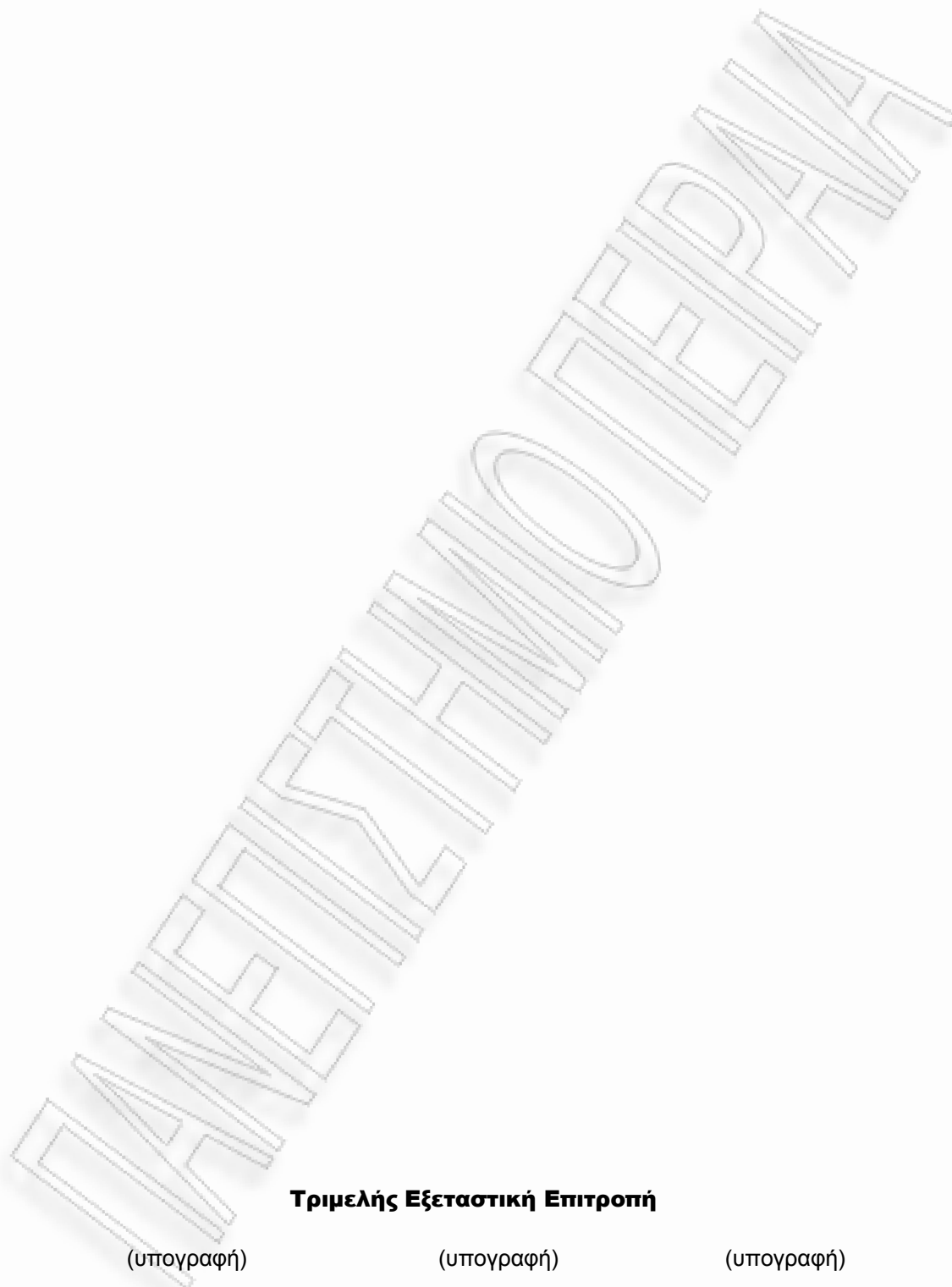




Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Πληροφορική»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Αποτίμηση τεχνολογιών μεθόδων και αλγορίθμων ελέγχου μη επανδρωμένων αεροσκαφών
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Χρήστος Δρόσος
Πατρώνυμο	Κων/νος
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΠΛ/09039
Επιβλέπων	Ευάγγελος Φούντας, Καθηγητής



Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

Όνομα Επώνυμο
Βαθμίδα

Όνομα Επώνυμο
Βαθμίδα

Όνομα Επώνυμο
Βαθμίδα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	5
Abstract	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
Η ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΣΜΗΝΟΥΣ	8
ΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΤΟΥ ΣΜΗΝΟΥΣ	8
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ	9
Αλγόριθμοι Νοημοσύνης Σμήνουσ	11
Ant colony optimization	11
Particle swarm optimization	11
Εφαρμογές	17
Γενικά περί των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	18
Τα πρώτα βήματα	18
Το Τεχνητό Νευρώνιο	18
Συνάρτηση ενεργοποιήσεις	19
Single-Layer (ενός στρώματος) Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	22
MULTILAYER (ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑ) ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	23
Η ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ	23
ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑ	24
ΕΚΠΑΙΔΕΥΟΝΤΑΣ ΕΝΑ ΤΕΧΝΗΤΟ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	24
ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ	24
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΜΕ ΕΠΙΒΛΕΨΗ	25
ΜΗ ΕΠΟΠΤΕΥΟΜΕΝΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ	25
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ	26
Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη – UAV (Unmanned Aircraft Vehicles)	27
Συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών	29
Σχεδιασμός ελεγκτών για μη επανδρωμένα αεροσκάφη	32
Αυτόματοι γραμμικοί ελεγκτές σταθεροποίησης	36
Εσωτερικός βρόγχος συστήματος ελέγχου	36
Αποσβεστήρας κλίσης	37
Αποσβεστήρας περιστροφής	37
Αποσβεστήρας κύλισης	37
Αυτόματος γραμμικός ελεγκτής πλοήγησης	38
Νευρωνικά δίκτυα και UAV	42
Σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών	44
Συνοπτική περιγραφή αλγορίθμων ελέγχου σμήνουσ μη επανδρωμένων αεροσκαφών45	
Ο αλγόριθμος PSO και η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου	47
Matlab - PSO Toolbox	47

Έλεγχος σχηματισμού σμήνους μη επανδρωμένων

αεροσκαφών	53
Έλεγχος πολλαπλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών	53
Οργάνωση σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών	55
Γνωστικός σχεδιασμός επιπέδου πράκτορα	56
Μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος	58
Επικοινωνία	59
Αναδιάρθρωση σχηματισμού σμήνους	60
Μαθηματική ανάλυση σμήνους και αλγόριθμος PSO	61
Συμπεράσματα	70
Βιβλιογραφία	71

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια μελέτη των τεχνολογιών των μεθόδων και των αλγορίθμων ελέγχου των μη επανδρωμένων αεροσκαφών με έμφαση στα αυτόνομα αεροσκάφη στα οποία το σχέδιο πτήσης προγραμματίζεται πριν από την πτήση και το αεροσκάφος πετάει χωρίς την ανάγκη ενός απομακρυσμένου χειριστή, αλλά χρησιμοποιώντας κατάλληλους αλγόριθμους για να ρυθμίζει την πορεία του και να φέρει σε πέρας την αποστολή του, η οποία του έχει ανατεθεί. Αναλύετε επίσης το πέταγμα των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε σμήνος, και γίνεται αναφορά σε διάφορους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Παρουσιάζεται ο αλγόριθμος "Particle Swarm Optimization" και πώς αυτός χρησιμοποιείται στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Επίσης αναλύουμε τον έλεγχο του σχηματισμού ενός σμήνους και πως χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο PSO μπορούμε να επιτύχουμε βελτιστοποίηση της μετάβασης από έναν αρχικό σχηματισμό στον τελικό επιθυμητό σχηματισμό.

Abstract

In the present work we show a study of technologies, methods and algorithms for control of unmanned aircraft with an emphasis on autonomous aircraft where the flight plan programmed before the flight and the aircraft fly without the need for a remote operator, using appropriate algorithms to regulate course and to carry out its mission, which has been assigned. It also analyzes the flight of unmanned aircraft in a flock, and make reference to various algorithms used for this purpose. Presented the algorithm "Particle Swarm Optimization" and how it is used in unmanned aircraft. Also we analyze the control of the formation of a flock and that using the PSO algorithm in order to achieve optimal transition from an initial formation to the final desired configuration of the swarm

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος το οποίο είναι και γνωστό σαν τηλεκατευθυνόμενο αεροσκάφος (remotely piloted aircraft (RPA) ή unmanned aircraft system(UAS)), είναι μια μηχανή της οποίας οι λειτουργίες ελέγχονται μέσω ενός απομακρυσμένου ελεγκτή του οποίου το χειρισμό έχει ένας πιλότος, μερικά μοντέλα μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα και να λαμβάνουν αποφάσεις σύμφωνα με το στόχο που τους έχει δοθεί να φτάσουν.

Η χρήση των UAVs αφορά κυρίως των στρατιωτικό τομέα και διαφορά τους από ένα απλό πύραυλο έγκειται στο ότι ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος είναι ανακτήσιμο και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

Υπάρχει μια τεράστια ποικιλία από μη επανδρωμένα αεροσκάφη σε σχήματα μεγέθη χαρακτηριστικά και λειτουργίες. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη μπορεί να ελέγχονται από μια απομακρυσμένη τοποθεσία η οποία μπορεί να είναι πολλές χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά, αλλά μερικά μπορεί να πετούν αυτόνομα βασιζόμενα σε προγραμματιζόμενα σχέδια πτήσης, χρησιμοποιώντας πολυπλοκότερα αυτόματα δυναμικά συστήματα.

Τα στρατιωτικά μη επανδρωμένα αεροσκάφη εκτελούν αναγνωριστικές η επιθετικές αποστολές κυρίως από το στρατό των Ηνωμένων Πολιτειών αν και έχουν τη φήμη ότι είναι επιρρεπεί στις "παράπλευρες απώλειες". Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη χρησιμοποιούνται επίσης και για ειρηνικές αποστολές όπως αποστολές πυροπροστασίας, χαρτογράφησης, επιτήρησης χώρων και εγκαταστάσεων (πχ αγωγών πετρελαίου ή ύδρευσης για την ανίχνευση βλαβών) κλπ.



Η πρώτη προσπάθεια για ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος ήταν από τον A.M. Low's το 1916 με τον "Εναέριο στόχο". Ο Τέσλα περιέγραψε ένα στόλο από μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα μάχης το 1915. Ένας μεγάλος αριθμός από προσπάθειες δημιουργίας τηλεκατευθυνόμενων αεροπλάνων ακολούθησε όπως: το αυτόματο αεροπλάνο των Hewit -Sperry κατά τη διάρκεια του πρώτου παγκόσμιου πόλεμου, ακολούθησε ο διάσημος ηθοποιός και φανατικός του αερομοντελισμού Reginald Denny το 1935 με το πρώτο υποκλίμακα τηλεκατευθυνόμενο αεροπλανάκι. Προσπάθειες έγιναν και κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου αλλά κυρίως μετά το πέρας του. Η γέννηση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών έγινε ο 1959 όταν οι αξιωματικοί της αεροπορείας των Ηνωμένων Πολιτειών προσπαθώντας να μειώσουν της απώλειες ανθρώπινου δυναμικού πάνω από εχθρικές περιοχές ξεκίνησαν το

σχεδιασμό μη επανδρωμένων πτήσεων (την εποχή εκείνη ονομάζονταν Remote Pilot Vehicle - RPV). Τα σχέδια αυτά αποκαλύφθηκαν το 1960 όταν ο Francis Gary Powers και το "μυστικό" του U-2 καταρρίφτηκε πάνω από τη Σοβιετική Ένωση. Εντός λίγων ημερών ένα απόρρητο πρόγραμμα μη επανδρωμένων αεροσκαφών ξεκίνησε με τη κωδική ονομασία "Red Wagon". Η πρώτη πολεμική αποστολή των UAV έγινε στο κόλπο του Τόνκιν σε μια μάχη του αμερικάνικου πολεμικού ναυτικού με το ναυτικό του βόρειου Βιετνάμ. Βέβαια η δημόσια παραδοχή των αξιωματούχων των Ηνωμένων Πολιτειών για την διεξαγωγή έρευνας πάνω στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη έγινε το 1973, από τότε μέχρι σήμερα έχουν γίνει τεράστια άλματα και έχουμε φτάσει στα σημερινά μη επανδρωμένα αεροπλάνα όπου τους προγραμματίζουμε τα σχέδια πτήσης και αυτά εκτελούν από μόνα τους την αποστολή του χωρίς να απαιτείται κανένας χειρισμός από τον άνθρωπο.

Για την αυτόνομη λειτουργία τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη χρησιμοποιούν διάφορους αλγόριθμους ένας από τους οποίους είναι και ο Particle Swarm Optimization τον οποίο και θα μελετήσουμε.



Η ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΣΜΗΝΟΥΣ

Τα έντομα που ζουν σε αποικίες (μυρμήγκια, μέλισσες, σφήκες, τερμίτες κτλ.) ήταν πάντα αντικείμενο θαυμασμού για τον άνθρωπο. Από πού πηγάζουν και πώς αναπτύσσονται οι οργανωμένες συμπεριφορές των κοινωνικών εντόμων; Κάθε έντομο σε μια αποικία φαίνεται να έχει τη δική του ημερήσια διάταξη και όμως σαν σύνολο δείχνουν μια υψηλού επιπέδου οργάνωση.

Προφανώς αυτή η άορατη ολοκλήρωση των μεμονωμένων δραστηριοτήτων δεν απαιτεί κάποια εποπτεία. Μάλιστα, οι επιστήμονες που μελετούν τη συμπεριφορά των κοινωνικών εντόμων ανακάλυψαν ότι η συνεργασία σε επίπεδο αποικίας είναι σε μεγάλο βαθμό αυτοοργανωνόμενη: στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων προκύπτει από αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεμονωμένων ατόμων. Αν και αυτές οι αλληλεπιδράσεις μπορεί να είναι απλές (π.χ. ένα μυρμήγκι απλώς ακολουθεί το μονοπάτι που χάραξε ένα άλλο), όλες μαζί μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα (όπως η εξεύρεση του συντομότερου δρόμου ανάμεσα σε αμέτρητες δυνατές διαδρομές προς την τροφή). Αυτή η συλλογική συμπεριφορά που προκύπτει από μια ομάδα κοινωνικών εντόμων ονομάστηκε «νοημοσύνη σμήνους».

Τον τελευταίο καιρό, μια διαρκώς αυξανόμενη κοινότητα ερευνητών, εφευρίσκει τρόπους για την εφαρμογή της νοημοσύνης σμήνους σε ποικιλία προβλημάτων. Η αναζήτηση τροφής από τα μυρμήγκια έχει οδηγήσει σε μια νέα μέθοδο για την αναδρομολόγηση της κυκλοφορίας στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Η συνεργατική αλληλεπίδραση των μυρμηγκιών που προσπαθούν να μεταφέρουν ένα μεγάλο κομμάτι τροφής μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματικούς αλγορίθμους για χρήση σε ρομπότ. Και ο καταμερισμός εργασίας ανάμεσα στις μέλισσες ίσως βοηθήσει σε αποτελεσματικότερες διαδικασίες στις βιομηχανίες με αλυσίδα συναρμολόγησης.

ΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΤΟΥ ΣΜΗΝΟΥΣ

Όπως στα μυρμήγκια έτσι και στα πουλιά η συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών ακολούθη κάποιους κανόνες. Αυτή η ικανότητα να οργανώνονται με περίπλοκο τρόπο και να επιδεικνύουν σύνθετες και αυτορυθμιζόμενες συμπεριφορές δεν είναι εγγεγραμμένη στα γονίδια τους αλλά είναι μια αναδυόμενη ιδιότητα που βασίζεται σε επίκτητες συμπεριφορές που εντυπώνονται κατά τα πρώτα στάδια της ζωής τους. Ο τρόπος όμως με τον οποίο αναδύονται αυτές οι συλλογικές συμπεριφορές παραμένει σε μεγάλο βαθμό μυστήριο.

Ο πληροφορικός Κρεγκ Ρέινολντς ήταν ο πρώτος που έκανε κάποιες εύλογες υποθέσεις. Το 1987 διατύπωσε τρεις βασικούς κανόνες που πρέπει να ακολουθήσουν τα πουλιά για να σχηματίσουν ένα σμήνος:

- 1) Να μην πλησιάζουν πέρα από ένα ορισμένο όριο άλλα αντικείμενα ή πουλιά.
- 2) Να διατηρούν την ίδια ταχύτητα και κατεύθυνση με τους πλησιέστερους συντρόφους τους.

3) Να κατευθύνονται προς το κέντρο της πιο κοντινής ομάδας.

Σήμερα είναι δυνατή η ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς των σμηνών, των κοπαδιών και των αγελών αν εφαρμόσουμε αυτούς τους κανόνες σε εικονικά πουλιά που ονομάστηκαν *boid* (από το αγγλικό "bird-oid").

Σκοπός των προσομοιώσεων δεν είναι απλά η ικανοποίηση της επιστημονικής περιέργειας, αλλά η ανάπτυξη τεχνικών που εφαρμόζονται με επιτυχία και στον κινηματογράφο. Για παράδειγμα, *boid* είναι οι νυχτερίδες και οι πικουίνοι στην ταινία *Η Επιστροφή του Μπάτμαν* (1992), οι γαλίμιμοι στο *Τζουράσικ Παρκ* (1993) και τα διαστημικά πλάσματα στο επεισόδιο "Voyager" της σειράς *Star Trek*.

Άραγε θα μπορούσαν αυτοί οι κανόνες να εφαρμοστούν και στα ρομπότ; "Μέχρις ενός σημείου, ναι" απαντά ο Ν. Φλορεάνο, καθηγητής ρομποτικής στο Πολυτεχνείο της Λοζάννης. "Όταν έχουμε να κάνουμε με πραγματικά ρομπότ αντί για εικονικά *boid*, το πρόβλημα γίνεται περίπλοκο. Τα ρομπότ δεν καταφέρνουν να διατηρούν τις αποστάσεις τους τόσο εύκολα".

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ

Χρησιμοποιώντας το μοντέλο των εικονικών μυρμηγκιών επιστήμονες στις Βρυξέλλες κατάφεραν να λύσουν το περίφημο «πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή». Το πρόβλημα αφορά την εξεύρεση του συντομότερου δρόμου που περνά από ένα συγκεκριμένο αριθμό πόλεων μόνο μια φορά από την καθεμιά. Είναι ένα πρόβλημα που τα βήματα υπολογισμού για τη λύση του αυξάνουν πολύ πιο γρήγορα απ' ό,τι ο αριθμός των πόλεων. Έτσι, ακόμα και για 15 πόλεις, οι δυνατές διαδρομές είναι δισεκατομμύρια.

Για τέτοια προβλήματα ικανοποιούμαστε συνήθως αν βρούμε μια καλή λύση και όχι την καλύτερη δυνατή (τη διαδρομή με το μικρότερο δυνατό μήκος). Τα εικονικά μυρμηγκία έδωσαν μια τέτοια καλή λύση στο πρόβλημα. Χρειάστηκε μόνο μια τροποποίηση στο πρόγραμμα, έτσι ώστε τα μυρμηγκία να αφήνουν διαφορετική ποσότητα φερομόνης ανάλογα με το συνολικό μήκος της διαδρομής που έκαναν. Έτσι, τα μυρμηγκία που έκαναν μικρότερη διαδρομή άφηναν περισσότερη φερομόνη, με αποτέλεσμα η δική τους διαδρομή να είναι πιο ελκυστική για τα άλλα μυρμηγκία, που εξερευνούσαν στην πορεία εναλλακτικές υποδιαδρομές, βελτιώνοντας συνεχώς τη λύση.

Ανάλογα ερευνητικά προγράμματα, αλλά από διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις, υλοποιούνται σε διάφορα μέρη του κόσμου. Ο Κλάους Ρόναλντ Κιούμπ και ο Χονγκ Ζανγκ, από το Πανεπιστήμιο της Αλμπέρτα, στον Καναδά, κατασκεύασαν ρομπότ-μυρμηγκία στα οποία ανέθεσαν να σπρώχνουν ένα βάρος προς μια φωτεινή πηγή.

Τα ρομπότ αναζητούν και βρίσκουν το αντικείμενο, προσπαθούν να το σπρώξουν και, αν δεν τα καταφέρουν, αλλάζουν θέση. Στην περίπτωση των ρομπότ-μυρμηγκιών η συλλογική συμπεριφορά δεν προκύπτει ούτε από

προσαρμογή στο περιβάλλον ούτε από την επικοινωνία μεταξύ των ρομπότ αλλά από απλούς κανόνες ήδη προγραμματισμένους.

Άλλες ερευνητικές ομάδες μελετούν ρομπότ που επικοινωνούν μεταξύ τους. Αντί να ελέγχονται από μια κεντρική μονάδα ή να κινούνται το καθένα για λογαριασμό του, ελέγχονται από τη συλλογική swarm intelligence (ευφυΐα σμήνους). Ο Ρας Ρόμπινετ, από τα Εθνικά Εργαστήρια Σάντια (ΗΠΑ), εφάρμοσε μια τεχνική που ονόμασε swarming (σμηνοποίηση), η οποία επιτρέπει σε μια ομάδα ρομπότ να αναζητούν ένα στόχο -για παράδειγμα, ένα σκιέρ που έπεσε σε χαράδρα- με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Πώς; Κάθε ρομπότ πληροφορεί συνεχώς τα υπόλοιπα για τη θέση του και για την ισχύ του σήματος που λαμβάνει από το στόχο.

Η ομάδα του Φλορεάνο επεξεργάζεται κι ένα άλλο πρόγραμμα διάσωσης: το Swarmbot. "Η ιδέα είναι να δημιουργήσουμε ένα πολύπλοκο ρομπωτικό σύστημα που θα αποτελείται από πολλά στοιχεία καθένα από τα οποία θα ονομάζεται S-bot. Αυτά τα στοιχεία θα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και να συνενώνονται έτσι ώστε να εκτελούν αποστολές αδύνατες για ένα μόνο ρομπότ, όπως η μεταφορά πολύ μεγάλων αντικειμένων ή η υπερπήδηση μεγάλων χασμάτων στο έδαφος" εξηγεί ο Φλορεάνο.

Εκτός από το να συνεργάζονται, τα σμήνη ρομπότ μπορούν να προγραμματιστούν και για να ανταγωνίζονται ή να επιτίθενται. Για να διερευνήσει αυτή τη δυνατότητα ο Φλορεάνο κατασκεύασε ένα σύστημα κυνηγού-θήραματος. Το ρομπότ-κυνηγός, με οξεία όραση, πρέπει να καταδιώξει το ρομπότ-θήραμα, το οποίο βλέπει μόνο σε μικρές αποστάσεις, είναι όμως ταχύτερο.

"Στις δοκιμές μας και τα δύο ρομπότ μπορούν να κινούνται επί δύο λεπτά. Ας υποθέσουμε ότι συγκρούονται -οπότε έχει νικήσει ο κυνηγός- μετά από ενάμισι λεπτό, στο 75% του συνολικού χρόνου. Σ' αυτή την περίπτωση ο κυνηγός θα έχει μια πιθανότητα 25% να αναπαραχθεί, ενώ το θήραμα 75%. Σ' αυτό το σημείο ο επεξεργαστής των ρομπότ προσομοιώνει την αναπαραγωγή των ρομπότ και εισάγει κάποιες γενετικές αλλαγές. "Κατά τη διάρκεια του ανταγωνισμού ευνοούνται μεταλλάξεις που τείνουν να δυσκολέψουν ή να μπερδέψουν τον αντίπαλο" εξηγεί ο Φλορεάνο. Η ανάπτυξη τέτοιων επιθετικών και αμυντικών στρατηγικών απαιτεί περίπου είκοσι γενεές.

"Μια άλλη στρατηγική ονομάζεται "της μύγας και της αράχνης. Τις περισσότερες φορές το θήραμα, μη διαθέτοντας την ικανότητα μακροσκοπικής όρασης, κινείται με ταχύτητα γύρω από τα τοιχώματα του αγωνιστικού χώρου. Τότε ο κυνηγός, αντί να χρησιμοποιήσει την όρασή του, οπισθοχωρεί μέχρι να ακουμπήσει στον τοίχο και περιμένει εκεί να συναντήσει το θήραμα. Η τελική εντύπωση είναι ότι έχουμε να κάνουμε με ζωντανά όντα" εξηγεί ο Φλορεάνο. Στην πραγματικότητα αυτά τα αυτόματα απέχουν πολύ από το να διαθέτουν έστω και την ελάχιστη νοημοσύνη ενός μυρμηγκιού.

Αλγόριθμοι Νοημοσύνης Σμήνους

Ant colony optimization

Είναι μια κατηγορία αλγόριθμων βελτιστοποίησης βασισμένη στις ενέργειες μιας αποικίας μυρμηγκιών. Τεχνητά μυρμηγκία - πράκτορες προσομοίωσης - εντοπίζουν βέλτιστες λύσεις κινούμενα μέσα σε παραμετροποιημένο χώρο ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις πιθανές λύσεις. Ουσιαστικά ο αλγόριθμος αντιγράφει τη μεθοδολογία των μυρμηγκιών για να βρουν το βέλτιστο μονοπάτι ανάμεσα στη τροφή και την αποικία (ίχνη φερομόνης).

Particle swarm optimization



Particle swarm optimization (PSO) είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την επίλυση προβλημάτων στα οποία η βέλτιστη λύση μπορεί να αναπαρασταθεί σαν ένα σημείο σε έναν πολυδιαστατικό χώρο. Οι υποθέσεις απεικονίζονται σε αυτό το χώρο και τροφοδοτούνται με μια αρχική ταχύτητα, επίσης ένα αρχικό κανάλι επικοινωνίας αποκαθίσταται μεταξύ των συμμετεχόντων σωματιδίων. Τα σωματίδια τότε κινούνται μέσα στο χώρο των λύσεων και αξιολογούνται βάση κάποιων κριτηρίων εκμάθησης μετά από κάθε χρονικό βήμα (του οποίου η διάρκεια έχει προκαθοριστεί). Με τη πάροδο του χρόνου, τα σωματίδια επιταχύνονται προς άλλα σωματίδια τα οποία πληρούν καλύτερα τα κριτήρια εκμάθησης. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτού του αλγόριθμου είναι ότι ο μεγάλος αριθμός των μελών που απαρτίζουν το σμήνος σωματιδίων καθιστούν την τεχνική εντυπωσιακά ανθεκτική στο πρόβλημα των τοπικών ελαχίστων.

Όπως έχει προαναφερθεί ο αλγόριθμος PSO προσομοιώνει τη συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών. Ας υποθέσουμε το ακόλουθο σενάριο: μια ομάδα πουλιών που ψάχνουν τυχαία για τροφή σε μια περιοχή, και ότι υπάρχει μόνο ένα κομμάτι τροφής στην περιοχή αυτή. Όλα τα πουλιά δεν ξέρουν που είναι η τροφή. Αλλά αυτά γνωρίζουν πόσο μακριά είναι η τροφή σε κάθε επανάληψη. Ποιά είναι λοιπόν η καλύτερη στρατηγική για να βρουν την τροφή; Προφανώς αυτή είναι το να ακολουθήσουν το πουλί που είναι πιο κοντά στη τροφή.

Ο αλγόριθμος PSO μαθαίνει από αυτό το σενάριο και το χρησιμοποιεί για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στον αλγόριθμο PSO κάθε μοναδική λύση είναι μια "οντότητα" στον προς ανίχνευση χώρο και την αποκαλούμε "σωματίδιο". Όλα τα "σωματίδια" έχουν τιμές καταλληλότητας οι οποίες αξιολογούνται από μια συνάρτηση "καταλληλότητας" την οποία και θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε, και έχουν ταχύτητες οι οποίες κατευθύνουν την πτήση των σωματιδίων. Τα σωματίδια πετάνε μέσα στο πρόβλημα ακολουθώντας τα πιο "καλά" σωματίδια κάθε φορά

Ο αλγόριθμος αρχικοποιείται από ένα σύνολο τυχαίων σωματιδίων (λύσεων) και στη συνέχεια αναζητά τα βέλτιστα με την ενημέρωση των γενεών. Σε κάθε επανάληψη, κάθε σωματίδιο ενημερώνεται από τις δύο ακολουθούμενες καλύτερες τιμές. Η πρώτη είναι η καλύτερη λύση που έχει επιτευχθεί μέχρι τώρα. Αυτή η τιμή ονομάζεται pbest. Μια άλλη "καλύτερη" τιμή είναι αυτή η οποία ανιχνεύεται από τον PSO είναι η "καλύτερη" τιμή που έχει βρεθεί μέχρι τώρα από οποιοδήποτε σωματίδιο του πληθυσμού. Αυτή η τιμή ονομάζεται gbest (global best). Όταν ένα σωματίδιο παίρνει συμμετέχει στον πληθυσμό σαν να ήταν οι τοπολογικοί γείτονες του, η καλύτερη τιμή ονομάζεται "lbest" (local best).

Αφού βρεθούν οι δύο καλύτερες τιμές το σωματίδιο ενημερώνει την ταχύτητα και την θέση του με τις ακόλουθες εξισώσεις (α) και (β)

$$v[] = v[] + c1 * rand() * (pbest[] - present[]) + c2 * rand() * (gbest[] - present[])$$

(a)

$$present[] = present[] + v[] \quad (b)$$

$v[]$ είναι η ταχύτητα του σωματιδίου

$present[]$ είναι το τρέχων σωματίδιο (λύση)

$pbest[]$ και $gbest[]$ ορίζονται όπως προαναφέρθηκε

$rand()$ είναι ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ (0,1)

$c1$, $c2$ είναι παράγοντες μάθησης συνήθως $c1 = c2 = 2$.

Ο ψευδοκώδικας της διαδικασίας είναι ο εξής:

```

For each particle
  Initialize particle
END

Do
  For each particle
    Calculate fitness value
    If the fitness value is better than the best fitness value (pBest) in history
      set current value as the new pBest
    End
  End

  Choose the particle with the best fitness value of all the particles as the
  gBest
  For each particle
    Calculate particle velocity according equation (a)
    Update particle position according equation (b)
  End
While maximum iterations or minimum error criteria is not attained

```

Οι ταχύτητες των σωματιδίων σε κάθε διάσταση μανδαλώνονται σε μια μέγιστη ταχύτητα V_{max} . Εάν το άθροισμα των επιταχύνσεων θα προκαλούσε την ταχύτητα σε εκείνη τη διάσταση να υπερβεί τι τιμή της V_{max} , η οποία είναι μια παράμετρος που καθορίζεται από το χρήστη, τότε η ταχύτητα σε αυτή τη διάσταση περιορίζεται στη V_{max} .

Οι περισσότερες εξελικτικές τεχνικές ακολουθούν την παρακάτω μεθοδολογία:

1. Τυχαία παραγωγή ενός αρχικού πληθυσμού.
2. Αναγνώριση της καλύτερης τιμής για κάθε αντικείμενο.
3. Αναπαραγωγή του πληθυσμού με βάση τις παραπάνω τιμές.
4. Εάν πληρούνται οι προϋποθέσεις τότε σταμάτησε, διαφορετικά πήγαινε στο βήμα 2.

Ανακεφαλαιώνοντας :

Κάθε σωματίδιο αναπαριστά μια υποψήφια λύση στο πρόβλημα. Σε ένα σύστημα PSO τα σωματίδια αλλάζουν τις θέσεις τους πετώντας τριγύρω, μέσα σε ένα πολυδιάστατο χώρο, μέχρι να φτάσουν σε ένα υπολογιστικό όριο, ή σε μια σχετικά σταθερή θέση. Τα βασικά στοιχεία μιας τεχνικής PSO είναι τα ακόλουθα:

- Σωματίδιο $X(t)$: μια υποψήφια λύση που αναπαρίσταται από ένα m - διαστάσεων διάνυσμα πραγματικών τιμών. Όπου m είναι ο

αριθμός των βελτιστοποιήσιμων παραμέτρων. Στη χρονική στιγμή t το j^{th} σωματίδιο μπορεί να περιγραφεί σαν $X_j(t)=[x_{j,1}(t), x_{j,2}(t), \dots, x_{j,m}(t)]$ όπου "x" είναι οι βελτιστοποιημένες παράμετροι και $x_{j,k}(t)$ είναι η θέση του σωματιδίου λαμβάνοντας υπόψη και την k^{th} βελτιστοποιημένη παράμετρο. (π.χ. η τιμή της k^{th} βελτιστοποιημένης παραμέτρου μέσα στην j^{th} υποψήφια λύση)

- Πληθυσμός pop(t): Είναι ένα σύνολο n σωματιδίων τη χρονική στιγμή t (πχ. pop(t)=[$X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$] T).
- Σμήνος (Swarm): είναι φαινομενικά ένας ανοργάνωτος πληθυσμός κινούμενων σωματιδίων τα οποία τείνουν να συγκεντρωθούν σε μια ομάδα, παρόλο που το κάθε σωματίδιο δείχνει να κινείται σε τυχαία κατεύθυνση
- Ταχύτητα σωματιδίου (Particle Velocity) $V(t)$: Είναι η ταχύτητα του κινούμενου σωματιδίου η οποία αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα m - διαστάσεων και πραγματικών τιμών. Στη χρονική στιγμή t , η ταχύτητα του j^{th} σωματιδίου μπορεί να περιγραφεί: $V_j(t)[v_{j,1}(t), v_{j,2}(t), \dots, v_{j,m}(t)]$ όπου $v_{j,k}(t)$ είναι η συνιστώσα της ταχύτητας του j^{th} σωματιδίου λαμβάνοντας υπόψη την k^{th} διάσταση.
- Συνάρτηση βαρύτητας (Weighting Function) $w(t)$: Είναι μια παράμετρος ελέγχου η οποία χρησιμοποιείται για να ελέγχει την επίδραση των προηγούμενων ταχυτήτων στην τωρινή ταχύτητα. Για αυτό το λόγο επηρεάζει την ανταλλαγή μεταξύ του ολικών και τοπικών ικανοτήτων εξερεύνησης των σωματιδίων. Στα αρχικά στάδια της διαδικασίας αναζήτησης, μεγάλη τιμή στη συνάρτηση βαρύτητας είναι προτεινόμενη έτσι ώστε να αυξήσουμε την ολική εξερεύνηση, ενώ για τα τελικά στάδια η τιμή της πρέπει να μειώνεται έτσι ώστε να αυξήσουμε την δυνατότητα τοπικής εξερεύνησης. Η συνάρτηση βαρύτητας ορίζεται σαν: $w = w_{max} - ((w_{max} - w_{min}) \times \text{iter} / \text{iter}_{max})$ όπου w_{max} , w_{min} είναι η αρχική και η τελική τιμή της συνάρτησης, iter_{max} είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και iter ο αριθμός της τρέχουσας επανάληψης.
- Individual Best $X^*(t)$: Καθώς ένα σωματίδιο κινείται μέσα στον προς ανίχνευση χώρο, συγκρίνει την τιμή του στην τωρινή του θέση με την καλύτερη τιμή που έχει επιτύχει μέχρι τώρα. Η θέση με την καλύτερη τιμή που έχει επιτευχθεί μέχρι τώρα ονομάζεται individual Best $X^*(t)$. Για κάθε σωματίδιο σωματίδιο του σμήνους, $X^*(t)$ μπορεί να αποφασιστεί και να ενημερωθεί κατά τη διάρκεια της αναζήτησης. Σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με μια αντικειμενική συνάρτηση J , το Individual Best του j^{th} σωματιδίου $X_j^*(t)$ ορίζεται έτσι ώστε $J(X_j^*(t)) \leq J(X_j(t)), t \leq t$. Για λόγους απλότητας υποθέτουμε ότι $J_j^* = J(X_j^*(t))$. Για κάθε j^{th} σωματίδιο το Individual best μπορεί να εκφραστεί ως $X_{j^*}(t)=[x_{j^*,1}^*(t), x_{j^*,2}^*(t), \dots, x_{j^*,m}^*(t)]$.
- Ολικό μέγιστο (Global Best) $X^{**}(t)$: είναι η "καλύτερη" τιμή που έχει βρεθεί μέχρι τώρα από οποιοδήποτε σωματίδιο του πληθυσμού. Για αυτό το λόγο ισχύει $J(X^{**}(t)) \leq J(X_j^{**}(t)), j=1,2,\dots,n$. Για λόγους απλότητας υποθέτουμε ότι $J^{**} = J(X^{**}(t))$.

- Κριτήρια διακοπής (Stopping criteria) : Είναι οι συνθήκες κάτω από τις οποίες θα τερματιστεί η διαδικασία αναζήτησης. (Συνήθως η αναζήτηση τερματίζει μετά από κάποιο αριθμό επαναλήψεων).

Η ταχύτητα των σωματιδίων στη k^{th} διάσταση περιορίζεται από κάποια μέγιστη τιμή, v_k^{max} . Αυτό το όριο προάγει την τοπική εξερεύνηση και στην πραγματικότητα προσομοιώνει της αλλαγές της ανθρώπινης μάθησης. Η μέγιστη αυτή ταχύτητα χαρακτηρίζεται από την έκταση των k^{th} παραμέτρων βελτιστοποίησης και δίνεται από τον τύπο: $v_k^{\text{max}}=(x_k^{\text{max}}-x_k^{\text{min}})/N$, όπου N είναι ο αριθμός των κενών στην k th διάσταση. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει στον αλγόριθμο PSO ο πληθυσμός έχει n σωματίδια τα οποία αναπαριστούν m υποψήφιες λύσεις και κάθε σωματίδιο είναι ένα m διαστάσεων διάνυσμα πραγματικών τιμών, όπου m είναι ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Για αυτό το λόγο κάθε παράμετρος αναπαριστά μια διάσταση του χώρου του προβλήματος. Αναλυτικά η τεχνική του PSO μπορεί να περιγραφεί με τα εξής βήματα:

1. **Αρχικοποίηση (initialization)**: Θέτουμε το μετρητή χρόνου στο μηδέν $t=0$, δημιουργούμε n τυχαία σωματίδια, επίσης δημιουργούμε τυχαίες τιμές ταχύτητας για όλα τα σωματίδια. Γίνεται αποτίμηση για κάθε σωματίδιο στον αρχικό πληθυσμό με τη χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης J . Αναζητούμε την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης J_{best} . Θέτουμε το σωματίδιο που σχετίζεται με αυτή τη τιμή σαν Global Best. Τέλος θέτουμε τις αρχικές τιμές των παραμέτρων βαρύτητας W_{min} και W_{max} .
2. **Ενημέρωση χρόνου (time updating)**: Ενημέρωση του time counter $t=t+1$.
3. **Ενημέρωση των παραμέτρων βάρους (Weight updating)**: Ενημέρωση του $w(t)=W_{\text{max}}-((W_{\text{max}}-W_{\text{min}}) \times \text{iter}/\text{Iter}_{\text{max}})$
4. **Ενημέρωση ταχύτητας (velocity updating)**: Χρησιμοποιώντας το το global best και το individual best η ταχύτητα του j th σωματιδίου ενημερώνεται σύμφωνα με την εξίσωση: $v_{j,k}(t)=w(t)v_{j,k}(t-1)+c_1r_1(x_{j,k}^*(t-1)-x_{j,k}(t-1))+c_2r_2(x_{j,k}^{**}(t-1)-x_{j,k}(t-1))$ όπου c_1 , c_2 είναι θετικές σταθερές και r_1, r_2 είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες τιμές στο διάστημα $[0,1]$. Επίσης ελέγχουμε τα όρια της ταχύτητας, εάν η ταχύτητα υπερβαίνει αυτά τα όρια την θέτουμε στο πλησιέστερο όριο (άνω ή κάτω αντίστοιχα)
5. **Ενημέρωση Θέσης (Position updating)**: Το κάθε σωματίδιο λαμβάνοντας υπ' όψη την ενημερωμένη ταχύτητά του αλλάζει την θέση του σύμφωνα με την εξίσωση: $x_{j,k}(t)=v_{j,k}(t)+x_{j,k}(t-1)$. Το αποτέλεσμα μπορεί να μην είναι πάντοτε το επιθυμητό λόγω της μη ικανοποίησης των περιορισμών της ταχύτητας, για αυτό

η προηγούμενη εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$X_{j,k} = \begin{cases} v_{j,k}(t) + x_{j,k}(t-1) \\ \text{if } x_{j,k}^{\min} \leq v_{j,k}(t) + x_{j,k}(t-1) \leq x_{j,k}^{\max} \\ x_{j,k}^{\min} \text{ if } v_{j,k}(t) + x_{j,k}(t-1) < x_{j,k}^{\min} \\ x_{j,k}^{\max} \text{ if } v_{j,k}(t) + x_{j,k}(t-1) > x_{j,k}^{\max} \end{cases}$$

6. **Ενημέρωση τοπικού βέλτιστου (Individual best updating):** κάθε σωματίδιο αποτιμάτε σύμφωνα με την ενημερωμένη θέση του: if $J_j > J_j^*$, $j=1,2,\dots,n$ { then update Individual Best as $X_j^*(t) = X_j(t)$ and $J_j^* = J_j$ and goto step 7} else goto to step 7.
7. **Ενημέρωση ολικού βέλτιστου (Global Best Updating):** αναζήτηση για τη μέγιστη τιμή J_{\max} μέσα στο J_j^* όπου \max είναι η θέση του σωματιδίου με τη μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (πχ. $\max \in \{j=1,2,\dots,n\}$). If $J_{\max} > J^{**}$ then {update global best as $X^{**} = X_{\max}(t)$ and $J^{**} = J_{\max}$ and goto to step 8} else goto to step 8.
8. **Συνθήκη τέλους (stopping criteria):** Εάν η συνθήκη τέλους ικανοποιείται τότε τελείωσε το πρόγραμμα αλλιώς πήγαινε στο βήμα 2

Εφαρμογές

- Οι Αμερικανικές ένοπλες δυνάμεις ερευνούν τη Νοημοσύνη Σμήνους με σκοπό την εφαρμογή της στον έλεγχο μη επανδρωμένων οχημάτων.
- Η Ευρωπαϊκή υπηρεσία διαστήματος σκέφτεται τη δημιουργία ενός σμήνους σε τροχιά για την αυτο συναρμολόγηση δορυφόρων και για συμβολομετρία.
- Η NASA ερευνά τη χρήση της νοημοσύνης σμήνους για την χαρτογράφηση πλανητών.
- Το 1992 μια δημοσίευση του M. Anthony Lewis and George A. Bekey πραγματεύεται τη πιθανότητα χρήσης της "swarm intelligence" για τον έλεγχο νανορομπότ μέσα στο ανθρώπινο σώμα ώστε να καταστούν ικανά να σκότωνουν τα καρκινικά κύτταρα.
- Οι καλλιτέχνες χρησιμοποιούν την τεχνολογία αυτή ως ένα μέσο για να δημιουργούν πολύπλοκα αλληλεπιδρόμενα συστήματα ή για να προσομοιώνουν τα πλήθη.. Tim Burton's *Batman Returns* ήταν η πρώτη ταινία που χρησιμοποίησε αυτή την τεχνολογία για να απεικονίσει ρεαλιστικά τις κινήσεις ενός γκρούπ πιγκουίνων χρησιμοποιώντας το σύστημα BOID. Ο άρχοντας των δαχτυλιδιών χρησιμοποίησε παρόμοια τεχνολογία γνωστή ως Massive (Multiple Agent Simulation System in Virtual Environment is a high-end computer animation and artificial intelligencesoftware package used for generating crowd-related visual effects for film and television. during battle scenes).
- Η τεχνολογία του Swarm intelligence χρησιμοποιείται επίσης και σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα με τη μορφή της δρομολόγησης μυρμηγκιού (ant based routing).
- Γενικά η τεχνολογία νοημοσύνης σμήνους είναι πολύ ελκυστική επειδή είναι φθηνή , εύρωστη και απλή στην υλοποίηση της. Ακόμη και φιλόσοφοι ασχολούνται μαζί της προσπαθώντας να ερμηνεύσουν την συμπεριφορά των μαζών.

Γενικά περί των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

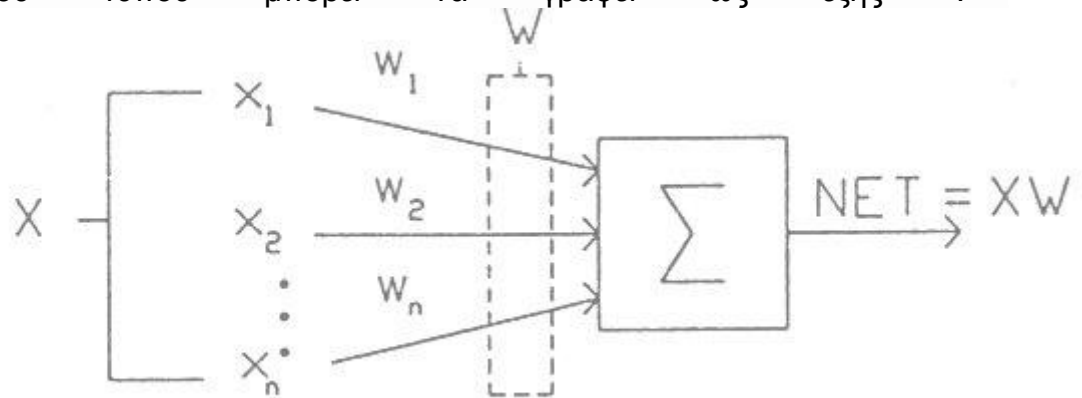
Τα πρώτα βήματα

Στα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης των νευρωνικών δικτύων οι ερευνητές προσπάθησαν να αντιγράψουν τον τρόπο οργάνωσης του εγκεφάλου όταν σκέπτονταν τον τρόπο της ρύθμισης και τους αλγόριθμους που έπρεπε να τους διέπουν . Όμως οι γνώσεις πάνω στην λειτουργία του εγκεφάλου ήταν περιορισμένες , όπως και σήμερα , έτσι οι ερευνητές έπρεπε να ξεπεράσουν τις γνώσεις αυτές και να βρουν δομές που να εκτελούν χρήσιμες λειτουργίες . Οι υποθέσεις , τελικά που κάνανε δεν επέτρεψαν την δημιουργία τέτοιων τεχνητών νευρωνικών δικτύων . Όμως ο συνεχιζόμενος παραλληλισμός με τον ανθρώπινο εγκέφαλο έκανε τους ερευνητές να προσπαθήσουν να οδηγήσουν τις λειτουργίες των ΤΝΔ στην ανθρώπινη συνείδηση . Αυτό θα οδηγούσε , όμως στον σταματιμό της έρευνας στον τομέα των ΤΝΔ το 1960 αν δεν αναχαιτίζονταν αυτός ο τρόπος σκέψης για την ανάπτυξη των ΤΝΔ .

Το Τεχνητό Νευρώνιο

Το Τεχνητό νευρώνιο σχεδιάστηκε ώστε να μιμείται τα χαρακτηριστικά των βιολογικών νευρώνων . Έτσι , ένα σύνολο από δεδομένα εισόδου (inputs) εφαρμόζεται , το καθένα αντιπροσωπεύει τα δεδομένα εξόδου (outputs) από άλλο νευρώνιο . Κάθε είσοδος πολλαπλασιάζεται από το αντίστοιχο βάρος (weight) , ανάλογα με την συναπτική δύναμη , και μετά όλα τα inputs πολλαπλασιαζόμενα με το βάρος αθροίζονται για να καθορίσουν το βαθμό ενεργοποιήσεως του νευρώνιου . Όλη αυτή η διαδικασία φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 1 . Παρά την ποικιλία που υπάρχει στα παραδείγματα των δικτύων , σχεδόν όλα στηρίζονται σε αυτό τον τρόπο δομής . Ένα σύνολο από inputs , που τα έχουμε ονομάσει x_1, x_2, \dots, x_n , εφαρμόζεται στο τεχνητό νευρώνιο . Τα inputs αυτά , που συλλογικά μπορούμε να τα αντιστοιχήσουμε στις συντεταγμένες ενός διανύσματος X , παρομοιάζονται σαν τα σήματα που περνάνε διαμέσου των συνάψεων των βιολογικών νευρώνων . Κάθε σήμα πολλαπλασιάζεται από το συσχετιζόμενο weight w_1, w_2, \dots, w_n πριν εφαρμοστεί στο αθροίστηκα τμήμα , που συμβολίζετε με το ελληνικό γράμμα Σ . Το κάθε βάρος αντιστοιχεί στην «δύναμη» (strength) μιας συναπτικής σύνδεσης των βιολογικών νευρώνων . Το σύνολο των βαρών το αντιστοιχούμε στις συντεταγμένες ενός διανύσματος W . Το αθροιστικό τμήμα , που στην περίπτωση του βιολογικού νευρώνιου είναι το σήμα του κυττάρου , προσθέτει όλα τα inputs που έχουν πολλαπλασιαστεί με τα βάρη αλγεβρικά και παράγει μια τιμή εξόδου που καλούμε NET . Αυτό η διαδικασία με την μορφή ενός

μαθηματικού τύπου μπορεί να γραφεί ως εξής :



$$NET = X \cdot W$$

$$NET = x_1 \cdot w_1 + x_2 \cdot w_2 + \dots + x_n \cdot w_n$$

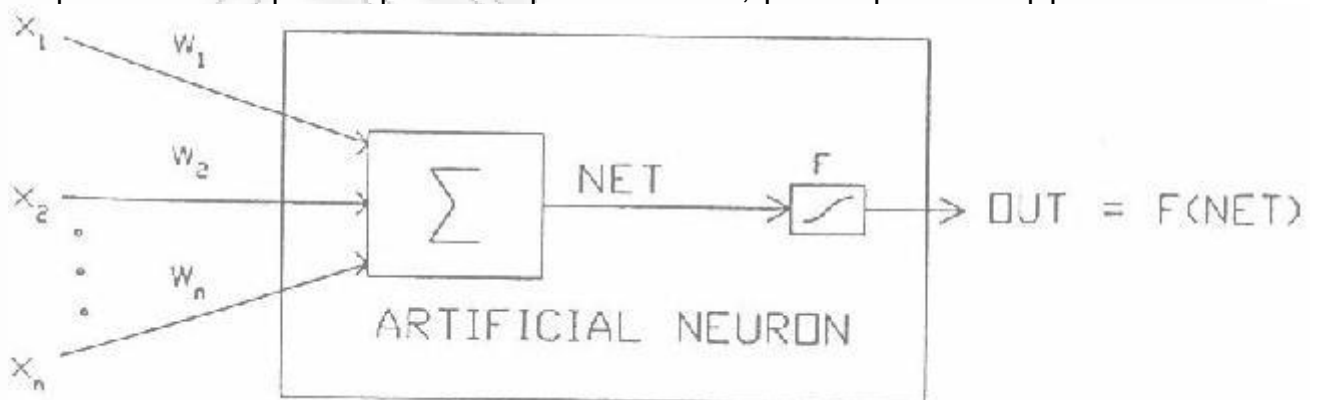
Συνάρτηση ενεργοποίησης

Το σήμα NET, συνήθως, από εκεί και πέρα επεξεργάζεται από μια συνάρτηση ενεργοποίησης F για να παράγει το σήμα εξόδου του νευρώσιου, που ονομάζεται OUT. Αυτή μπορεί να είναι (η συνάρτηση ενεργοποίησης) είτε μια απλή γραμμική σχέση: $OUT = K(NET)$, όπου K μια σταθερά ή από μια συνάρτηση κατωφλίου:

$$OUT = 1 \text{ αν } NET > T$$

$$OUT = 0 \text{ για κάθε άλλη τιμή}$$

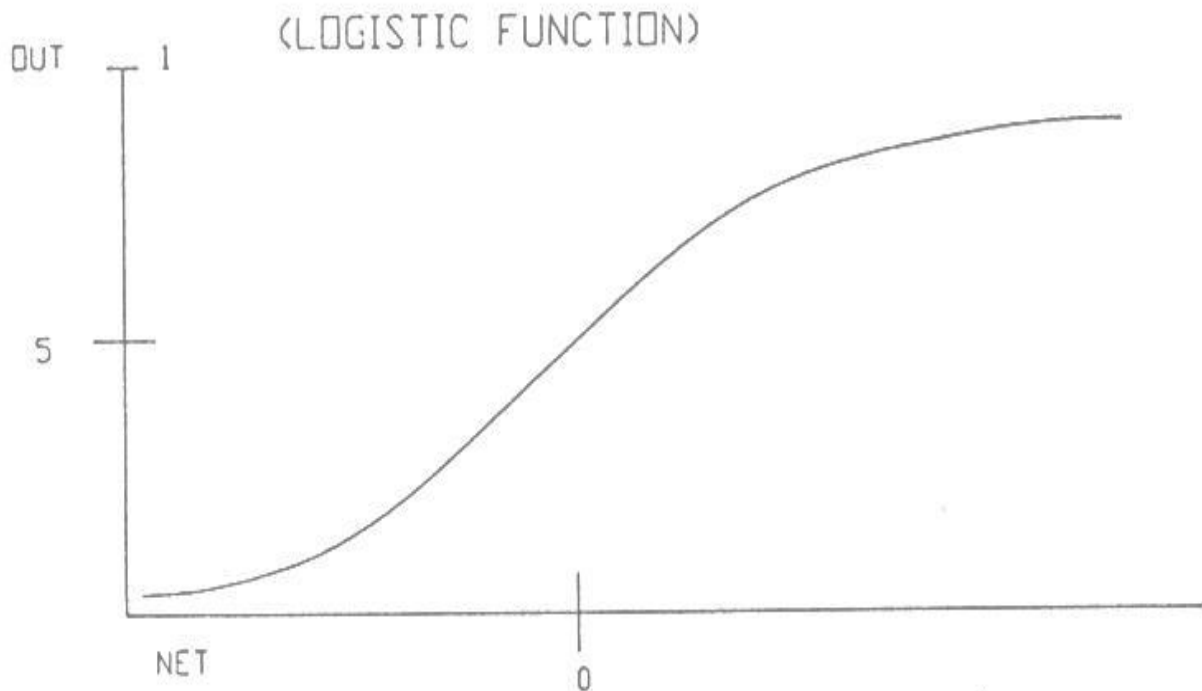
όπου T είναι η σταθερή τιμή του κατωφλίου είτε μια συνάρτηση που προσομοιώνει καλύτερα την μη-γραμμική ικανότητα μεταφοράς των βιολογικών νευρώνων και επιτρέπει την εκτέλεση από το δίκτυο, γενικότερων λειτουργιών.



Στο πιο πάνω Σχήμα το τετράγωνο F δέχεται το σήμα NET και παράγει το σήμα OUT. Αν το F τετράγωνο επεξεργασίας συμπιέζει την έκταση του NET έτσι ώστε το OUT να μην υπερβαίνει ποτέ κάποιο κατώτερο όριο, αναφορικά

με την τιμή του NET , ονομάζετε squashing function . Η squashing function συχνά επιλέγεται να είναι logistic συνάρτηση ή «σιγμοειδής» (η γραφική της παράσταση να έχει σχήμα S όπως φαίνεται στο πιο κάτω Σχήμα 3) . Η συνάρτηση μαθηματικά γράφεται σαν $F(x)=1/(1+EXP(-x))$, {όπου $EXP(-x)$ είναι μια δύναμη με βάση e και εκθέτη το -x} έτσι :

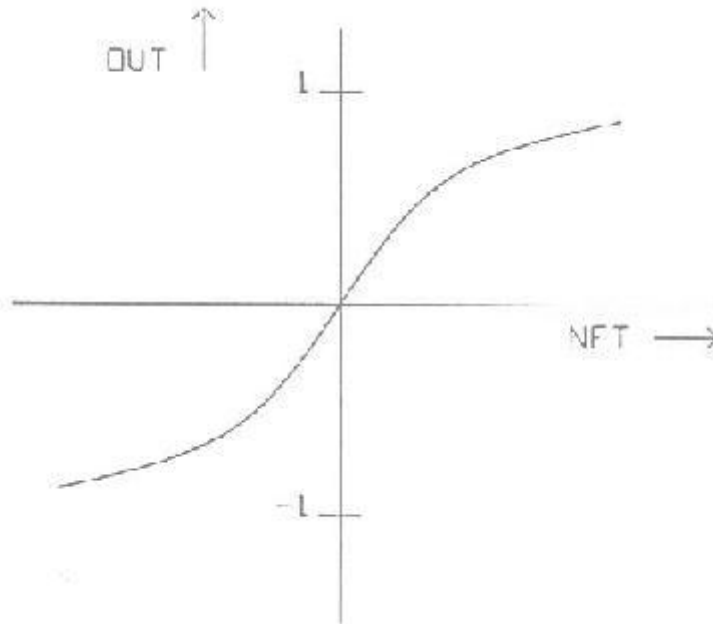
$$OUT=1/(1+EXP(-NET))$$



Σε αντιστοιχία με τα αναλογικά ηλεκτρονικά συστήματα , μπορούμε να πούμε για την συνάρτηση ενεργοποιήσεις ότι είναι αυτή που ορίζει το μη-γραμμικό κέρδος για το TN. Το κέρδος αυτό υπολογίζεται αν βρούμε την αλλαγή που επιφέρει μια μικρή αλλαγή του σήματος NET πάνω στο σήμα OUT . Έτσι , το κέρδος είναι η κλίση της καμπύλης στο καθορισμένο επίπεδο διέγερσης . Αναλυτικά , αρχικά έχει χαμηλή τιμή για μεγάλη αρνητική διέγερση (η καμπύλη είναι σχεδόν οριζόντια) μέχρι υψηλή τιμή για μηδενική διέγερση και πέφτει στην συνέχεια όταν η διέγερση γίνεται πολύ μεγάλη και θετική . Ο Grossberg (1973) βρήκε ότι η ικανότητα του μη-γραμμικού κέρδους έλυσε το noise-saturation (διαβρεχόμενα από θόρυβο) προβλήματα που αυτός έθεσε , δηλ. πως το ίδιο το δίκτυο μπορεί να χειρίζεται μικρά και μεγάλα σήματα . Μικρά σήματα εισόδου απαιτούν υψηλό κέρδος διαμέσου του δικτύου αν θέλουμε να παράγουν χρήσιμη έξοδο , όμως μεγάλος αριθμός από υψηλά στάδια κέρδους μπορούν να διαποτίσουν την έξοδο με μεγεθυμένο θόρυβο (τυχαία μεταβαλλόμενο) , αυτό μπορεί να παρουσιαστεί σε οποιοδήποτε δίκτυο που είναι πραγματοποιήσιμο . Επίσης , μεγάλα σήματα εισόδου θα διαποτίσουν τα υψηλού κέρδους στάδια , εξουδετερώνοντας τα σήματα εξόδου που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν . Η κεντρική περιοχή του υψηλού κέρδους από την

logistic συνάρτηση λύνει το πρόβλημα της επεξεργασίας μικρών σημάτων καθώς η περιοχή του , όπου στο θετικό και αρνητικό άκρο έχουμε κέρδος που ελαττώνετε , είναι κατάλληλη για μεγάλες διεγέρσεις . Με αυτό τον τρόπο το νευρώνιο λειτουργεί , με το κατάλληλο κέρδος , πάνω σε μια μεγάλη περιοχή των επιπέδων εισόδου.

Μια άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ενεργοποιήσεως είναι η υπερβολική εφαπτομένη . Έχει παρόμοιο σχήμα με την logistic συνάρτηση και χρησιμοποιείτε συχνά από τους βιολόγους σαν το μαθηματικό μοντέλο της nerve-cell ενεργοποίησης . Για να χρησιμοποιηθεί σαν συνάρτηση ενεργοποιήσεως του ΤΝΔ παίρνει την μορφή : $OUT = \tanh(x)$. Σαν την logistic συνάρτηση η υπερβολική εφαπτομένη είναι σιγμοειδής αλλά είναι και συμμετρική ως προς την αρχή των αξόνων , έτσι το OUT παίρνει την τιμή 0 όταν το NET είναι 0 (όπως φαίνετε στο ποιο κάτω Σχήμα 3). Σε αντίθεση με την logistic συνάρτηση , η υπερβολική εφαπτομένη έχει διπλή τιμή για το OUT χαρακτηριστικό που φαίνετε να είναι ευεργετικό για ορισμένα δίκτυα .

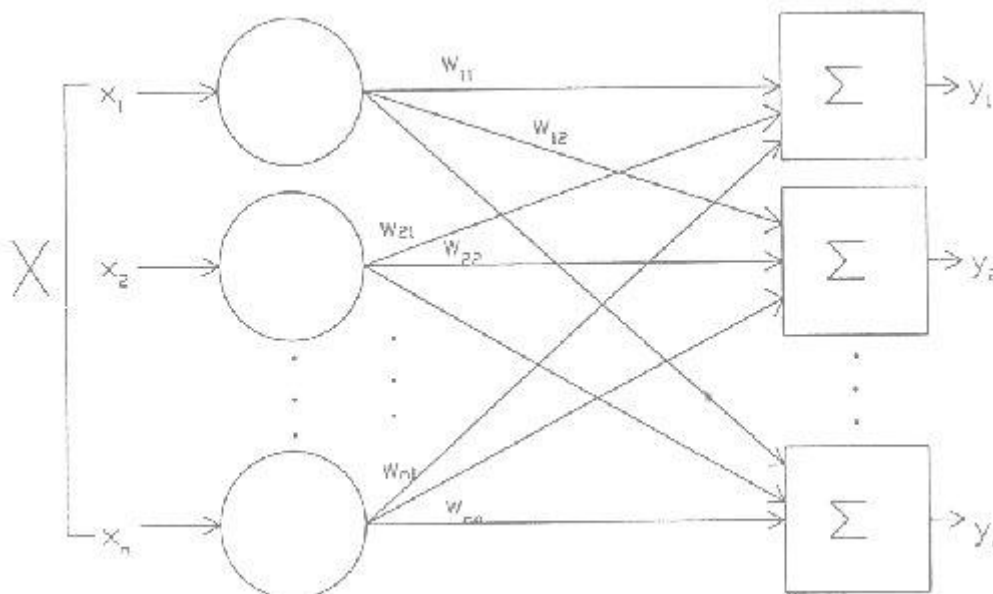


Τα απλά μοντέλα των ΤΝ αγνοούν πολλά από τα χαρακτηριστικά των βιολογικών τους προτύπων . Για παράδειγμα , δεν παίρνουν υπόψη τους τον χρόνο καθυστέρησης πράγμα που έχει επίδραση πάνω στην δυναμική του συστήματος (η είσοδος παράγει αμέσως έξοδο) . Ακόμα δεν περιλαμβάνουν την αποτελεσματικότητα του συγχρονισμού η της συχνά μοντελοποιήσεις των λειτουργιών των βιολογικών νευρώνων , χαρακτηριστικά των οποίων μερική ερευνητές βρίσκουν πολύ κρίσιμα .

Παρά τους περιορισμούς , δίκτυα που είχαν σχηματιστεί από τέτοιου είδους νευρώνια , παρουσιάζουν ιδιότητες που μας θυμίζουν πολύ έντονα τα βιολογικά συστήματα . Ίσως αρκετή από την βασική φύση των βιολογικών νευρώνων έχει χρησιμοποιηθεί ώστε να έχουμε ανταπόκριση παρόμοια με αυτή των βιολογικών συστημάτων , ίσως η ομοιότητα αυτή να είναι σύμπτωση , μόνο ο χρόνος και η έρευνα θα δείξει .

Single-Layer (ενός στρώματος) Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Μολονότι ένα μόνο του νευρώνιο μπορεί να εκτελέσει μερικές απλές λειτουργίες που αφορούν την ανίχνευση απλών προτύπων, η δύναμη της υπολογιστικότητας των νευρωνίων ανοίγεται μπροστά μας μόνο όταν αυτά συνδεθούν σε δίκτυο. Το πιο απλό δίκτυο αποτελείται από μια ομάδα από νευρώνια διατεταγμένους σε στρώμα, όπως φαίνεται στην δεξιά πλευρά του παρακάτω Σχήματος 4. Σημειώνουμε ότι, οι κύκλοι που φαίνονται στα αριστερά εργάζονται μόνο για το μοίρασμα των τιμών εισόδου, δεν εκτελούν υπολογισμούς, και έτσι δεν θεωρούνται ότι αποτελούν στρώμα αντίθετα τα νευρώνια που εκτελούν υπολογισμούς έχουν την μορφή τετραγώνων. Το σετ των τιμών εισόδου X έχει το κάθε του στοιχείο συνδεδεμένο σε κάθε ΤΝΔ διαμέσου διαφορετικών βαρών. Τα πρώτα ΤΝΔ δεν ήταν περισσότερο πολύπλοκα από ότι αυτό εδώ. Το κάθε νευρώνιο απλά παράγει ένα άθροισμα από τις τιμές εισόδου του δικτύου που έχουν πολλαπλασιαστεί με τα αντίστοιχα βάρη. Στην πραγματικότητα στα τεχνητά και βιολογικά δίκτυα πολλές από τις συνδέσεις τους μπορεί να μην υπάρχουν, όμως φαίνονται όλες οι για λόγους γενικότητας.

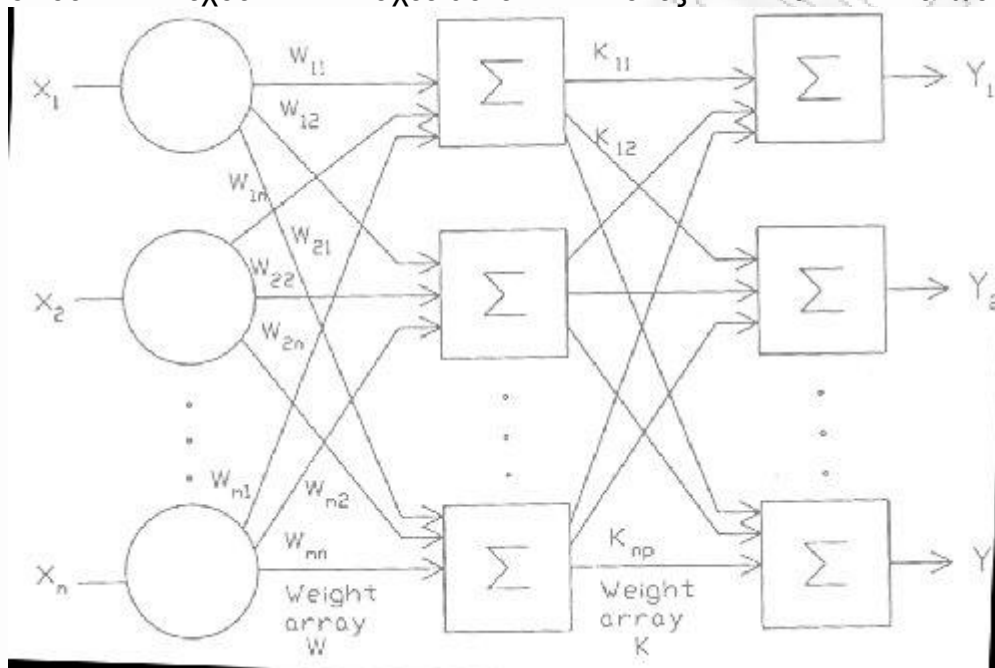


Είναι πιο συμφέρον να θεωρούμε τα βάρη σαν τα στοιχεία ενός πίνακα W . Οι διαστάσεις του πίνακα είναι m γραμμές και n στήλες, όπου m ο αριθμός των εισόδων και n ο αριθμός των νευρώνων. Για παράδειγμα, το βάρος που συνδέει την 3η είσοδο με το 2ο νευρώνιο είναι το $w_{3,2}$. Με αυτό τον τρόπο φαίνεται ότι ο υπολογισμός του σετ των νευρώνων NET τιμών εξόδου N για ένα στρώμα πετυχαίνεται με πολλαπλασιασμό πινάκων. Έτσι $N=X*W$, όπου N και X είναι row vectors.

MULTILAYER (ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑ) ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Μεγαλύτερα , περισσότερο πολύπλοκα δίκτυα , γενικά , προσφέρουν μεγαλύτερη ικανότητα υπολογισμών . Μολονότι τα δίκτυα έχουν κατασκευαστή με κάθε δυνατό τρόπο διάταξής τους , διατάσσοντας τα νευρώνια σε στρώμα μιμούνται την στρωματική δομή των διάφορων τμημάτων του εγκεφάλου . Τα πολύστρωμα δίκτυα , έχει αποδειχθεί , ότι έχουν ικανότητες πέρα από αυτές των μονόστρωμων δικτύων και στα πρόσφατα χρόνια αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι για να τα εκπαιδεύσουν .

Τα πολύστρωμα δίκτυα μπορούν να σχηματιστούν από ομάδες μονόστρωμων δικτύων , η έξοδος ενός στρώματος αποτελεί την είσοδο του απομένου στρώματος . Στο παρακάτω Σχήμα 5 φαίνεται ένα τέτοιο δίκτυο , όπου έχουν σχεδιαστεί όλες οι ενώσεις .



Η ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ

Τα πολύστρωμα δίκτυα δεν παρέχουν αύξηση της υπολογιστικής δύναμης από ότι ένα μονόστρωμο δίκτυο εκτός και αν υπάρχει μια μη-γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης ανάμεσα στα στρώματα . Υπολογίζοντας την έξοδο από ένα στρώμα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το vector εισόδου με τον πρώτο πίνακα βάρους και στην συνέχεια (αν δεν υπάρχει κάποια μη-γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης) το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με τον δεύτερο πίνακα βάρους . Αυτό μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$(X * W_1) * W_2$$

Η αντιμεταθετική ιδιότητα ισχύει στους πίνακες , έτσι :

$$X * (W_1 * W_2) = (X * W_1) * W_2$$

Αυτό δείχνει ότι ένα δίκτυο με δυο στρώματα μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα μονόστρωμο δίκτυο που έχει τον πίνακα βάρους του ίσο με τον γινόμενο των δυο πινάκων των βαρών . Έτσι το κάθε πολύστρωμο δίκτυο μπορεί να αντικατασταθεί με το ισοδύναμο μονόστρωμο δίκτυο . Το μονόστρωμο δίκτυο έχει σοβαρούς περιορισμούς πάνω στην υπολογιστική του ικανότητα , έτσι οι μη-γραμμικές συναρτήσεις ενεργοποιήσεις είναι ζωτικές για την επέκταση της ικανότητας των δικτύων πέρα από αυτήν των μονόστρωμων δικτύων .

ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΑ

Τα δίκτυα που είδαμε μέχρι τώρα έχουν αναφερθεί δεν έχουν συνδέσεις επανατροφοδοσίας feedback δηλαδή συνδέσεις μέσω βαρών που ξεκινούν από την έξοδο ενός στρώματος και καταλήγουν στην είσοδο του ίδιου ή ενός άλλου προηγούμενου στρώματος . Αυτή είναι ιδιική τάξη δικτύων που ονομάζονται non recurrent ή feedforward δίκτυα . Γενικά , δίκτυα που περιλαμβάνουν feedback συνδέσεις λέγεται ότι επαναλαμβάνονται . Τα nonrecurrent δίκτυα δεν έχουν μνήμη , έτσι η έξοδος τους καθορίζεται πάντα από την παρούσα είσοδος και από τις τιμές των βαρών . Σε μερικές διατάξεις δικτύων τα recurrent δίκτυα επανατροφοδοτούν με προηγούμενες εξόδους την είσοδο , έτσι η έξοδος τους καθορίζεται και από τις αντίστοιχες εισόδους και από τις προηγούμενες εξόδους . Για αυτό τον λόγο τα recurrent δίκτυα μπορούν να παρουσιάσουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτές της μικρόχρονης ανθρώπινης μνήμης , έτσι η κατάσταση των εξόδων του δικτύου εξαρτάτε κατά ένα μέρος από τα προηγούμενες τους εισόδους .

ΕΚΠΑΙΔΕΥΟΝΤΑΣ ΕΝΑ ΤΕΧΝΗΤΟ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό , από όλα , που αφορά τα ΤΝΔ είναι η ικανότητα τους να μαθαίνουν . Η εκπαίδευση τους δείχνει τόσους πολλούς παραλληλισμούς με την διανοητική ανάπτυξη των ανθρώπων , πράγμα που μας κάνει να πιστεύουμε ότι έχουμε πετύχει την βασική κατανόηση αυτής της διαδικασίας . Η ευφορία μας πρέπει να τερματιστεί εδώ γιατί η μάθηση στα ΤΝΔ είναι περιορισμένη και πολλές είναι οι δυσκολίες που πρέπει να λυθούν πριν πούμε ότι βρισκόμαστε στο σωστό δρόμο . Όμως πολλές εντυπωσιακές παρουσιάσεις έχουν γίνει , όπως το NetTalk του Sejnowski , και πολλές πρακτικές εφαρμογές άρχισαν να ξεπροβάλλουν .

ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Ένα δίκτυο εκπαιδεύεται έτσι ώστε η εφαρμογή ενός σετ από εισόδους δίνει το επιθυμητό σετ από εξόδους . Κάθε τέτοιο σετ από εισόδους ή εξόδους αναφέρεται σε μας σαν vector (διάνυσμα) . Η εκπαίδευση πετυχαίνεται με συνεχή εφαρμογή από διανύσματα εισόδου καθώς τα βάρη του δικτύου

προσαρμόζονται με βάση μια προκαθορισμένη διαδικασία . Κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης τα βάρη του δικτύου σταδιακά συγκλίνουν σε τιμές έτσι ώστε το κάθε διάνυσμα εισόδου να δίνει το επιθυμητό διάνυσμα εξόδου .

ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΜΕ ΕΠΙΒΛΕΨΗ

Οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης είναι χωρισμένοι σε αυτούς που εποπτεύονται και σε αυτούς που δεν εποπτεύονται . Η εποπτευόμενη εκπαίδευση απαιτεί το ζευγάρι το κάθε διανύσματος εισόδου με το διάνυσμα στόχο που αντιπροσωπεύει την επιθυμητή έξοδο , μαζί ονομάζονται training pair (ζευγάρι εκπαίδευσης) . Για να εκπαιδευτεί ένα δίκτυο χρειάζεται κάποιος αριθμός τέτοιων ζευγαριών . Ένα διάνυσμα εισόδου εφαρμόζεται , η έξοδος του δικτύου υπολογίζεται και συγκρίνεται με το αντίστοιχο διάνυσμα στόχο και η διαφορά (λάθος) τροφοδοτείται πίσω διαμέσου του δικτύου και τα βάρη αλλάζουν σύμφωνα με ένα αλγόριθμο που τείνει να ελαττώσει το λάθος . Τα διανύσματα εισόδου εφαρμόζονται συνεχώς , και τα λάθη υπολογίζονται και τα βάρη προσαρμόζονται για το κάθε διάνυσμα μέχρι το λάθος ολόκληρου του σετ εκπαίδευσης να είναι σε ένα αποδεκτό χαμηλό επίπεδο .

ΜΗ ΕΠΟΠΤΕΥΟΜΕΝΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

Παρά την επιτυχία μερικών εφαρμογών η εποπτευόμενη εκπαίδευση έχει κατηγορηθεί ότι είναι βιολογικά αδύνατη , είναι δύσκολο να συλλάβει κανείς ένα μηχανισμό εκπαίδευσης στο εγκέφαλο που συγκρίνει της επιθυμητές και της ενεργές εξόδους , που να εκτελεί διαδικασίες διόρθωσης τροφοδοτώντας πίσω διαμέσου του δικτύου . Αν ίσχυε αυτό τότε από πού αυτός ο μηχανισμός του εγκεφάλου θα είχε το πρότυπο της επιθυμητής εξόδου . Η μη εποπτευόμενη εκπαίδευση είναι πολύ περισσότερο εύλογη σαν μοντέλο της μάθησης στα βιολογικά συστήματα . Αναπτύχθηκε από τον Kohonen (1984) και πολλούς άλλους , δεν απαιτεί διανύσματα στόχους για την έξοδο και για αυτό δεν γίνεται σύγκριση με την κάποια προκαθορισμένη ιδανική απόκριση . Το σετ εκπαίδευσης αποτελείται μόνο από διανύσματα εισόδου . Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης αλλάζει τα βάρη του δικτύου για να παράγονται διανύσματα εξόδου που να είναι συνεπής , δηλαδή είτε η εφαρμογή ενός από τα διανύσματα εκπαίδευσης είτε η εφαρμογή ενός διανύσματος που είναι αρκετά όμοιος με αυτόν θα παράγει το ίδιο πρότυπο από εξόδους . Η διαδικασία εκπαίδευσης βγάζει της στατιστικές ιδιότητες του σετ εκπαίδευσης και ομαδοποιεί τα παρόμοια διανύσματα σε τάξης . Εφαρμόζοντας ένα διάνυσμα από δοσμένη τάξη στη είσοδο θα παράγει συγκεκριμένο διάνυσμα εξόδου , αλλά δεν υπάρχει κανένας τρόπος ώστε να καθοριστεί πριν από την εκπαίδευση ποιο συγκεκριμένο πρότυπο εξόδου θα παραχθεί από δοσμένη τάξη διανύσματος εισόδου . Για αυτό οι έξοδοι ενός τέτοιου δικτύου πρέπει , γενικά , να μετατραπούν σε μια κατανοητή μορφή που είναι επακόλουθο της διαδικασίας εκπαίδευσης . Αυτό δεν είναι κάποιο σοβαρό πρόβλημα . Είναι συνήθως απλό το θέμα της αναγνώρισης της σχέσης εισόδου-εξόδου , που έχει εγκαθιδρυθεί από το δίκτυο.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Οι περισσότερη σημερινοί αλγόριθμοι έχουν εξελιχθεί από τις ιδέες του D.O. Hebb (1962). Αυτός πρότεινε ένα μοντέλο της μη-εποπτευόμενης εκμάθησης στο οποίο τα βάρη αυξάνονται όταν και οι δυο νευρώνες πηγή - αποδέκτης ενεργοποιούνται . Με αυτό τον τρόπο τα συχνά χρησιμοποιούμενοι διάδρομοι στο δίκτυο είναι ενισχυμένοι , και το φαινόμενο της συνήθειας και μάθησης διαμέσου της επανάληψης εξηγείτε έτσι .

Ένα ΤΝΔ που χρησιμοποιεί τον τρόπο μάθησης του Hebbian θα αυξήσει τα βάρη του δικτύου αυτού σύμφωνα με τα παράγωγα των ανώτερων επίπεδων των νευρώνων πηγής και αποδέκτη . Δηλαδή :

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \alpha \cdot \text{OUT}_i \cdot \text{OUT}_j$$

όπου:

$w_{ij}(n)$: η τιμή του βάρους από τον νευρώνα i στον νευρώνα j πριν από την προσαρμογή

$w_{ij}(n+1)$: η τιμή του βάρους από τον νευρώνα i στον νευρώνα j μετά την προσαρμογή

α : ο συντελεστής των ορίων μάθησης

OUT_i : η έξοδος από τον νευρώνα i και η είσοδος στον νευρώνα j

OUT_j : η έξοδος από των νευρώνα j .

Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη – UAV (Unmanned Aircraft Vehicles)



Σύμφωνα με μια μελέτη του υπουργείου Εθνικής Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών υπάρχει μια τεράστια αύξηση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών τόσο για πολεμικές αλλά και για ειρηνικές αποστολές (όπως χαρτογραφήσεις διασώσεις κλπ.). Αυτή η αύξηση δεν είναι μόνο ποσοτική αλλά και ποιοτική καθώς πλέον οι δυνατότητες των μη επανδρωμένων αεροσκαφών έχουν αυξηθεί κατά πολύ και έχουν φτάσει στο σημείο να μην απαιτούν την ύπαρξη απομακρυσμένων χειριστών για να εκτελέσουν πολύπλοκες αποστολές, είτε κατά μόνας είτε πετώντας σε σμήνη. Τεράστια ποσά δαπανούνται για τις ανάγκες τις έρευνας και τις ανάπτυξης της τεχνολογίας των μη επανδρωμένων αεροσκαφών, έτσι ώστε να έχουμε φτάσει σήμερα στο σημείο τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη να πραγματοποιούν υπερατλαντικές πτήσεις αλλά και να διασχίζουν ακόμη και τον Ειρηνικό Ωκεανό να εκτελούν την αποστολή και να επιστρέφουν στην βάση τους. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι τέλεια για στρατιωτικές αποστολές, μεταφέροντας μια μικρή συλλογή όπλων, μπορεί να φέρει σε πέρας αποστολές παρόμοιες με ένα κανονικό αεροπλάνο, έχοντας το πλεονέκτημα ότι εξαλείφουν την απώλεια σε ανθρώπινες ζωές για αυτό το λόγο στέλνονται σε αποστολές υψηλού κινδύνου.

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Τα οδηγούμενα από ένα απομακρυσμένο χειριστή (Remotely Piloted Vehicle –RPV)
2. Τα εντελώς αυτόνομα η προγραμματιζόμενα οχήματα (autonomous or pre-programmed)

Τα RPV ελέγχονται με τη βοήθεια ενός χειριστή από κάποιο σταθμό εδάφους (Ground Control Station – GCS). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελεί το περίφημο Predator της αμερικανικής πολεμικής

αεροπορίας το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στον πόλεμο στο Αφγανιστάν. Το συγκεκριμένο αεροσκάφος μπορεί να πετάει συνεχόμενα για 24 ώρες, μέχρι και 400 μίλια απόσταση σε ευθεία γραμμή από τον πλησιέστερο σταθμό εδάφους, και σε ένα υψόμετρο 15000-25000 ποδιών. Ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή μιας εντολής από τον σταθμό εδάφους στο αεροσκάφος απαιτεί κλάσμα του δευτερολέπτου

Τα εντελώς αυτόνομα UAVs είναι εφοδιασμένα με ένα αυτόματο ελεγκτή ο οποίος ελέγχει την πτήση του αεροσκάφους και προβαίνει στις απαιτούμενες διορθωτικές ενέργειες αν τυχόν το αεροπλάνο παρεκκλίνει από το σχέδιο πτήσης το οποίο έχει φορτωθεί στη μνήμη του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελεί το Global Hawk, ένα μη επανδρωμένο όχημα το οποίο μπορεί να λειτουργεί συνεχόμενα για 35 ώρες, πετώντας σε μια καθορισμένη πορεία σε μέγιστο ύψος 65000 ποδών. Στη προκειμένη περίπτωση δύο Global Hawk μπορούν να πετούν σε σμήνος αποφεύγοντας τη σύγκρουση, διασχίζοντας τόσο τον Ατλαντικό όσο και τον Ειρηνικό Ωκεανό.



Global Hawk

Συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών

Ένα σύστημα μη επανδρωμένων αεροσκαφών αποτελείται από αρκετά αεροσκάφη και ένα Σταθμό Ελέγχου ο οποίος βρίσκεται στο έδαφος. Ένας σταθμός εδάφους ενός στρατιωτικού σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών συνήθως έχει δύο χειριστές ό ένας ασχολείται με τα ζητήματα που αφορούν την πτήση και ο άλλος με τα οπλικά συστήματα. Τα συστήματα ελέγχου πτήσης των μη επανδρωμένων αεροσκαφών συνήθως περιλαμβάνουν:

- Σταθεροποιητή τριών αξόνων
- Ολοκληρωμένο σύστημα πλοήγησης (INS/GPS)
- Τρισδιάστατη αυτόματη πλοήγηση
- Πακέτο λήψης δεδομένων – αισθητήρες
- Εισόδους-Εξόδους: Ψηφιακής σειριακή θύρα, Αναλογική θύρα
- Ενσωματωμένο καταγραφέα δεδομένων

Ένα τυπικό σύστημα ελέγχου πτήσης μη επανδρωμένων αεροσκαφών, όπως μπορούμε να δούμε στο πιο κάτω διάγραμμα αποτελείται από ένα εσωτερικό βρόγχο με πολλαπλές εισόδους και εξόδους (Multi Input Multi Output – MIMO) και έναν εξωτερικό βρόγχο με πολλαπλές εισόδους – εξόδους. Ο σκοπός του εσωτερικού βρόγχου είναι για την αύξηση της σταθερότητας του αεροσκάφους απέναντι στις διάφορες διαταραχές πτήσεως όπως για παράδειγμα: άνεμος, γρήγορους ελιγμούς κλπ. Ο εσωτερικός βρόγχος αποκαλείται επίσης Σύστημα Ενίσχυσης της Ευστάθειας (Stability Augmentation System – SAS). Ο εξωτερικός βρόγχος είναι ένας βρόγχος ανάδρασης σχεδιασμένος έτσι ώστε να κατευθύνει το αεροπλάνο σύμφωνα με το σχέδιο πτήσης, αποτελείται από ένα κλειστό βρόγχο για τον έλεγχο του ύψους, μέσα σε ένα άλλο κλειστό βρόγχο για τον έλεγχο της διαδρομής.

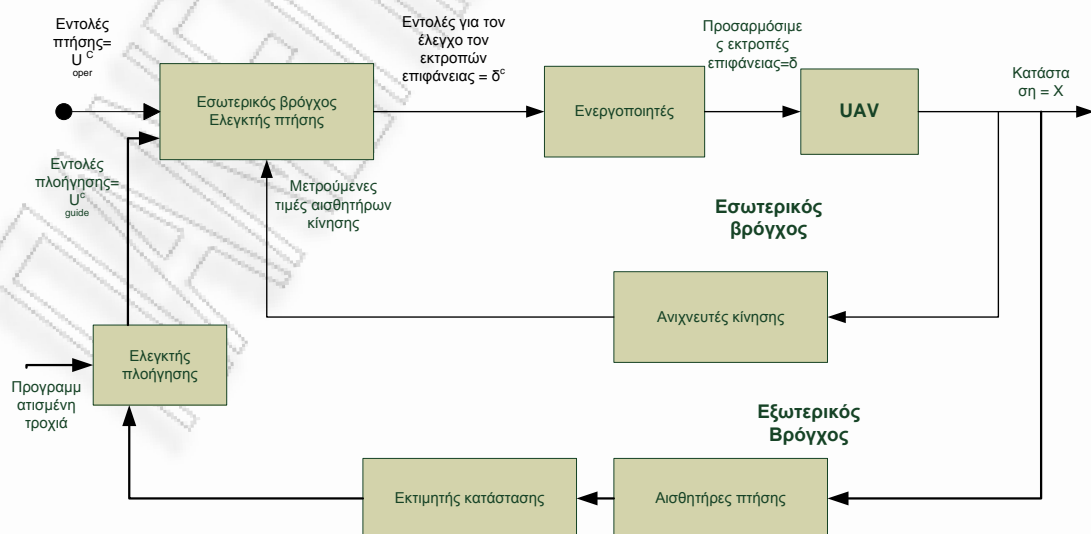


Ο εσωτερικός βρόγχος περιέχει

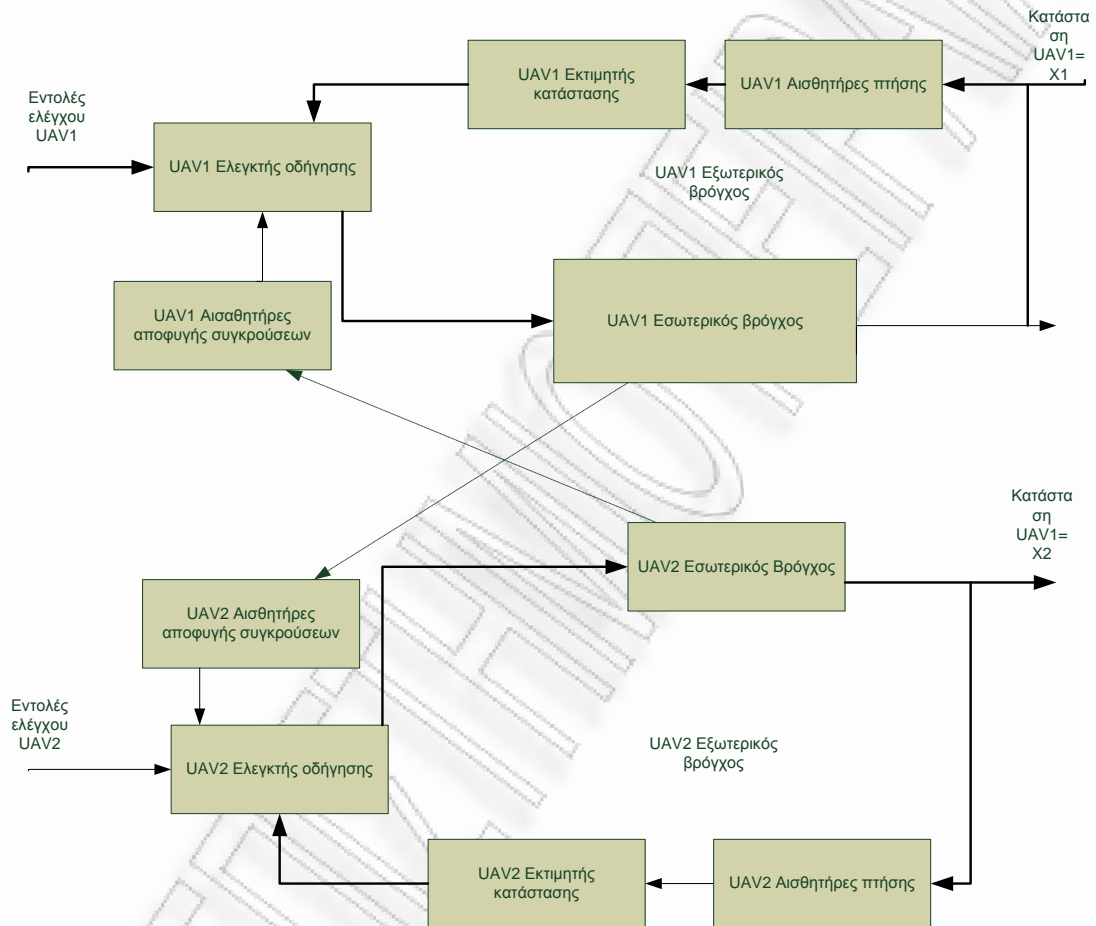
- Ανιχνευτές κίνησης
- Εσωτερικό βρόγχο ελέγχου πτήσης
- Ενεργοποιητές για τον έλεγχο των παραμορφώσεων του εδάφους

Ο εξωτερικός βρόγχος περιέχει:

- Αισθητήρες πτήσης
- Εκτιμητές κατάστασης, περιλαμβάνουν διάφορους αισθητήρες για την εκτίμηση της κατάστασης του αεροσκάφους
- Ελεγκτή προσανατολισμού
- Εσωτερικό βρόγχο



Όταν έχουμε πολλαπλά μη επανδρωμένα αεροσκάφη να πετάνε σε σμήνος, τότε απαιτείται η ύπαρξη ενός μηχανισμού ο οποίος θα είναι επιφορτισμένος με τις αποφυγές σύγκρουσης και τη διατήρηση του σχηματισμού. Για αυτό το σκοπό κάθε μη επανδρωμένο αεροσκάφος εξοπλίζεται με αισθητήρες οι οποίοι μετρούν την σχετική απόσταση με τα άλλα αεροσκάφη του σμήνους και το παραπάνω μπλοκ διάγραμμα τροποποιείται ως εξής:



Όσο ποιά μεγάλο είναι ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών τόσο πιο πολύπλοκος γίνεται ο έλεγχος αποφυγής των συγκρούσεων μεταξύ των αεροσκαφών του σμήνους. Εάν έχουμε n αεροπλάνα στο σμήνος τότε ο συνολικός αριθμός N των πιθανών συγκρούσεων μεταξύ δύο (κ) αεροπλάνων είναι:

$$N = C_n^2 = n! / (k!(n-k!)) \text{ για } n=5 \text{ έχουμε } N = 5! / (2!3!) = 10 \text{ για } k=2$$

Βλέπουμε ότι το N αυξάνεται ραγδαία όταν αυξάνεται το n.

Σχεδιασμός ελεγκτών για μη επανδρωμένα αεροσκάφη

Διαμήκης και πλευρική δυναμική

Η στατική σταθερότητα ενός αεροσκάφους αναφέρεται στη σταθερότητα των συνθηκών διαγωγής πχ, σε ένα σημείο ισορροπίας, για σταθερή πτήση, το οποίο χαρακτηρίζεται από μηδενικές επιταχύνσεις και στους 6 βαθμούς ελευθερίας του σώματος του αεροσκάφους (6-DOFs), οι αναφερόμενοι βαθμοί ελευθερίας είναι η κίνηση στις τρεις διαστάσεις X,Y,Z ,και οι τρεις γωνιακές μετατοπίσεις Φ, Θ και Ψ, η περιστροφή, το βήμα και η εκτροπή. Οι συνθήκες σταθερής πτήσης ορίζονται από τις μεταβλητές: $X_0, Y_0, Z_0, \Phi_0, \Theta_0$ και Ψ_0 και οι μικρές διαταραχές ορίζονται σαν x,y,z , και ϕ,θ,ψ . Οι αντίστοιχες διαταραχές ταχύτητας ορίζονται σαν u, v, w και p, q, r σε σχέση με τις τιμές για σταθερή πτήση οι οποίες ορίζονται ως $U_0, V_0, Z_0, W_0, P_0, Q_0$ και R_0 . Η στατική σταθερότητα σε σχέση με το σημείο ισορροπίας απαιτεί την αντίδραση του αεροσκάφους σε κάθε διαταραχή έτσι ώστε να επιστρέφει στο καθορισμένο σημείο ισορροπίας.

Ένας αυτόματος γραμμικός ελεγκτής για την σταθεροποίηση του αεροσκάφους σχεδιάζεται για :

- Ευθεία πτήση με μηδενικές γωνιακές ταχύτητες περιστροφής και εκτροπής $(d\Phi/dt)_0 = 0$ και $(d\Psi/dt)_0 = 0$.
- Συμμετρική πτήση με μηδενική ταχύτητα στον άξονα Y, $V_0 = 0$ και μηδενική γωνία εκτροπής $\Psi_0 = 0$.
- Επίπεδο πτήσης φτερών με μηδενική γωνία εκτροπής $\Phi_0 = 0$.

Η περιστροφική και μεταγραφική δυναμική δίνεται από τις εξισώσεις του Newton – Euler για τη μάζα και τη ροπή αδρανείας I_{xx}, I_{xz}, I_{yy} και I_{zz} , και για την κατάσταση ισορροπίας $P_0=0, Q_0=0$ και $R_0=0$

$$m(du/dt + W_0 q - \theta g \cos \Theta_0) = F_x$$

$$m(dv/dt + U_0 r - W_0 p - \phi g \cos \Theta_0) = F_y$$

$$m(dw/dt - U_0 q + \theta g \sin \Theta_0) = F_z$$

$$I_{xx} dp/dt - I_{xz} dr/dt = m_x$$

$$I_{yy} dq/dt = m_y$$

$$I_{zz} dr/dt - I_{xz} pr/dt = m_z$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αντιπροσωπεύουν ένα μοντέλο μη επανδρωμένου αεροσκάφους με 6 βαθμούς ελευθερίας. (6-DOF UAV model, DOF=Degree Of Freedom),

Η μετατροπή των ισότιμων γωνιακών ταχυτήτων του αεροσκάφους p, q , και r στις γωνιακές ταχύτητες του άξονα της γης $d\phi/dt, d\theta/dt$ και $d\psi/dt$ λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τις γωνίες του Euler Φ_0, Θ_0 και Ψ_0 :

$$d\phi/dt = q$$

$$d\theta/dt = p + r \tan \Theta_0$$

$$d\psi/dt = r / \cos \Theta_0$$

Οι παραπάνω εννιά διαφορικές εξισώσεις αναπαριστούν ένα μοντέλο μη επανδρωμένου αεροσκάφους σε κατάσταση ισορροπίας. F_x, F_y, F_z, m_x, m_y , και

m_z είναι οι δυνάμεις και οι ροπές διαταραχής, οι οποίες είναι συναρτήσεις χρόνου, οι μεταβλητές κίνησης και ο έλεγχος των αποκλίσεων επιφάνειας υπολογίζονται χρησιμοποιώντας συντελεστές ευστάθειας. Η διαμήκης και πλευρική δυναμική, στην πράξη, αποσυνδέεται.

Οι στατική σταθερότητα αναλύεται και συμπληρώνεται ξεχωριστά για:

- διαμήκης δυναμική, όσον αφορά τους άξονες X, Z και Θ
- πλευρική δυναμική, όσον αφορά τους άξονες Y, Φ και Ψ .

α) Οι εξισώσεις της διαμήκης δυναμικής είναι:

$$m(du/dt + W_0 q - \theta g \cos \Theta_0) = F_x$$

$$m(dw/dt - U_0 q + \theta g \sin \Theta_0) = F_z$$

$$I_{yy} dq/dt = m_y$$

ή σε μορφή κατάστασης χώρου:

$$du/dt = -W_0 q + \theta g \cos \Theta_0 + F_x/m$$

$$dw/dt = U_0 q - \theta g \sin \Theta_0 + F_z/m$$

$$dq/dt = m_y / I_{yy}$$

$$d\theta/dt = q$$

όπου οι εξωτερικές δυνάμεις διαταραχών F_x και F_z και η ροπή διαταραχής m_y προσεγγίζονται γραμμικά από μια σειρά Taylor με τη χρησιμοποίηση σημαντικών παραγώγων σταθερότητας:

$$X_u = (1/m) d F_x / du$$

$$X_w = (1/m) d F_x / dw$$

$$X_{\delta th} = (1/m) d F_x / d\delta_{th}$$

$$Z_u = (1/m) d F_z / du$$

$$Z_w = (1/m) d F_z / dw$$

$$Z_{\delta E} = (1/m) d F_z / d\delta_E$$

$$Z_{\delta th} = (1/m) d F_z / d\delta_{th}$$

$$M_u = (1/ I_{yy}) d m_y / du$$

$$M_w = (1/ I_{yy}) d m_y / dw$$

$$M_{dw/dt} = (1/ I_{yy}) d m_y / d(dw/dt)$$

$$M_q = (1/ I_{yy}) d m_y / dq$$

$$M_{\delta E} = (1/ I_{yy}) d m_y / d\delta_E$$

$$M_{\delta th} = (1/ I_{yy}) d m_y / d\delta_{th}$$

Όπου δ_E είναι η εκτροπή ανόδου και δ_{th} η αλλαγή στην ώση.

Έτσι οι εξισώσεις κατάστασης για τη διαμήκη δυναμική γίνονται:

$$du/dt = -W_0 q + \theta g \cos \Theta_0 + X_u u + X_w w + X_{\delta th} \delta_{th}$$

$$dw/dt = U_0 q - \theta g \sin \Theta_0 + Z_u u + Z_w w + Z_{\delta E} \delta_E + Z_{\delta th} \delta_{th}$$

$$dq/dt = M_u u + M_w w + M_{dw/dt} (dw/dt) + M_q q + M_{\delta E} \delta_E + M_{\delta th} \delta_{th}$$

$$d\theta/dt = q$$

ή σε μορφή πίνακα κατάστασης χώρου:

$$dx_L/dt = A_L x_L + B_L u_L$$

$$y_L = C_L x_L$$

όπου το διάνυσμα κατάστασης είναι:

$$x_L = [u \ w \ q \ \theta]^T$$

το διάνυσμα εξόδου επιλέγεται ως:

$$y_L = [\delta_E \ \delta_{th}]^T$$

και οι μήτρες A_L , B_L , C_L προκύπτουν από τις παραπάνω τέσσερις εξισώσεις κατάστασης.

Από τις παραπάνω εξισώσεις κατάστασης μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνάρτηση μετάβασης $u(s)/\delta_E(s)$. Ένα αεροσκάφος με σταθερά πτερύγια που περιέχει ένα «θετικό μηδέν» υποδεικνύει ένα μη ελάχιστο σύστημα φάσης. Στην περίπτωση αυτή μια βηματική είσοδος $\delta_E(s)$ οδηγεί σε υστέρηση $u(t)$. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη με ανοικτούς δυναμικούς βρόγχους με περιορισμένη στατική σταθερότητα και που περιέχουν μη ελάχιστα υποσυστήματα φάσης μπορούν να βελτιωθούν με αύξηση της σταθερότητας των συστημάτων κλειστού βρόγχου που αποτελούν μέρος του αυτόματου πιλότου.

Οι εξισώσεις πλευρικής δυναμικής είναι οι εξής:

$$m(dv/dt + U_0 r - W_0 p - \varphi g \cos \Theta_0) = F_y$$

$$I_{xx} dp/dt - I_{xz} dr/dt = m_x$$

$$I_{zz} dr/dt - I_{xz} pr/dt = m_z$$

$$d\varphi/dt = p + r \tan \Theta_0$$

$$d\psi/dt = r / \cos \Theta_0$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια ακολουθία ενεργειών όπως και προηγουμένως, οι εξισώσεις σε μορφή πίνακα κατάστασης χώρου είναι:

$$Dx_i/dt = A_i x_i + B_i u_i$$

$$y_i = C_i x_i$$

όπου το διάνυσμα κατάστασης είναι:

$$x_i = [v \ p \ r \ \varphi \ \psi]^T$$

το διάνυσμα εξόδου επιλέγεται ως:

$$y_i = [\delta_A \ \delta_R]^T$$

όπου δ_A είναι η εκτροπή του πτερυγίου κλίσης του αεροσκάφους και δ_R είναι η εκτροπή του πηδαλίου κατεύθυνσης. Παρόμοια οι μήτρες A_i , B_i , C_i , προκύπτουν από τις παραπάνω 5 εξισώσεις κατάστασης.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω διαμήκης και πλευρικές εξισώσεις οι συνολικές εξισώσεις της κατάστασης ισορροπίας για ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος με 6 βαθμούς ελευθερίας είναι οι εξής:

$$\mathbf{dx/dt} = \mathbf{A x} + \mathbf{B u}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C x}$$

όπου το διάνυσμα κατάστασης είναι:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{u w q \theta v p r \phi \psi}]^T$$

το διάνυσμα εξόδου επιλέγεται ως:

$$\mathbf{y} = [\delta_E \delta_{th} \delta_A \delta_R]^T$$

οι μήτρες A, B, C προκύπτουν απευθείας από τις παραπάνω A_L , B_L , και C_L και τις A_i , B_i , C_i . Το γραμμικό μοντέλο για τις συνθήκες ισορροπίας μπορούν να θεωρηθεί σαν μια γραμμικοποιημένη μορφή ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους με 6 βαθμούς ελευθερίας.

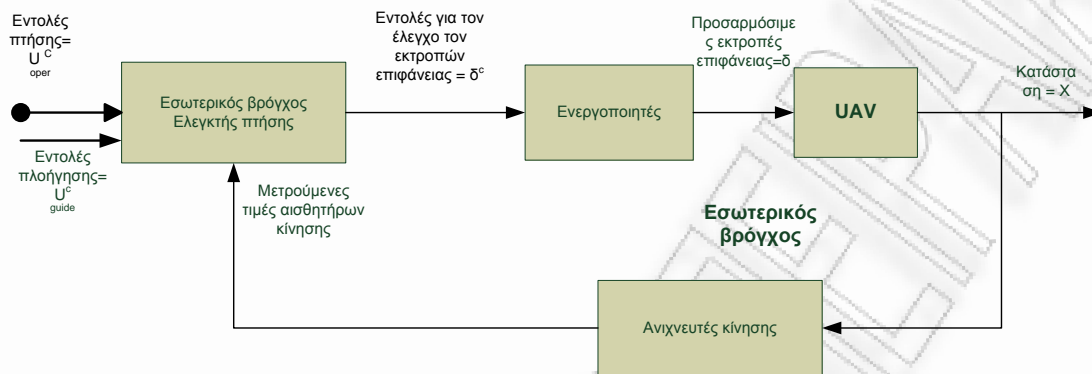
$$\mathbf{dx/dt} = \mathbf{f(x)} + \mathbf{g(x) u}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{g(x)}$$

Το γραμμικό μοντέλο ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους με 6 βαθμούς ελευθερίας σε κατάσταση ισορροπίας χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό γραμμικών ελεγκτών για τα αεροσκάφη, ενώ το μη γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό μη γραμμικών ελεγκτών και για τις δοκιμές των ελεγκτών σε προσομοιώσεις.

Αυτόματοι γραμμικοί ελεγκτές σταθεροποίησης

Εσωτερικός βρόγχος συστήματος ελέγχου



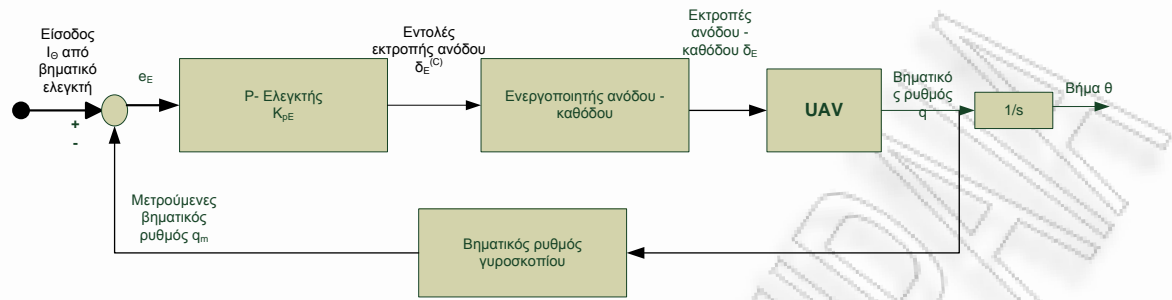
Τα μοντέρνα αεροσκάφη, συμπεριλαμβανομένου και των μη επανδρωμένων είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να έχουν μεγάλη ικανότητα ελιγμών, χαμηλό συντελεστή αντίστασης αέρα, χαμηλή κατανάλωση, ελάχιστο δυνατό βάρος κλπ. Οι εκπλήρωση των παραπάνω απαιτήσεων οδηγεί πολλές φορές σε αύξηση της αστάθειας των αεροσκαφών. Για αυτό απαιτείται η χρήση ενός κλειστού εσωτερικού βρόγχου ελέγχου για την αύξηση της σταθερότητας του αεροσκάφους. Επιπλέον τα μηδενικά της συνάρτησης μετάβασης του ανοικτού βρόγχου σταθεροποίησης του αεροσκάφους υποδεικνύουν την ύπαρξη μη ελάχιστων φασικών συστημάτων τα οποία απαιτούν δυναμική τροποποίηση με τη χρήση ενός ειδικά κατασκευασμένου εσωτερικού κλειστού βρόγχου ελέγχου.

Τρεις εσωτερικοί βρόγχοι ελέγχου απαιτούνται για να αυξήσουμε τη σταθερότητα του αεροσκάφους:

- αποσβεστήρας κλίσης
- αποσβεστήρας εκτροπής
- αποσβεστήρας κύλισης

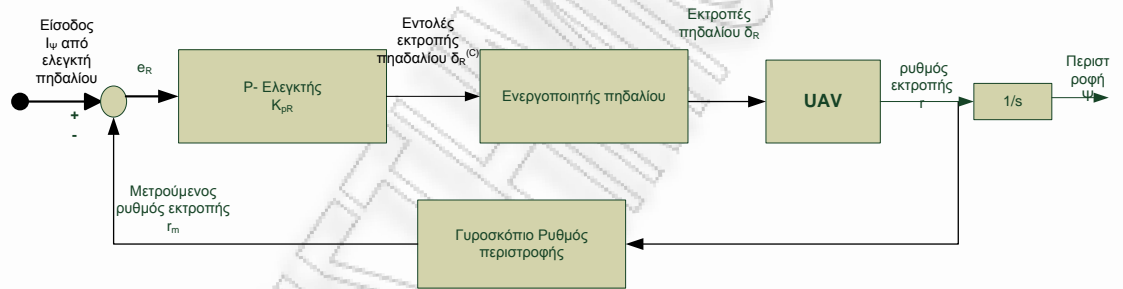
Αυτοί οι τρεις εσωτερικοί βρόγχοι ελέγχου μπορούν να σχεδιαστούν βασιζόμενοι στο γραμμικό μοντέλο των μη επανδρωμένων αεροσκαφών για κατάσταση ισορροπίας, πχ τόπος ριζών, πολικές συντεταγμένες κλπ.

Αποσβεστήρας κλίσης



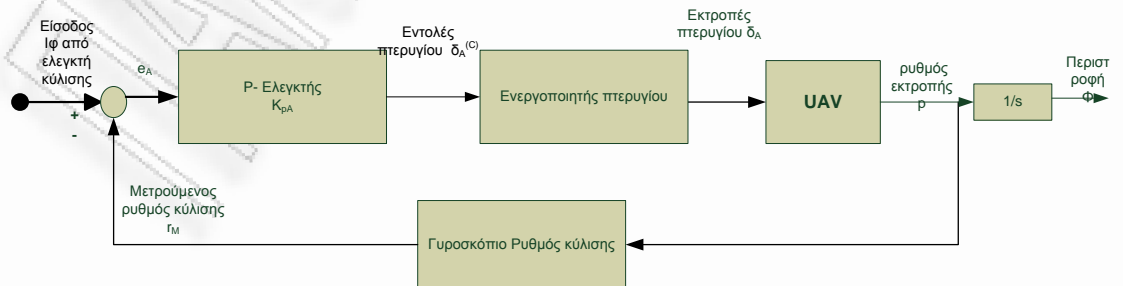
Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε έναν ελεγκτή P με ενίσχυση K_{pE} , για την αύξηση της βηματικής απόσβεσης εισάγοντας μια αρνητική ανάδραση του βηματικού ρυθμού. Η βηματική συνάρτηση μετάβασης $\theta(s) / I_\theta(s)$ θα έχει σε αυτή την περίπτωση επιπλέον απόσβεση εξαιτίας του βηματικού ρυθμού ανάδρασης q στον ελεγκτή P.

Αποσβεστήρας περιστροφής



Η συνάρτηση μετάβασης της περιστροφής $\Psi(s)/I_\psi(s)$ θα έχει μεγαλύτερη απόσβεση λόγω της ανατροφοδότησης στον ελεγκτή P. Για το σχεδιασμό του ελεγκτή P χρησιμοποιούμε μοντέλα πλαινίου δυναμικού σε καταστάσεις ισορροπίας του αεροσκάφους.

Αποσβεστήρας κύλισης

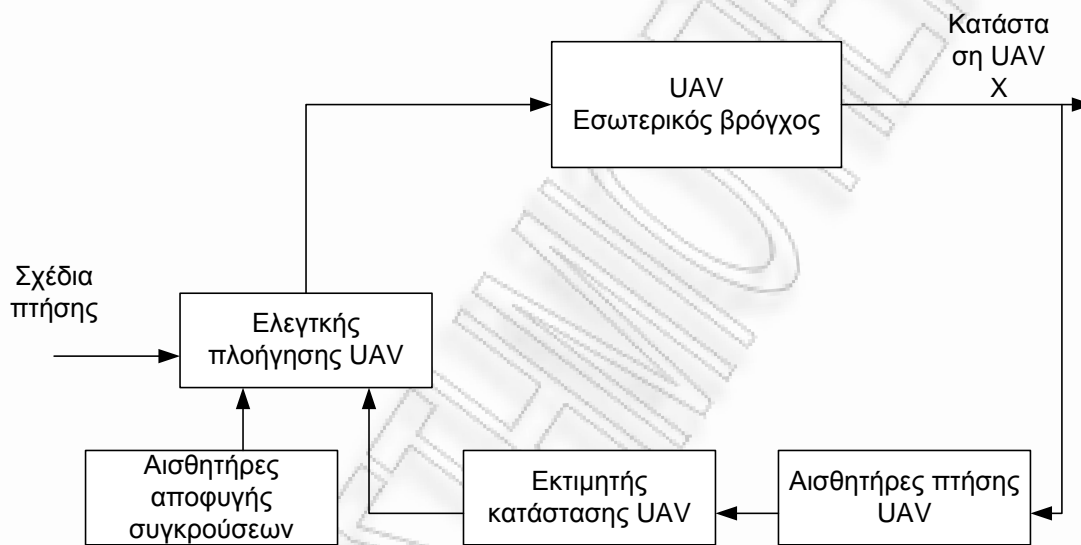


Η συνάρτηση μετάβασης της κύλισης του αεροσκάφους $\phi(s)/I_\phi(s)$ λόγω της ανάδρασης θα έχει μεγαλύτερη απόσβεση, για το σχεδιασμό και αυτού του

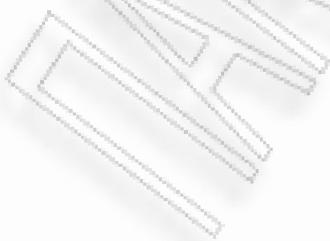
ελεγκτή χρησιμοποιούμε ένα μοντέλο πλευρικού δυναμικού σε κατάσταση ισορροπίας.

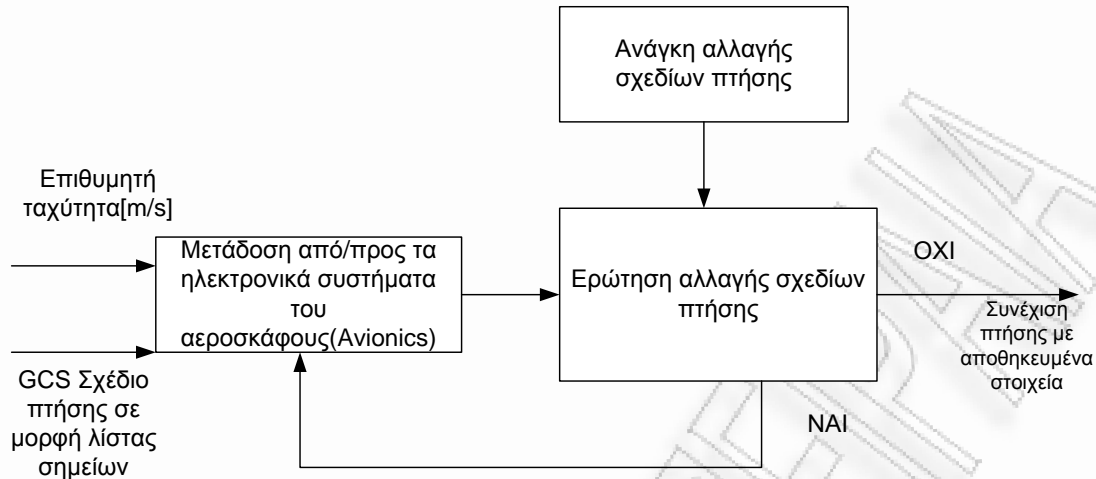
Αυτόματος γραμμικός ελεγκτής πλοήγησης

Με την εξέλιξη των μην επανδρωμένων αεροσκαφών παρουσιάστηκε και η ανάγκη ανάπτυξης κατάλληλων ελεγκτών για την αυτόματη πλοήγησή τους. Τα σημερινά μη επανδρωμένα αεροσκάφη έχουν την δυνατότητα ή της εντελώς αυτόνομης πλοήγησης ή της πλοήγησης μέσω ενός σταθμού εδάφους. Παρακάτω φαίνεται το γενικό μπλοκ διάγραμμα του εξωτερικού βρόγχου ελέγχου ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους:



Η τροχιά ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους αποτελείται από μια λίστα σημείων το καθένα από αυτά σχετίζεται με το γεωγραφικό πλάτος και μήκος, και το ύψος. Το σχέδιο πτήσης μεταβιβάζεται στα ηλεκτρονικά συστήματα του αεροσκάφους για αποθήκευση και εκτέλεση. Σε περιπτώσεις που έχουμε αλλαγή στα σχέδια πτήσης, αυτά πρέπει να ξανααποσταλούν για αποθήκευση στα ηλεκτρονικά συστήματα του αεροσκάφους από το σταθμό εδάφους. Παρακάτω φαίνεται ένας μπλοκ διάγραμμα που μας δείχνει την όλη διαδικασία για το σχέδιο πτήσης:





Για κάθε ζεύγος σημείων, τα σχετιζόμενα με αυτό γεωγραφικά μήκη και πλάτη, υψόμετρο και ταχύτητα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εντολών:

$U^{(c)}$ = Εντολή ταχύτητας [m/s]

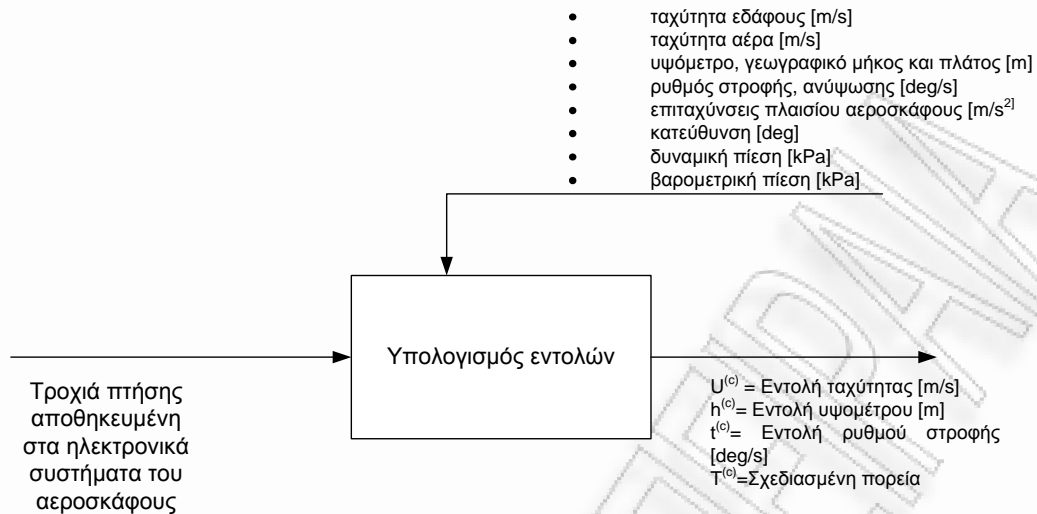
$h^{(c)}$ = Εντολή υψομέτρου [m]

$t^{(c)}$ = Εντολή ρυθμού στροφής [deg/s]

$T^{(c)}$ = Σχεδιασμένη πορεία

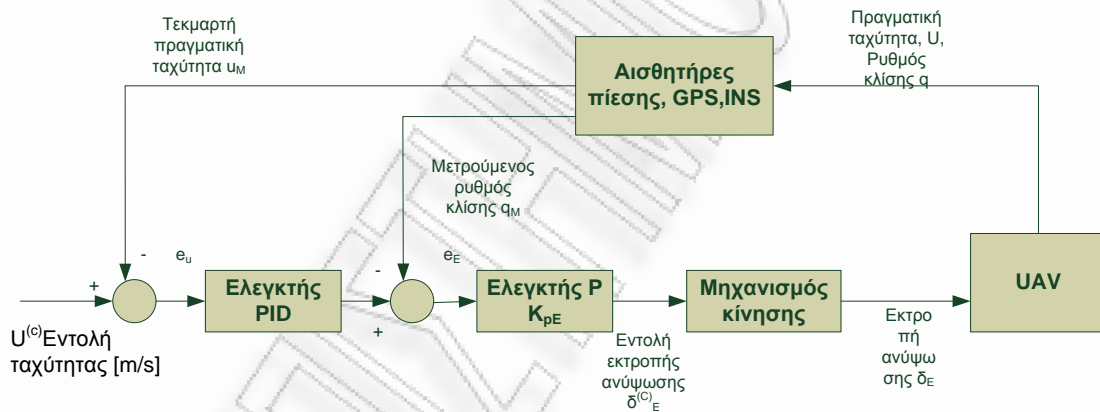
Επίσης για τον υπολογισμό χρησιμοποιούνται και οι μετρήσεις από τους αισθητήρες πίεσης και GPS,INS:

- ταχύτητα εδάφους [m/s]
- ταχύτητα αέρα [m/s]
- υψόμετρο, γεωγραφικό μήκος και πλάτος [m]
- ρυθμός στροφής, ανύψωσης [deg/s]
- επιταχύνσεις πλαισίου αεροσκάφους [m/s²]
- κατεύθυνση [deg]
- δυναμική πίεση [kPa]
- βαρομετρική πίεση [kPa]



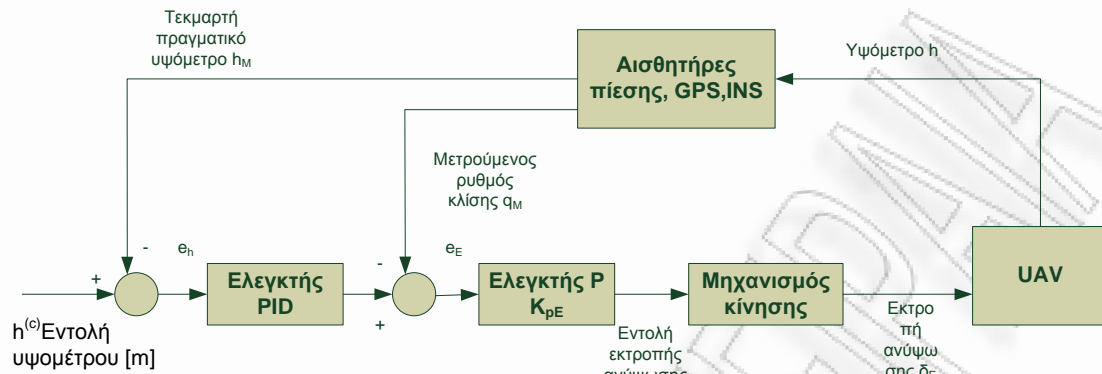
Για μικρά μη επανδρωμένα αεροσκάφη ο ελεγκτής πλοήγησης μπορεί να αποτελείται από τέσσερις ελεγκτές κλειστού βρόγχου:

• διατήρησης ταχύτητας

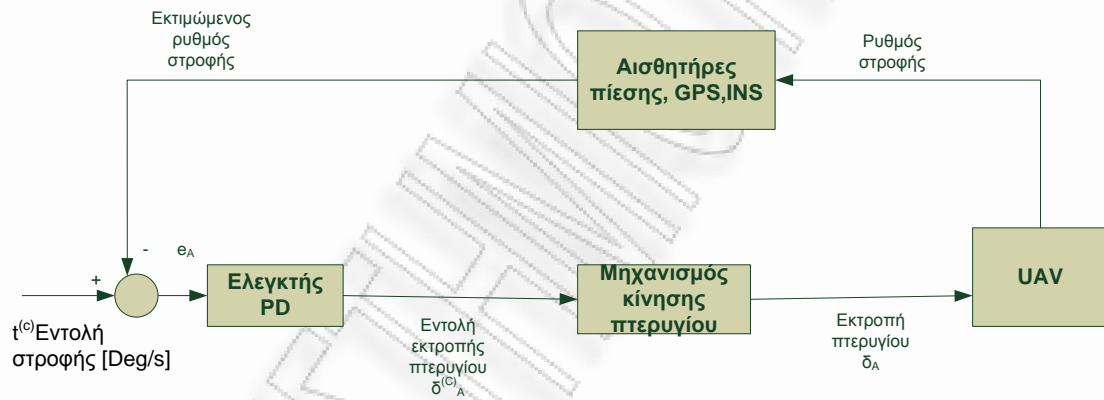


Σε αυτό τον ελεγκτή αρνητικής ανάδρασης η πραγματική ταχύτητα U_M συγκρίνεται με την προσδοκώμενη $U^{(c)}$ και το σφάλμα δίνεται ως είσοδος στον ελεγκτή PID ο οποίος έτσι δίνει εντολή σε έναν ελεγκτή κλειστού βρόγχου μείωσης της κλίσης.

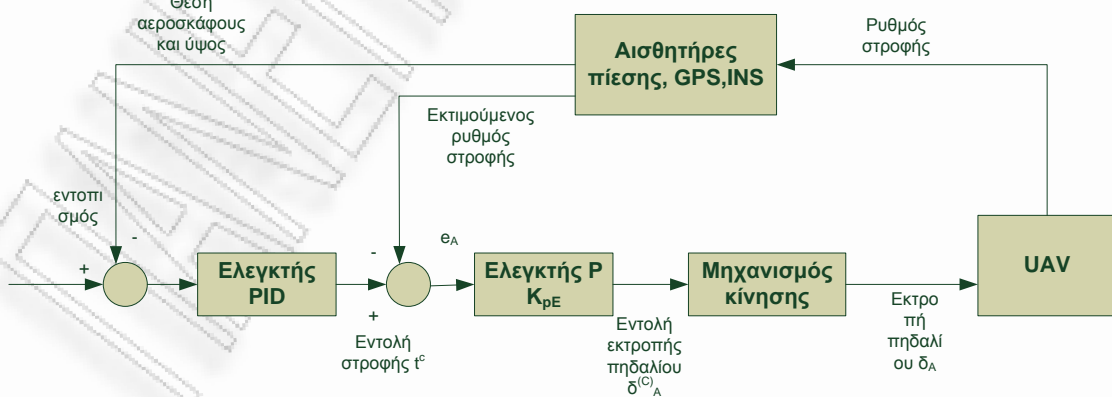
- διατήρησης υψόμετρου



- ελεγκτής ρυθμού στροφής

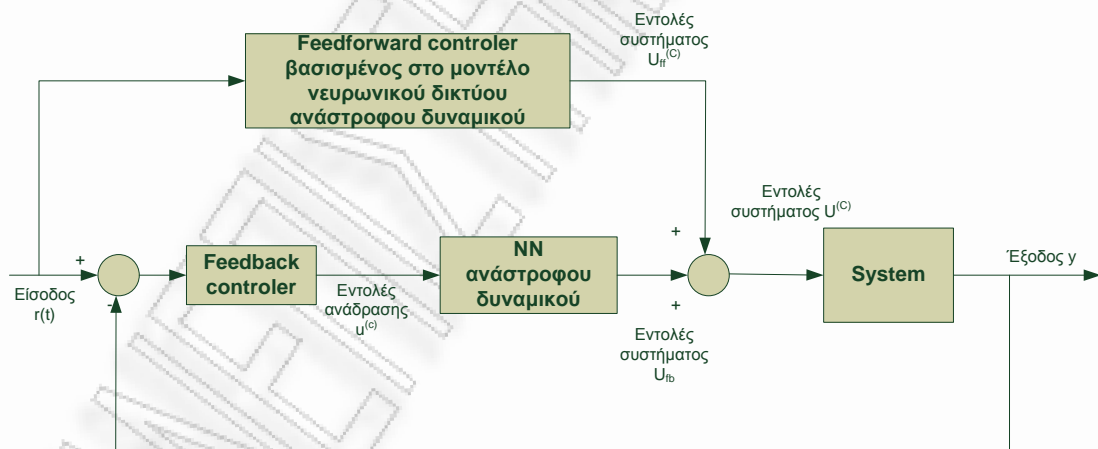


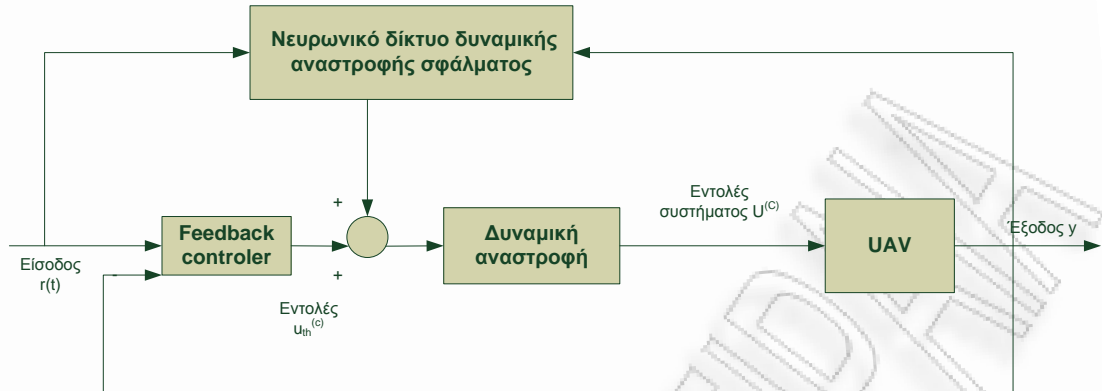
- ελεγκτής ανίχνευσης πορείας



Νευρωνικά δίκτυα και UAV

Ελεγκτές σταθερής ενίσχυσης που είδαμε μέχρι στιγμής δεν μπορούν να ικανοποιήσουν πολλές φορές τις ακραίες απαιτήσεις που έχει ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος όταν πετάει κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Ένας ακόμη λόγος, ο οποίος έκανε τους επιστήμονες να στραφούν στην ανάπτυξη πιο έξυπνων ελεγκτών, είναι το γεγονός ότι πολλές φορές δεν είναι δυνατό να γνωρίζουμε το πλήρες μαθηματικό μοντέλο όλων των συστημάτων ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους, αντίθετα μπορούμε να έχουμε στη διάθεση μας πληθώρα δεδομένων εισόδου, και για αυτά τα δεδομένα εισόδου να έχουμε και τα αντίστοιχα δεδομένα εξόδου, δηλαδή να γνωρίζουμε την είσοδο και την έξοδο του συστήματος χωρίς να γνωρίζουμε ακριβώς το μαθηματικό μοντέλο του ίδιου του συστήματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις μια ικανοποιητική λύση είναι η χρήση των νευρωνικών δικτύων (Neural Networks). Ο έλεγχος της πτήσης ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους, λόγω της πολυπλοκότητας του μοντέλου πτήσης είναι πιο εύκολο να γίνεται με τη χρήση νευρωνικών δικτύων, τα οποία απαιτούν πολύ λιγότερο υπολογιστικό χρόνο από ένα απλό ελεγκτή, με αποτέλεσμα να έχουν γρηγορότερη απόκριση στις διάφορες διαταραχές που μπορεί να συμβούν κατά τη διάρκεια μιας πτήσης ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους. Στα παρακάτω μπλοκ διαγράμματα βλέπουμε μια άποψη ενός ελεγκτή που κάνει χρήση ενός νευρωνικού δικτύου:





Ο εσωτερικός βρόγχος ελέγχου χρησιμοποιεί μοντέλο δυναμικής αναστροφής για τη γραμμική μορφοποίηση της δυναμικής πτήσης ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους. Δεδομένης της η μοντελοποίησης των δυναμικών παραμέτρων ενός αεροσκάφους και με δεδομένο την αβεβαιότητα των παραμέτρων, η γραμμική μορφοποίηση είναι μόνο μερική. Για τη βελτίωση της γραμμικής μορφοποίησης ενός νευρωνικού μοντέλου, συμπεριλαμβάνουμε στο σύστημα μας έναν δυναμικό αναστροφέα, έτσι το νευρωνικό μας δίκτυο γίνεται μια πολύ ενδιαφέρουσα λύση για τη χρήση του στον έλεγχο μη επανδρωμένων αεροσκαφών.

Σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών

Ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών έχει πολύ περισσότερες δυνατότητες από ότι ένα μεμονωμένο αεροσκάφος και αυτό γιατί η με την αύξηση του αριθμού των μη επανδρωμένων αεροσκαφών, διαμοιράζετε το έργο που έχει να επιτελεστεί στα συμμετέχοντα αεροσκάφη. Ιδίως σε αποστολές αναγνώρισης και παρακολούθησης ο χρόνος ολοκλήρωσης της αποστολής μειώνεται δραματικά με την αύξηση των συμμετεχόντων αεροσκαφών στο σμήνος. Επίσης όταν μια αποστολή ανατίθεται σε ένα σμήνος από μη επανδρωμένα αεροσκάφη διασφαλίζουμε ότι ακόμη και αν κάποια από τα αεροσκάφη παρουσιάσουν κάποιο πρόβλημα και εγκαταλείψουν την αποστολή, τα υπόλοιπα αεροσκάφη του σμήνους είναι ικανά να την ολοκληρώσουν, έτσι έχουμε αύξηση του ποσοστού επιτυχίας μιας αποστολής με τη χρήση σμήνους παρά μεμονωμένων μη επανδρωμένων αεροσκαφών.

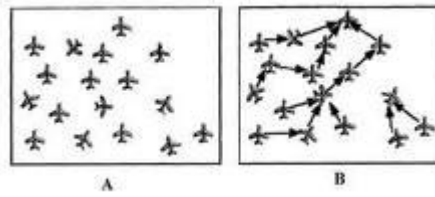
Ένα από τα βασικά στοιχεία για τη λειτουργία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε σμήνος είναι το λογισμικό που απαιτείται για την αυτόνομη λειτουργία τους. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου λογισμικού που να ανταποκρίνεται σε μια κεντρική δομή εντολών κάτω από τον ανθρώπινο έλεγχο είναι σχετικά εύκολη υπόθεση, όταν δίνεται μια εντολή, το αεροσκάφος πρέπει να αντιδρά άμεσα στην εντολή αυτή. Όταν όμως θέλουμε το αεροσκάφος να πετά αυτόνομα, τότε απαιτείται η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων πτήσης, όπως είδαμε και σε προηγούμενη ενότητα. Ιδίως σε λειτουργία σμήνους το κάθε αεροσκάφος απαιτείται να επικοινωνεί με τα υπόλοιπα αεροσκάφη ανταλλάσσοντας πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες πτήσης και το βαθμό ολοκλήρωσης της αποστολής.

Ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών μπορεί να παρομοιαστεί με ένα σμήνος πουλιών, για αυτό για την αποκεντρωμένη λειτουργία και την αυτοοργάνωση του σμήνους αεροσκαφών είναι απαραίτητη η χρήση συμπεριφοριστικών αλγορίθμων. Το σμήνος πρέπει να ακολουθεί μια ρεαλιστική και πρακτική μέθοδο για την ολοκλήρωση της αποστολής. Υπάρχουν δύο αυτόνομες μέθοδοι ελέγχου ενός σμήνους αεροσκαφών :

- Particle swarm optimization
- Linear control method

Στη παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους (Particle Swarm optimization) τον οποίο και θα προσομοιώσουμε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα matlab.





Με το πρόγραμμα αυτό εκπαιδεύουμε ένα νευρωνικό δίκτυο για να επιλύει ένα πρόβλημα, πράγμα που είναι ίδιο με ένα αεροσκάφος που ψάχνει για ένα στόχο.

Συνοπτική περιγραφή αλγορίθμων ελέγχου σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών

Κατά τη διάρκεια εφαρμογής του αλγόριθμου PSO σε εξομοιώσεις ενός σμήνους αεροσκαφών, παρατηρήθηκε ότι ο πλήρης συγχρονισμός του σμήνους δεν πρέπει να αποτελεί το βασικό στόχο. Το εξομοιωμένο, πλήρως συγχρονισμένο σμήνος περιόριζε της δυνατότητες του για το λόγο περιόριζε πάρα πολύ τα μέλη του σμήνους επιβάλλοντάς τους να κινούνται σε μια πολύ μικρή περιοχή. Το σμήνος ταξίδευε καταλαμβάνοντας μια πολύ μικρή περιοχή και για να ανίχνευση όλο το πεδίο για να βρει το στόχο του, έπρεπε να κινηθεί προς όλες τις κατευθύνσεις, ενώ αν αφήναμε τη δυνατότητα στα στοιχεία που αποτελούν το σμήνος να κινούνται λίγο προς τα έξω από αυτό τότε ο χρόνος ανίχνευσης μιας περιοχής μειώνεται, μιας και κάθε στοιχείο του σμήνους θα κάλυπτε μεγαλύτερο κομμάτι αυτής. Γενικά ισχύει ότι για την καλή λειτουργία ενός σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών, η επικοινωνία μεταξύ των μελών του σμήνους έχει μεγαλύτερο βάρος από τον ίδιο τον συγχρονισμό των κινήσεων του σμήνους.

Βασικό πλεονέκτημα του αλγόριθμου PSO είναι ότι μπορεί να ανακαλύψει το μοτίβο οποιουδήποτε προβλήματος χώρου για να φτάσει σε μια λύση αλλά η ακολουθία που ακολουθεί για να το επιτύχει αυτό μπορεί πολλές φορές να καταλήξει σε αδιέξοδο, και ο αλγόριθμος να πρέπει να ξανατρέξει προς μια νέα κατεύθυνση για να ανακαλύψει τη λύση-στόχο. Πράγμα που σημαίνει σπατάλη υπολογιστικού χρόνου και πόρων του συστήματος μιας και μπορεί να οδηγήσει το σμήνος προς μια κατεύθυνση η οποία μπορεί να αποδειχτεί ότι είναι λάθος και να πρέπει ολόκληρο το σμήνος να ξεκινήσει το ψάξιμο προς μια νέα κατεύθυνση. Για να ξεπεραστεί ένα τέτοιο λάθος ο αλγόριθμος PSO χρειάζεται ορισμένες τροποποιήσεις – βελτιώσεις για να μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικά σμήνη αεροσκαφών που κινούνται στον τρισδιάστατο χώρο.

Ο αλγόριθμος PSO εστιάζει στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος ανάμεσα στα σωματίδια και στον στόχο. Εξάλλου ο αλγόριθμος αλλάζει την κατεύθυνση των σωματιδίων έτσι ώστε να κατευθύνονται προς το στόχο, μεταβάλλοντας την επιτάχυνσή τους. Εφαρμόζοντας τον PSO σε πραγματικά αντικείμενα οι αλλαγές στην ταχύτητα αποτελούν ένα μεγάλο μειονέκτημα. Στη πραγματικότητα τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη του σμήνους θα πρέπει να διατηρούν μια σταθερή ταχύτητα έτσι ώστε να αποφεύγεται το χάος και οι

συγκρούσεις. Παρόλο αυτό το μεγάλο μειονέκτημα του αλγόριθμου PSO, η κεντρική ιδέα της ελαχιστοποίησης του σφάλματος ανάμεσα στα αεροσκάφη και του στον στόχο είναι απολύτως λειτουργική για ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών.

Ο γραμμικός αλγόριθμος ενσωματώνει πολλές από τις ιδέες που αναφέραμε στον αλγόριθμο PSO. Το σμήνος δεν χρειάζεται να κινείται συγχρονισμένα και κινείται προς το στόχο μειώνοντας συνεχώς το σφάλμα που προκύπτει από τις τρέχουσες συντεταγμένες του σμήνους και τις συντεταγμένες του στόχου. Το σφάλμα ελαχιστοποιείται μέσα από μια γραμμική διεργασία, διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα των αεροσκαφών. Η γραμμικότητα αυτή έχει πολύ καλά αποτελέσματα και στην εξομοίωση ενός σμήνους αεροσκαφών τα αεροσκάφη βρίσκουν το στόχο εύκολα και γρήγορα. Ο αλγόριθμος αυτός χειρίζεται τα αεροσκάφη σαν αντικείμενα που καταλαμβάνουν χώρο, πράγμα που οδηγεί στην αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των αεροσκαφών του σμήνους. Από τη στιγμή που το σμήνος δεν ταξιδεύει σε σχηματισμό, παρουσιάζεται η ανάγκη της ανασύνταξης των αεροσκαφών του σμήνους όταν βρεθεί ο στόχος και το σμήνος πρέπει να ετοιμαστεί για την «επίθεση». Αυτός ο ανασχηματισμός του σμήνους γίνεται με τη βοήθεια επίγειων σταθμών ελέγχου τροχιάς των αεροσκαφών, οι οποίοι συντονίζουν το σχηματισμό για την «επίθεση» στο στόχο.

Βασικό πλεονέκτημα του γραμμικού αλγορίθμου αποτελεί η εύκολη προσομοίωσή του σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και η εύκολη εφαρμογή του σε πραγματικά συστήματα μεγάλης κλίμακας.

Ο αλγόριθμος PSO και η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου

Από τη στιγμή που τα περισσότερα προβλήματα τα οποία έχουν να κάνουν με τον έλεγχο της πτήσης ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους είναι μη γραμμικά και πολυδιαστατικά, ο αλγόριθμος PSO είναι μια πάρα πολύ καλή λύση για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου το οποίο θα αναλάβει τον έλεγχο της πτήσης του αεροσκάφους.

Βασιζόμενοι στις υπολογιστικές απαιτήσεις που έχει η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου οι Venu G. Gudise and Ganesh K. Venayagamoorthy, ("Comparison of Particle Swarm Optimization and Backpropagation as Training Algorithms for Neural Networks,") απέδειξαν ότι ο αλγόριθμος PSO είναι πολύ πιο αποδοτικός από ότι η μέθοδος του "backpropagation". Αυτό το απέδειξαν βάζοντας τους δύο αλγορίθμους δια μέσω ενός νευρωνικού δικτύου να επιλύσουν μια μη γραμμική εξίσωση 2ου βαθμού ($y=2x^2+1$) φτάνοντας σε μια απόκλιση λάθους της τάξης του 0,001. Το πείραμα έδειξε ότι ο αλγόριθμος PSO χρειάζεται λιγότερο υπολογιστικό χρόνο από ότι η μέθοδος του "backpropagation".

Matlab - PSO Toolbox

Το matlab (matrix laboratory) είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Αποθηκεύει και κάνει τις πράξεις με βάση την άλγεβρα μητρών. Η τρέχουσα έκδοσή του είναι η R2011a η οποία κυκλοφόρησε στις 8 Απριλίου του 2011.

Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο είναι πολύ "ισχυρό" και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό καθώς περιέχει εντολές από την C++ όπως την while, την switch και την if. Στον τομέα των γραφικών όσον αφορά τον μαθηματικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει συναρτήσεις πραγματικές, μιγαδικές, πεπλεγμένες συναρτήσεις δύο μεταβλητών και άλλες. Όσον αφορά τον στατιστικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει ιστογράμματα, τομεογράμματα, ραβδοδιαγράμματα, εμβαδογράμματα και άλλα.

Ο Brian Birge δημιούργησε ένα εργαλείο του αλγόριθμου Particle Swarm Optimization για το matlab το οποίο μας εφοδιάζει με κάποιες πρόσθετες συναρτήσεις οι οποίες μας επιτρέπουν να εργαστούμε πάνω στον αλγόριθμο αυτό.

Τα κύρια αρχεία που περιλαμβάνει το συγκεκριμένο toolbox είναι τα εξής:

1. PSO : βρίσκει το μέγιστο/ελάχιστο μιας συνάρτησης MISO χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο PSO
2. trainPSO: Συνάρτηση για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιώντας τον PSO
3. tpsol,2,3,: συνάρτηση η οποία καλείται από την trainPSO για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου με 0 κρυφά επίπεδα, 1 κρυφό επίπεδο, και 2 κρυφά επίπεδα
4. wramat: μετατρέπει τα διανύσματα σε μήτρες

5. unwrmat: μετατρέπει οποιαδήποτε μήτρα 2 διαστάσεων σε ένα γραμμικό διάνυσμα
6. normalize: δέχεται ως είσοδο μια μήτρα δύο διαστάσεων και την ξαναφορμάρει σε συγκεκριμένη σειρά
7. gorlotpso: καλείται από το trainPSO για την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης
8. DemoTrainPSO: μας δείχνει ένα παράδειγμα της χρήσης του αλγόριθμου PSO για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου στη συνάρτηση XOR
9. f6 - Schaffer's συνάρτηση f6
10. hypara: τεσσάρων διαστάσεων υπερβολική/παραβολική συνάρτηση
11. hypara2: οκτώ διαστάσεων υπερβολική/παραβολική συνάρτηση
Το συγκεκριμένο toolbox διατίθεται δωρεάν από τη διεύθυνση:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7506>

Όπως είδαμε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο για τον PSO η πιο πολύ χρησιμοποιούμενη φόρμα του είναι αυτή που περιλαμβάνει αδρανειακούς όρους και σταθερές επιτάχυνσης:

$$v_i(k+1) = \varphi(k)v_i(k) + \alpha_1[\gamma_{1i}(p_i - x_i(k))] + \alpha_2[\gamma_{2i}(G - x_i(k))]$$

- i : δείκτης του σωματιδίου
- k : δείκτης διακριτού χρόνου
- v : ταχύτητα του i^{th} σωματιδίου
- x : θέση του i^{th} σωματιδίου
- p : καλύτερη θέση του i^{th} σωματιδίου (personal best)
- G : καλύτερη θέση του σμήνους (Global best, best of personals best)
- $\gamma_{1,2}$: τυχαία νούμερα μεταξύ $[0,1]$ οι οποίες δίνονται στο i^{th} σωματίδιο
- φ : Συνάρτηση αδρανεΐας
- $\alpha_{1,2}$: Σταθερές επιτάχυνσης

Η συνάρτηση αδρανεΐας συνήθως έχει μια σταθερή τιμή 1.4 ή μειώνεται γραμμικά μεταξύ 0.9 ως 0.4. Όταν η εκπαίδευση γίνεται με τη χρήση της γραμμικής συνάρτησης αδρανεΐας, η επίδραση της προηγούμενης ταχύτητας γίνεται μικρότερη. Οι Shi, Y., Eberhart, R., έχουν δείξει ότι οι συντελεστές επιτάχυνσης συνήθως πρέπει να τίθενται ίσες με το 2.

Ένα απλό παράδειγμα για τη χρήση του προγράμματος pso.m για να βρούμε το ελάχιστο της συνάρτησης συνημίτονου από 0 έως $\pi/2$ είναι το εξής :

```
pso('sin',1,[0,pi/2],0)
```

το όνομα της συνάρτησης περικλείεται ανάμεσα σε ' ' το 1 μας δείχνει ότι το πρόβλημα είναι μιας διάστασης (μια είσοδος έτσι έχουμε μόνο μια διάσταση για αναζήτηση) το διάστημα εξερεύνησης τίθεται από 0 έως $\pi/2$ $[0,pi/2]$ και το 0 στο τέλος μας δείχνει ότι ψάχνουμε για το ελάχιστο (αν ήταν ένα θα είχαμε την ανεύρεση του μέγιστου).

Όταν τώρα θέλουμε να εκπαιδεύσουμε ένα νευρωνικό δίκτυο με το συγκεκριμένο toolbox τότε τρέχουμε τη συνάρτηση trainPSO.m . Η συνάρτηση

αυτή προϋποθέτει ότι έχουμε εγκαταστήσει και το Neural Net toolbox στο matlab. Η φόρμα κλήσης της συνάρτησης αυτής είναι η εξής:

```
[W1,B1,W2,B2,...TE,TR]=trainPSO(W1,B1,F1,W2,B2,F2,...,P,T,TP)
```

όπου $W1, W2, W3, B1, B2, B3$ είναι τα βάρη και η στατιστική απόκλιση για το νευρωνικό δίκτυο. $F1, F2, F3$ είναι οι συναρτήσεις ενεργοποίησης οι οποίες επιλέγονται ως 'logsig', 'tansig' κλπ. για περισσότερες λεπτομέρειες δίνουμε στο matlab την εντολή:

```
help trainPSO
```

και παίρνουμε:

```
>> help trainPSO
```

TRAINPSO Particle Swarm Optimization backpropagation.

Syntax

```
[net,tr,Ac,EI] = trainpso(net,Pd,TI,Ai,Q,TS,VV,TV)
info = trainpso(code)
```

Description

TRAINPSO is a network training function that updates weight and bias values according to particle swarm optimization.

TRAINPSO(NET,Pd,TI,Ai,Q,TS,VV,TV) takes these inputs,

NET - Neural network.

Pd - Delayed input vectors.

TI - Layer target vectors.

Ai - Initial input delay conditions.

Q - Batch size.

TS - Time steps.

VV - Empty matrix [] or structure of validation vectors.

TV - Empty matrix [] or structure of test vectors.

and returns:

NET - Trained network.

TR - Training record of various values over each epoch:

TR.epoch - Epoch number.

TR.perf - Training performance.

TR.vperf - Validation performance.

TR.tperf - Test performance.

Ac - Collective layer outputs for last epoch.

EI - Layer errors for last epoch.

Training occurs according to the TRAINPSO's training parameters shown here with their default values:

```

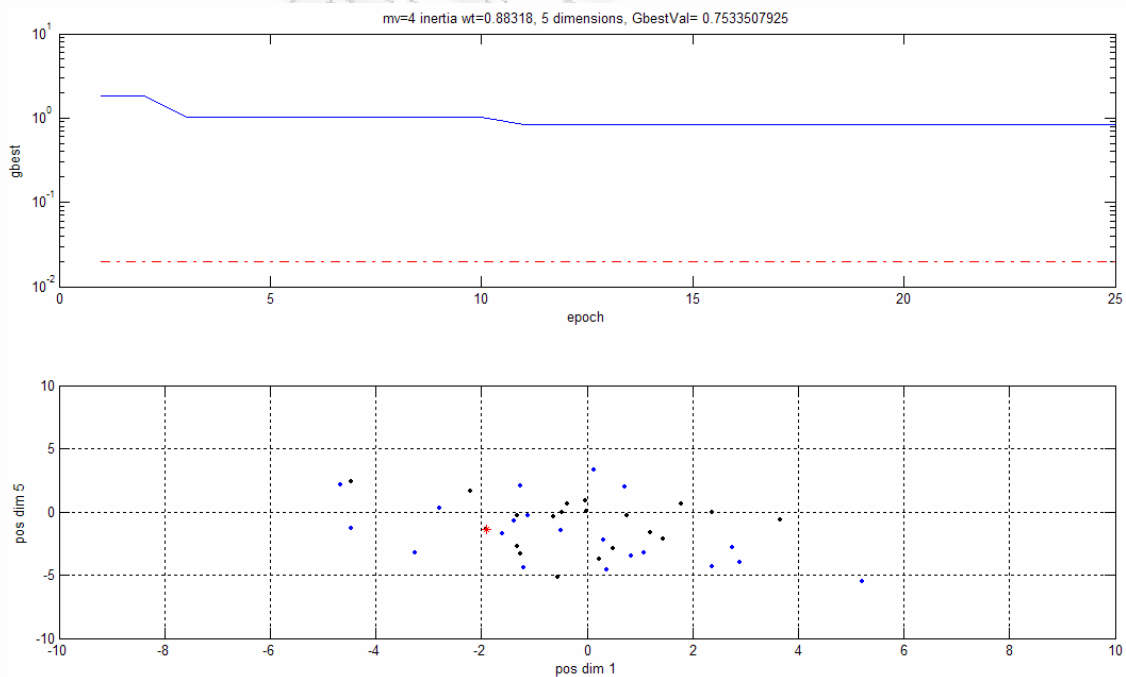
trainParam.display = 0;      iterations to update display (0 means
never)
trainParam.maxit   = 2000;   maximum iterations
trainParam.popsz   = 25;    population size
trainParam.ac      = [2,2];  acceleration constants (for type = 0)
trainParam.inwt    = [0.9,0.4]; inertia weights (for type = 0)
trainParam.it_inwt = floor(0.8*trainParam.maxit) iters to reach final
inertia weight
trainParam.egd     = 1e-9;   minimum error gradient
trainParam.iter_egd = floor(0.2*trainParam.maxit) iters at errgrad value
before exit
trainParam.eg      = 0;     error goal, NaN is unconstrained
trainParam.type    = 2;     chooses type of pso (common, clerc, etc)
trainParam.seedflag = 0;    flag to tell if we want to seed particles
trainParam.plotfcn = 'goplotpso'; plotting function
trainParam.seedvals = NaN;  Seed values

```

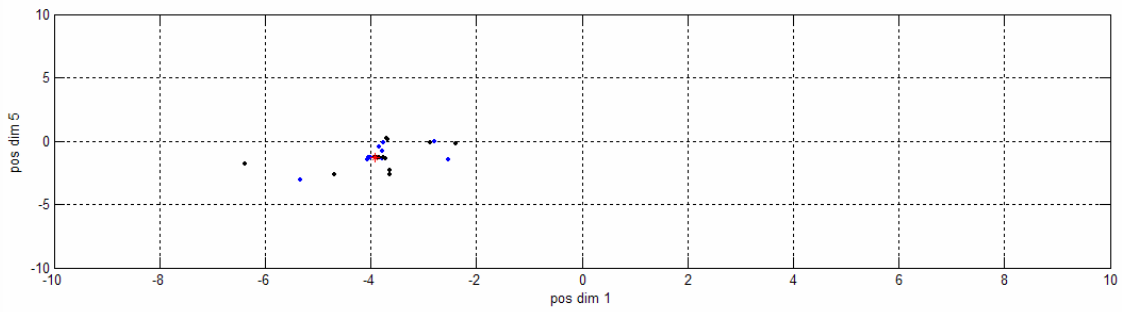
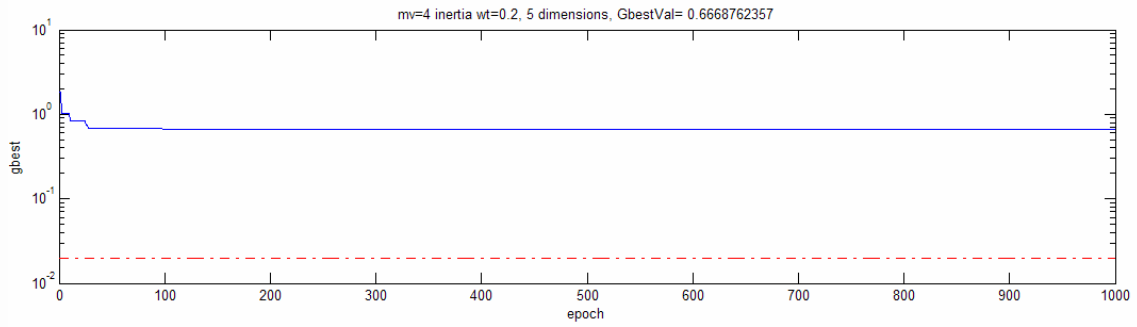
TRAINPSO(CODE) returns useful information for each CODE string:
'pnames' - Names of training parameters.
'pdefaults' - Default training parameters.

Μέσα στο συγκεκριμένο toolbox περιλαμβάνεται και το αρχείο demoPSOnet.m με το οποίο εκπαιδεύουμε έναν νευρωνικό δίκτυο στη συνάρτηση XOR.

Εκτελώντας το συγκεκριμένο script παίρνουμε:

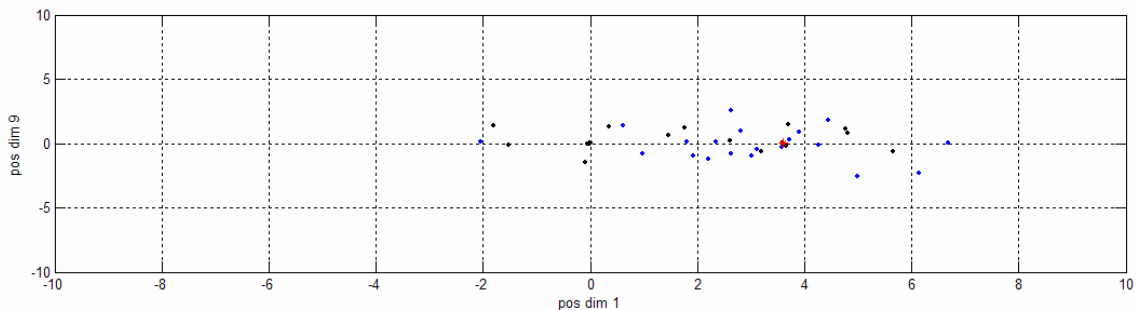
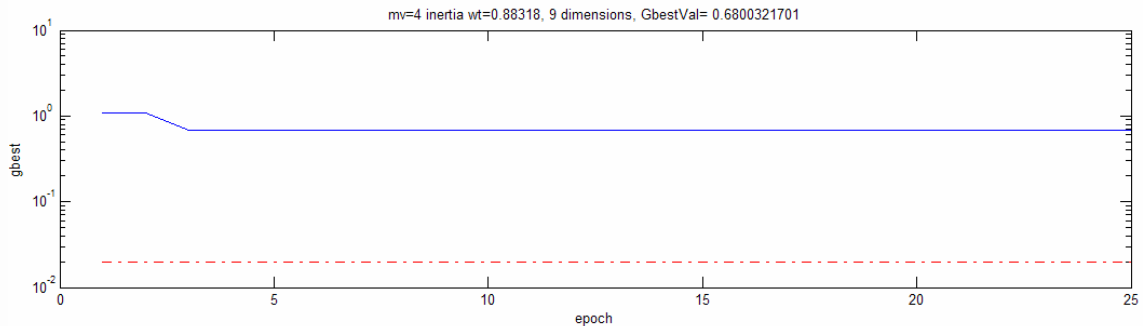


πρώτοι 600 κύκλοι (epochs) του αλγόριθμου Pso για ένα πρόβλημα XOR.

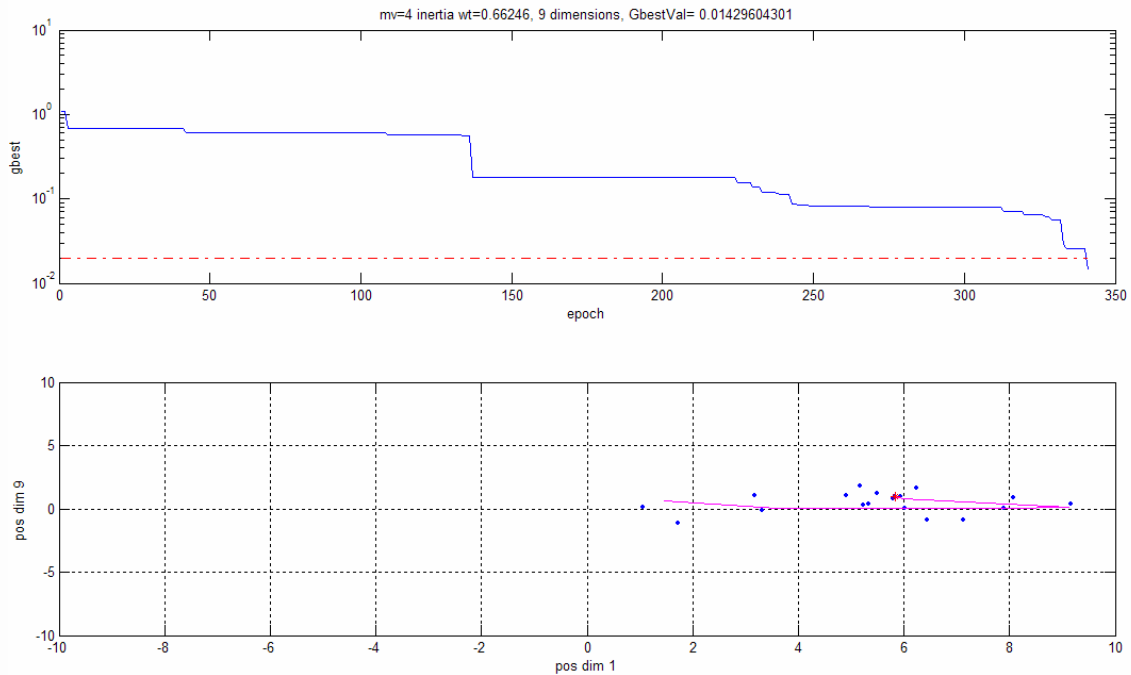


πρώτοι 1000 κύκλοι (epochs) του αλγόριθμου PSO για ένα πρόβλημα XOR

Ο αλγόριθμος αποτυγχάνει να φτάσει σε ένα άθροισμα τετραγωνικού σφάλματος 0,02 έτσι όπως έχει οριστεί μέσα από το script για αυτό ξεκινά πάλι την εκτέλεση του:



Επόμενοι 25 κύκλοι (epochs) του αλγόριθμου PSO για ένα πρόβλημα XOR



Επόμενες 340 κύκλοι του αλγόριθμου PSO για ένα πρόβλημα XOR

Όπως βλέπουμε από την παραπάνω εικόνα ο αλγόριθμος το πρόγραμμα φτάνει σε λύση μετά από 340 κύκλους (epochs) . Η γραμμή με χρώμα βαθύ κόκκινο (magenta) αναπαριστά τη διαδρομή επίλυσης του προβλήματος, η οποία είναι η διαδρομή των συνολικά καλύτερων θέσεων του σμήνους κατά τη διάρκεια των 340 κύκλων. Η μπλε γραμμή μας δείχνει το άθροισμα του τετραγωνικού σφάλματος το οποίο είναι της τάξης του 0,02. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου για την επίλυση της συνάρτησης XOR μετά από 1340 κύκλους.

Έλεγχος σχηματισμού σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών

Η χωρίς πιλότο φύση και οι αυξανόμενες, σε αποστολές, δυνατότητες των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) δημιουργούν έντονο ενδιαφέρον για εναέριες επιχειρήσεις σε απομακρυσμένες και εχθρικές περιοχές. Τα τελευταία χρόνια, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη έχουν χρησιμοποιηθεί από το στρατό για να εκτελέσουν επιχειρήσεις συλλογής πληροφοριών, επιτήρησης και αναγνώρισης (ISR), στενής αεροπορικής υποστήριξης (CAS), καταστολής της αεροπορικής άμυνας του αντιπάλου (SEAD) και για επιχειρήσεις χτυπημάτων ακριβείας. Το αυξανόμενο ενδιαφέρον προς μικρότερα και φθηνότερα UAVs παρουσιάζει μια αναδυόμενη δυνατότητα να λειτουργούν πιο βαθιά μέσα σε εχθρικούς και πολιτικών αντιφρονούντων εναέριους χώρους. Η σχετική διακριτικότητα και η αναλωσιμότητα αυτών των μη επανδρωμένων αεροσκαφών, τα καθιστούν μια βέλτιστη επιλογή για εξαιρετικά επικίνδυνες πράξεις. Η τάση προς τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη προτείνει ένα πρωτοφανές επίπεδο αυτοματισμού σε μελλοντικά σενάρια μάχης.

Οι τρέχουσες τεχνολογίες μη επανδρωμένων αεροσκαφών έχουν έλλειψη στην επαρκή αυτονομία για την αποτελεσματική και δραστική ανάπτυξη πολλαπλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών ταυτόχρονα.

Εξελιγμένες πλατφόρμες μη επανδρωμένων αεροσκαφών που σήμερα χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές επιχειρήσεις εξαρτώνται από ένα απομακρυσμένο πλήρωμα 1-3 χρηστών. Σε μελλοντικές καταστάσεις μάχης, όπου πολλαπλά μη επανδρωμένα αεροσκάφη συνεργάζονται για την επίτευξη κοινού στόχου, η απαιτούμενη γνωστική προσπάθεια των χειριστών αυξάνεται εκθετικά όσο αυξάνεται ο αριθμός των μη επανδρωμένων συστημάτων.

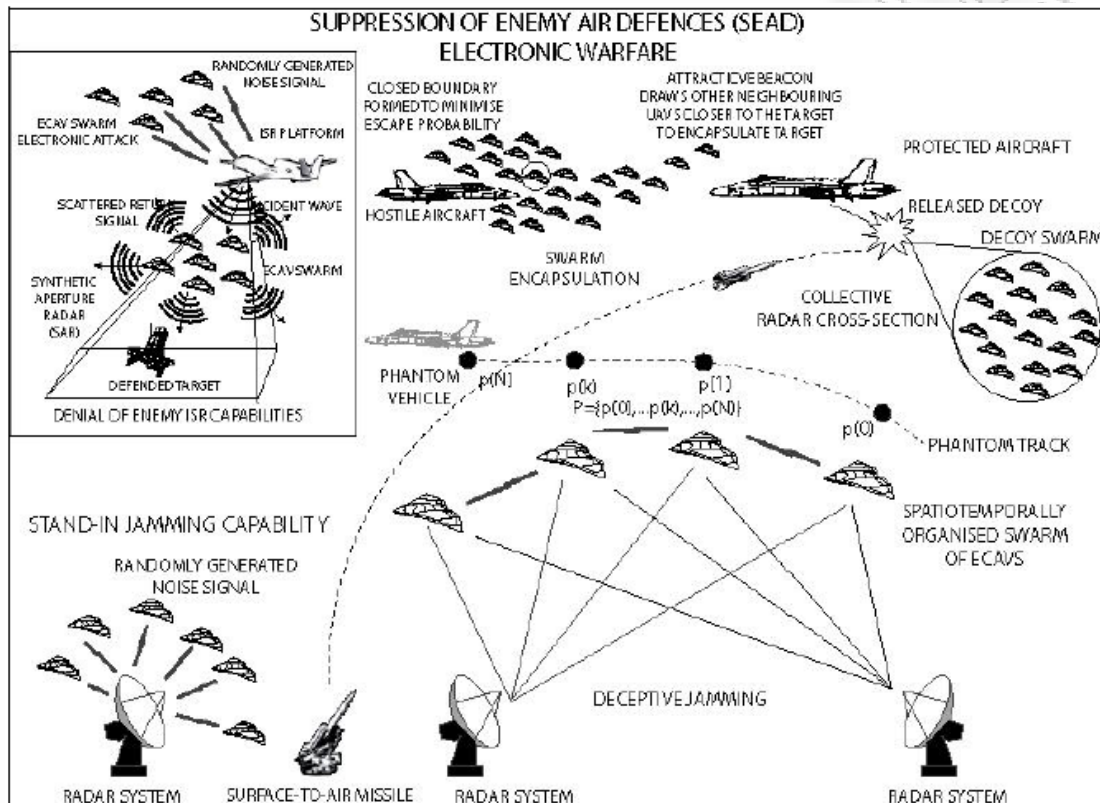
Η έννοια του σμήνους εισήχθη ως μια μέθοδος ανατροπής της αναλογίας χειριστή-συστήματος που παρατηρήθηκε σε πολυπρακτορικά συστήματα. Ένα υποθετικό αμυντικό σύστημα βλημάτων με μορφή σμήνους που χρησιμοποιεί πολλαπλά μικρής κλίμακας μη επανδρωμένο αεροσκάφος παρουσιάζεται για να επιδείξει την ικανότητα μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε σμήνος. Θέματα σχετικά με την ανάπτυξη και τον έλεγχο των σμηνών των συστημάτων παρουσιάζονται παρακάτω σε σχέση με το γενικό πλαίσιο για τη σύνθεση ενός σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών.

Έλεγχος πολλαπλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών

Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών το οποίο είναι επιφορτισμένο με τη παρακολούθηση ενός στόχου.

Το σμήνος αποτελείται από μικρά μη επανδρωμένα αεροσκάφη με χαμηλής παρατηρησιμότητας χαρακτηριστικά. Αυτή η χαμηλή

παρατηρησιμότητα επιτρέπει την λειτουργία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε πολύ μικρή απόσταση από ένα υποτιθέμενο εχθρικό σύστημα, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα την ανάληψη ενός εκτός αποφυγής στόχου. Επίσης θεωρούμε ότι το σμήνος δεν πάσχει από φθορά.

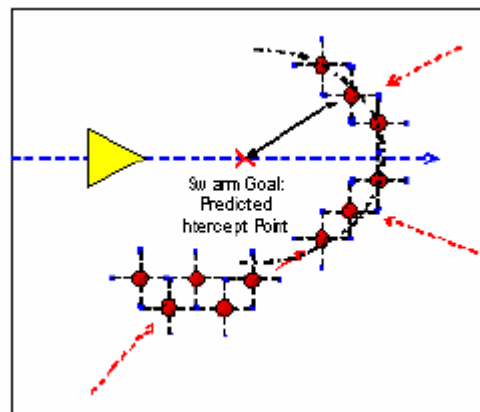


Λειτουργικό διάγραμμα θεωρητικού αμυντικού σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών

Το πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε σε ένα σχηματισμό όπως αυτός που φαίνεται στο παραπάνω λειτουργικό διάγραμμα έχει να κάνει με τον προσδιορισμό του κατάλληλου σχηματισμού του σμήνους έτσι ώστε να έχουμε ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διαφυγής του στόχου. Για να το επιτύχουμε αυτό πρέπει να καταφέρουμε να ενθλακώσουμε το στόχο μέσα σε ένα κανονικό πολύγωνο το κέντρο του οποίου θα συμπίπτει με τη θέση του στόχου. Για τη απλοποίηση του σχεδιασμού του ελεγκτή, ο έλεγχος του σχηματισμού παρέχεται από έναν εξωτερικό ελεγκτή το ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο διοίκησης του σμήνους.

Ο σχεδιασμός των ελεγκτών για ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών έγκειται στη σύνθεση ενός αποκεντρωμένου αλγορίθμου ελέγχου για τα μέλη του σμήνους, ο οποίος μιμείται ουσιαστικά τη συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών που συναντάμε στη φύση. Πιο ειδικά πρέπει έχοντας ως δεδομένο ένα αρχικό σμήνος το οποίο μιμείται μια αυτοοργανούμενη συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών, να βρούμε της βελτιστοποιημένες τροχιές των σωματιδίων που το απαρτίζουν και οι οποίες θα οδηγούν στο επιθυμητό σχηματισμό του σμήνους στον οποίο τα μέλη του σμήνους τα θεωρούμε σαν κορυφές ενός κανονικού πολυγώνου.

Αν και εδώ γίνεται η περιγραφή ενός σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών το οποίο χρησιμοποιείται σε ένα αμυντικό σύστημα, εντούτοις ο αποκεντρωμένος έλεγχος του σχηματισμού ενός σμήνους χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα πολυπρακτορικά συστήματα. Στη περίπτωση που ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών σχηματίζει ένα δίκτυο αισθητήρων για την εποπτεία μιας περιοχής τότε ο βέλτιστος σχηματισμός θα πρέπει να μια δομή πλέγματος. Όταν θέλουμε να έχουμε εξοικονόμηση καυσίμου τότε ο σχηματισμός θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να μειώνεται η οπισθέλκουσα δύναμη που ασκεί το κάθε μη επανδρωμένο αεροσκάφος στο γειτονικό του.



ενθυλάκωση στόχου

Οργάνωση σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών

Θα αναλύσουμε τώρα το πλαίσιο εργασίας το οποίο περιγράφει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του σμήνους. Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες πολυπρακτορικών συστημάτων:

1. Τα ιεραρχικά συστήματα
2. Κοινότητα ειδικών (community of experts)
3. Μοντέλο της αγοράς (market - based)
4. Μοντέλο επιστημονικής κοινότητας (Scientific community organisation)

Στα ιεραρχικά συστήματα η απόφαση και ο έλεγχος αποσυντίθενται κάθετα, δηλαδή υπάρχει μια πυραμοειδής μορφή ελέγχου από πάνω προς τα κάτω.

Στο μοντέλο "community of expert" κάθε σωματίδιο του σμήνους θεωρείται ότι είναι ειδικό στη επίλυση του προβλήματος. Τα μέλη του σμήνους αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σύμφωνα με κάποιους κανόνες προσαρμόζοντας τις λύσεις που κατέχει το κάθε μέλος του σμήνους μέχρι να φτάσουν σε μια κοινή αποδεκτή λύση.

Στο μοντέλο της αγοράς (market based) κάθε μέλος του σμήνους ανταγωνίζεται με τους γύρω του να αποκτήσει πόρους του συστήματος μέσω μια διαδικασίας προσφορών.

Το επιστημονικό μοντέλο κάνει χρήση ενός σμήνους από κόμβους επεξεργασίας οι οποίοι παράγουν από μια βιώσιμη λύση. Μέσα από τον

αμοιβαίο διαμοιρασμό των λύσεων οι λύσεις δοκιμάζονται και βελτιώνονται έως ότου φτάσουμε σε μια κοινά αποδεκτή λύση.

Ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών συνήθως απαιτεί και την ύπαρξη ενός επίπεδου αποκεντρωμένου ελέγχου. Ο οργανισμός ενός σμήνους αεροσκαφών μοντελοποιείται μέσω της έννοιας της "γειτονιάς". Μια γειτονιά εκφράζει μια μικρή περιοχή στο χώρο. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο για την μοντελοποίηση ενός σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών η δομή του οργανισμού παραμένει επίπεδη και προσαρμόσιμη στις δυναμικές αλλαγές του περιβάλλοντος. Για τον καθορισμό των ορίων μιας τέτοιας γειτονιάς λαμβάνουμε υπόψη την ακτίνα δράσης κάθε μέλους του σμήνους. Η ακτίνα δράσης μοντελοποιεί τη ροή της πληροφορίας και του ελέγχου μεταξύ γειτονικών αεροσκαφών. Ταυτόχρονα αναπαριστά μια καθορισμένη περιοχή που περικλείει τοπική διαδραστικότητα. Το μέγεθος και το σχήμα μιας τέτοιας περιοχής εξαρτάται από τις ικανότητες των αισθητήρων, τις τηλεπικοινωνίες και την κίνηση του κάθε μη επανδρωμένου αεροσκάφους.

Γνωστικός σχεδιασμός επιπέδου πράκτορα

Συνήθως, οι πράκτορες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις γνωστικές τους ικανότητες. Τα αντιδραστικά συστήματα είναι εκείνα στα οποία δεν διατηρείται καμία εσωτερική αναπαράσταση του εξωτερικού περιβάλλοντος. Πράκτορες αυτού του τύπου ανταποκρίνονται στο άμεσο περιβάλλον και δεν κάνουν καμία μέριμνα για προηγούμενες περιπτώσεις ή μελλοντικές συνέπειες των άμεσων δράσεων τους. Οι απαντήσεις ενεργοποιούνται μέσω ερεθισμάτων που βασίζονται στην συμπεριφορά. Γενικά, ο έλεγχος αλγορίθμων που διέπουν τη συμπεριφορά τους μπορεί να είναι υπολογιστικά απλός και άμεσης ανταπόκρισης. Μέσα από τοπικές αλληλεπιδράσεις με άλλους πράκτορες ένα συγκρότημα συλλογικής συμπεριφοράς αναδύεται. Αυτό είναι ανάλογο με τις αρχές των συστημάτων σμήνους.

Παρά το σχετικά απλό τους σχεδιασμό, την ευρωστία και την προσαρμοστικότητα τους, η υλοποίηση σε πρακτικές εφαρμογές είναι περιορισμένη από τις ίδιες αρχές που τις καθιστούν ευνοϊκές: αναδυόμενη συμπεριφορά μέσω τοπικών αλληλεπιδράσεων.

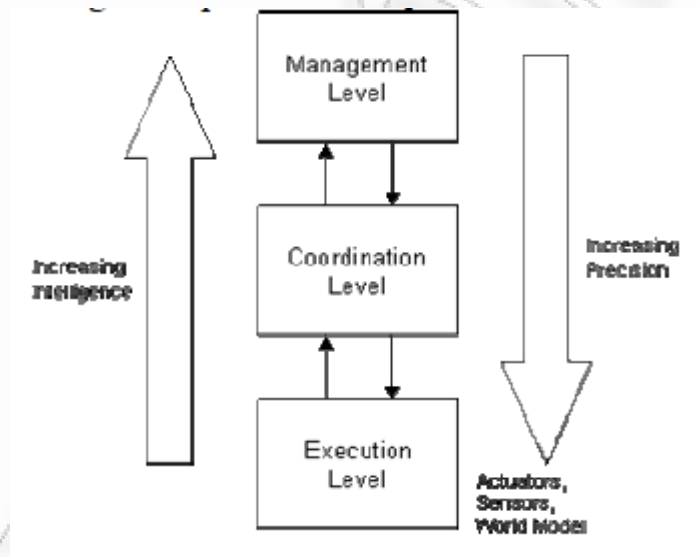
Μόνο τα καθαρά αντιδραστικά συστήματα λαμβάνουν υπόψη την τοπική πληροφόρηση ενώ ταυτόχρονα δεν μπορούν να προβλέψουν την επίδραση της τοπικής συμπεριφορά τους στην συμπεριφορά του σμήνους. Αυτό οδηγεί σε απρόβλεπτα αλλά και συχνά σε σχεδόν βέλτιστα αποτελέσματα. Μέθοδοι για την εκτίμηση της απόδοσης και τη σταθερότητα του σμήνους είναι εξαρτώμενες από τα στοχαστικά και εμπειρικά συστήματα. Αυτή η έλλειψη κατανόησης της σχέσης των πρακτόρων με το περιβάλλον, των γειτονικών τους πρακτόρων, αλλά και ολόκληρου του σμήνους, καθιστούν δύσκολη την σχεδίαση αντιδραστικού σμήνους με ακρίβεια.

Σε αντίθεση με τους αντιδραστικούς πράκτορες, οι συμβουλευτικοί πράκτορες χρησιμοποιούν και συντηρούν μια εσωτερική αναπαράσταση του εξωτερικού περιβάλλοντος. Με βάση αυτήν την εσωτερική αναπαράσταση, είναι σε θέση να προγραμματίζουν και να αποφασίζουν για την κατάλληλη συμπεριφορά. Μπορούν επίσης να προβλέψουν την επιρροή της απόφασής

τους σε μελλοντικές εκβάσεις και τις επιπτώσεις στην συμπεριφορά του σμήνους. Σμήνη συμβουλευτικών πρακτόρων θα μπορούσαν ενδεχομένως να συγκλίνουν προς την επιθυμητή ολική βέλτιστη λύση.

Οι αυξημένες γνωστικές ικανότητες των συμβουλευτικών πρακτόρων απαιτούν και εξειδικευμένα παραδείγματα ελέγχου τα οποία είναι απαιτητικά σε υπολογιστικούς πόρους. Οι απαιτήσεις σε ενέργεια από αυτούς τους αλγόριθμους και ο χρόνος επεξεργασίας περιορίζουν τη χρήση τους σε μικρής κλίμακας συστήματα όταν δραστηριοποιούνται σε δυναμικό και αβέβαιο περιβάλλον.

Τα υβριδικά συστήματα συνδυάζουν στοιχεία και από τους δύο τύπους του συστήματος σε μια εννοποιημένη αρχιτεκτονική που εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες λήψης αποφάσεων των συμβουλευτικών πρακτόρων και την ανταπόκριση των αντιδραστικών πρακτόρων. Οι υβριδικές αρχιτεκτονικές αντιπροσωπεύονται από διάφορα στρώματα αφαίρεσης. Τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μπορούν να εκπροσωπούνται από τρία επίπεδα ιεραρχίας όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου

Η υβριδική αρχιτεκτονική χαρακτηρίζεται από την αύξηση ακρίβειας χαμηλά στην ιεραρχία και την αύξηση της νοημοσύνης υψηλά στην ιεραρχία. Το πιο πάνω επίπεδο, που συνήθως αναφέρεται ως επίπεδο διαχείρισης, είναι υπεύθυνο για την λήψη αποφάσεων και το σχεδιασμό. Χαρακτηρίζεται από το υψηλότερο επίπεδο νοημοσύνης και χρησιμοποιεί υψηλού επιπέδου στόχους που καθορίζονται το χρήστη που αναθέτει καθήκοντα στα διάφορα υποσυστήματα του οχήματος. Σε ένα πολυπρακτορικό πλαίσιο, το επίπεδο διαχείρισης θα μπορούσε επίσης να είναι υπεύθυνο για τον συντονισμό της κοινωνικής συμπεριφοράς των μελών του σμήνους. Το χαμηλότερο επίπεδο είναι το αντιδραστικό επίπεδο και εκτελεί αποφάσεις βασισμένο στα δεδομένα που λαμβάνει από τους αισθητήρες. Σε μια εφαρμογή σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών, ο αντιδραστικός πράκτορας είναι υπεύθυνος για άμεση δράση, όπως πχ την αποφυγή σύγκρουσης. Το αντιδραστικό επίπεδο αντιπροσωπεύει την διεπαφή του πράκτορα με το άμεσο περιβάλλον και περιέχει τους απαραίτητους αισθητήρες και ενεργοποιητές. Αυτό μερικές φορές

αναφέρεται ως επίπεδο εκτέλεσης. Το μεσαίο επίπεδο, ή επίπεδο συντονισμού, παρέχει ένα περιβάλλον διασύνδεσης μεταξύ του υψηλού επιπέδου λήψης αποφάσεων με το επίπεδο εκτέλεσης. Ο κύριος ρόλος αποσκοπεί στο να διευκολύνει την επεξεργασία πληροφοριών μεταξύ του στρώματος εκτέλεσης με την συμβολική αφαίρεση του στρώματος διαχείρισης.

Μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος

Μέσα από τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος μη επανδρωμένων αεροσκαφών μπορούμε να προσδιορίσουμε τους ρόλους και την αξιοπιστία του συστήματος ενώ ταυτόχρονα μας βοηθάει στο να κατανοήσουμε τους στόχους που πρέπει να μας ενδιαφέρουν κατά τη σχεδίαση του ελεγκτή του συστήματος. Οι μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος μπορεί να γίνει από την πλευρά του συστήματος από την πλευρά του στόχου και από την πλευρά των πρακτόρων του συστήματος. Στα συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών όπου ο όρος του πράκτορα ταυτίζεται με ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος το οποίο συμμετέχει στο σμήνος, ο όρος συμπεριφορά του πράκτορα μπορεί να περιλαμβάνει την αποφυγή των συγκρούσεων και την κίνηση προς το στόχο.

Η συμπεριφορά σε επίπεδο "host level" εξετάζει τη συλλογική συμπεριφορά των πρακτόρων και είναι συνώνυμη με την αναδυόμενη συμπεριφορά. Παραδείγματα αποτελούν η σύγκλιση και ο σχηματισμός του σμήνους, η αναδιάταξη του σμήνους κλπ.

Σε επίπεδο συστήματος η συμπεριφορά έχει να κάνει με την διαλειτουργικότητα του σμήνους με άλλα υποσυστήματα. Στο αμυντικό σύστημα που βλέπουμε στην πιο πάνω εικόνα, το σμήνος υποστηρίζεται από ένα στοιχείο ελέγχου της αποστολής το οποίο και καθορίζει τους στόχους της αποστολής. Αυτός ο καθορισμός διαβεβαιώνει ότι η συμπεριφορά του σμήνους συνάδει με την αποστολή που έχει το αμυντικό σύστημα.

Ο καθορισμός των συμπεριφορών των συμμετεχόντων μελών σε ένα σμήνος μας βοηθάει στο να κατανοήσουμε το ρόλο του σμήνους και των πρακτόρων βοηθώντας στο σχεδιασμό του συστήματος. Έχοντας ως βάση το πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε κάθε φορά, η συμπεριφορά σε επίπεδο συστήματος θα μπορούσε να ενθυλακώσει και ένα κινούμενο στόχο. Η συμπεριφορά σε επίπεδο σχεδιασμού του "host level" θα μπορούσε να συμπεριλάβει και τις απαραίτητες συμπεριφορές οι οποίες εκδηλώνονται από κάθε στοιχείο της αποστολής.

Η διαχείριση της μάχης, της διοίκησης, του ελέγχου, της επικοινωνίας, και της νοημοσύνης κόμβου (BM3CI) αξιολογεί το πεδίο της μάχης και παρέχει ένα βέλτιστο σημείο αναχαίτισης και καθορίζει το σχηματισμό για το σμήνος. Το σμήνος, θα αρχικοποιηθεί σε κάποια περιοχή στο πεδίο της μάχης και θα πρέπει στη συνέχεια να συγκλίνει στο σχηματισμό. Το επίπεδο συμπεριφοράς των πρακτόρων που αφορά τα μεμονωμένα αεροσκάφη θα μπορούσε να περιλαμβάνει αποφυγή σύγκρουσης, μετακίνηση στόχου, διατήρηση μιας σταθερής απόστασης μεταξύ των μη επανδρωμένων αεροσκαφών που αποτελούν το σμήνος και τη σύγκλιση στο επιθυμητό σχήμα διαμόρφωσης του σμήνους.

Με βάση αυτές τις απλοϊκές συμπεριφορές και τοπικές αλληλεπιδράσεις, το συλλογικό σμήνος θα αποδείξει την ικανότητά του να συγκλίνει προς τον επιθυμητό σχηματισμό που αναχαιτίζοντας τον στόχο ενδιαφέροντος.

Η πραγματοποίηση αυτών των συμπεριφορών απαιτεί την σύνθεση των κατάλληλων τεχνικών ελέγχου και μοντέλων.

Επικοινωνία

Διακρίνουμε δύο τύπους πληροφορίας που είναι διαθέσιμη σε κάθε σωματίδιο του σμήνους, την αντιληπτική και την εκπεμπόμενη. Η αντιληπτική πληροφορία σχετίζεται με την πληροφορία που διακινείται μέσω των καναλιών επικοινωνίας των αισθητήρων κάθε αεροσκάφους, και περιλαμβάνει δεδομένα από τους αισθητήρες πτήσης και της συσκευές απεικόνισης. Η εκπεμπόμενη πληροφορία σχετίζεται με κάθε είδους πληροφορία που μεταφέρεται μεταξύ δύο ή περισσότερων συστημάτων του σμήνους, αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ γειτονικών αεροσκαφών μέσω ασύρματων πρωτοκόλλων, ή μεταξύ των αεροσκαφών και του κέντρου ελέγχου της αποστολής, το είδος της πληροφορίας και η διαθεσιμότητα της εξαρτάται από το επιλεγμένο υλικό και ορισμένες συμπεριφορές του επιπέδου συστήματος του επιπέδου στόχου, καθώς και στο επίπεδο του πράκτορα.

Η επιλογή των αισθητηρίων και ο σχεδιασμός του λογισμικού για τις επικοινωνίες περιλαμβάνει την αναγνώριση του είδους των πληροφοριών και το σκοπό για τον οποίο είναι χρήσιμες. Οι αισθητήρες προσέγγισης, όπως ανιχνευτές φάσματος λέιζερ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση και τη μέτρηση αποστάσεων από εμπόδια, ενώ το σύστημα πλοήγησης GPS μας παρέχει τη τοπική θέση του οχήματος σε σχέση με κάποιο παγκόσμιο πλαίσιο αναφοράς.

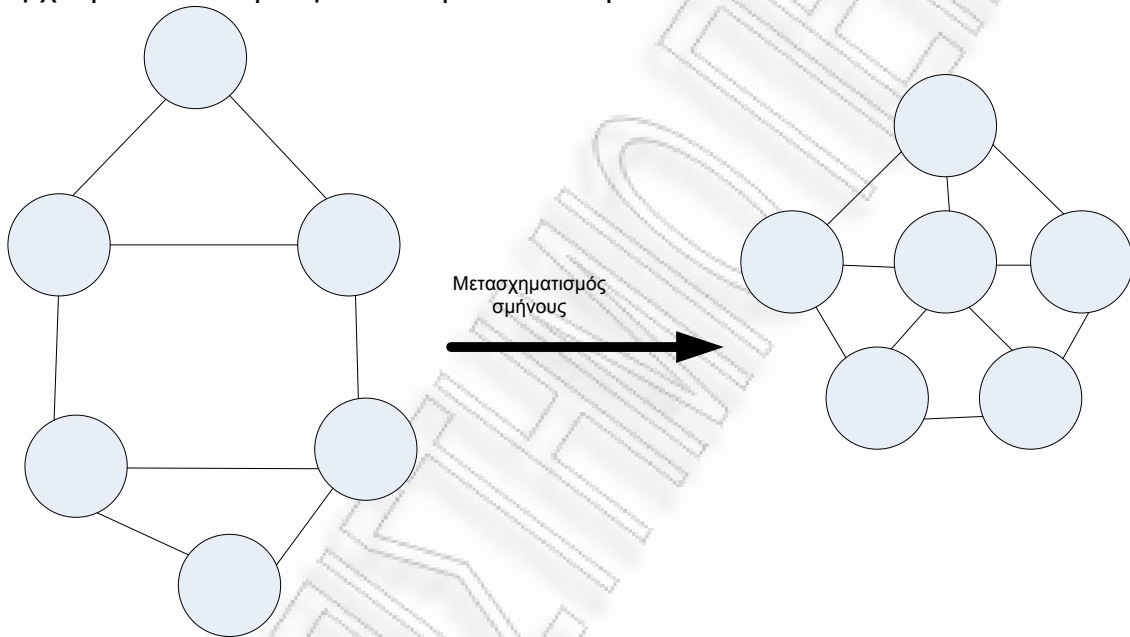
Η ροή της πληροφορίας μέσα σε ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών μπορούν να θεωρηθεί ότι είναι προσβάσιμη από κάθε μέλος του σμήνους. Η ροή αυτή επηρεάζει τη συμπεριφορά του κάθε μέλους και την επακόλουθη αναδυόμενη συμπεριφορά του σμήνους. Το σχήμα και το μέγεθος πρωτυποποιείται χρησιμοποιώντας την μαθηματική έννοια της "γειονιάς" και είναι στενά συνδεδεμένο με τον σχεδιασμό των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων και των χρησιμοποιούμενων οργάνων επικοινωνίας.

Η σταθερότητα και η απόδοση ενός σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πληροφορία την οποία ανταλλάσσουν τα μέλη του σμήνους μεταξύ τους καθώς και με το σταθμό βάσης. Η ροή της πληροφορίας μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά με ένα συνδεδεμένο γράφημα. Το μέγεθος σε βαθμούς της μήτρας αντιστοιχεί στην πληροφορία ενός μέλους του σμήνους. Οι υψηλές τιμές υποδεικνύουν μια συνολική γνώση της κατάστασης του σμήνους ενώ οι χαμηλές δείχνουν γνώση περιορισμένη σε μια στενή περιοχή του σμήνους. Όταν υπάρχει διαθέσιμη ροή μεγάλου όγκου πληροφορίας μέσα σε ένα σμήνος, τότε το σμήνος τείνει να παρουσιάζει μια ασταθή συμπεριφορά, εξαιτίας της μεγάλης διάδοσης τυχόν παραγόντων αστάθειας. Η συνοχή του σμήνους τίθεται σε αμφισβήτηση εξαιτίας τις προσπάθειες του κάθε μέλους του σμήνους να επικοινωνήσει με όλα τα υπόλοιπα. Αυτό το πρόβλημα διογκώνεται με την μεγέθυνση του σμήνους, και γίνεται πολύ έντονο όταν ένα σμήνος αποτελείται από μεγάλο αριθμό

σωματιδίων. Αντίθετα όταν ένα σμήνος αποτελείται από σωματίδια με πολύ χαλαρούς δεσμούς όσον αφορά τη μεταξύ τους επικοινωνία τότε το σμήνος μπορεί να μη φτάσει στον επιθυμητό στόχο. Για αυτό το λόγο ο σχεδιασμός των πρωτοκόλλων επικοινωνίας σε ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή γιατί αποτελεί σημαντικό παράγοντα της σταθερότητας του σχηματισμού και της αποτελεσματικότητάς του.

Αναδιάρθρωση σχηματισμού σμήνους

Όταν μιλάμε για αναδιάρθρωση του σχηματισμού ενός σμήνους μη επανδρωμένων αεροσκαφών, ουσιαστικά εννοούμε τη μετάβαση από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική κατάσταση.



Ένα σημαντικό πρόβλημα, μέσα σε αυτό το παράδειγμα που αναλύουμε έχει να κάνει με την σύνθεση της αναδυόμενης συμπεριφοράς ενός σμήνους που αποτελείται από αποκεντρωμένα αεροσκάφη από ένα αρχικό σχηματισμό σε μια τελική κατάσταση έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουμε αυτή τη συμπεριφορά. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα μετάβασης, το οποίο πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί μέσω ενός αποκεντρωμένου δικτύου κόμβων οι οποίοι είναι διάσπαρτοι μέσα στο σμήνος των μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Δοθείσης της αρχικής διάταξης των μη επανδρωμένων αεροσκαφών στο περιβάλλον και γνωρίζοντας την τελική επιθυμητή διαμόρφωση του σμήνους, ο στόχος κάθε αεροσκάφους έγκειται στο να αναγνωρίσει την ενδεχόμενη τελική του θέση μέσα στο τελικό σχηματισμό του σμήνους, η οποία ελαχιστοποιεί το αντικειμενικό κόστος των απαιτήσεων της αποστολής. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με από έναν αποκεντρωμένο αλγόριθμο σμήνους, ο οποίος χρησιμοποιώντας τοπικές πληροφορίες (από ένα αεροσκάφος) και τη τοπική αντικειμενική συνάρτηση κόστους (ενός αεροσκάφους), συγκλίνει σε μια βέλτιστη ολική λύση. Βέβαια αυτή η μέθοδος επίλυσης παρουσιάζει το μειονέκτημα της διάσπασης του ολικού αντικειμενικού

στόχου μέσα στους αποκεντρωμένους κόμβους του συστήματος. Αυτή η αναδυόμενη συμπεριφορά είναι πολλές φορές τελείως απρόβλεπτη και δεν ικανοποιεί απαραίτητα τον ολικό αντικειμενικό στόχο του συστήματος.

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι δυναμικά συστήματα, μπορεί να θεωρηθούν ως δυναμικοί πράκτορες και η μετάβαση από τον έναν αρχικό σχηματισμό του σμήνους σε ένα νέο σχηματισμό είναι μι εξελικτική διαδικασία στο χρόνο. Έτσι ο αρχικός σχηματισμός και ο τελικός μπορεί να αναπαρασταθούν μαθηματικά με τη χρήση γραφημάτων, έτσι η μετάβαση μεταξύ δύο σχηματισμών είναι ένα δυναμικό γράφημα. Σε κάθε στιγμή της μεταβατικής περιόδου η στιγμιαία θέση του σχηματισμού μοντελοποιείται ως ένα γράφημα, δηλαδή η μετάβαση του σμήνους από τον αρχικό σχηματισμό στον τελικό είναι μια διαδικασία γραφήματος.

Οι μοντελοποίηση μια διαδικασίας γραφημάτων μεταξύ δύο διαμορφώσεων χαρτογραφεί την εμφάνιση της συμπεριφοράς του συστήματος εφοδιάζοντας μας με σημαντικές πληροφορίες για την εξέλιξη του σχηματισμού του σμήνους μειώνοντας ταυτόχρονα την αβεβαιότητα του συστήματος.

Μαθηματική ανάλυση σμήνους και αλγόριθμος PSO

Η μοντελοποίηση του γραφήματος είναι μια προκαταρκτική διαδικασία για την σύνθεση μια συνεργατικής αυτοοργανούμενης συμπεριφοράς του σμήνους. Ο συνεργατικός σχεδιασμός του σμήνους είναι προαπαιτούμενος έτσι ώστε να μπορέσουμε να οδηγήσουμε το σμήνος μέσα από μια ομαλή μετάβαση στον τελικό του σχεδιασμό. Βασικό ρόλο σε αυτό παίζει ο διαμοιρασμός των τροχιών κάθε αεροσκάφους του σμήνους με τα γειτονικά του. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη του σμήνους αξιοποιούν της σχεδιασμένες τροχιές των γειτονικών τους αεροσκαφών έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουν τις δικές τους τροχιές. Αυτές οι τροχιές αποκτώνται μέσω της μοντελοποίησης γραφήματος και ενημερώνονται από αναδρομικούς αλγόριθμους αναζήτησης. Αυτός ο διαρκείς διαμοιρασμός και η ενημέρωση των τροχιών μεταξύ γειτονικών αεροσκαφών οδηγεί τα αεροσκάφη του σμήνους στο να βελτιώνουν συνεχώς τις τροχιές τους με αποτέλεσμα την βέλτιστη μετάβαση από μια αρχική κατάσταση σχηματισμού στην επιθυμητή (τελική) κατάσταση σχηματισμού.

Ερχόμενη τώρα στο αμυντικό σύστημα που εξετάζουμε θα προσπαθήσουμε να αποδώσουμε μαθηματικά και να δούμε πώς μπορούμε να επιτύχουμε τον έλεγχο των μη επανδρωμένων αεροσκαφών έτσι ώστε το σμήνος να διατάσεται με τον επιθυμητό κάθε φορά σχηματισμό.

Θεωρώντας ένα σμήνος αποτελούμενο από n πράκτορες τυχαία διασκορπισμένους στο περιβάλλον περιοριζόμενους από:

$$\begin{cases} \dot{q}_i = p_i \\ \dot{p}_i = u_i \end{cases} \quad (1)$$

Η διάταξη των πρακτόρων στο περιβάλλον μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια θεωρητική προσέγγιση γραφήματος. Ονομάζουμε

γράφημα τόξων G κάθε δυάδα συνόλων (V, E) με $V = \{1, 2, \dots, N\}$ και $E = \{(x, y) \mid v, w \in V\}$

Το σύνολο των κορυφών του γραφήματος αντιστοιχεί στο σύνολο των μη επανδρωμένων αεροσκαφών του σμήνους. Τα τόξα μεταξύ γειτονικών κορυφών αντιπροσωπεύουν τους διαύλους επικοινωνίας γειτονικών μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Συνήθως η επικοινωνία μεταξύ των μελών των μη επανδρωμένων αεροσκαφών είναι αμφίδρομη για αυτό και εμείς θα σταθούμε στα μη προσανατολισμένα γραφήματα. Στα μη προσανατολισμένα γραφήματα ισχύει και η ακόλουθη ιδιότητα $\forall (v_i, v_j) \in E \Rightarrow (v_j, v_i) \in E$. Έχοντας στο νου μας αυτή την αναπαράσταση, τότε βλέπουμε ότι και οι είσοδοι κάθε πράκτορα είναι ίσες με τις εξόδους κάθε πράκτορα (αεροσκάφος). Για να έχουμε διατήρηση της τοπικότητας, το σύνολο των γειτονικών πρακτόρων σε κάθε πράκτορα v_i καθορίζεται από τη σχέση:

$$N_i = \{j \in V : a_{ij} \neq 0\} = \{j \in V : (i, j) \in E\} \quad (2)$$

όπου a_{ij} ορίζει το πίνακα γειννίας του γραφήματος και δίνεται από τη σχέση:

$$a_{ij}(q) = \rho(\|q_j - q_i\|/r) \quad (3)$$

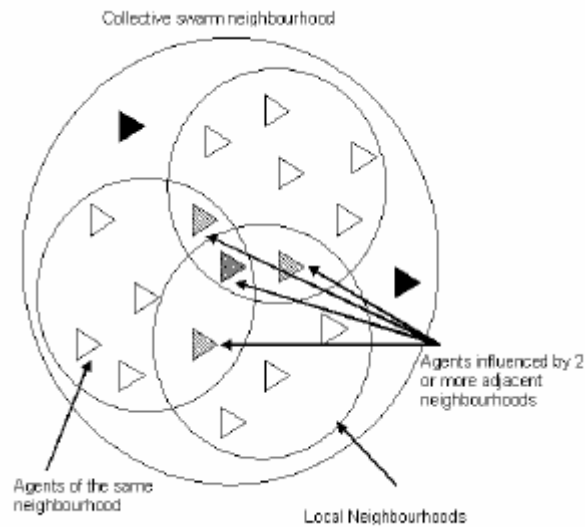
θεωρούμε τη βαθμωτή συνάρτηση:

$$\rho(z) = \begin{cases} 1, & z \in [0, \delta] \\ \frac{1}{2^k} \left[1 + \cos\left(\pi \frac{(z-\delta)}{(1-\delta)}\right) \right]^k, & z \in (\delta, 1] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta \in (0, 1).$$

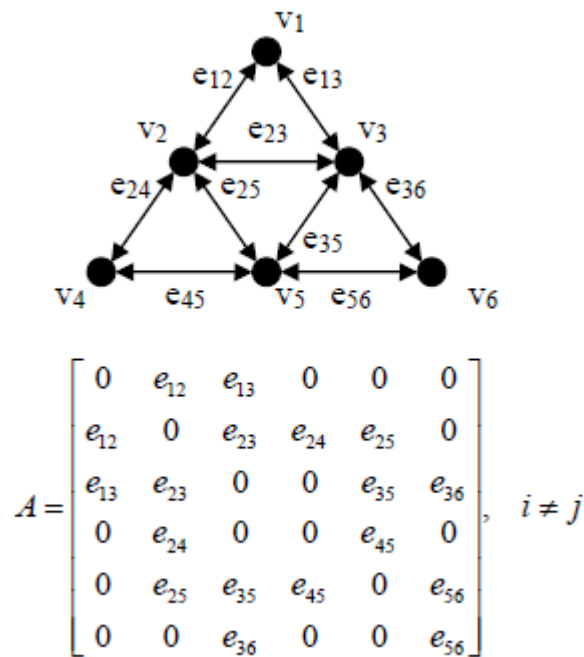
η οποία έχει αναλυθεί από την Reza Olfati-Saber και καθορίζει ένα χάρτη επιρροών μεταξύ των πρακτόρων. Ισχύει ότι $a_{ij}=0 \quad \forall (i, j) \notin E$.

Η παρουσίαση αυτή δεν κάνει καμία διάκριση ανάμεσα στις δυνατότητες επικοινωνίας και ανίχνευσης των μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Η διατύπωση αυτή των αρχών που διέπουν μια γειτονιά πρακτόρων (αεροσκαφών) αναδεικνύει την κλιμάκωση ενός δυναμικού οργανισμού υπό την έννοια ότι περικλείει το πέρασμα των πρακτόρων μεταξύ προσκείμενων "γειτονιών".



Τοπικές περιοχές

Έτσι όπως περιγράψαμε στην αρχή του κεφαλαίου, στόχος του υπό εξέταση σμήνους είναι η σύγκλιση σε έναν επιθυμητό σχηματισμό. Για το σκοπό της ενθυλάκωσης του στόχου, ο βέλτιστος σχηματισμός του σμήνους είναι ο σχηματισμός ενός κλειστού δακτυλιδιού. Ο ελεγκτής (σταθμός εδάφους) που είναι υπεύθυνος για την αποστολή του σμήνους αποστέλλει μια εντολή σχηματισμού στο σμήνος η οποία λαμβάνεται από τους συσκευές ελέγχου των πρακτόρων (αεροσκαφών) και ο ελεγκτής αυτός δίνει τις κατάλληλες εντολές προς το αεροσκάφος να κινηθεί ανάλογα. Σε συμφωνία με την προσέγγιση του σμήνους μέσω της θεωρίας γραφημάτων ο επιθυμητός σχηματισμός παρουσιάζεται και αυτός σαν ένα γράφημα. Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει ένα παράδειγμα ενός σχηματισμού με την αντίστοιχη μήτρα γειννίαςης:



Παράδειγμα γραφήματος πυραμοειδούς σχηματισμού

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να καθορισθεί ως εξής:

δοθείσης μια αρχικής διαμόρφωσης G_0 και μια τελικής διαμόρφωσης G_f , να καθορίσουμε τις τροχιές των αεροσκαφών και να ελέγξουμε την είσοδο του συστήματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τη συνάρτηση:

$$\int_{t_0}^{t_f} L(q(t), u(t), t) dt \quad (5)$$

Η παραπάνω διατύπωση είναι ένα αντιπροσωπευτικό πρόβλημα βελτιστοποίησης τύπου Bolza. Η συνάρτηση κόστους Mayer πολύ συχνά σχετιζόμενη με τα προβλήματα τύπου Bolza έχει παραληφθεί λόγω του ότι το πρόβλημα μας περικλείει μια σταθερή τελική κατάσταση. Προσαρμόζοντας ανάλογα το πρόβλημα μπορεί να αποδεχτεί διάφορους στόχους της αποστολής όπως η ελαχιστοποίηση του χρόνου σύγκλισης του σχηματισμού η την ελαχιστοποίηση της δαπανώμενης ενέργειας .

Σε αυτό το στάδιο η λύση περιλαμβάνει ένα αποκεντρωμένο ευρετικό αλγόριθμο. Επί του παρόντος, διεξάγεται έρευνα για τη διερεύνηση μιας μεθόδου που θα χρησιμοποιεί σύνδεση συσχετισμένου ελέγχου συστημάτων με το μοντέλο της διαδικασίας μετάβασης μεταξύ γειτονικών παραγόντων. Μια ιδιότητα του συσχετισμένου ελέγχου συστημάτων σύνδεσης είναι το πρόβλημα βελτιστοποίησης που φυσιολογικά υπάρχει στη διαμόρφωση. Ο συσχετισμένος έλεγχος συστημάτων έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν ως μια διατύπωση για διάφορα μηχανικά συστήματα. Λύσεις στο βασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης σε συσχετιζόμενες διαμορφώσεις μπορεί να προάγει τον βέλτιστο έλεγχο και να συσχετίσει της τροχιές έτσι ώστε να μεταβούμε από τον αρχικό σχηματισμό σε ένα τελικό σχηματισμό.

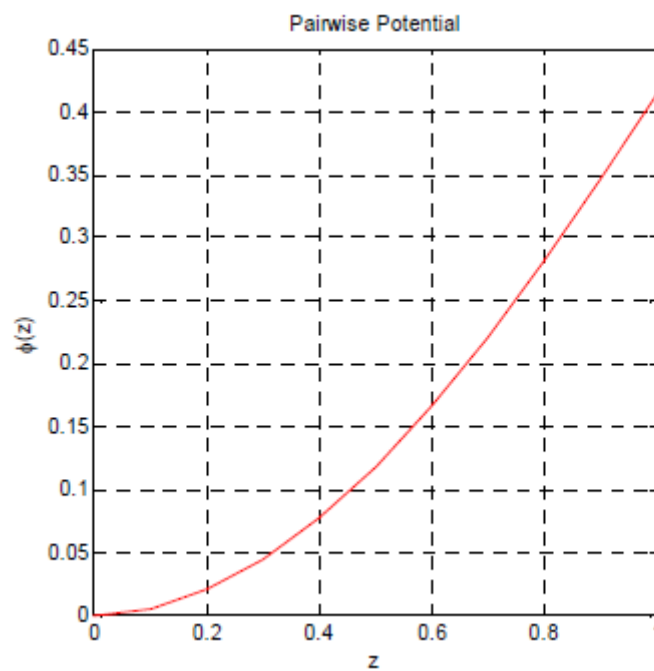
Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώθηκε κάνοντας χρήση της ενεργειακή συνάρτηση απόκλισης που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$|E(q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} \phi(\|q_j - q_i\| - d_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} \phi(n_{ij} \cdot (p_j - p_i)) \quad (6)$$

όπου $\phi()$ είναι μερικά ζεύγη δυνατοτήτων που δίνονται από την εξίσωση:

$$\phi(z) = \sqrt{z^2 + 1} - 1 \quad (7)$$

και φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



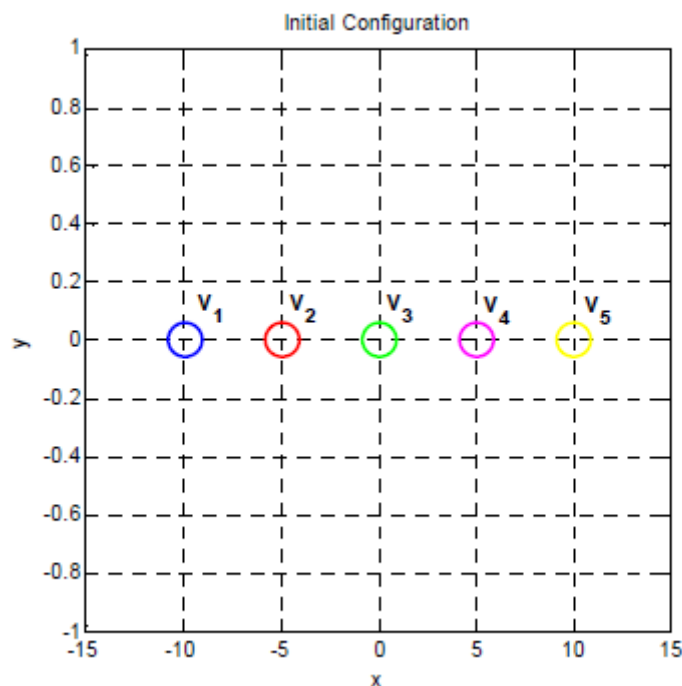
ζεύγη δυνατοτήτων

όπου n_{ij} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα και δίνεται από τη σχέση:

$$n_{ij} = (q_j - q_i) / \|q_j - q_i\|$$

Η απόκλιση της ενέργειας περιγράφει την αντιστοιχία μιας διαμόρφωσης ενός γραφήματος σε μια άλλη επιθυμητή διαμόρφωση. Ο πρώτος όρος της απόκλισης ενέργειας χρησιμοποιεί της συνθήκες των ακμών για να προσδιορίσει τη δυνατότητα σύνδεσης του σχηματισμού του γραφήματος και περιγράφει τη σύγκλιση του σμήνους στην επιθυμητή διαμόρφωση του γραφήματος. Μια ένα προς ένα αντιστοιχία ανάμεσα σε δύο διαμορφώσεις παρατηρείται όταν η ενεργειακή συνάρτηση απόκλισης ισούται με το 0 ($E(q)=0$). Σε αυτό το σημείο η αρχική διασπορά του σμήνους μπορεί να ειπωθεί ότι έχει συγκλίνει σε μια μετάθεση της επιθυμητής διαμόρφωσης. Ο δεύτερος όρος της ενεργειακής συνάρτησης απόκλισης περιγράφει την κινητική ενέργεια του συστήματος. Η προσθήκη του όρου αυτού έχει ως στόχο να ελαχιστοποιήσει την ενέργεια που απαιτείται για να μεταβούμε από την αρχική κατάσταση του σχηματισμού στην τελική κατάσταση.

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο PSO (Particle Swarm Optimization), τον οποίο περιγράψαμε σε προηγούμενες ενότητες και χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο toolbox του matlab που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας την ενεργειακή συνάρτηση απόκλισης (6). Ένα σμήνος πέντε μη επανδρωμένων αεροσκαφών θεωρήθηκε ότι βρισκόταν στον αρχικό σχηματισμό σε επίπεδο γραμμής όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



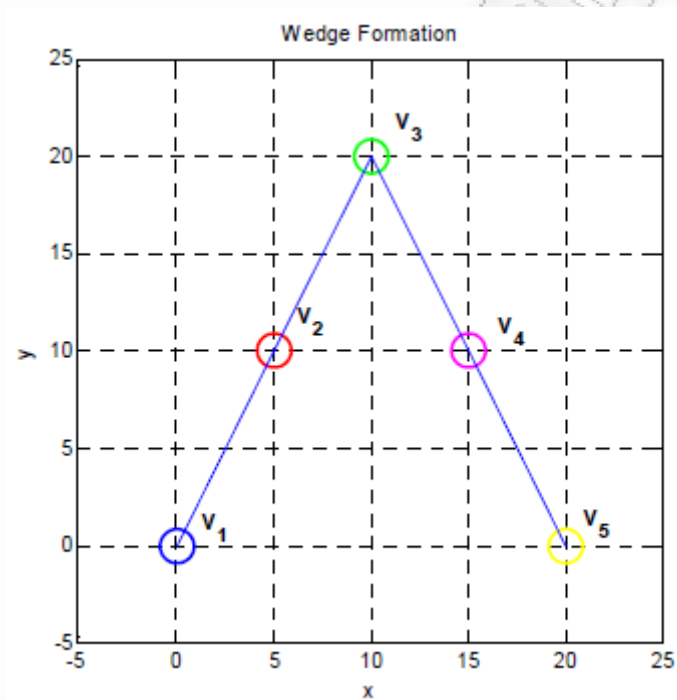
Αρχικός σχηματισμός αεροσκαφών

Τα δυναμικά και τα στοιχεία ελέγχου των μη επανδρωμένων αεροσκαφών του σμήνους περιγράφονται από τις εξισώσεις:

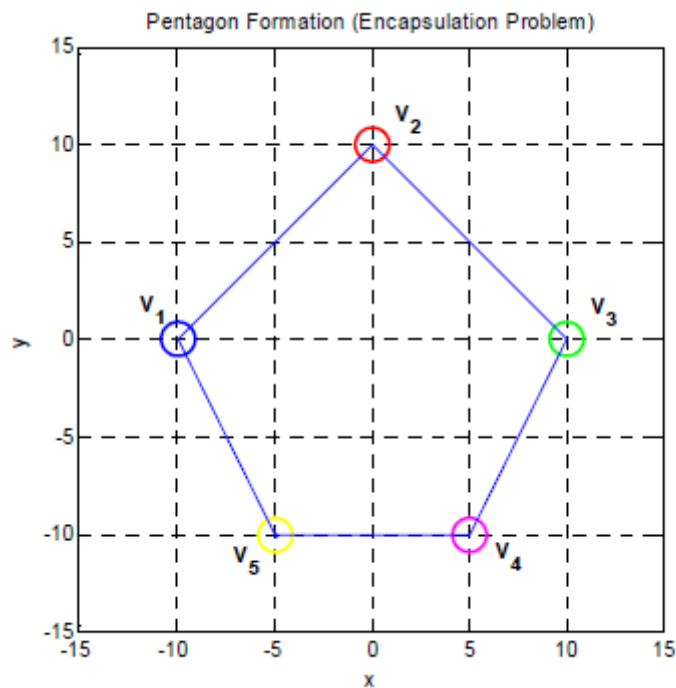
$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= v \cos \theta_i \\ \dot{y}_i &= v \sin \theta_i \\ \theta_i &= u_i\end{aligned}\quad (9)$$

όπου:

$$U = \left\{ u \in \mathbb{R}^m : u_{\min} \leq u_i(k) \leq u_{\max} \right. \\ \left. u_{\min} < 0 < u_{\max}, i = 1, \dots, 5 \right\}, \quad \forall t \in [0, T] \quad (10)$$



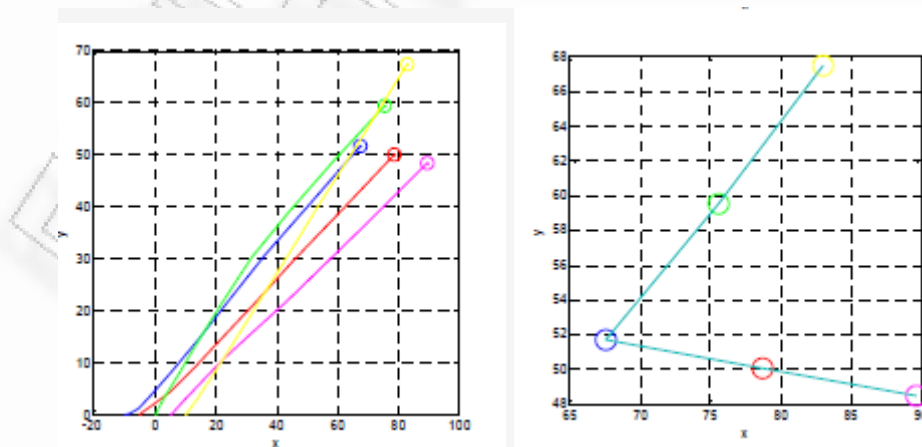
σφηνοειδής διαμόρφωση



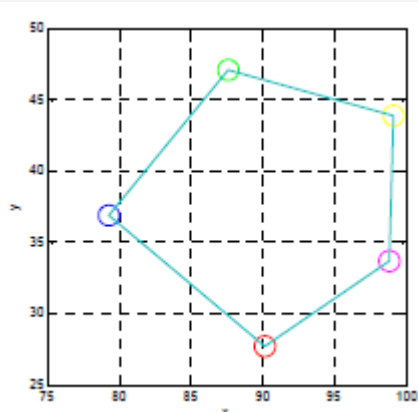
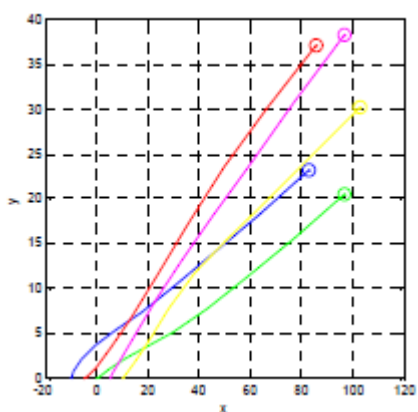
Διαμόρφωση πενταγώνου

Στις δύο προηγούμενες εικόνες βλέπουμε και δύο επιθυμητούς σχηματισμούς του σμήνους. Τα απαριθμημένα γραφήματα που παρουσιάζονται για κάθε σχηματισμό αντιπροσωπεύουν μια μετάθεση της τελικής διαμόρφωσης και δεν αντιπροσωπεύουν μια βέλτιστη μετάθεση του σμήνους στην τελική διαμόρφωση.

Κάθε σωματίδιο του αλγορίθμου PSO αντιπροσωπεύει μια υποψήφια λύση αποτελούμενη από την χρονική εξέλιξη της εισόδου του ελεγκτή για κάθε μη επανδρωμένο αεροσκάφος. Ο αλγόριθμος τρέχει για ένα διάστημα 10 δευτερολέπτων και στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τις βέλτιστες τροχιές που παράγονται από τον αλγόριθμο PSO, για την σφηνοειδή και τον πολυγωνική τελική διαμόρφωση αντίστοιχα:



τροχιές για σφηνοειδή διαμόρφωση



τροχιές για διαμόρφωση πενταγώνου



Συμπεράσματα

Ο αλγόριθμος PSO (Particle Swarm Optimization) τα καταφέρνει πολύ καλά στην εύρεση της αναζητούμενης λύσης. Το εργαλείο (toolbox) που χρησιμοποιήσαμε στο matlab αποδείχτηκε πάρα πολύ καλό και μας επέτρεψε να εκπαιδύσουμε ένα νευρωνικό δίκτυο με τη χρήση του αλγορίθμου PSO χωρίς να απαιτήται η ανάπτυξη νέου κώδικα κάθε φορά.

Οι εξομοίωση του αλγορίθμου PSO στο matlab είναι ανάλογη προς την διαδικασία αναζήτησης του στόχου (του οποίου η θέση είναι γνωστή) από ένα σμήνος μη επανδρωμένων αεροσκαφών χρησιμοποιώντας μη γραμμικές μεθόδους ελέγχου. Βέβαια παρατηρήθηκε το μειονέκτημα του ότι ο PSO δεν παράγει ρεαλιστικά αποτελέσματα όταν έχουμε να κάνουμε με πραγματικά μη επανδρωμένα αεροσκάφη και αυτό γιατί τα σωματίδια επιταχύνονται προς όλες τις κατευθύνσεις και με διαφορετικούς ρυθμούς, και αυτοί οι ελιγμοί δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν όταν τα σωματίδια είναι πραγματικά αεροσκάφη. Ο αλγόριθμος PSO απαιτεί απότομους ελιγμούς με αποτέλεσμα δύσκολα να αποφεύγονται οι συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων του σμήνους, τα οποία επιταχύνονται προς όλες τις κατευθύνσεις, έτσι μια πιο ρεαλιστικής προσέγγιση απαιτείται για τον έλεγχο των ελιγμών ενός σμήνους αεροσκαφών για αυτό χρειάζεται και γραμμικός αλγόριθμος που αναφέραμε πιο πάνω.

Αν και η μέθοδος ελέγχου ενός σμήνους αεροσκαφών με τον αλγόριθμο PSO (Particle Swarm Optimization) δεν προτείνεται για πρακτική εφαρμογή, η κεντρική του ιδέα όμως της ελαχιστοποίησης του σφάλματος είναι ένα πολύ αξιόλογο εργαλείο μέσω του οποίου μπορεί να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι για τον έλεγχο ενός σμήνους αεροσκαφών.

Ο αλγόριθμος PSO όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως είδαμε στην τελευταία ενότητα της παρούσης εργασίας, για την βελτιστοποίηση της μετάβασης του σχηματισμού ενός σμήνους αεροσκαφών από μια αρχική κατάσταση σχηματισμού σε μια τελική κατάσταση του σχηματισμού. Η επιτυχία του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization στο να βρίσκει τη βέλτιστη κάθε φορά μετάβαση για κάθε διαμόρφωση και ταυτόχρονα να ελέγχει ταυτόχρονα τις εισόδους κάθε αεροσκάφους, μας δίνει θετικά μηνύματα και για την εφαρμογή του σε σμήνη με μεγάλο αριθμό συμμετεχόντων αεροσκαφών. Μελλοντική δουλειά θα μπορούσε να γίνει πάνω στη χρήση της συνάρτησης ενεργειακής απόκλισης, που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα, χρησιμοποιώντας εξελικτικές τεχνικές αναζήτησης του PSO για τη επίλυση συ σχετιζόμενων εξισώσεων σύνδεσης. Η επίλυση των εξισώσεων αυτών μπορεί να μας παρέχει δυνητικές πληροφορίες για τον βέλτιστο μετασχηματισμό του σμήνους και να αποδώσει χρονικά παραμετροποιημένες πληροφορίες για τις τροχιές των μη επανδρωμένων αεροσκαφών κατά την κίνησή τους στο χώρο. Για να μπορέσουμε να συνθέσουμε την αυτό - οργανούμενη συμπεριφορά ενός φυσικού σμήνους σωματιδίων, οι τεχνικές αναζήτησης πρέπει να κατανεμηθούν σε όλα τα οχήματα και αυτός είναι ένας τομέας που χρειάζεται περισσότερη έρευνα.

Βιβλιογραφία

- <http://asl.epfl.ch/> Ο διαδικτυακός τόπος του Πολυτεχνείου της Λοζάννης.
- <http://www.swarmintelligence.org/>
- <http://www2.rizospastis.gr/page.do?publDate=3/12/2000&id=1446&pageNo=7&direction=-1>
- <http://www.focusmag.gr/articles/view-article.rx?oid=53301>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_intelligence
- http://www.barnardmicrosystems.com/L4E_uav_swarm.htm
- <http://www.cs.virginia.edu/~evans/bio/slides/presentation.pdf>
- Buss, Leo. 1987: *The evolution of individuality*. Princeton: Princeton University Press.
- Deneubourg, Jean-Louis, Guy Theraulaz and Ralph Beckers. 1992: "Swarm-made architectures", in: Varela, Francisco and P. Bourgine (eds.), *Toward a practice of autonomous systems. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, Paris, 123-133*. Cambridge: MIT Press.
- Grassé, P.-P. 1959: "La Reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles. La théorie de la stigmergie", *Insectes Sociaux* 6: 41-84.
- Hoffmeyer, Jesper. 1992: "Some semiotic aspects of the psycho-physical relation: The endo-exosemiotic boundary", in: Sebeok, Thomas A. and Jean Umiker-Sebeok (eds.), *Biosemiotics: The semiotic web 1991*, 101-123. Berlin: Mouton de Gruyter.
- Jerne, Niels K. 1985: 'The generative grammar of the immune system', *Science* 229, (4718): 1057-1059.
- Pert, Candace B., M. R. Ruff, R. J. Weber and M. Herkenham. 1985: "Neuropeptides and their receptors: A psychosomatic network", *The Journal of Immunology* 135 (2): 820s-826s.
- Wilson, Edward O. 1975: *Sociobiology. The New Synthesis*, Cambridge: Belknap Press.

- Sato A. Research and Development and Civil Application of an Autonomous, Unmanned Helicopter. *Proceedings of AHS International Forum57*, 2001.
- Stevens B. L. and Lewis F. L. *Aircraft Control and Simulation*, John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- Calise A. J., Kim B. S., Leitner J., and Prasad J. V. R. Helicopter Adaptive Flight Control Using Neural Networks. *Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control*, Lake Buena Vista, FL, pp 3336-3341, 1994.
- Anup Dargar, Ahmed Kamel, Gordon Christensen and Kendall E. Nygard, "An Agent Based Framework for UAV Collaboration," *Proceedings of the ISCA 11th International Conference on Intelligent Systems*, pp. 54-59, 2002.
- J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," *Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, December 1995.
- Chin A. Lua, Karl Altenburg, and Kendall E. Nygard, "Synchronized Multi-Point Attack by Autonomous Reactive Vehicles with Simple Local Communication," *Proceedings of 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pp. 95-102, April 2003.
- Brian Birge, "PSOt- a Particle Swarm Optimization Toolbox for Use with Matlab," *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pp. 182-186, April 2003.
- [5] Gerardo Beni, "From Swarm Intelligence to Swarm Robotics," *Swarm Robotics LNCS 3342*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 1-9, 2005.
- Eric Bonabeau, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz, *Swarm Intelligence from Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, New York, 1999.
- James Kennedy and Russell C. Eberhart, *Swarm Intelligence*, Academic Press, San Francisco, 2001.
- [8] Haykin, Simon, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd Ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999.
- Venu G. Gudise and Ganesh K. Venayagamoorthy, "Comparison of Particle Swarm Optimization and Backpropagation as Training Algorithms for Neural Networks," *Proceedings of 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pp. 110- 117, April 2003.
- Karl Altenburg, Joseph Schlecht, and Kendall E. Nygard, "An Agent-based Simulation for Modeling Intelligent Munitions," *Proceedings of the Second WSEAS International Conference on Simulation, Modeling and Optimization*, Skiathos, Greece, 2002, <http://www.cs.ndsu.nodak.edu/~nygard/research/munitions.pdf>,
- Fax J. *Optimal and Cooperative control of vehicle formations*, California Institute of Technology, 2002.
- Fax J, Murray R. Information flow and cooperative control of vehicle formations, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 49, No. 9, 2004.

- Hao Y. *A practical framework for formation planning and control of multiple unmanned ground vehicles*, University of Delaware, 2004.
- Lewis A. Affine Connection Control Systems, *Proc. of IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control*, Princeton, NJ, 2001.
- Muhammad A. *Graphs, simplicial complexes and beyond: Topological tolls for multi-agent coordination*, Georgia Institute of Technology, 2005.
- Olfati-Saber R, Dunbar W, and Murray R. Cooperative control of multi-vehicle systems using cost graphs and optimization, *Proc. American Control Conference*, Pasadena, California, 2003.
- Olfati-Saber R. *Flocking for multi-agent dynamic: systems algorithms and theory*, California Institute of Technology, 2004. [8]. Sycara K. Multiagent systems, *AI Magazine*, The American Association for Artificial Intelligence, pp. 79-92, 1998