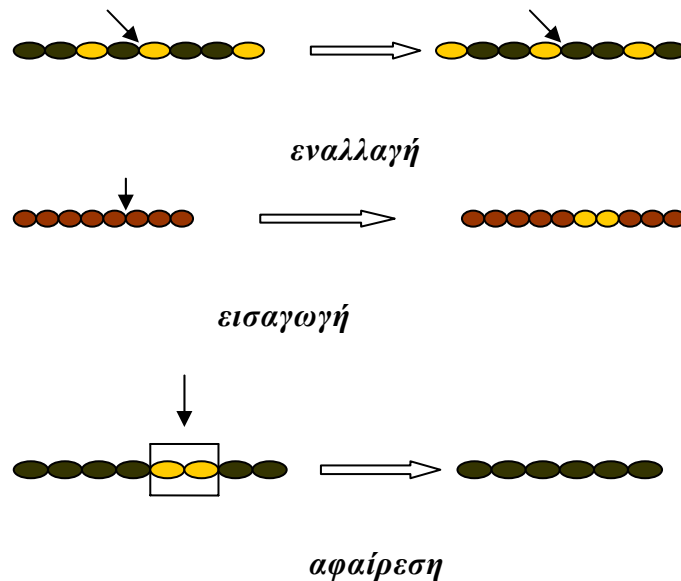


Σχήμα 2.3: Απλή μετάλλαξη.

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, εισαγωγής και αφαίρεσης.

Ολοκληρώνοντας 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 Ο Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος

Η χρήση Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου (ΔΕΑ - DE) εν συγκρίσει με άλλες εξελικτικές μέθοδοι βελτιστοποίησης υπερέχει στα ακόλουθα σημεία:

- Ο ΔΕΑ αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα απλός σ' επίπεδο προγραμματισμού και εφαρμογής, καθώς διαθέτει μικρό αριθμό ρυθμιστικών παραμέτρων.
- Σε σύγκριση με τους κλασσικούς GA παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά σύγκλισης.
- Δύναται να χειριστεί ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης τύπου πραγματικού, ακέραιου ή διακριτών τιμών.
- Δύναται να χειριστεί προβλήματα με μεγάλο πλήθος ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης.

Προτάθηκε αρχικά από τους [Storn R., 1995] και [Storn R. Et al., 1995] και διαφαίνεται ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνική ολικής βελτιστοποίησης, αρκετά αποδοτική και εύρωστη. Ο ΔΕΑ που χρησιμοποιείται στο παρόν πρόβλημα στηρίχθηκε στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στην εργασία του [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 αντικειμενική συνάρτηση (κόστους) που επιδιώκουμε να ελαχιστοποιήσουμε. Σε κάθε γενιά G , ένας πληθυσμός από N_p υποψήφιας λύσεις υποβάλλονται σε ειδικές διεργασίες:

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

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 μεταβλητές σχεδίασης πραγματικών αριθμών. 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 γονίδια του να πέρνουν τιμές εντός του προκαθορισμένου χώρου

λύσεων. Ως κανόνα θεωρούμε για όλες τις τυχαίες αποφάσεις πιθανότητες ομοιόμορφης κατανομής.

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 τροποποιημένης 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 ο τελεστής 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

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

επιλέγονται τυχαία ανάμεσα από τις υποψήφιες λύσεις του τρέχοντος πληθυσμού. Η παράμετρος F , είναι παράμετρος ελέγχου του ΔΕΑ, ορίζεται 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:

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

2.7.2 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 κατανεμημένη 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 στην εργασία των [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.

2.7.3 Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών

Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών (με ομοιόμορφη πιθανότητα) βασίζεται στον αλγόριθμο που προτάθηκε από τους [Marse, et al., 1983]. 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, 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. Παραμετρική σχεδίαση

3.1 Απαιτήσεις συστημάτων γεωμετρικής απεικόνησης

Ενιαίο σύστημα περιγραφής: τόσο για τυποποιημένες καμπύλες και επιφάνειες (κωνικές τομές, ευθείες κ.λπ.) όσο και για γεωμετρικές οντότητες ελεύθερης μορφής.

Διαισθητική λειτουργία: κάθε αλγόριθμος που χρησιμοποιείται θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα ένα εύκολα προβλέψιμο γεωμετρικό σχήμα.

Γρήγοροι και υπολογιστικά ευσταθείς αλγόριθμοι.

Απαραμόρφωτα σχήματα όταν υποβάλλονται σε γεωμετρικούς μετασχηματισμούς (περιστροφή, μεταφορά, προβολές).

3.2 Πεπλεγμένη και παραμετρική μορφή

Οι πεπλεγμένες εξισώσεις και οι παραμετρικές συναρτήσεις αποτελούν τις πιο διαδεδομένες τεχνικές περιγραφής καμπυλών και επιφανειών στον τομέα της γεωμετρικής σχεδίασης.

Η πεπλεγμένη εξίσωση μιας καμπύλης που κείται στο xy επίπεδο δίνεται απλά από την εξίσωση $f(x,y) = 0$, η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ των συνταταγμένων x και y των σημείων που ανήκουν στην συγκεκριμένη καμπύλη. Για μια δεδομένη καμπύλη η παράπανω σχέση είναι μοναδική. Για παράδειγμα η εξίσωση του κύκλου δίδεται:

$$f(x,y) = x^2 + y^2 - 1 = 0 \quad 3.1$$

Σε παραμετρικό επίπεδο κάθε συντεταγμένη, κάθε σημείου της καμπύλης περιγράφεται ξεχωριστά ως συνάρτηση ανεξάρτητων παραμέτρων, σύμφωνα με τη σχέση που ακολουθεί:

$$C(u) = (x(u), y(u)) \quad a \leq u \leq b \quad 3.2$$

όπου $C(u)$ είναι μια διανυσματικού τύπου συνάρτηση της ανεξάρτητης μεταβλητής u . Παρότι το διάστημα $[a, b]$ είναι αυθαίρετο, είθισται η κανονικοποίησή του στο $[0, 1]$. Η παραμετρική απεικόνιση για παράδειγμα, ενός τεταρτημόριου κύκλου δίνεται από τις ακόλουθες παραμετρικές συναρτήσεις :

$$\begin{aligned}x(u) &= \cos(u) \\y(u) &= \sin(u) \\0 < u < \pi/2\end{aligned}\tag{3.3}$$

Παρατηρούμε ότι θέτοντας $t = \tan(u/2)$ παίρνουμε:

$$\begin{aligned}x(t) &= \frac{1-t^2}{1+t^2} \\y(t) &= \frac{2t}{1+t^2} \\0 \leq t \leq 1\end{aligned}\tag{3.4}$$

που συνεπαγεται ότι η αναπαράσταση της καμπύλης δεν είναι μοναδική.

Αξίζει να σημειωθεί η αναλογία μεταξύ φυσικής θεώρησης και παραμετρικής σχεδίασης. Θεωρώντας τη σχέση $C(u) = (x(u), y(u))$ ως την τροχιά κίνησης ενός σωματιδίου στο χρόνο, εξαρτώμενη της παραμέτρου u , τότε η παράμετρος u δεν είναι τίποτα άλλο παρά η περιγραφή της μεταβλητής του χρόνου. Υπολογίζοντας την πρώτη και δεύτερη παράγωγο της θέσης, $C(u)$ προκύπτει κατά τα γνωστά η ταχύτητα και η επιτάχυνση αντίστοιχα του σωματιδίου:

$$\begin{aligned}C'(u) &= (-\sin(u), \cos(u)) \\|C'(u)| &= \sqrt{\sin^2(u) + \cos^2(u)} = 1, \quad \forall u\end{aligned}\tag{3.5}$$

Η αναλογία παραμετρικής σχεδίασης με τη φυσική είναι εμφανής και επιτρέπει την άμεση θεωρητική αντιστοίχιση της φυσικής δυναμικής του προβλήματος της πλοήγησης με τη χρονική παραμετρική προσομοίωση ως εργαλείο χειρισμού και επίλυσης.

3.3 Σύγκριση μεταξύ πεπλεγμένης και παραμετρικής απεικόνισης

Είναι δύσκολο να υποστηρίξει κάποιος πως μια από τις δύο μεθόδους είναι καταλληλότερη από την άλλη για την αντιμετώπιση κάθε προβλήματος σχεδίασης. Είναι γεγονός πως και οι δύο τεχνικές υπερισχύουν ή στερούν σε διαφορετικά σημεία και συνθήκες:

- Προσθέτοντας μία z -συντεταγμένη στην παραμετρική μέθοδο προκύπτουν τυχαίες 3-D καμπύλες. Εν αντιθέσει, η πεπλεγμένη μορφή δύναται να δώσει μόνο καμπύλες σε επίπεδο.
- Είναι ιδιαίτερα δύσκολο να περιγραφούν τμήματα καμπυλών ή μπαλώματα επιφανειών με πεπλεγμένη μορφή. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα εύκολη η περιγραφή τους σε παραμετρική μορφή, θέτωντας απλώς τα όρια των παραμέτρων.
- Αντιθέτως, μη περιορισμένες γεωμετρικές μορφές όπως είναι οι ευθείες και τα, επίπεδα, περιγράφονται σε πεπλεγμένη μορφή και όχι σε παραμετρική.
- Η παραμετρική σχεδίαση διαθέτει φυσική διεύθυνση σάρωσης, δίνοντας διαδοχικά σημεία.
- Η παραμετρική μορφή είναι καλύτερα προσαρμοσμένη για σχεδίαση με H/Y, διότι επιτρέπουν τη δημιουργία αριθμητικά σταθερών αλγορίθμων με με ξεχωριστά γεωμετρική γεύση. Πολλές γεωμετρικές λειτουργίες εξαρτώνται από το είδος της περιγραφής:
 - Το να υπολογίσεις ένα σημείο που ανήκει σε συγκεκριμένη καμπύλη ή επιφάνεια είναι δύσκολο για την πεπλεγμένη μορφή απεικόνισης.
 - Για δεδομένο σημείο, το να ελέγξεις εάν ανήκει σε συγκεκριμένη καμπύλη ή επιφάνεια είναι δύσκολο στην παραμετρική μορφή απεικόνισης.
 - Στην παραμετρική σχεδίαση συναντώνται ιδιόμορφα σημεία – παραμετρικές ανωμαλίες, που δεν υπάρχουν στην πραγματική γεωμετρία (βλέπε πόλους σφαίρας)

Γίνεται έτσι φανερό ότι η επιλογή της χρήσης πεπλεγμένης ή παραμετρικής σχεδίασης εξαρτάται καθαρά από τα ειδικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του προβλήματος που επιλύεται.

3.4 Power Basis - Bezier συναρτήσεις

Επιτρέποντας στις συναρτήσεις $x(u)$, $y(u)$ και $z(u)$ που περιγράφουν συντεταγμένες σημείων να πάρουν αυθαίρετα τιμές προκύπτουν ποικίλες καμπύλες. Υπάρχουν θεμελιώδη χαρακτηριστικά που οι συναρτήσεις επιβάλλεται να ικανοποιούν:

- Να επιτρέπουν την ακριβή απεικόνιση όλων των καμπυλών και επιφανειών που επιθυμεί ο χρήστης

- Να είναι εύκολη, αποδοτική και ακριβής η επεξεργασία τους σε H/Y:
 - Ο υπολογισμός των σημείων και παραγώγων να γίνεται εύκολα και γρήγορα.
 - Η υπολογιστική διαχείριση των συναρτήσεων να μην είναι ευαίσθητη σε σφάλματα στρογγυλοποίησης.
 - Να υπάρχει μικρή απαίτηση σε μνήμη.

- Απλές συναρτήσεις και εύκολα κατανοητές:

Οι πολυωνυμικές συναρτήσεις αν και ικανοποιούν τα δύο τελευταία κριτήρια δε δύναται να αναπαραστήσουν επακριβώς καμπύλες όπως είναι οι κωνικές τομές, που απαιτούν για την προσέγγιση τους πολυωνυμικά συστήματα. Δύο ικανές τεχνικές στο να περιγράψουν πολυωνυμικές συναρτήσεις είναι οι Power Basis και Bezier. Παρότι είναι μαθηματικώς ισοδύναμες ωστόσο, η Bezier μέθοδος αποδεικνύεται καλύτερη και καταλληλότερη για τη σχηματική αναπαράσταση και χειρισμό καμπυλών σε υπολογιστή. Αναλυτικότερα, τα μειονεκτήματα χρήσης Power Basis συναρτήσεων είναι:

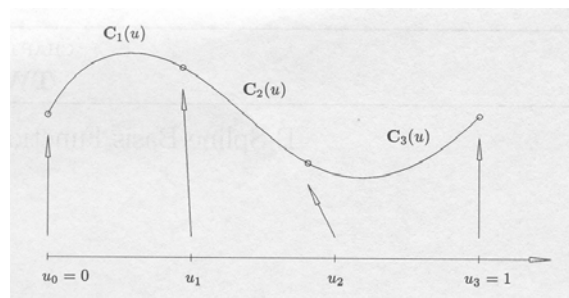
- απουσία φυσικής έννοιας για τους συντελεστές των πολυωνύμων. Προσδιορίζονται από την κατάσταση της καμπύλης στην αρχή της, ενώ επιθυμούμε συνήθως οριακές συνθήκες και στα δύο άκρα,
- οι αλγόριθμοι υπολογισμού τους είναι αλγεβρικοί και όχι γεωμετρικοί,
- το σχήμα Horner είναι επιρρεπές σε σφάλματα στρογγυλοποίησης, όταν οι συντελεστές μεταβάλλονται σημαντικά σε μέγεθος.

Εν αντιθέσει, οι καμπύλες Bezier αντιμετωπίζουν όλα τα μειονεκτήματα των καμπυλών Power Basis. Ωστόσο, οι καμπύλες που αποτελούνται από ένα μοναδικό τμήμα Bezier ρητό ή μη, εμφανίζουν άλλα σημαντικά μειονεκτήματα όπως:

- απαιτείται υψηλός βαθμός καμπύλης για μεγάλο αριθμό σημείων (για n σημεία ο βαθμός είναι $n-1$),
- για παρεμβολή σε πολύπλοκα σχήματα απαιτείται υψηλός βαθμός καμπύλης,
- δεν είναι ο καλύτερος τρόπος για διεπιδραστική σχεδίαση (μετακινώντας ένα σημείο ελέγχου δεν έχουμε τοπική αλλαγή της καμπύλης αλλά συνολική).

3.5 Εισαγωγή των B-Spline καμπυλών

Ένας τρόπος αντιμετώπισης των παραπάνω απαιτήσεων είναι η χρήση διαδοχικών τμημάτων παραμετρικών καμπυλών που ενώνονται μεταξύ τους. Το κάθε τμήμα αντιστοιχεί σε ένα τμήμα της παραμέτρου u . Τα όρια κάθε διαστήματος του u ονομάζονται breakpoints και αντιστοιχούν στα όρια του κάθε τμήματος της καμπύλης.



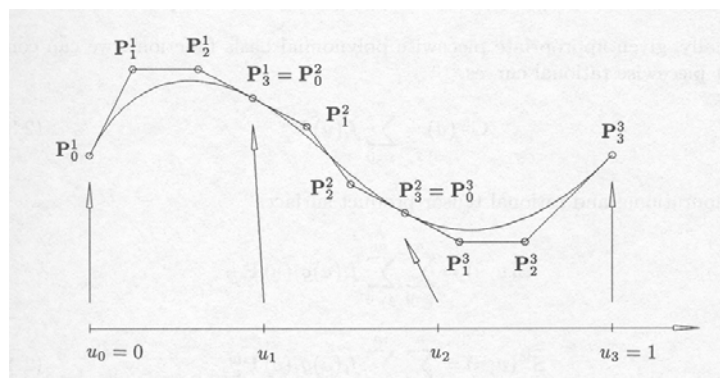
Σχήμα 3.1: Κυβική πολωνυμική καμπύλη τριών τμημάτων
[Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].

Έστω m ο αριθμός των τμημάτων μιας καμπύλης βαθμού n . Τότε τα τμήματα συμβολίζονται ως:

$$C_i(u) \quad 1 \leq i \leq m \quad 3.6$$

όπου τα $C_i(u)$ εμφανίζουν κάποια μορφή συνέχειας στα οριά τους. Η συνολική καμπύλη $C(u)$ εμφανίζει C^k συνέχεια στο breakpoint u_i εάν ισχύει:

$$C_i^j(u_i) = C_{i+1}^j(u_i) \quad \forall j \quad 0 \leq j \leq k \quad 3.7$$



Σχήμα 3.2: Η καμπύλη του σχήματος 3.1 με αναπαράσταση των πολωνυμικών τμημάτων ως Bezier
[Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].

Ωστόσο παρουσιάζονται νέα προβλήματα. Όσο υψηλότερη συνέχεια επιβάλλεται μεταξύ των τμημάτων, τόσο περισσότεροι περιορισμοί εισάγονται στη μετακίνηση των σημείων ελέγχου κάθε τμήματος, οπότε η μέθοδος γίνεται ιδιαίτερα δύσκολη. Η γεωμετρική όμως απεικόνιση με σημεία ελέγχου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, διότι είναι **διαισθητική** και **γεωμετρική**. Για το λόγο αυτό αναζητείται ένας τρόπος γεωμετρικής περιγραφής καμπυλών που να χρησιμοποιεί **σημεία ελέγχου**, αλλά να επιτρέπει την **ανεξάρτητη** (κατά το δυνατόν) **επιλογή βαθμού πολυωνύμου** για την καμπύλη. Η ζητούμενη επιθυμητή μορφή γεωμετρικής αναπαράστασης δίδεται:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n f_i(u) \cdot P_i \quad 3.8$$

όπου, P_i είναι τα σημεία ελέγχου, control points,

$$f_i(u) \quad i = 0, \dots, n \quad 3.9$$

οι τμηματικές πολυωνμικές συναρτήσεις που αποτελούν τη βάση του διανυσματικού χώρου όλων των πολυωνυμικών συναρτήσεων του επιθυμητού βαθμού και της επιθυμητής συνέχειας για δεδομένη αλληλουχία breakpoints

$$U = \{u_i\}, \quad 0 \leq i \leq m \quad 3.10$$

Κατά τον τρόπο αυτό, η συνέχεια στα breakpoints επιβάλλεται από τις βασικές συναρτήσεις και όχι από τις θέσεις των σημείων ελέγχου. Η μετακίνηση των σημείων ελέγχου δεν μεταβάλλει τη συνέχεια της καμπύλης. Οι Βασικές Συναρτήσεις f_i πρέπει να επιλέγονται με τρόπο ώστε να παρέχουν στις καμπύλες ιδιότητες αντίστοιχες με τις Bezier. Επιπλέον κύριο ζητούμενο είναι ο τοπικός έλεγχος της καμπύλης, οι f_i δηλαδή, να είναι μη μηδενικές μόνο σε τμήματα του U και όχι σε ολόκληρο το διάστημα U .

3.6 Βασικές συναρτήσεις B-Spline

3.6.1 Γενικά

Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι περιγραφής των βασικών συναρτήσεων μιας B-Spline καμπύλης. Για την παρούσα μελέτη έχει επιλεγεί η επαναληπτική φόρμουλα

των DeBoor, Cox και Mansfield [Cox 1972, DeBoor 1972, 1978] καθώς ενδείκνεται για εφαρμογή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Έστω

$$U = \{u_0, \dots, u_m\} \quad 3.11$$

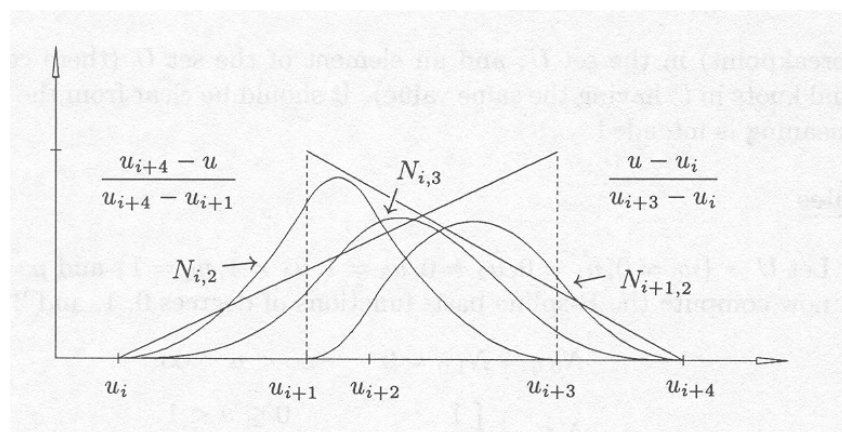
μη μειούμενη ακολουθία πραγματικών αριθμών. Τα u_i ονομάζονται **κόμβοι** (knots) και το U **διάνυσμα κόμβων**. Η i -στη Βασική Συνάρτηση B-Spline **βαθμού** p (τάξης $p+1$), ορίζεται ως:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad 3.12$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

3.6.1 Χαρακτηριστικά βασικών συναρτήσεων B-Spline καμπυλών

- Η συνάρτηση $N_{i,0}(u)$ είναι συνάρτηση βήματος, παντού μηδενική εκτός του διαστήματος $[u_i, u_{i+1})$.
- Για $p > 0$, η $N_{i,p}(u)$ είναι γραμμικός συνδυασμός δύο βασικών συναρτήσεων βαθμού $(p-1)$.



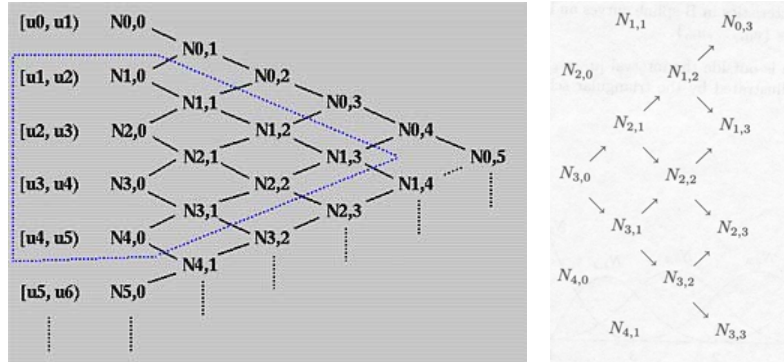
Σχήμα 3.3: Επαναληπτικός ορισμός των βασικών συναρτήσεων
[Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].

- Ο υπολογισμός μιας ομάδας βασικών συναρτήσεων απαιτεί τον ορισμό ενός διανύσματος κόμβων U και του βαθμού p .
- Ο λόγος $0/0$ τίθεται ίσος με 0.

- Οι βασικές συναρτήσεις ορίζονται σε όλο το διάστημα των πραγματικών αριθμών, αλλά συνήθως μας ενδιαφέρει το διάστημα $[u_0, u_m)$.
- Το διάστημα $[u_i, u_{i+1})$ ονομάζεται ***i*-οστό εύρος κόμβου** (*i*-th knot span). Το εύρος δύναται να είναι και μηδενικό, στην περίπτωση όπου οι διαδοχικοί κόμβοι ταυτίζονται.
- Ο υπολογισμός των βασικών συναρτήσεων βαθμού p βασίζεται στον ακόλουθο τριγωνικό πίνακα:

$$N_{j-p,p}, \dots, N_{j,p}$$

3.15



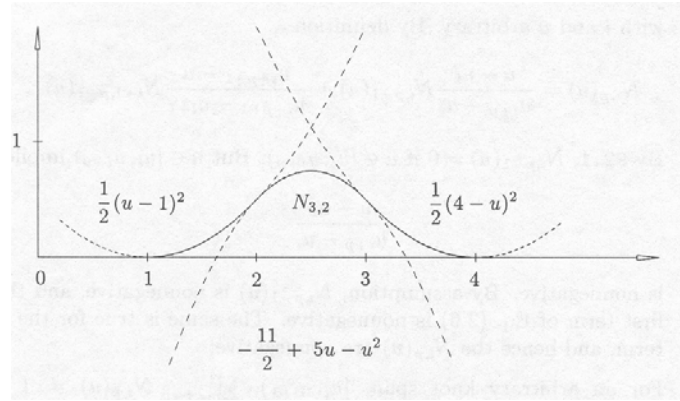
Σχήμα 3.5: Γραφική αναπαράσταση της ιδιότητας της τοπικής επίδρασης
[Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].

- **Μη αρνητικότητα.**
- **Διαμέριση της μονάδας:** για ένα τυχαίο εύρος κόμβου $[u_i, u_{i+1})$ ισχύει:

$$\sum_{j=i-p}^i N_{j,p}(u) = 1 \quad 3.16$$

που έχει ως αποτέλεσμα η καμπύλη και το πολύγωνο ελέγχου να μην αλλάζουν με τους μετασχηματισμούς.

- Όλες οι παράγωγοι των βασικών συναρτήσεων υπάρχουν στο εσωτερικό ενός εύρους κόμβου (όπου η βασική συνάρτηση είναι πολυώνυμο). Πάνω σε έναν κόμβο η βασική συνάρτηση $N_{i,p}(u)$ είναι $p-k$ φορές παραγωγίσιμη, όπου k η **πολλαπλότητα του κόμβου**. Έτσι, αυξάνοντας το βαθμό αυξάνεται η συνέχεια, ενώ αυξάνοντας την πολλαπλότητα του κόμβου, μειώνεται η συνέχεια.



Σχήμα 3.6: αποσύνθεση της $N_{3,2}$ σε πολωνυμικά τμήματα παραβολικής μορφής
[Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].

- Εκτός της περίπτωσης $p=0$, κάθε βασική συνάρτηση διαθέτει **μοναδικό μέγιστο**.

Έστω

$$\{u_i\}, \quad 0 \leq j \leq k \quad 3.17$$

ένα σύνολο breakpoints αυστηρά αύξων. Το σύνολο όλων των τμηματικά πολωνυμικών συναρτήσεων βαθμού p στο $\{u_j\}$, που είναι C^r συνεχείς στη θέση

$$u = u_j \quad 3.18$$

σχηματίζουν ένα **διανυσματικό χώρο**

$$V(-1 \leq r_j \leq p) \quad 3.19$$

Αν δεν υπάρχουν περιορισμοί συνέχειας, τότε για όλα τα j

$$r_j = -1 \quad 3.20$$

Τότε, η διάσταση του διανυσματικού χώρου γίνεται:

$$\dim(V) = k(p+1) \quad 3.21$$

Όπου k το πλήθος των διαστημάτων μεταξύ των breakpoints, $(p+1)$ οι βαθμοί ελευθερίας κάθε τμηματικού πολωνύμου βαθμού p . Επίσης, κάθε μία επιβολή συνθήκης συνέχειας σε ένα breakpoint μειώνει την παραπάνω διάσταση κατά 1:

$$\dim(V) = k(p+1) - \sum_{j=0}^k (r_j + 1) \quad 3.22$$

Επιβάλλοντας τις κατάλληλες πολλαπλότητες s_j , όπου

$$s_j = p - r_j \quad 3.23$$

δύναται να κατασκευαστούν οι βασικές συναρτήσεις βαθμού p με κόμβους στα breakpoints $\{u_j\}$. Έτσι, το διάνυσμα κόμβων δίνεται:

$$U = \left\{ \underbrace{u_0, \dots, u_0}_{J_0}, \underbrace{u_1, \dots, u_1}_{J_1}, \dots, \underbrace{u_k, \dots, u_k}_{J_k} \right\} \quad 3.24$$

όπου η διάστασή του είναι

$$m = \left(\sum_{j=0}^k S_j \right) - 1 \quad 3.25$$

Αυτό συνεπάγεται ότι υπάρχουν m συναρτήσεις μηδενικού βαθμού, $m-1$ πρώτου βαθμού, $m-p$ συναρτήσεις p βαθμού, οι οποίες εμφανίζουν συνέχεια

$$r_j = p - s_j \quad 3.26$$

ενώ η διάσταση του χώρου V προκύπτει ως

$$\dim(V) = m - p \quad 3.27$$

Αποδεικνύεται ότι οι βασικές συναρτήσεις είναι γραμμικώς ανεξάρτητες:

$$\sum_{i=0}^n a_i N_{i,p}(u) = 0, \quad \forall u \quad 3.28$$

Για δεδομένο βαθμό, το διάνυσμα κόμβων ορίζει τις βασικές συναρτήσεις καμπυλών B-Spline. Υπάρχουν ποικίλα διανύσματα κόμβων που χρησιμοποιούνται.

- Το **μη περιοδικό διάνυσμα κόμβων** που δημιουργεί ανοικτές καμπύλες δίδεται ως:

$$U = \left\{ \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \right\} \quad 3.29$$

- Το διάνυσμα κόμβων:

$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\} \quad 3.30$$

δίδει τα πολυώνυμα **Bernstein** βαθμού p . Στην περίπτωση όπου $n = p$, η καμπύλη που προκύπτει είναι **Bezier**.

Αν $m+1$ είναι ο αριθμός των κόμβων, τότε υπάρχουν $n+1$ βασικές συναρτήσεις, για τις οποίες ισχύει

$$n = m - p - 1 \quad 3.31$$

Βάσει της παραπάνω σχέσης υπολογίζεται ο αριθμός των βασικών συναρτήσεων συγκεκριμένου βαθμού p για δεδομένο διάνυσμα κόμβων. Και αντιστρόφως, για δεδομένο αριθμό βασικών συναρτήσεων (για δεδομένο, δηλαδή, αριθμό σημείων ελέγχου $n+1$) προκύπτει η διάσταση του διανύσματος κόμβων

$$m = n + p + 1 \quad 3.32$$

Εν γένει, για τον καθορισμό του διανύσματος κόμβων πρέπει να ισχύει

$$u_i \leq u_{i+1} \quad 3.33$$

και έχουμε τις ακόλουθες δυνατότητες σχηματισμού καμπυλών ανάλογα με το διάνυσμα κόμβων:

- Ομοιόμορφο, **uniform**
- Ανοικτό ομοιόμορφο, **open uniform**
- Ανομοιόμορφο, **non uniform**

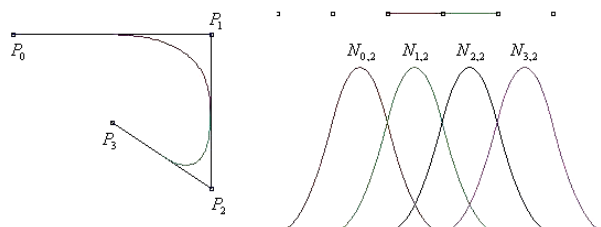
Στο **ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων**, οι επιμέρους κόμβοι **ισαπέχουν** μεταξύ τους. Για παράδειγμα έχουν την μορφή $[0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]$ ή $[0 \ 0.25 \ 0.5 \ 0.75 \ 1.0]$. Ο γενικός τύπος ορισμού του είναι

$$u_{i+1} - u_i = \text{σταθερο} \quad \forall i \quad 3.34$$

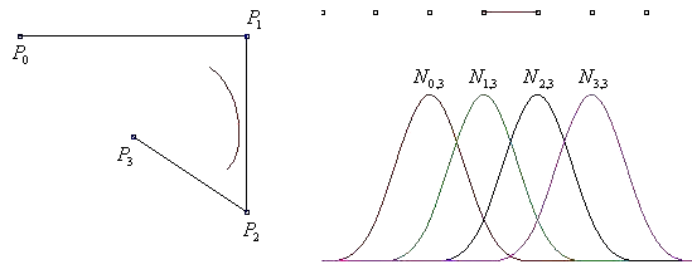
Το **χρήσιμο διάνυσμα κόμβων**, όπου δηλαδή ορίζεται η καμπύλη, παρίσταται ως η γραμμή που ενώνει τους κόμβους πάνω από τις βασικές συναρτήσεις και δίδεται ως

$$(p-2) \leq j \leq n+1 \quad 3.35$$

Για παράδειγμα, μια τετραγωνική και κυβική ομοιόμορφη καμπύλη B-Spline με 4 σημεία ελέγχου δίνεται στα Σχήματα 3.7 και 3.8, που ακολουθούν:



Σχήμα 3.7: Αριστερά απεικονίζεται η τετραγωνική καμπύλη και δεξιά οι βασικές συναρτήσεις της, με τη διάταξη των κόμβων [Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].



Σχήμα 3.8: Αριστερά απεικονίζεται η κυβική καμπύλη και δεξιά οι βασικές συναρτήσεις της, με τη διάταξη των κόμβων [Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].

Στο **ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων**, υπάρχει **πολλαπλότητα** στους ακραίους κόμβους, η οποία ισούται με την τάξη

$$k = p + 1 \quad 3.36$$

των βασικών συναρτήσεων. Οι εσωτερικοί κόμβοι είναι ομοιόμορφα διατεταγμένοι, και δίνονται από τη σχέση που ακολουθεί:

$$\left\{ \begin{array}{ll} u_i = u_1, & i \leq k \\ u_{i+1} - u_i = \text{σταθερο}, & k \leq i < n + 2 \\ u_i = u_{k+(n+1)}, & i \geq n + 2 \end{array} \right\} \quad 3.37$$

Όπου, για $k=2$: [0 0 1 2 3 4 4]

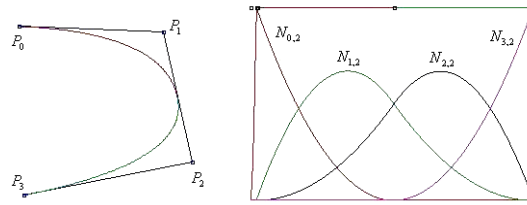
$k=3$: [0 0 0 1 2 3 3 3]

$k=4$: [0 0 0 0 1 2 2 2 2]

Οι καμπύλες B-Spline με **ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων** έχουν την πολύ βασική ιδιότητα η καμπύλη να παρεμβάλλει το αρχικό και τελικό σημείο ελέγχου. Τέλος, στην ειδική περίπτωση όπου ο πρώτος κόμβος είναι μηδενικός και η απόσταση των κόμβων είναι μοναδιαία, το ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα τιμών προσδιορίζεται ως:

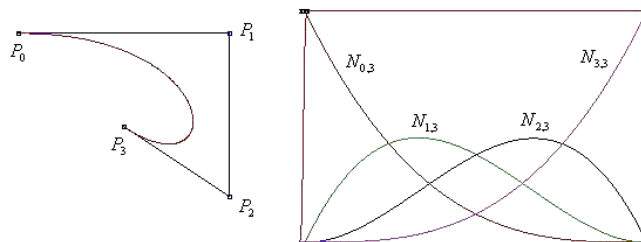
$$u_i = \begin{cases} 0, & 0 \leq i \leq p + 1 \\ i - p, & p + 1 \leq i \leq n + 1 \\ n - p + 1, & n + 1 \leq i \leq n + p + 1 \end{cases} \quad 3.38$$

Για παράδειγμα, μια τετραγωνική και μια κυβική B-Spline με ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων και με 4 σημεία ελέγχου δίνονται αντίστοιχα στα Σχήματα 3.9 και 3.10 που ακολουθούν:



Σχήμα 3.9: Αριστερά απεικονίζεται η τετραγωνική καμπύλη και δεξιά οι βασικές συναρτήσεις της, με τη διάταξη των κόμβων [Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].

Όπου, παρατηρούμε ότι, η καμπύλη ξεκινάει από το αρχικό σημείο ελέγχου και τερματίζει στο τελικό. Αυτό φαίνεται επίσης και στο πεδίο ορισμού της καμπύλης (πάνω από τις βασικές συναρτήσεις) που καλύπτει όλο το φάσμα των κόμβων.



Σχήμα 3.10: αριστερά απεικονίζεται η κυβική καμπύλη και δεξιά οι βασικές συναρτήσεις της με τη διάταξη των κόμβων [Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].

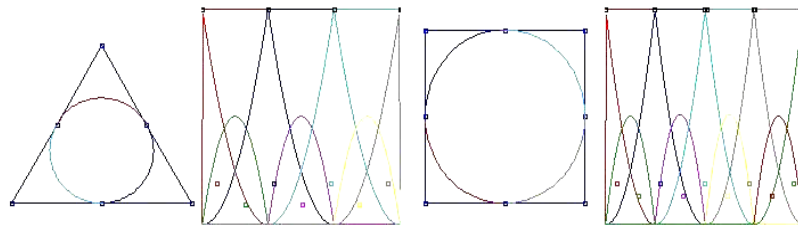
Εδώ γίνεται αισθητή μια πολύ βασική ιδιότητα των B-Spline καμπυλών κατά την οποία ισχύει ότι, όσο αυξάνει ο βαθμός της καμπύλης τόσο αυτές απομακρύνονται από τα σημεία ελέγχου. Στην ειδική περίπτωση των **τετραγωνικών** καμπυλών η καμπύλη τέμνει (ή **εφάπτεται** με) το πολύγωνο ελέγχου ακριβώς στην μέση κάθε πλευράς.

Το **ανομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων** μπορεί να παίρνει τιμές ανομοιόμορφα κατανομημένες ή να έχει πολλαπλούς εσωτερικούς κόμβους και μπορεί να είναι περιοδικό ή ανοικτό, για παράδειγμα $[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2]$ ή $[0 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 4]$ ή $[1 \ 3 \ 7 \ 22 \ 23 \ 23 \ 49 \ 50 \ 50]$. Ο μοναδικός τρόπος περιγραφής κύκλων ή άλλων κωνικών

τομών με B-Spline καμπύλες είναι η χρήση ανομοιόμορφου διάνυσματος κόμβων, όπως γίνεται για την περιγραφή καμπυλών NURBS. Στο Σχήμα 3.11 που ακολουθεί παρουσιάζονται δύο κυβικές NURBS. Η πρώτη σχηματίζεται με 6 σημεία ελέγχου και διάνυσμα κόμβων

$$U = \{0, 0, 0, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{2}{3}, 1, 1, 1\}$$

ενώ η δεύτερη σχηματίζεται με 8 σημεία ελέγχου και διάνυσμα κόμβων



Σχήμα 3.11: περιγραφή κύκλου με ανομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων, [Les Piegl and Wayne Tiller, 1995].

3.6.3 Κατασκευή καμπυλών B-Spline

Έστω ότι θέλουμε να κατασκευάσουμε μια καμπύλη B-Spline, p βαθμού, με ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων. Η καμπύλη ορίζεται:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad a \leq u \leq b \quad 3.39$$

όπου P_i οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου, πλήθους $n+1$ και $N_{i,p}(u)$, $i = 0, 1, \dots, n$ οι Βασικές συναρτήσεις, ίδιου πλήθους με τα σημεία ελέγχου.

Αρχικά κατασκευάζουμε το ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων που δίνεται ως:

$$U = \{a, \dots, a, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, b, \dots, b\} \quad 3.40$$

Πρέπει να ισχύει η εξίσωση (3.32)

$$m = n + p + 1 \quad 3.32$$

με πολλαπλότητα των αρχικών και τελικών κόμβων $p+1$. Η σχέση που δίνει ένα κατάλληλο διάνυσμα κόμβων που ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη είναι η σχέση (3.38) που ακολουθεί:

$$u_i = \begin{cases} 0, & 0 \leq i \leq p+1 \\ i-p, & p+1 \leq i \leq n+1 \\ n-p+1, & n+1 \leq i \leq n+p+1 \end{cases} \quad 3.38$$

Εν συνεχεία, βάση του βαθμού της καμπύλης υπολογίζονται όλες οι βασικές συναρτήσεις βαθμού p , πλήθους $(n+1) - \text{όσα τα σημεία ελέγχου } -, \text{ που αντιστοιχούν στο προηγούμενο διάνυσμα κόμβων και φαίνονται στη σχέση (3.12):}$

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad 3.12$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+p}-u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1}-u}{u_{i+p+1}-u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

Με συγκεκριμένο βήμα Δu , παράγουμε διαδοχικές τιμές στην παράμετρο u . Το διάστημα που κινείται η παράμετρος u για το συγκεκριμένο διάνυσμα κόμβων, είναι το $[0, n-p+1)$, που αντιστοιχεί στο μήκος του διανύσματος κόμβων. Η σχέση που δίνει κάθε σημείο της καμπύλης είναι η γνωστή εξίσωση (3.39) :

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad a \leq u \leq b \quad 3.39$$

Η σχέση είναι διανυσματική, οπότε εφαρμόζεται για όλες τις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου, δίνοντας έτσι τις αντίστοιχες συντεταγμένες του σημείου της καμπύλης, που αντιστοιχεί στην εκάστοτε τιμή της παραμέτρου u .

Οι καμπύλες B-Spline με ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων έχουν τις ακόλουθες σημαντικές ιδιότητες:

- **Ο βαθμός της καμπύλης επιλέγεται από το χρήστη**, αλλά δεδομένου ότι πρέπει να ισχύει η σχέση

$$\begin{aligned} n-k+2 &> 0 \\ n-p+1 &> 0 \end{aligned} \quad 3.41$$

συνεπάγεται ότι απαιτούνται 2, 3 και 4 σημεία ελέγχου για τον προσδιορισμό πρώτου, δεύτερου ή τρίτου βαθμού καμπύλης B-Spline:

$$\begin{aligned} m+1 &= (n+1)+p \\ m &= n+p \end{aligned} \quad 3.42$$

- Στην περίπτωση κατά την οποία ισχύει $n=p$, τότε προκειται για καμπύλη Bezier
- **Τοπικός έλεγχος:** επιτυγχάνεται μετακινώντας ένα σημείο ελέγχου, ή έχοντας πολλαπλότητα σε ένα σημείο ελέγχου, ή αλλάζοντας το βαθμό της καμπύλης. Εν γένει σε μια καμπύλη επηρεάζονται μόνο $p+1$ από τα τμήματά της.
- Η ανοικτή καμπύλη περνάει από τα ακραία σημεία ελέγχου και εφάπτεται στα ακραία τμήματα του πολυγώνου ελέγχου.
- Η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από το βαθμό της
- Η καμπύλη δευτέρου βαθμού εφάπτεται του πολυγώνου ελέγχου στο μέσο του κάθε τμήματος. Αυτό δεν συμβαίνει για καμπύλες μεγαλύτερου βαθμού
- Πολλαπλά σημεία ελέγχου δίνουν υψηλή τιμή καμπυλότητας στο σημείο εκείνο
- Αύξηση του βαθμού της καμπύλης έχει ως αποτέλεσμα δυσκολία ελέγχου της μορφής της, καθώς και της πολυπλοκότητας των υπολογισμών.

4. Το πρόβλημα σχεδίασης για τη συντονισμένη πλοήγηση πολλαπλών μη επανδρωμένων εναέριων αεροσκαφών.

4.1 Αντιμετώπιση του προβλήματος

4.1.1 Γενική περιγραφή του προβλήματος

Η παρούσα μελέτη περιγράφει την ανάπτυξη ενός σχεδιαστή πορείας υπεύθυνου για τη συντονισμένη πλοήγηση, σε θαλάσσιο περιβάλλον, πολλαπλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών, UAVs, και αποφυγή κάθε μορφής πρόσκρουσης. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε αποκλειστικά σε περιβάλλον προσομοίωσης. Ως κώδικας βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ένας έτοιμος Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος (ΔΕΑ - 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 κίνησης των UAVs είναι περιορισμένος, με δυνατότητα για το 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. 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.

4.1.2 Υποθέσεις, περιορισμοί και στόχοι πλοήγησης

Το περιβάλλον κίνησης των UAVs θεωρείται στατικό και γνωστό, χαρακτηριζόμενο από πλήθος νήσων σε κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις. Το ύψος πτήσης των UAVs θεωρείται σχεδόν σταθερό, κοντά στην θαλάσσια επιφάνεια με αποτέλεσμα την 2-D μοντελοποίηση του προβλήματος. Θεωρώντας την εκτόξευση N UAVs από διαφορετικές, γνωστές αρχικές θέσεις, ζητούμενο είναι:

- ο σχεδιασμός N δισδιάστατων τροχιών πτήσης UAVs,
- μοντελοποιημένες σύμφωνα με τη θεωρία των καμπυλών B-Spline,
- επιτυγχάνοντας την επιθυμητή διανομή ταχύτητας σε κάθε τροχιά,
- στοχεύοντας στην προσέγγιση του προκαθορισμένου στόχου,
- αποφεύγοντας παράλληλα κάθε τύπου συγκρούσεων, είτε μεταξύ των UAVs είτε με τα εμπόδια στο χώρο κίνησής τους.

Επιπλέον, οι παραγώμενες τροχιές πτήσης, πρέπει να ικανοποιούν τους συγκεκριμένους περιορισμούς και στόχους πορείας και συντονισμού του παρόντος προβλήματος. Κάθε αεροσκάφος θεωρείται σημειακό, ενώ τα πραγματικά μεγέθη τους λαμβάνονται υπόψη μέσω κατάλληλης τροποποίησης - μεγέθυνσης των εμποδίων.

Ο γενικός περιορισμός του προβλήματος περιγράφεται ως η αποφυγή κάθε μορφής συγκρούσεων μεταξύ των UAVs και προσκρούσεων των UAVs στα νησιά του περιβάλλοντος κίνησής τους.

Οι περιορισμοί τροχιάς διευθετώνται μέσω του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και δίνονται ως ακολούθως:

- Προκαθορισμός των αρχικών και τελικών συντεταγμένων για κάθε UAV,
- προκαθορισμός της αρχικής και τελικής ταχύτητας κάθε UAV,
- προκαθορισμό της ελάχιστης και μέγιστης ταχύτητας κίνησης των UAVs κατά την διάρκεια της πτήσης τους.

Επιπλέον, ο επιβαλλόμενος στόχος τροχιάς δίδεται μέσα από την απαίτηση για ελάχιστου μήκους τροχιές, με απώτερο στόχο την αύξηση της ακτίνας δράσης κάθε αεροσκάφους. Λαμβάνεται υπόψη μέσω του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και της κατάλληλης μοντελοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης.

Οι στόχοι συντονισμού για την παρούσα μελέτη δίνονται μέσω των ακόλουθων απαιτήσεων:

- Κάθε αεροσκάφος πρέπει να προσεγγίσει το στόχο χρησιμοποιώντας διαφορετική διαδρομή και διεύθυνση προσανατολισμού,
- όλα τα αεροσκάφη πρέπει να προσεγγίσουν το στόχο ταυτόχρονα ή έχοντας την ελάχιστη δυνατή χρονική διαφορά μεταξύ τους,
- προσέγγιση του στόχου από διαφορετικές κατευθύνσεις. Ο συγκεκριμένος αντικειμενικός σκοπός εκφράζεται μέσω της απαίτησης ισοδύναμων διαδοχικών γωνιών κατεύθυνσης, για την εξασφάλιση ομοιόμορφης κατανομής των UAVs γύρω από τον στόχο και επομένως για τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας επιτυχίας της αποστολής.

Ο περιορισμός συντονισμού εκφράζεται μέσω της απαίτησης διατήρησης μιας ελάχιστης απόστασης ασφαλείας μεταξύ των UAVs προκειμένου να διασφαλιστεί:

- η αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των αεροσκαφών,
- ο χωρικός διαχωρισμός των παραγόμενων διαδρομών για την αύξηση της πιθανότητας επιβίωσης των UAVs και επομένως επίτευξης της αποστολής.

4.1.3 Μοντελοποίηση των ρομποτικών διαδρομών μέσω της χρήσης καμπυλών B-Spline

Κάθε τροχιά πτήσης των μη επανδρωμένων εναέριων αεροσκαφών περιγράφεται ως καμπύλη B-Spline. Παρότι, οι παραγόμενες καμπύλες περιγράφονται στο φυσικό χώρο ως διδιάστατες, στην παρούσα μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται τριδιάστατες B-Spline καμπύλες για την περιγραφή της πτήσης των αεροσκαφών. Οι δύο πρώτες διαστάσεις αντιστοιχούν στον καθορισμό των x , y συντεταγμένων κίνησης των UAVs στο φυσικό χώρο, ενώ η τρίτη διάσταση αντιστοιχεί στην ταχύτητα c του αεροσκάφους κατά μήκος της τροχιάς του. Για το λόγο αυτό κάθε B-Spline σημείο ελέγχου ορίζεται από τρεις αριθμούς:

$$x_{k,j}, y_{k,j}, c_{k,j} \quad (k=0, \dots, n, \quad j=1, \dots, N) \quad 4.1$$

όπου N ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων UAVs και $n+1$ ο αριθμός των σημείων ελέγχου (control points) κάθε καμπύλης B-Spline (ίδιος για κάθε καμπύλη).

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ομαλή κατανομή της ταχύτητας κατά μήκος κάθε εναέριας διαδρομής. Το πρώτο ($k=0$) και τελικό ($k=n$) σημεία ελέγχου του

πολύγωνου ελέγχου, αντιστοιχούν στο σημείο εκκίνησης και το τελικό σημείο του στόχου για το j^{th} UAV, τα οποία προκαθορίζονται από τον χρήστη πριν από την έναρξη της προσομοίωσης. Ομοίως, η ταχύτητα στα αντίστοιχα σημεία εκκίνησης και άφιξης στο στόχο για το j^{th} UAV περιγράφεται από τις μεταβλητές c_{0j} , c_{nj} .

Το πολύγωνο ελέγχου κάθε B-Spline καμπύλης περιγράφεται από διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα. Το μήκος seg_length_{kj} και η κατεύθυνση seg_angle_{kj} κάθε ευθύγραμμου τμήματος χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές σχεδίασης ($k=1, \dots, n-1$, $j=1, \dots, N$). Η μεταβλητή σχεδίασης που περιγράφει την κατεύθυνση κάθε ευθύγραμμου τμήματος που απαρτίζει το πολύγωνο ελέγχου κάθε καμπύλης B – Spline, seg_angle_{kj} υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της διεύθυνσης (σε μοίρες) του τρέχοντος μείον του προηγούμενου ευθύγραμμου τμήματος, μετρούμενη από τον x -άξονα. Επιπλέον μεταβλητή σχεδίασης είναι και η ταχύτητα κάθε αεροσκάφους σε κάθε σημείο ελέγχου, εκτός του αρχικού και τελικού (που είναι προκαθορισμένες από τον χρήστη).

Οι συντεταγμένες κάθε σημείου $x_{k,j}$, $y_{k,j}$, κάθε τροχιάς πτήσης υπολογίζονται πολύ εύκολα γνωρίζοντας το μήκος seg_length_{kj} και τη διεύθυνση seg_angle_{kj} κάθε ευθύγραμμου τμήματος. Η χρήση του seg_length_{kj} και της seg_angle_{kj} κάθε ευθύγραμμου τμήματος του πολύγωνου ελέγχου ως μεταβλητές σχεδίασης αντί των $x_{k,j}$, $y_{k,j}$ υιοθετήθηκε για δύο κύριες αιτίες:

- Οι απότομες στροφές σε κάθε πτήση δύναται πολύ εύκολα να αποφευχθούν με κατάλληλη οριοθέτηση των άνω και κάτω ορίων της μεταβλητής σχεδίασης που περιγράφει τη διεύθυνση κίνησης των αεροσκαφών, seg_angle_{kj} , επιτρέποντας απλά τη μικρή διακύμανση στο πεδίο των επιθυμητών τιμών.
- Επιτυγχάνεται έτσι καλύτερος βαθμός σύγκλισης, εξαιτίας της μείωσης του χώρου αναζήτησης των λύσεων.

Τα κάτω και άνω όρια κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής σχεδίασης προκαθορίζονται από τον χρήστη. Τα όρια για την ταχύτητα των UAVs εξαρτώνται από το φάκελο πτήσης κάθε αεροσκάφους. Για το πρώτο ευθύγραμμο τμήμα κάθε πολύγωνου ελέγχου τα άνω και κάτω όρια για την διεύθυνση των αεροσκαφών επιλέγονται με τρόπο ώστε να επιτρέπεται ο καθορισμός μιας εφικτής και κατάλληλης διεύθυνσης πτήσης. Τέλος, η επιλογή για τις υπόλοιπες μεταβλητές διεύθυνσης τιμών κοντά στο μηδέν σε μοίρες (για περάδειγμα -30° με 30°) οδηγεί στην αποφυγή απότομων στροφών των αεροσκαφών κατά την πτήση τους.

4.1.4 Περιγραφή της συνάρτησης κόστους

Η αναζήτηση της βέλτιστης εναέριας διαδρομής κάθε αεροσκάφους έχει μοντελοποιηθεί ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Η συνάρτηση κόστους που περιγράφει το κριτήριο αξιολόγησης των υποψηφίων λύσεων του προβλήματος έχει διατυπωθεί ως το βαθμονομημένο άθροισμα πέντε διαφορετικών όρων, κάθε ένας εκ των οποίων περιγράφει τις απαιτήσεις πτήσης και συντονισμού που αναλύθηκαν παραπάνω:

$$f = \sum_{i=1}^5 w_i f_i \quad 4.2$$

όπου, w_i είναι τα βάρη, υπολογίζονται πειραματικά και στοχεύουν στην στάθμιση των διαφορετικών απαιτήσεων του προβλήματος και f_i είναι οι υποσυναρτήσεις που περιγράφουν τις διαφορετικές και σε πολλές περιπτώσεις αντικρουόμενες απαιτήσεις του προβλήματος. Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή τους.

Ο όρος f_1 αντιστοιχεί στον περιορισμό πτήσης που ρυθμίζει την απαίτηση για ελάχιστου μήκους τροχιές των αεροσκαφών. Ορίζεται ως το αδιάστατο άθροισμα των μηκών όλων των N τροχιών (B-Spline καμπύλων). Δίνεται ως:

$$f_1 = \sum_{j=1}^N l_j \quad 4.3$$

όπου, l_j το αδιάστατο μήκος της j^{th} διαδρομής που περιγράφεται από τη σχέση:

$$l_j = \frac{L_j}{\sqrt{\left(x_{target} - x_{0,j}\right)^2 + \left(y_{target} - y_{0,j}\right)^2}}^{-1} \quad 4.4$$

όπου,

L_j το μήκος της j^{th} διαδρομής,

x_{target}, y_{target} οι συντεταγμένες του στόχου,

$x_{0,j}, y_{0,j}$ οι συντεταγμένες εκκίνησης του j^{th} UAV.

Για τον υπολογισμό του l_j που δίνεται από τη παραπάνω σχέση (4.4) υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ του σημείου του στόχου και του σημείου εκκίνησης του j^{th} UAV προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι $f_1 = 0$ στην περίπτωση διαδρομών χαρακτηριζόμενων από ευθύγραμμα τμήματα.

Ο όρος f_2 της συνάρτησης κόστους είναι ένας όρος ποινής. Έχει σχεδιαστεί για την υλοποίηση του γενικού περιορισμού του προβλήματος υπεύθυνου για τη

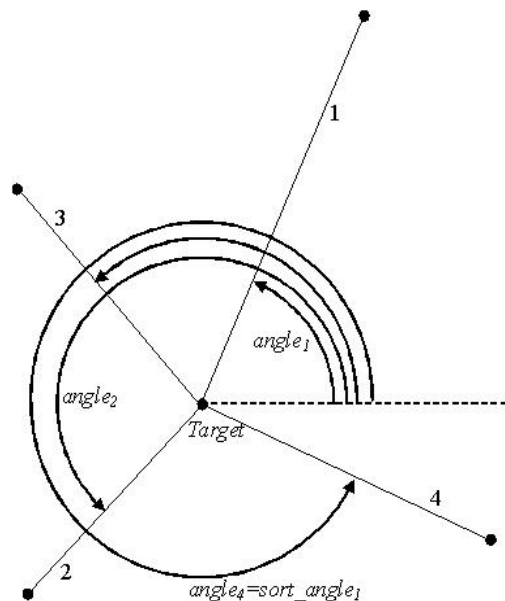
διαχείριση της απαίτησης αποφυγής κάθε μορφής συγκρούσεων. Όλες οι N πτήσεις των N UAVs ελέγχονται εάν περνούν μέσα από κάθε ένα M εμπόδιο του εδάφους. Διακριτά τμήματα λαμβάνονται κατά μήκος κάθε B-Spline καμπύλης και ελέγχονται εάν βρίσκονται στο εσωτερικό κάθε εμποδίου. Στην περίπτωση όπου κάποιο διακριτό σημείο της τροχιάς ενός αεροσκάφους περνάει μέσα από εμπόδιο του εδάφους τότε η τιμή του f_2 αυξάνεται κατά ένα σταθερό ποσό. Επόμενως, ο όρος f_2 είναι ανάλογος του πλήθους των διακριτών σημείων που βρίσκονται στο εσωτερικό των εμποδίων του εδάφους.

Ο όρος f_3 έχει σχεδιαστεί για τη ρύθμιση της απαίτησης προσέγγισης του στόχου από διαφορετικές διευθύνσεις. Αρχικά, υπολογίζεται η αζιμούθιος γωνία από το τελευταίο ευθύγραμμο τμήμα του πολυγώνου ελέγχου κάθε B-Spline τροχιάς, όπως προκύπτει από την εφαρμογή των παρακάτω εξισώσεων και φαίνεται στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί:

$$angle_j = \begin{cases} \arctan(\Delta y / \Delta x) & \text{if } \Delta y \geq 0, \Delta x \geq 0 \\ 2\pi - \arctan(\Delta y / \Delta x) & \text{if } \Delta y < 0, \Delta x \geq 0 \\ \pi + \arctan(\Delta y / \Delta x) & \text{if } \Delta x < 0 \end{cases} \quad 4.5$$

όπου

$$\Delta y = y_{n-1,j} - y_{n,j} \quad \text{και} \quad \Delta x = x_{n-1,j} - x_{n,j} \quad 4.6$$



Σχήμα 4.1: Ορισμός των αζιμούθιων γωνιών, υπολογιζόμενες από το τελικό ευθύγραμμο τμήμα κάθε πολύγωνου ελέγχου κάθε τροχιάς.

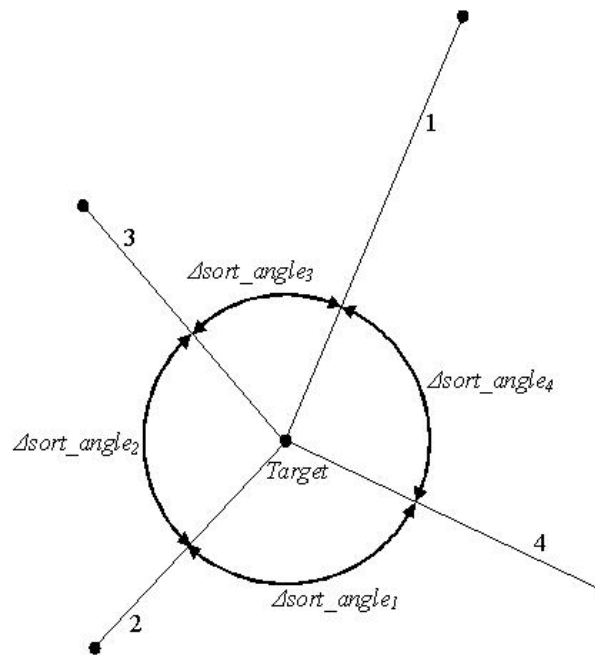
Εν συνεχεία, όλες οι αζιμούθιες γωνίες $angle_j$ ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά και αποθηκεύονται στη μεταβλητή $sort_angle_j$. Υπολογίζεται η μεταβλητή $sort_angle_{N+1}$:

$$sort_angle_{N+1} = sort_angle_1 - 2\pi \quad 4.7$$

καθώς, και οι διαφορές μεταξύ διαδοχικά ταξινομημένων αζιμούθιων γωνιών:

$$\Delta sort_angle_j = sort_angle_j - sort_angle_{j+1}, \quad j=1, \dots, N \quad 4.8$$

όπου, $\Delta sort_angle_j$ είναι η γωνία μεταξύ δύο διαδοχικών τροχιών κατά τη στιγμή προσέγγισης του στόχου (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Ορισμός των $\Delta sort_angle_j$ σύμφωνα με τη σχέση (4.8).

Τέλος, ορίζεται η βέλτιστη γωνία ως:

$$opt_angle = 2\pi/N \quad 4.9$$

η γωνία, δηλαδή, μεταξύ διαδοχικών B-Spline τροχιών κατά την άφιξή τους στο στόχο, με απαίτηση την ομοιόμορφη κατανομή τους γύρω από αυτόν. Έτσι, ο όρος f_3 δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας όρος ποινής, που εκφράζεται μέσω του πηλίκου του αθροίσματος της διαφοράς της βέλτιστης επιθυμητής γωνίας προσέγγισης του

στόχου μείον της “πραγματικής” διά μιας γωνίας αναφοράς ref_angle που εξασφαλίζει την αδιάστατη μορφή του όρου και παίρνει την τιμή $\pi/20$:

$$f_3 = \frac{\sum_{j=1}^N |opt_angle - \Delta sort_angle_j|}{ref_angle} \quad 4.10$$

Ο όρος f_4 περιγράφει τον περιορισμό συντονισμού που διαχειρίζεται την απαίτηση διατήρησης μιας προκαθορισμένης απόστασης ασφαλείας d_{safe} μεταξύ των μη επανδρωμένων αεροσκαφών. **Ο όρος f_5** ρυθμίζει την αξίωση για ταυτόχρονη άφιξη των UAVs στον στόχο. Για τον υπολογισμό τους απαιτείται προσομοίωση της κίνησης των UAVs.

Κάθε υπονήφια λύση ορίζεται από τις αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών σχεδίασης: το μήκος seg_length_{kj} και η κατεύθυνση seg_angle_{kj} κάθε ευθύγραμμου τμήματος ($k=1, \dots, n-1, j=1, \dots, N$) καθώς και την ταχύτητα c_{kj} του j^{th} UAV σε κάθε ένα από αυτά. Έχοντας λοιπόν κάθε χρονική στιγμή τις τιμές αυτές, υπολογίζονται πολύ εύκολα οι συντεταγμένες κάθε σημείου κάθε καμπύλης B-Spline, οι συντεταγμένες δηλαδή των διαδοχικών σημείων της τροχιάς κάθε αεροσκάφους. Πρέπει να σημειωθεί ότι ταυτόχρονα με τη θέση κάθε UAV γνωρίζουμε και την ταχύτητά του σε κάθε σημείο της τροχιάς, αφού εκτός του αρχικού και τελικού σημείου που είναι ήδη προκαθορισμένα από τον χρήστη, η μεταβλητή της ταχύτητας για τα υπόλοιπα σημεία ελέγχου που περιγράφουν κάθε εναέρια διαδρομή αποτελεί επίσης μεταβλητή σχεδίασης του προβλήματος. Υποθέτοντας ταυτόχρονη απογείωση όλων των αεροσκαφών τη χρονική στιγμή μηδέν, $t=0$, εκτελείται η προσομοίωση της κίνησής τους.

Σύμφωνα με τη θεωρία των καμπυλών B-Spline όπως περιγράφηκε στο 3^ο Κεφάλαιο κάθε καμπύλη κατασκευάζεται στο φυσικό χώρο δίνοντας συγκεκριμένες τιμές στην παράμετρο u στον παραμετρικό χώρο. Με σταθερό βήμα u υπολογίζονται διακριτά σημεία κατά μήκος κάθε καμπύλης και προκύπτουν οι συντεταγμένες των σημείων της καθώς και η ταχύτητα σε κάθε ένα από αυτά. Έχοντας τώρα τις συντεταγμένες x , y και την ταχύτητα c κάθε UAV σε κάθε διακριτό σημείο, καθορίζεται ο αναγκαίος χρόνος προσέγγισης του επόμενου σημείου της τροχιάς για όλα τα αεροσκάφη και επομένως ο τελικός χρόνος προσέγγισης του στόχου. Ο χρόνος προσέγγισης κάθε UAV στο στόχο αποθηκεύεται στη μεταβλητή t_curr_j .

Λαμβάνοντας ένα σταθερό χρονικό βήμα, εκτελούνται γραμμικές παρεμβολές μεταξύ διαδοχικών διακριτών σημείων για τον προσδιορισμό σε κάθε χρονική στιγμή της θέσης κάθε UAV. Έτσι, δύναται ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ των αεροσκάφων κάθε χρονική στιγμή και επομένως ο έλεγχος διατήρησης της προκαθορισμένης από τον χρήστη απόσταση ασφαλείας d_{safe} . Στην περίπτωση όπου καταπατείται η συγκεκριμένη απαίτηση, προστίθεται ποινή στον όρο f_4 .

Τέλος, ο όρος f_5 υπολογίζεται από τη σχέση που ακολουθεί

$$f_5 = \sum_{j=1}^N (t_{max} - t_{curr_j}) / t_{max} \quad 4.11$$

όπου, t_{max} ο χρόνος άφιξης του τελευταίου UAV στο στόχο.

Κάτα την ολοκλήρωση της περιγραφής των όρων που απαρτίζουν τη συνάρτηση κόστους του προβλήματος πρέπει να σημειωθεί ότι δεδομένης της κύριας απαίτησης για ασφαλείς διαδρομές το γινόμενο $w_2 f_2$ κυριαρχεί των άλλων όρων.

4.1.5 Αναπαράσταση των λύσεων

Ζητείται η εύρεση των διαδρομών εκείνων που θα οδηγήσουν τα UAV στην ασφαλή προσσέγγιση του στόχου, ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς πορείας και συντονισμού του προβλήματος. Οι τροχιές περιγράφονται από τρισδιάστατες B-Spline καμπύλες όπως προαναφέραμε και αναλύσαμε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου. Οι μεταβλητές σχεδίασης (μεταφράζονται ως το μήκος και η διεύθυνση των ευθύγραμμων τμημάτων που ορίζουν τα πολύγωνα ελέγχου για τη σχεδίαση κάθε καμπύλης καθώς και τη ταχύτητα που επιβάλλεται να έχουν τα αεροσκάφη σε κάθε σημείο της τροχιάς, προκειμένου να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του εξεταζόμενου προβλήματος πλοήγησης) μπορούν να συνδυαστούν ιδανικά με τη λύση του προβλήματος με χρήση εξελικτικών μεθόδων. Έτσι, κάθε γονίδιο πέρνει μια πραγματική τιμή που αντιπροσωπεύει είτε το μήκος, είτε τη διεύθυνση των ευθύγραμμων τμημάτων που ορίζουν τα πολύγωνα ελέγχου των καμπυλών ή την ταχύτητα που επιβάλλεται να έχουν τα UAVs στο συγκεκριμένο σημείο ελέγχου. Δύο από τα σημεία κάθε τροχιάς είναι σταθερά: το πρώτο και το τελευταίο, που ορίζουν το σημείο εκκίνησης και το τελικό σημείο του στόχου (για κάθε UAV). 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 της τροχιάς δύναται να πάρει οποιαδήποτε θέση (εντός του επιτρεπτού χώρου) και συνεπώς, να ορίσει μια διαφορετική πτήση. Οι ταχύτητες στα εσωτερικά σημεία ελέγχου παίρνουν τιμές μεταξύ ορίων που ορίζονται από τον χρήστη και στοχεύουν στην επίτευξη ομαλών διαδρομών, πτήσεων χωρίς απότομες στροφές.

Αναλυτικότερα, στην περίπτωση όπου εξετάζεται η κίνηση τριών UAVs, κάθε ένα από τα οποία έχει προκαθοριστεί να περάσει από δύο ενδιάμεσα σημεία ελέγχου, προκειμένου να προσεγγίσει τον κοινό στόχο τους, το χρωμόσωμα αποτελείται από 18 γονίδια ($nvars=18$) και έχει την ακόλουθη μορφή:

<code>seg_length₁₁</code>	<code>seg_angle₁₁</code>	<code>c₁₁</code>	<code>seg_length₂₁</code>	<code>seg_angle₂₁</code>	<code>c₂₁</code>
<code>seg_length₁₂</code>	<code>seg_angle₁₂</code>	<code>c₁₂</code>	<code>seg_length₂₂</code>	<code>seg_angle₂₂</code>	<code>c₂₂</code>
<code>seg_length₁₃</code>	<code>seg_angle₁₃</code>	<code>c₁₃</code>	<code>seg_length₂₃</code>	<code>seg_angle₂₃</code>	<code>c₂₃</code>

όπου,

seg_length₁₁: το μήκος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος του πολύγωνου ελέγχου για το σχεδιασμό της τροχιάς πτήσης του 1^{ου} UAV.

seg_angle₁₁: η διεύθυνση του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος του πολύγωνου ελέγχου για το σχεδιασμό της τροχιάς πτήσης του 1^{ου} UAV.

c₁₁: η ταχύτητα που επιβάλλεται να έχει το 1^ο UAV στο 1^ο σημείο ελέγχου της τροχιάς.

seg_length₂₁: το μήκος του δεύτερου ευθύγραμμου τμήματος του πολύγωνου ελέγχου για το σχεδιασμό της τροχιάς πτήσης του 1^{ου} UAV.

seg_angle₂₁: η διεύθυνση του δεύτερου ευθύγραμμου τμήματος του πολύγωνου ελέγχου για το σχεδιασμό της τροχιάς πτήσης του 1^{ου} UAV.

c_{21} : η ταχύτητα που επιβάλλεται να έχει το 1^ο UAV στο 2^ο σημείο ελέγχου της τροχιάς.

seg_length_{12} : το μήκος του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος του πολύγωνου ελέγχου για το σχεδιασμό της τροχιάς πτήσης του 2^{ου} UAV.

seg_angle_{12} : η διεύθυνση του πρώτου ευθύγραμμου τμήματος του πολύγωνου ελέγχου για το σχεδιασμό της τροχιάς πτήσης του 2^{ου} UAV.

c_{12} : η ταχύτητα που επιβάλλεται να έχει το 2^ο UAV στο 1^ο σημείο ελέγχου της τροχιάς, κ.λπ.

4.2 Αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου

Αρχεία εισόδου

Στην παρούσα μελέτη ως μέθοδος βελτιστοποίησης του προβλήματος της συντονισμένης πλοήγησης εναέριων μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs), εφαρμόστηκε ο Διαφορικός Εξελικτικός Αλγόριθμος που περιγράφεται στην εργασία [Ioannis K. Nikolos, 2004]. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να καλεί εξωτερικά προγράμματα για την επίλυση κάθε προβλήματος εφαρμογής του. Για τον προσδιορισμό και υπολογισμό της συνάρτησης προσαρμογής που περιγράφει κάθε τυχαίο χρωμόσωμα και επομένως κάθε υποψήφιας εναέριας διαδρομής, αναπτύχθηκε κατάλληλο πρόγραμμα σε Visual Basic. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος καλεί τρία αρχεία εισόδου που παράγει ένα αρχείο εξόδου, στο οποίο τυπώνεται η βέλτιστη τιμή της συνάρτησης, καθώς και οι τρέχουσες τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης. Αναλυτικότερα, οι είσοδοι είναι:

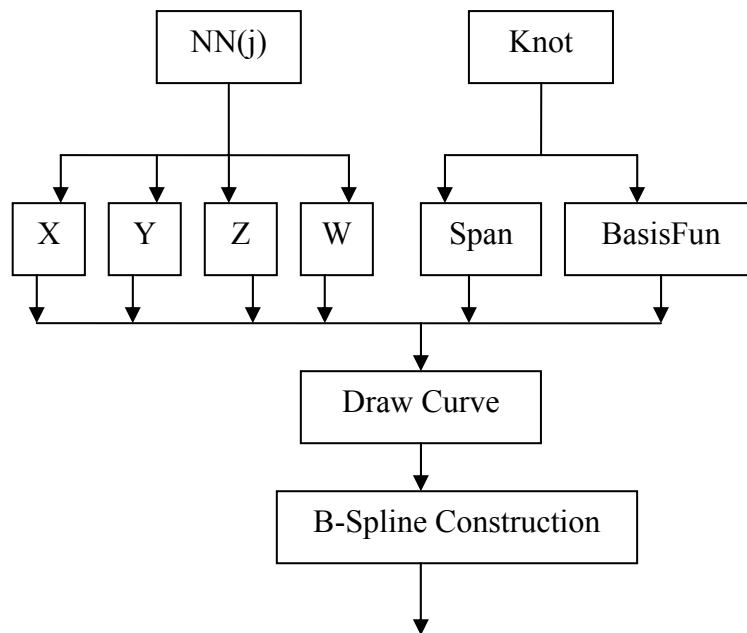
- το αρχείο “Robot. txt”: καθορίζεται ο αριθμός των UAVs που θα κινηθούν στον επιτρεπτό χώρο, η μεταξύ τους απόσταση ασφαλείας (d_{safe}), οι συντεταγμένες της θέσης εκκίνησης και του στόχου για κάθε ένα από αυτά καθώς και η αρχική και τελική ταχύτητά τους.

- το αρχείο “obstacle. txt”: καθορίζεται ο αριθμός των εμποδίων (NO) που υπάρχουν μέσα στον επιτρεπτό χώρο κίνησης των αεροσκαφών, το πλήθος των κορυφών τους ($NP(j)$) καθώς, οι συντεταγμένες της θέσης τους ($XP(i,j)$, $YP(i,j)$).
- το αρχείο “chromosome. txt”: περιέχει το χρωμόσωμα περιγραφής κάθε υποψήφιας λύσης και παράγεται από τον DE αλγόριθμο. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα τα γονίδια του χρωμοσώματος αντιστοιχούν στις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος, δηλαδή, στο μήκος και την κατεύθυνση των ευθύγραμμων τμημάτων που περιγράφουν το πολύγωνο ελέγχου κάθε υποψήφιας B-Spline καμπύλης και επομένως τροχιάς, καθώς και στην ταχύτητα με την οποία πρέπει να κινούνται τα UAVs για να προσεγγίσουν το στόχο με ασφάλεια και συνέπεια απέναντι στις απαιτήσεις του προβλήματος. Τέλος, ορίζεται ο αριθμός των γονιδίων, των ελεύθερων δηλαδή παραμέτρων του προβλήματος. Όλες οι τροχιές διαθέτουν ακριβώς τον ίδιο αριθμό σημείων ελέγχου που προκύπτει από τον αριθμό των γονιδίων και τον αριθμό των UAVs που συμμετέχουν σε κάθε αποστολή.

Για τον προσδιορισμό κάθε όρου σχηματισμού της συνάρτησης αξιολόγησης έχουν αναπτυχθεί κατάλληλες προγραμματιστικές συναρτήσεις, οι οποίες ομαδοποιούν τον ευρύτερο κώδικα σε δύο κύρια υποπρογράμματα: *Κατασκευής B-Spline Καμπυλών* και *Συντονισμένης Πλοήγησης*. Αναλυτικότερα:

Κατασκευή B-Spline Καμπυλών

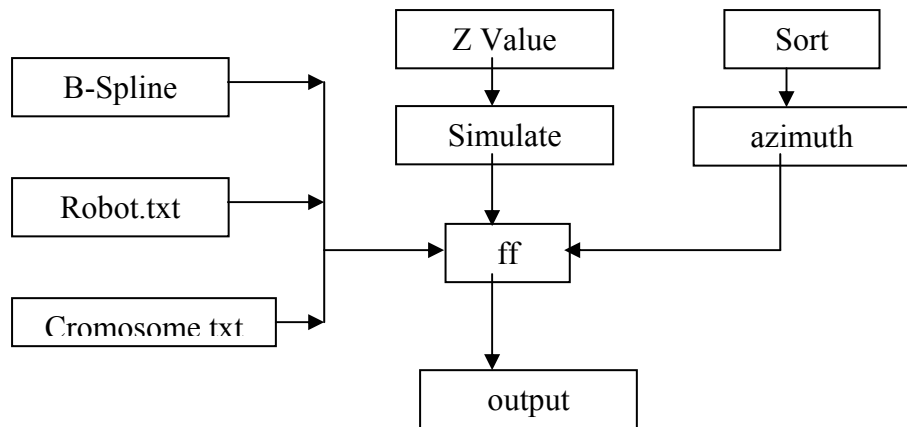
Η κύρια δράση του συγκεκριμένου υποπρογράμματος αφορά στη δημιουργία και αναπαράσταση των καμπυλών περιγραφής των εξεταζόμενων διαδρομών, για όλα τα αεροσκάφη που συμμετέχουν. Η δομή του δίδεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Δομικό διάγραμμα του υποπρογράμματος κατασκευής καμπυλών *B-Spline*.

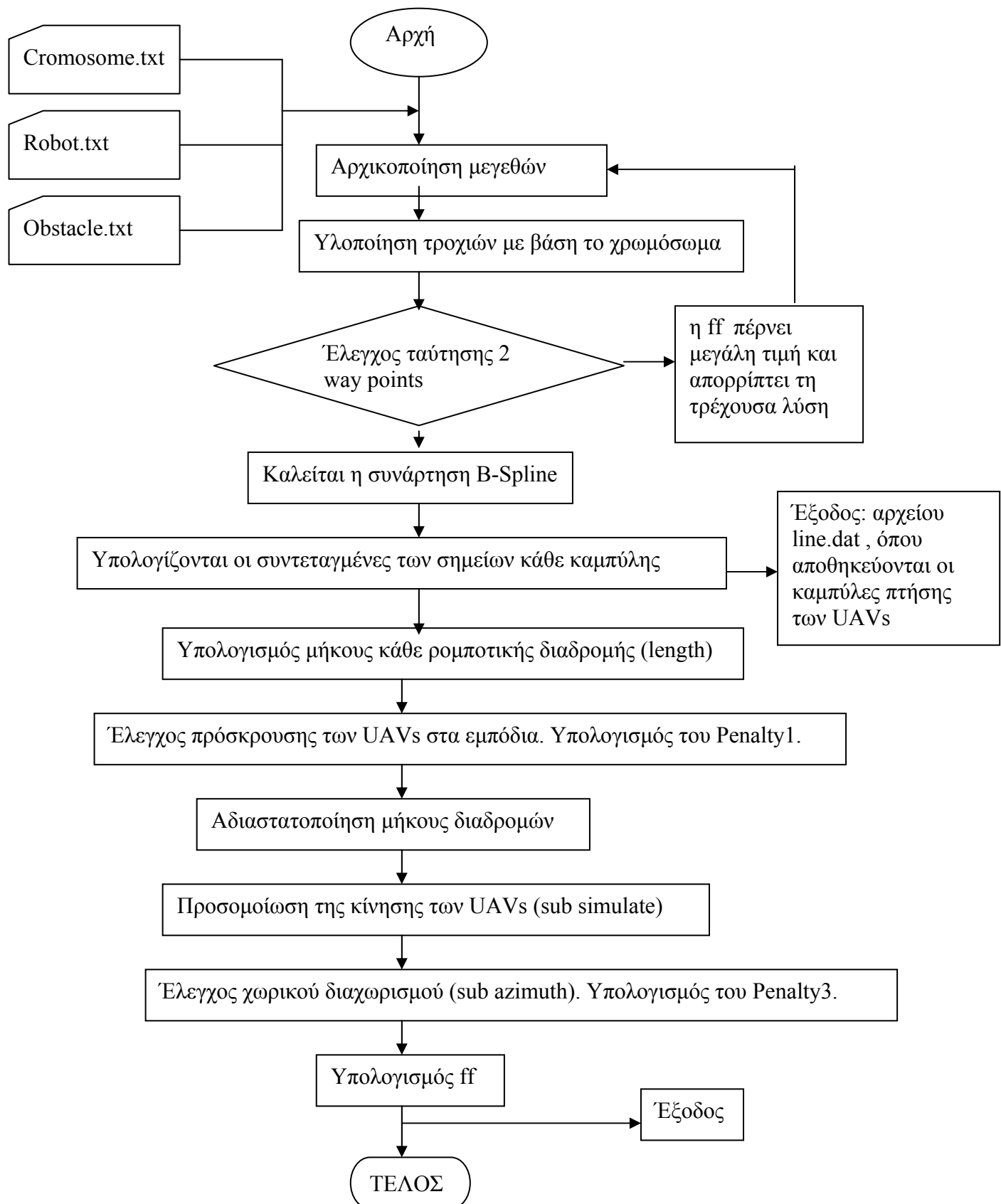
Συντονισμένης Πλοήγησης

Το συγκεκριμένο υποπρόγραμμα είναι υπεύθυνο για την προσομοίωση της συντονισμένης πλοήγησης των UAVs. Όπως προαναφέρθηκε, καλούνται εξωτερικά αρχεία για την εισαγωγή των προκαθορισμένων από τον χρήστη ρυθμιστικών παραμέτρων του προβλήματος που μελετάται. Στην συγκεκριμένη προγραμματιστική υπομονάδα, περιγράφονται και ορίζονται όλοι οι όροι που συνιστούν τη συνάρτηση προσαρμογής και παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου. Εκτελείτε χρονική προσομοίωση για τον προσδιορισμό των συναρτήσεων ποινής, εξετάζεται η ισχύς των περιορισμών και τέλος καλείται ο διαφορικός αλγόριθμος ως εργαλείο εξερεύνησης της βέλτιστης λύσης του τρέχοντος σεναρίου πλοήγησης. Το δομικό διάγραμμα δίδεται στο Σχήμα 4.4.

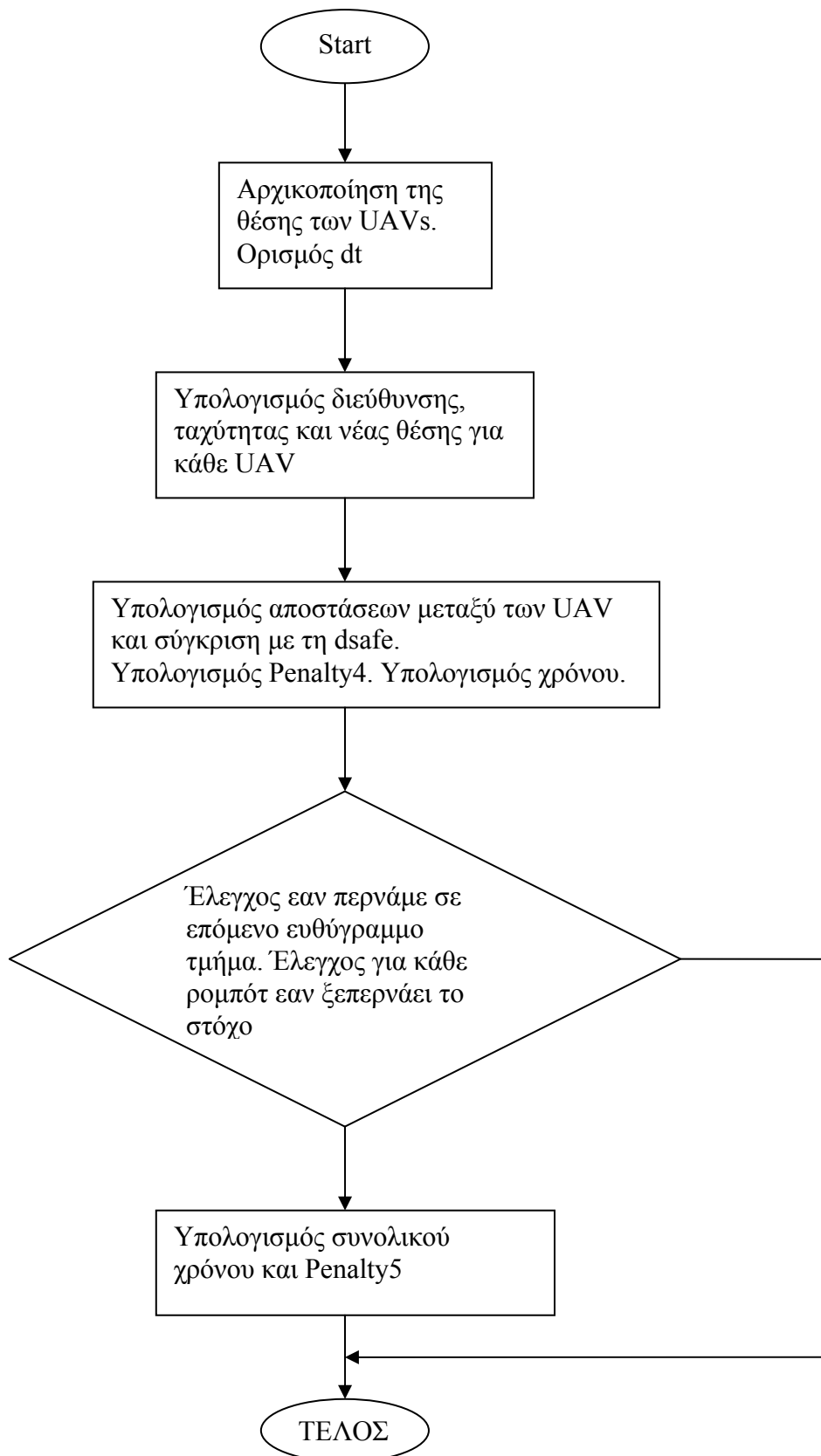


Σχήμα 4.4 Δομικό διάγραμμα του υποπρογράμματος συντονισμένης πλοήγησης.

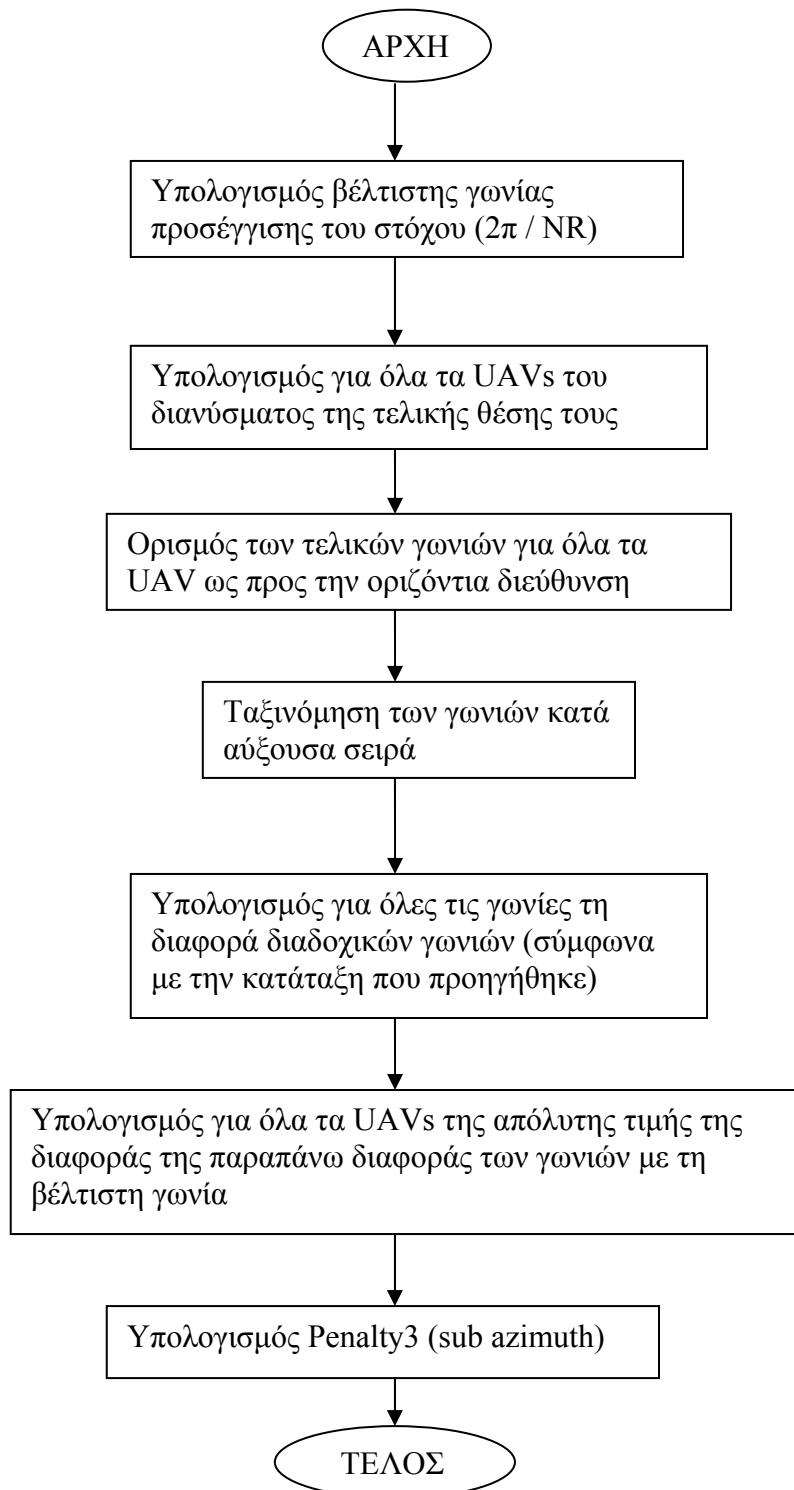
4.3 Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου



4.4 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας simulate



4.5 Διάγραμμα ροής υπορουτίνας azimuth



5. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

5.1 Γενικά

Το περιβάλλον κίνησης των UAVs αποδίδεται ως τρισδιάστατη επιφάνεια πλέγματος η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της σχέσεως (5.1):

$$z(x, y) = \sin(y + a) + b \sin(x) + c \cos(d \sqrt{y^2 + x^2}) + e \cos(y) + f \sin(f \sqrt{y^2 + x^2}) + g \cos(y) \quad 5.1$$

όπου όροι a , b , c , d , e και f είναι σταθερές οι τιμές των οποίων προσδιορίζονται πειραματικά. Για τον καθορισμό τους ζητούμενο στην παρούσα μελέτη είναι η επιφάνεια εδάφους να προσομοιώνει μια θαλάσσια επιφάνεια όπου υπάρχουν νησιά σε κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις.

Ακολουθούν, τα αποτελέσματα της off-line προσομοίωσης για τη συντονισμένη κίνηση των αεροσκαφών. Τα ρομποτικά οχήματα θεωρούνται σημειακά και στη μοντελοποίηση των εμποδίων-νήσων έχουν συνυπολογισθεί οι διαστάσεις των ρομποτικών οχημάτων, ώστε οι προκύπτουσες διαδρομές να είναι οι ασφαλέστερες δυνατές. Εξετάστηκαν διάφορα σενάρια πτήσης που διαφοροποιούνται μεταξύ τους είτε ως προς το μήκος του χρωμοσώματος, είτε εξαιτίας της μεταβολής των προκαθορισμένων από τον χρήστη παραμέτρων του προβλήματος.

Για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια έχει χρησιμοποιηθεί το ίδιο τεχνητό περιβάλλον. Η διαφοροποίησή τους έγκειται στον καθορισμό των σημείων εκκίνησης και της θέσεως του στόχου. Οι βαθμωτοί παράμετροι του διαφορικού αλγορίθμου για όλα τα σενάρια είναι:

- **μέγεθος πληθυσμού**, που αντιστοιχεί στην επιλογή του αριθμού των προς εξέταση υποψηφίων λύσεων: `population_size = 50`

- **παράμετρος ελέγχου** ενίσχυσης της προστιθέμενης διαταραχής στο δωρητή, για το προτεινόμενο σχέδιο μετάλλαξης του αλγορίθμου: $F= 0.99$
- **πιθανότητα διασταύρωσης** των υποψήφειων λύσεων κάθε γεννιάς: $C_r= 0.85$

Ο τερματισμός του αλγορίθμου καθορίστηκε στην εκτέλεση 500 γεννεών, $\max_gens= 500$. Ωστόσο, εφικτές λύσεις παρέχονται σε λιγότερο από 30 γενεές. Και για τα τέσσερα σενάρια που μελετήθηκαν, ο αριθμός των ελεύθερων σημείων εκκίνησης (free-to-move points) για όλα τα UAVs ορίστηκε ίσος με 3. Ο αριθμός αυτός αντιστοιχεί σε 5 (εκτός δηλαδή του σημείου εκκίνησης και του στόχου για κάθε UAV) σημεία ελέγχου για την κατασκευή κάθε B-Spline καμπύλης. Έτσι, τρεις διαφορετικές τροχιές με τρία ελεύθερα σημεία κίνησης η κάθε μία συντελούν σε μήκος χρωμοσώματος 27 γονιδίων ή διαφορετικά 27 μεταβλητών σχεδίασης.

Τα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τα αποτελέσματα τεσσάρων σεναρίων. Σε όλα τα πειράματα η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας μεταξύ των ρομποτικών μηχανισμών έχει ληφθεί ίση με το 12.5 % του μήκους της διαγωνίου της τετραγωνικής γεωγραφικής περιοχής (terrain): $d_{safe}= 12.5\% \text{ length}(\text{diag}_{\text{terrain}})$

5.2 Παρουσίαση διάφορων σεναρίων

Σενάριο 1:

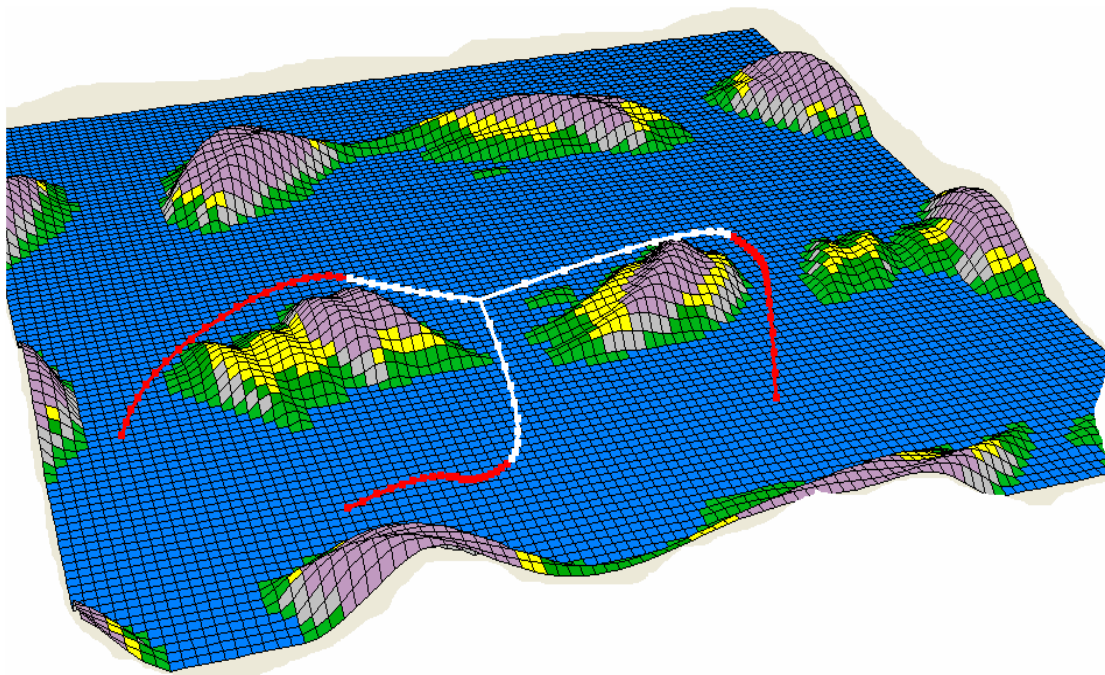
Θεωρούμε την πτήση τριών UAVs. Οι θέσεις εκκίνησής τους δίδονται από τα σημεία: (7, -4), (4, 10) και (8, 6). Η θέση του κοινού στόχου περιγράφεται από το σημείο (1, 1). Το διάστημα των επιθυμητών τιμών για το καθορισμό του μήκους των ευθυγράμμων τμημάτων, seg_length κάθε πολυγώνου ελέγχου καθορίστηκε ίσο με [1, 10]. Το διάστημα που περιγράφει την επιθυμητή διεύθυνση κίνησης για κάθε αεροσκάφος σε κάθε ελεύθερο σημείο ελέγχου κάθε τροχιάς ορίστηκε:

- για το 1^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [170°, 230°]
- για το 1^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]

- για το 1^ο UAV στο 3^ο free-to-move σημείο ως $[90^\circ, -90^\circ]$
- για το 2^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως $[170^\circ, 200^\circ]$
- για το 2^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως $[90^\circ, -90^\circ]$
- για το 2^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως $[90^\circ, -90^\circ]$
- για το 3^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως $[210^\circ, 270^\circ]$
- για το 3^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως $[90^\circ, -90^\circ]$
- για το 3^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως $[90^\circ, -90^\circ]$

Γίνεται φανερό ότι το πεδίο των επιθυμητών τιμών που ρυθμίζει την αρχική διεύθυνση κάθε αεροσκάφους ορίζεται με τρόπο ώστε να διευκολύνεται η ικανοποίηση της απαίτησης προσέγγισης του στόχου από διαφορετικές διευθύνσεις.

Το αποτέλεσμα του εξεταζόμενου σεναρίου παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5.1: Γραφική αναπαράσταση του 1^{ου} σεναρίου.

Παρατηρούμε ότι ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος:

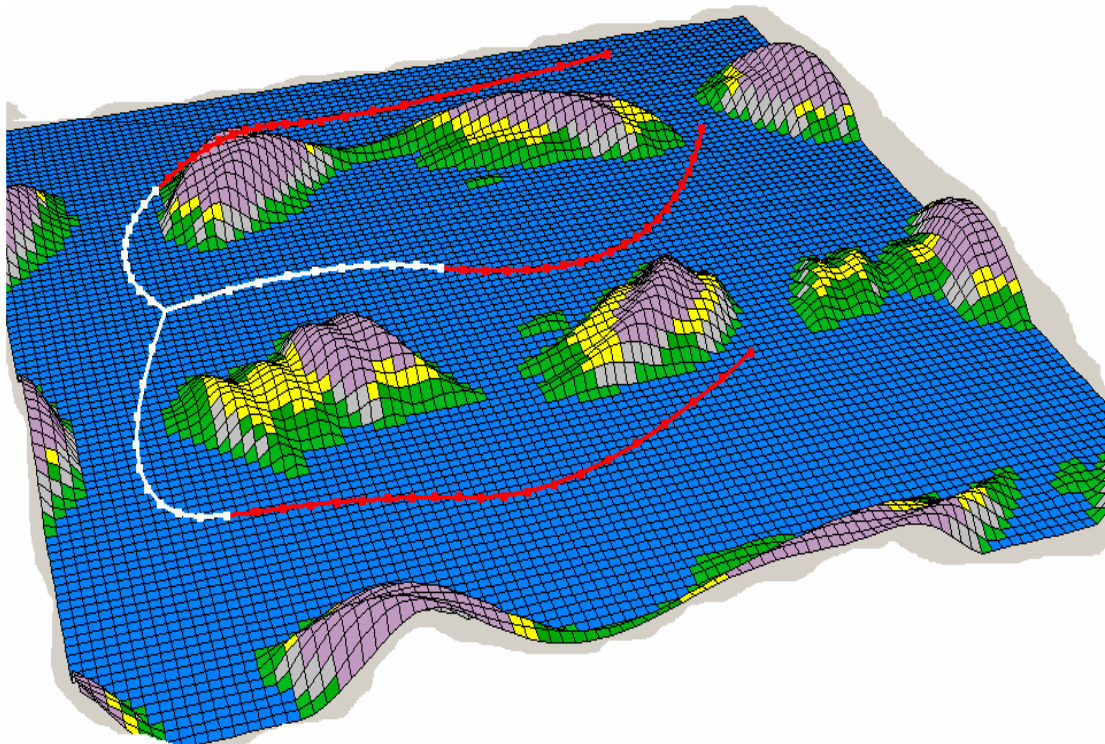
- αποφεύγεται κάθε σύγκρουση των αεροσκαφών με τα νησιά του θαλάσσιου χώρου κίνησής τους,
- ο όρος f_4 της συνάρτησης προσαρμογής συγκλίνει στο μηδέν που συνεπάγεται την ικανοποίηση της απαίτησης διατήρησης της προκαθορισμένης από τον χρήστη απόστασης ασφαλείας μεταξύ των UAVs,
- οι τροχιές των αεροσκαφών είναι ομαλές, χωρίς την ύπαρξη απότομων στροφών,
- έχουν σχετικά μικρό μήκος,
- ο στόχος προσεγγίζεται περικυκλωτικά που συνεπάγεται ότι ο όρος f_3 της συνάρτησης προσαρμογής διαχειρίστηκε με επιτυχία την απαίτηση για ομοιόμορφη κατανομή των UAVs στο στόχο,
- το χρονικό διάστημα άφιξης στο στόχο μεταξύ του πρώτου και τελευταίου αεροσκάφους για το εξεταζόμενο σενάριο είναι ίσο με το 0.71 % του συνολικού χρόνου κίνησης όλων των UAVs.

Σενάριο 2:

Θεωρούμε την πτήση τριών UAVs. Οι θέσεις εκκίνησής τους δίδονται από τα σημεία: (-11, -7), (-6, -8) και (4, -5). Η θέση του κοινού στόχου περιγράφεται από το σημείο (-2, 8). Το διάστημα των επιθυμητών τιμών για το καθορισμό του μήκους των ευθυγράμμων τμημάτων, *seg_length* κάθε πολυγώνου ελέγχου καθορίστηκε ίσο με [3, 10]. Το διάστημα που περιγράφει την επιθυμητή διεύθυνση κίνησης για κάθε αεροσκάφος σε κάθε ελεύθερο σημείο ελέγχου κάθε τροχιάς ορίστηκε:

- για το 1^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [45°, 90°]
- για το 1^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 1^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 2^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [0°, 60°]
- για το 2^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 2^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 3^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [45°, 80°]
- για το 3^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 3^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]

Το αποτέλεσμα του εξεταζόμενου σεναρίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2, που ακολουθεί:



Σχήμα 5.2: Γραφική αναπαράσταση του 2^{ου} σεναρίου.

Παρατηρούμε ότι ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος:

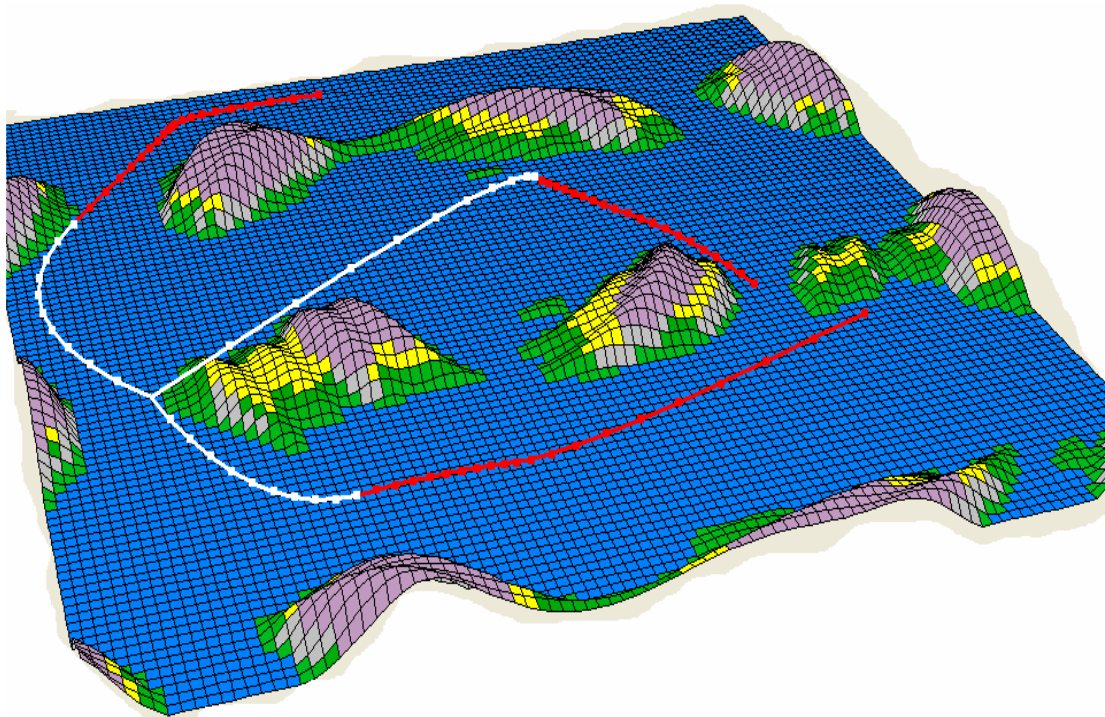
- αποφεύγεται κάθε σύγκρουση των αεροσκαφών με τα νησιά του θαλάσσιου χώρου κίνησής τους,
- ο όρος f_4 της συνάρτησης προσαρμογής συγκλίνει στο μηδέν που συνεπάγεται την ικανοποίηση της απαίτησης διατήρησης της προκαθορισμένης από τον χρήστη απόστασης ασφαλείας μεταξύ των UAVs,
- οι τροχιές των αεροσκαφών είναι ομαλές, χωρίς την ύπαρξη απότομων στροφών,
- έχουν σχετικά μικρό μήκος,
- ο στόχος προσεγγίζεται περικυκλωτικά που συνεπάγεται ότι ο όρος f_3 της συνάρτησης προσαρμογής διαχειρίστηκε με επιτυχία την απαίτηση για ομοιόμορφη κατανομή των UAVs στο στόχο,
- το χρονικό διάστημα άφιξης στο στόχο μεταξύ του πρώτου και τελευταίου αεροσκάφους για το εξεταζόμενο σενάριο είναι ίσο με το 1.33 % του συνολικού χρόνου κίνησης όλων των UAVs.

Σενάριο 3:

Θεωρούμε την πτήση τριών UAVs. Οι θέσεις εκκίνησής τους δίδονται από τα σημεία: (4, -8), (2, -6) και (-11, 2). Η θέση του κοινού στόχου περιγράφεται από το σημείο (2, 9). Το διάστημα των επιθυμητών τιμών για το καθορισμό του μήκους των ευθυγράμμων τμημάτων, *seg_length* κάθε πολυγώνου ελέγχου καθορίστηκε ίσο με [6, 10]. Το διάστημα που περιγράφει την επιθυμητή διεύθυνση κίνησης για κάθε αεροσκάφος σε κάθε free-to-move σημείο κάθε τροχιάς ορίστηκε:

- για το 1^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [45^ο, 135^ο]
- για το 1^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90^ο, -90^ο]
- για το 1^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90^ο, -90^ο]
- για το 2^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [135^ο, 200^ο]
- για το 2^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90^ο, -90^ο]
- για το 2^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90^ο, -90^ο]
- για το 3^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [45^ο, 135^ο]
- για το 3^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90^ο, -90^ο]
- για το 3^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90^ο, -90^ο]

Το αποτέλεσμα του εξεταζόμενου σεναρίου παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5.3: Γραφική αναπαράσταση του 3^{ου} σεναρίου.

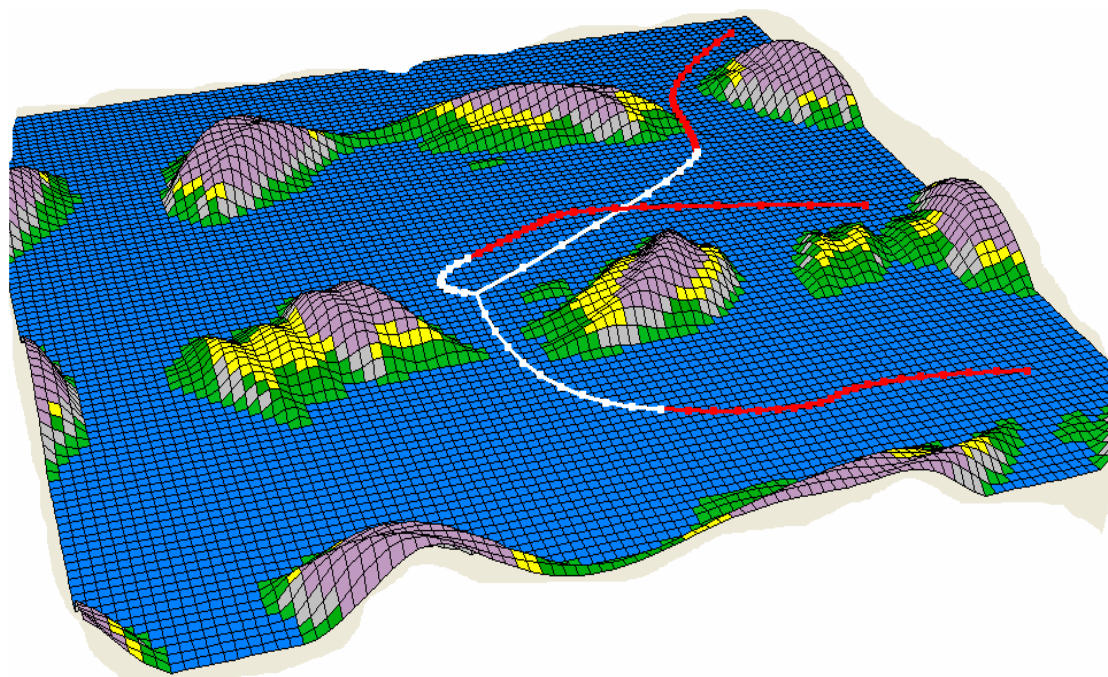
Το χρονικό διάστημα άφιξης στο στόχο μεταξύ του πρώτου και τελευταίου αεροσκάφους για το εξεταζόμενο σενάριο είναι ίσο με το 1.41 % του συνολικού χρόνου κίνησης όλων των UAVs.

Σενάριο 4:

Θεωρούμε την πτήση τριών UAVs. Οι θέσεις εκκίνησής τους δίδονται από τα σημεία: (-11, -11), (-11, 0) και (8, -10). Η θέση του κοινού στόχου περιγράφεται από το σημείο (1, 1). Το διάστημα των επιθυμητών τιμών για το καθορισμό του μήκους των ευθυγράμμων τμημάτων, *seg_length* κάθε πολυγώνου ελέγχου καθορίστηκε ίσο με [5, 15]. Το διάστημα που περιγράφει την επιθυμητή διεύθυνση κίνησης για κάθε αεροσκάφος σε κάθε free-to-move σημείο κάθε τροχιάς ορίστηκε:

- για το 1^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [45°, 135°]
- για το 1^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 1^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 2^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [45°, 135°]
- για το 2^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 2^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 3^ο UAV στο 1^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [45°, 135°]
- για το 3^ο UAV στο 2^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]
- για το 3^ο UAV στο 3^ο ελεύθερο σημείο ελέγχου ως [90°, -90°]

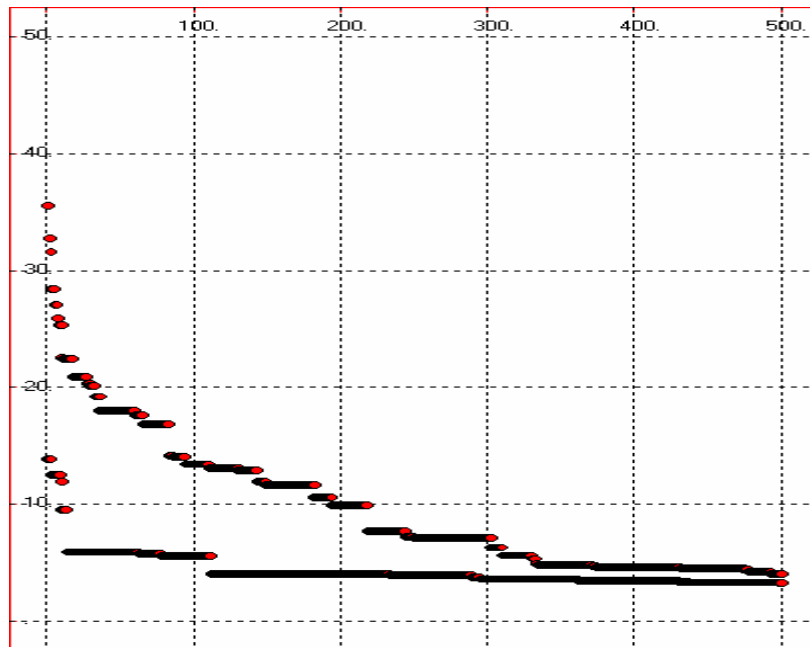
Το αποτέλεσμα του εξεταζόμενου σεναρίου παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



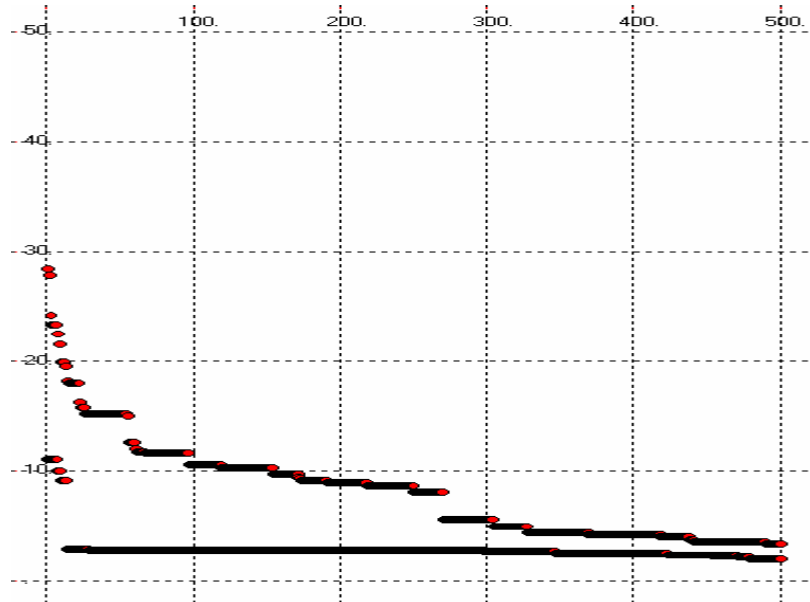
Σχήμα 5.4: Γραφική αναπαράσταση του 4^{ου} σεναρίου.

Το χρονικό διάστημα άφιξης στο στόχο μεταξύ του πρώτου και τελευταίου αεροσκάφους για το εξεταζόμενο σενάριο είναι ίσο με το 3.08 % του συνολικού χρόνου κίνησης όλων των UAVs.

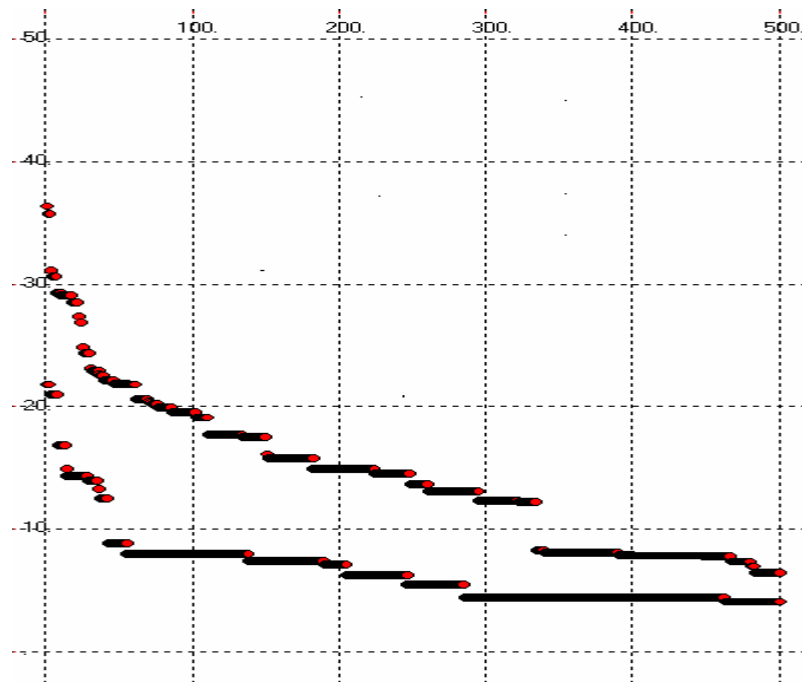
5.3 Παρουσίαση της σύγκλισης του αλγορίθμου και για τα τέσσερα εξεταζόμενα σενάρια



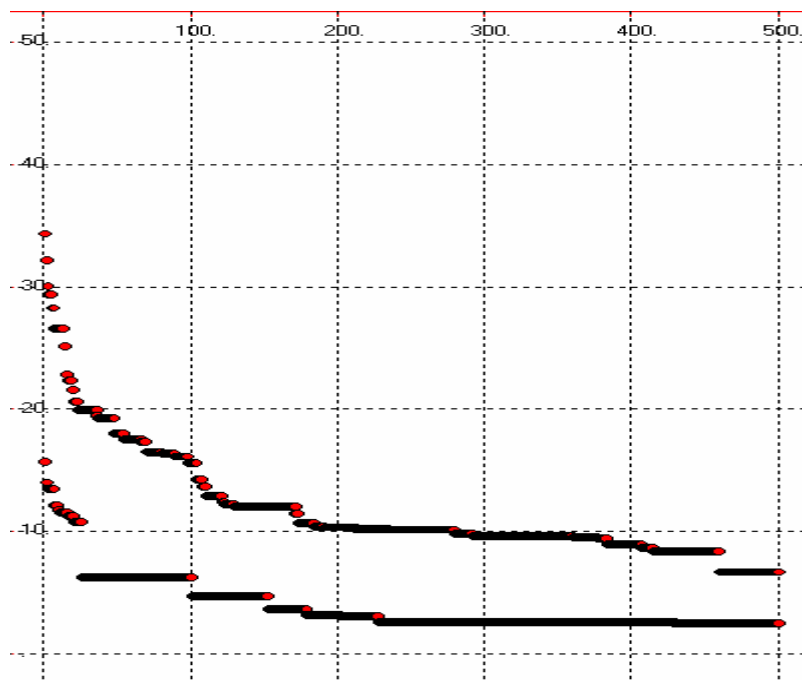
Σχήμα 5.5: Σύγκλιση του αλγορίθμου για το 1^ο σενάριο.



Σχήμα 5.6: Σύγκλιση του αλγορίθμου για το 2^ο σενάριο.



Σχήμα 5.7: Σύγκλιση του αλγορίθμου για το 3^ο σενάριο.



Σχήμα 5.8: Σύγκλιση του αλγορίθμου για το 4^ο σενάριο.

5.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάστηκε ένας off-line σχεδιαστής τροχιάς για την συντονισμένη κίνηση εναέριων μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε ως πρόβλημα βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κόστους που περιγράφει και ρυθμίζει τους περιορισμούς και τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος. Για την περιγραφή των τροχιών πτήσης των UAVs χρησιμοποιήθηκαν καμπύλες B-Spline διότι παρέχουν τη δυνατότητα περιγραφής πολύπλοκων τροχιών χρησιμοποιώντας το μικρότερο δυνατό αριθμό μεταβλητών ελέγχου. Η κατανομή της ταχύτητας κατά μήκος κάθε τροχιάς μοντελοποιήθηκε επίσης μέσω της συγκεκριμένης διατύπωσης καμπυλών B-Spline και αποδόθηκε ως η τρίτη διάσταση της κίνησης. Ο έλεγχος της απόδοσης του προτεινόμενου ελεγκτή πραγματοποιήθηκε σ' ένα τεχνητά ορισμένο περιβάλλον προσομοίωσης. Τα παραγόμενα αποτελέσματα υποστηρίζουν την ικανότητα του αλγορίθμου εύρεσης των βέλτιστων διαδρομών, ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλες τις απαιτήσεις του προβλήματος. Τέλος, η επιλογή της χρήσης καμπυλών B-Spline για την περιγραφή των εναέριων διαδρομών συντέλεσε στη διατήρηση μικρού αριθμού ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης καθώς, και στην παροχή ομαλών τροχιών, χωρίς απότομες στροφές, που υποστηρίζουν τη φυσική διάσταση των αποτελεσμάτων.

Το πρόβλημα της συντονισμένης πλοήγησης αγγίζει ποικίλους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Μερικά παραδείγματα μπορούν να αφορούν στρατιωτικές εφαρμογές, είτε εφαρμογές έρευνας και διάσωσης. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει γίνει αισθητή η μετακίνησή του από το μακρόκοσμο στο μικρόκοσμο. Πιο συγκεκριμένα, διάφορες ερευνητικές ομάδες ανά τον κόσμο εξετάζουν την εφαρμογή του σε προβλήματα νανοκλίμακας, ένα από τα οποία είναι και ο σχεδιασμός φαρμάκων. Έχει παρατηρηθεί η δυνατότητα περιγραφής των μορίων ως ρομποτικές κινηματικές αλυσίδες με πολλούς βαθμούς ελευθερίας. Έτσι, ζήτουμενο είναι η εύρεση των μοριακών διαδρομών που θα οδηγήσουν σε μια φυσική μοριακή συναρμολόγηση με συγκεκριμένη δυναμική. Είναι γεγονός ότι μετακινώντας το πρόβλημα της πλοήγησης στο νανόκοσμο πολλά από τα αξιώματα που ισχύουν στο μακρόκοσμο είτε παύουν να ισχύουν είτε απαιτούν την υοθέτηση συγκεκριμένων μετατροπών.

Η κατασκευή φαρμάκων είναι ένα ανοικτό ερευνητικά πεδίο που απασχολεί έντονα κάθε ερευνητική κοινότητα και γενικότερα τον άνθρωπό. Έρευνες που έχουν εξαχθεί σε διάφορα πανεπιστήμια ανά τον κόσμο υποστηρίζουν την εφαρμογή των αρχών της πλοήγησης ως ένα δυνατό εργαλείο για τη σχεδίαση φαρμάκων. [Zhang & Kavrakı, 2002]. Η διαπίστωση αυτή, συντελεί στη δυνατότητα της ανοικτής θεώρησης του προβλήματος της πλοήγησης και εξέτασης της εφικτότητας της εφαρμογής του ως μέσο εύρεσης φαρμάκων για την θεραπεία ανίατων ασθενειών.

Βιβλιογραφία

- [Pedro Almeida, et. al., 2006] Pedro Almeida, Ricardo Bencatel, Gil Concalves, and Joao Sousa, “Multi-UAV Integration for Coordinated Missions”, Copyright 2006 FEUP.
- [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.
- [John Bellingham, et. al., 2001] John Bellingham, Michael Tillerson, Arthur Richards, and Jonathan P. How, “Multi-Task Allocation and Path Planning for Cooperating UAVs”, in Second Annual Conference on Cooperative Control and Optimization, Nov. 2001.
- [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.

- [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.
- [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.
- [Δημήτριος Εμίρης, 1999] Δημήτριος Εμίρης, «Ρομποτική», εκδόσεις Άνωση, Αθήνα 1999.
- [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.

- [Jonathan How, et. al., 2004] Jonathan How, Ellis King, and Yoshiaki Kuwata, “Flight Demonstrations of Cooperative Control for UAV Teams”, AIAA 3rd “Unmanned Unlimited” Technical Conference, Workshop and Exhibit 20-23 September 2004, Chicago, Illinois.
- [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.
- [Teiji Isokawa et al., 2002] Teiji 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.
- [K. Madhava Krishna, et. al., 2005] K. Madhava Krishna, Henry Hexmoor, Subbarao Pasupuleti and James Llinas, “Parametric Control of Multiple Unmanned Air Vehicles over an Unknown Hostile Habitat”, CSCE Dept. University of Arkansas, Fayetteville AR 72701 and Indian Institute of Information Technology, Hyderabad, India, 2005.
- [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.
- [Reid A. Larson, et. al., 2005] Reid A. Larson, Meir Pachter, Mark J. Mears, “Path Planning by Unmanned Air Vehicles for Engaging an Integrated Radar Network”, AIAA 2005-6191, AIAA Guidance, and Control Conference and Exhibit 15-18 August 2005, San Fransisco, California.
- [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 Fyzzzy 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.
- [Theju Maddula, et. al., 2002] Theju Maddula, Ali A. Minai, and Marios M. Polycarpou, “Multi-Target Assignment and Path Planning for Groups of UAVs”,

was supported by the AFRL/VA and AFOSR Collaborative Center of Control Science (Grant F33615-01-2-3154).

- [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.
- [Timothy W. McLain, et. al., 2003] Timothy W. McLain, and Randal W. Beard, “Cooperative Path Planning for Timing-Critical Missions”, 0-7803-7896-2/03/\$17.00, IEEE 2003.
- [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.
- [Zhang & Kavragi, 2002] Ming Zhang and Lydia E. Kavragi, “A New Method for Fast and Accurate Derivation of Molecular Conformations”, Journal of Chemical Information and Computing Sciences, 2002, 42, 64-70.
- [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.
- [I. K. Nikolos, A. Brintaki, 2005], «*Coordinated UAV Path Planning Using Differential Evolution*», IEEE, 13th Mediterranean Conference on Control and Automation, Cyprus, June 2005.
- [K. Nikolos, A. Brintaki, E. Zografos, 2005], «*Coordinated UAV Path Planning Using an ANN Assisted Differential Evolution Algorithm*», EUROGEN 2005, Munich, Sep. 2005 (Accepted for publication).
- [I. K. Nikolos, 2005] notes from the graduate course “Design Optimization”, Department of Production Engineering and Management, Technical University of Greece, Chania, 2005.
- [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.

- [Barbara Pfeiffer, et. al., 2005] Barbara Pfeiffer, Rajan Batta, Kathrin Klamroth and Rakesh Nagi, “Path Planning for UAVs in the Presence of Threat Zones Using Probabilistic Modeling”, Institute of Applied Mathematics, University of Erlangen-Nuremberg Martensstr. 3, 91058 Erlangen, Germany and Department of Industrial Engineering, 342 Bell Hall University at Buffalo (SUNY), Buffalo, NY 14260, USA, 2005.
- [Les Piegl and Wayne Tiller, 1995] Les Piegl and Wayne Tiller, “The NURBS Book”, Springer, 1995.
- [Yan Ping et al.,] Yan Ping, Ding Mingyue, Zhou Chengping and Zheng Changwen, “Coordinated Route Planning via Nash Equilibrium and evolutionary algorithm”.
- [Ping Yan, et. al., 2004] Ping Yan, Ming_Yue Ding, and Cheng-Ping Zhou, “Game-Theoretic Route Planning for Team of UAVs”, Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, 26-29 August 2004.
- [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.
- [Marc D. Richards, et. al., 2005] Marc D. Richards, Darrell Whitley and J. Ross Beveridge, “Evolving Cooperative Strategies for UAV Teams”, GECCO 2005 Washington, D.C. USA, Copyright 2005 ACM 1-59593-010-8/05/0006...\$5.00.
- [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.

- [George Vachtsevanos, et. al., 2004] George Vachtsevanos, Liang Tang, and Johan Reimann, “An Intelligent Approach to Coordinated Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles”, American Helicopter Society, 60th Annual Forum, Baltimore, MD, June 7-10, 2004.
- [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 Caroline, 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.