



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2022-23
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (SYSTEMS ENGINEERING)
(ΠΔ 56 /2015/ΦΕΚ 163Α'/20.08.2014)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και
Διοίκησης

Σχολή

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ρομποτική Σμήνους. Νέες Ιδέες, Προοπτικές και Μελλοντικές Εφαρμογές

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων
για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό:

ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΚΑΤΣΙΜΠΑΛΗ

A.M.:

2015018008

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2023

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή της κας Βασιλικής Κατσίμπαλη εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΙΩ. ΔΑΡΑΣ (Επιβλέπων),



Αναπληρωτής Καθηγητής ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ,

Nikolaos Papadakis

Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΔΟΪΤΣΙΔΗΣ,



ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

© Copyright υπό Βασιλικής Κατσίμπαλη

Έτος 2023

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Καθηγητή μου κ. Δρ. Ο Νικόλαο Δάρα για τη δυνατότητα που μου έδωσε να δημιουργήσω τον μεγάλο μου στόχο να σπουδάσω σε αυτό το πολύ τμήμα, όπως επίσης να τον ευχαριστήσω για τον πολύτιμο χρόνο που διέθετε για την περάτωση της παρούσας εργασίας. Οι σημαντικές υποδείξεις και οι συμβουλές του με κατεύθυναν σ' έναν σωστό τρόπο σκέψης πάνω απ' όλα και μου προσέφεραν σημαντικά εφόδια για τη μετέπειτα ζωή μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα, όλους τους καθηγητές του Πολυτεχνείου και της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν όλα αυτά τον καιρό των σπουδών μου.

Τέλος, θέλω να εκφράσω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Πέραν όμως από την πολύτιμη αυτή στήριξη, μου έδωσαν όλα τα εφόδια ώστε να γίνω ένας σωστός Άνθρωπος και αυτό είναι κάτι που δεν μαθαίνεται, αλλά μεταδίδεται.

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | I |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | I |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 | |
| ΤΙ ΕΝΝΟΟΥΜΕ ΜΕ ΤΟΝ ΟΡΟ «ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΣΜΗΝΟΥΣ. ΝΕΕΣ ΙΔΕΕΣ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ» | |
| §1.1 Εισαγωγή | 1 |
| §1.2 Η Ιστορία της Ρομποτικής Σμήνους | 5 |
| §1.3 Ρομποτική Σμήνους: μια Αρχική Προσέγγιση | 9 |
| §1.3.1 Σμήνος- Τύποι στην Επιστήμη | 10 |
| §1.3.2 Ιδιότητες | 13 |
| §1.3.3 Πλεονεκτήματα και Θέματα | 16 |
| §1.3.4 Περιοχές εργασιών και Εργασίες για Ρομποτικά Συστήματα Σμήνους | 18 |
| §1.3.5 Πεδία Εφαρμογής | 23 |
| §1.3.6 Ρομποτικά Συστήματα Σμήνους και άλλα Ρομποτικά Συστήματα | 26 |
| §1.3.7 Ταξινόμηση Ρομποτική Σμήνους | 31 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 | |
| Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ | |
| §2.1. Εισαγωγή | 37 |
| §2.2 Το SWARMBOT | 38 |
| §2.3 Το SCRIMMAGE | 43 |
| §2.4 Το WEBBOTS: | 44 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 | |
| ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ | |
| §3.1 Εισαγωγή | 54 |
| §3.2. Ανησυχίες περί του υλισμικού και λογισμικού | 56 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| §3.3 Μελλοντικές Δυνητικές Εφαρμογές | 58 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 64 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 66 |

Περίληψη - Η ρομποτική σμήνους είναι ένας νέος τομέας που εφαρμόζει τη ρομποτική στο φαινόμενο των φυσικών σμηνών. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύστημα που να είναι επεκτάσιμο, προσαρμόσιμο και στιβαρό, οι ερευνητές μελετούν σμήνη ρομπότ που μιμούνται φυσικά σμήνη, όπως σμήνη μυρμηγκιών και πουλιών. Η αυτοοργάνωση, η αυτονομία, η συνεργασία και ο συντονισμός εμφανίζονται όλα από αυτά τα ρομπότ. Προκειμένου να διατηρηθεί το κόστος και η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού χαμηλά, δημιουργούνται συστήματα που μοιάζουν πολύ με φυσικά σμήνη. Τα ρομπότ λειτουργούν ανεξάρτητα από έναν κεντρικό ελεγκτή και μπορούν να επικοινωνούν άμεσα (ρομπότ σε ρομπότ) ή έμμεσα (ρομπότ με περιβάλλον). Η ρομποτική σμήνους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια ποικιλία εργασιών, από απλές δουλειές του σπιτιού έως στρατιωτικές επιχειρήσεις. Αυτό το δοκίμιο εξετάζει την ιστορία και τις δυνατότητες της τεχνικής της ρομποτικής σμήνους. Καλύπτει τις βασικές αρχές της ρομποτικής σμήνους καθώς και τα βασικά στοιχεία, τα έργα, τις προσομοιώσεις, τις εφαρμογές του πραγματικού κόσμου και τις πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΣΜΗΝΟΥΣ. ΝΕΕΣ ΙΔΕΕΣ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

§1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρομποτική σμήνους είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας της ρομποτικής που μελετά τη συμπεριφορά μεγάλων ομάδων σχετικά απλών ρομπότ που συνεργάζονται για να ολοκληρώσουν εργασίες. Αντλεί έμπνευση από τη συμπεριφορά κοινωνικών εντόμων, όπως τα μυρμήγκια και οι μέλισσες, και εστιάζει στην ανάπτυξη αλγορίθμων και στρατηγικών ελέγχου που επιτρέπουν σε ομάδες ρομπότ να συνεργάζονται με συντονισμένο τρόπο.

Το παρελθόν της ρομποτικής σμήνους μπορεί να εντοπιστεί στη δεκαετία του 1980, όταν οι ερευνητές άρχισαν για πρώτη φορά να εξερευνούν την έννοια των κατανεμημένων ρομποτικών συστημάτων. Ωστόσο, μόλις τη δεκαετία του 1990 η ρομποτική σμήνος άρχισε να απογειώνεται ως πεδίο από μόνη της, με την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων και στρατηγικών ελέγχου που κατέστησαν δυνατό τον συντονισμό μεγάλων ομάδων ρομπότ.

Σήμερα, η ρομποτική σμήνους είναι ένας ενεργός τομέας έρευνας με εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων, συμπεριλαμβανομένης της γεωργίας, της έρευνας και διάσωσης και της περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της ρομποτικής σμήνους είναι ότι επιτρέπει τις εργασίες να εκτελούνται πιο γρήγορα και αποτελεσματικά από ό,τι θα ήταν δυνατό με ένα μόνο ρομπότ ή μια μικρή ομάδα ρομπότ.

Κοιτάζοντας προς το μέλλον, η ρομποτική σμήνους είναι πιθανό να συνεχίσει να αναπτύσσεται και να εξελίσσεται καθώς αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες και τεχνικές. Μερικοί από τους βασικούς τομείς εστίασης για μελλοντική έρευνα στη ρομποτική σμήνους περιλαμβάνουν την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων αλγορίθμων και στρατηγικών ελέγχου που μπορούν να επιτρέψουν στα ρομπότ να προσαρμοστούν σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα και να συνεργαστούν πιο αποτελεσματικά, καθώς και να βελτιώσουν τις φυσικές δυνατότητες των μεμονωμένων ρομπότ για να τους επιτρέψουν να εκτελούν πιο σύνθετες εργασίες. Τελικά, ο στόχος της ρομποτικής σμήνους είναι να δημιουργήσει συστήματα που μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα και να προσαρμόζονται σε ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων, καθιστώντας τα χρήσιμα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Οι άνθρωποι έχουν παραινυθεί να δημιουργήσουν συστήματα χρησιμοποιώντας ρομπότ που μπορούν να δράσουν με τον πιο συγγίσιμο τρόπο ως φυσικά σμήνη από τη συνεργατική συμπεριφορά που επιδεικνύουν οργανισμοί όπως οι μέλισσες, τα μυρμήγκια, τα ψάρια και άλλοι. Δουλεύοντας μαζί, τα μέλη αυτών των φυσικών σμηνών είναι σε θέση να αναλάβουν δραστηριότητες που θα ήταν αδύνατο για κανένα από αυτά να κάνει μόνο του.

Σμήνη μυρμηγκιών μπορούν να κατασκευάσουν γέφυρες για να εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις, οι τερμίτες μπορούν να κατασκευάσουν αναχώματα ύψους έως και 30 πόδια, κοπάδια ψαριών μαζί για ασφάλεια και ούτω καθεξής. Το σχήμα 1 απεικονίζει μια αποικία μυρμηγκιών που κατασκευάζουν μια αυτοσχέδια γέφυρα πάνω από μια ρωγμή στο έδαφος, ενώ η σχήμα 2 απεικονίζει ένα ανάχωμα τερμιτών.

Η υλοποίηση φυσικών συστημάτων που μοιάζουν με σμήνος στη ρομποτική απαιτεί μια σταθερή κατανόηση της έννοιας του σμήνους. Ένα σμήνος μπορεί να οριστεί με διάφορους τρόπους. Ένας μεγάλος αριθμός τοπικά αλληλεπιδρώντων ατόμων που μοιράζονται στόχους είναι ένας συνήθης ορισμός που δίνεται στη βιβλιογραφική αναφορά [1]. Αυτό σημαίνει ότι ο στόχος είναι να δημιουργηθούν συστήματα που περιέχουν σμήνη ρομπότ που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και έχουν κάποιους κοινούς στόχους, όπως ακριβώς κάνουν τα φυσικά σμήνη. Η παρούσα μελέτη συζητά την έννοια της ενσωμάτωσης ρομποτικών σμηνών, παρόμοιων με αυτά που παρατηρούνται στη φύση, σε πρακτικές εφαρμογές και, ταυτόχρονα, παρέχει μια συνοπτική επισκόπηση της ιστορίας και των μελλοντικών προοπτικών της έρευνας στη ρομποτική σμήνους. Ο στόχος είναι να παρασχεθεί μια επισκόπηση της ανάπτυξης, της τρέχουσας έρευνας και των προγραμματισμένων εφαρμογών των ρομπότ σμήνους. Η εξέλιξη των ρομπότ σμήνους καλύπτεται στο Κεφάλαιο 2, στο οποίο συζητείται η προέλευση του πεδίου, οι πρώτες μέθοδοι και ιδέες και οι συναφείς θεμελιώδεις έννοιες. Στη συνέχεια, η ρομποτική σμήνους αναλύεται λεπτομερώς στην Κεφάλαιο 3, όπου προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά, τα οφέλη, οι προκλήσεις, οι εργασίες και οι τομείς εφαρμογής της ρομποτικής σμήνους.



Σχήμα 1. Τα μυρμήγκια χτίζουν μια γέφυρα [2]



Σχήμα 2. Ένα βουνό χτιζμένο από τερμίτες [3]



Σχήμα 3. Ένα σμήνος μελισσών [4]



Σχήμα 4. Σχηματισμός πουλιών [5]



Σχήμα 5. Ένα κοπάδι ψαριών [6]



Σχήμα 6. Σμήνη ακρίδων [7]

§1.2. Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ

Η ιστορία της ρομποτικής σμήνους μπορεί να αναχθεί στη δεκαετία του 1980, όταν οι ερευνητές άρχισαν για πρώτη φορά να εξερευνούν την έννοια των κατανεμημένων ρομποτικών συστημάτων. Ωστόσο, ο όρος «ρομποτική σμήνους» επινοήθηκε μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 2000, όταν οι ερευνητές άρχισαν να επικεντρώνονται ειδικά στη συμπεριφορά μεγάλων ομάδων σχετικά απλών ρομπότ που συνεργάζονται για να ολοκληρώσουν εργασίες.

Στις πρώτες μέρες της ρομποτικής σμήνους, οι ερευνητές ενδιαφέρθηκαν κυρίως για την ανάπτυξη αλγορίθμων και στρατηγικών ελέγχου που θα επέτρεπαν σε ομάδες ρομπότ να συνεργαστούν με συντονισμένο τρόπο. Μερικά από τα πρώτα παραδείγματα έρευνας για τη ρομποτική σμήνους περιλάμβαναν τη χρήση απλών ρομπότ που ονομάζονται «kilobots», τα οποία σχεδιάστηκαν να κινούνται σε συντονισμένα μοτίβα.

Στη δεκαετία του 1990, οι ερευνητές άρχισαν να εξερευνούν την ιδέα της χρήσης ρομποτικής σμήνους για πρακτικές εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση του περιβάλλοντος και η έρευνα και διάσωση. Ένα αξιοσημείωτο πρώιμο παράδειγμα αυτού ήταν η ανάπτυξη ενός σμήνους ρομπότ που σχεδιάστηκαν για να εξερευνήσουν τα συντρίμια του Παγκόσμιου Κέντρου Εμπορίου μετά τις επιθέσεις της 11ης Σεπτεμβρίου.

Στα χρόνια που ακολούθησαν, η ρομποτική σμήνους συνέχισε να αναπτύσσεται και να εξελίσσεται καθώς οι ερευνητές ανέπτυξαν νέους αλγόριθμους και στρατηγικές ελέγχου που κατέστησαν δυνατό τον συντονισμό μεγαλύτερων και πιο περίπλοκων ομάδων ρομπότ. Σήμερα, η ρομποτική σμήνους είναι ένας ενεργός τομέας έρευνας με εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων, συμπεριλαμβανομένης της γεωργίας, της μεταποίησης και της εξερεύνησης του διαστήματος.

Συνολικά, η ιστορία της ρομποτικής σμήνους χαρακτηρίζεται από μια σταθερή πρόοδο από την πρώιμη διερευνητική έρευνα σε πρακτικές εφαρμογές σε σενάρια πραγματικού κόσμου. Καθώς το πεδίο συνεχίζει να αναπτύσσεται και να εξελίσσεται, είναι πιθανό να δούμε ακόμη πιο εξελιγμένα και ικανά συστήματα ρομποτικής σμήνους τα επόμενα χρόνια.

Ο όρος «σμήνος» στο πλαίσιο της ρομποτικής εφαρμόζεται για πρώτη φορά από τους G. Beni [8] και Fukuda [9] το 1988. Σύμφωνα με τον G. Beni, η κυτταρική ρομποτική είναι ένα σύστημα που αποτελείται από αυτόνομα ρομπότ, που λειτουργούν σε ένα n -διάστατο κυτταρικό χώρο, χωρίς καμία κεντρική οντότητα. Επιπλέον, έχουν περιορισμένη επικοινωνία μεταξύ τους και συντονίζονται και συνεργάζονται για την επίτευξη κοινών στόχων. Από την άλλη πλευρά, η Fukuda χρησιμοποιεί το σμήνος ως μια ομάδα ρομπότ που μπορούν να συνεργαστούν όπως τα κύτταρα ενός ανθρώπινου σώματος και ως εκ τούτου μπορούν να επιτύχουν πολύπλοκους στόχους. Ένα χρόνο αργότερα οι G. Beni και J. Wang [10] εισάγουν τον όρο νοημοσύνη σμήνους σε σχέση με τα ρομποτικά συστήματα κελαριών. Ισχυρίστηκαν ότι τα κυψελωτά ρομποτικά συστήματα είναι σε θέση να επιδείξουν «έξυπνη» συμπεριφορά μέσω του συντονισμού των ενεργειών τους. Το 1993, ο C. Ronald Kube και ο Hong Zohng [11] κατασκεύασαν ένα σύστημα πολλαπλών ρομπότ που εμπνεύστηκε από τις συλλογικές συμπεριφορές των φυσικών σμηνών. Την ίδια χρονιά, ο Gregory Dudek et al. [12] όρισε τη ρομποτική σμήνους σε σχέση με διαφορετικά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους ενός σμήνους, του εύρους επικοινωνίας μεταξύ των ρομπότ σε ένα σμήνος, της τοπολογίας επικοινωνίας, του εύρους ζώνης επικοινωνίας, του ρυθμού αναδιοργάνωσης ενός σμήνους, των ικανοτήτων των μελών του σμήνους και του ομοιογενούς ή ετερογενούς σμήνους. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το «σμήνος» είναι συνώνυμο των πολυρομποτικών συστημάτων, γι' αυτό και δεν ήταν ακόμη σαφές ποιες ιδιότητες διαφέρουν από τον όρο «ρομποτική σμήνους» από άλλα ρομποτικά συστήματα.

Στην πρώτη έρευνα για τα ρομποτικά συστήματα σμήνους, η εστίαση παρέμεινε στις εξερευνήσεις των συμπεριφορών σμήνους σε διαφορετικά είδη, όπως τα μυρμηγκία, τα πουλιά, τα ψάρια και άλλα. Οι ερευνητές εξέτασαν αυτές τις συμπεριφορές και διερεύννησαν τρόπους για το πώς να πραγματοποιήσουν αυτές τις συμπεριφορές σε ρομποτικά συστήματα [13], [14], [15], [16], [17].

Επιπλέον, η έρευνα βασίστηκε σε διαφορετικές εμπνεύσεις, όπως το σμήνος πουλιών ή αποικίες μυρμηγκιών. Τα φυσικά σμήνη ήταν πάντα το κύριο κίνητρο πίσω από την ιδέα της ρομποτικής σμήνους. Πολλές μελέτες και έρευνες μιμούνται διαφορετικές συμπεριφορές σμήνους όπως αναζήτηση τροφής, σμήνος, διαλογή, στιγματισμός ή συνεργασία. Οι εργασίες [18] και [19] είναι δύο (σχετικά) παλιές ερευνητικές εργασίες (1994 και 1999), που ασχολούνται με το θέμα της στιγματοποίησης. Η στιγματοποίηση αναφέρεται στην έμμεση επικοινωνία μεταξύ των ειδών και εισάγεται στην εργασία [20] με αναφορά στη συμπεριφορά των τερμιτών. Η πρώτη εργασία περιέχει διάφορα πειράματα όπου τα κινητά ρομπότ είναι υπεύθυνα για τη συλλογή τυχαία καταναμεμένων αντικειμένων σε ένα περιβάλλον μέσω της στιγματοποίησης. Το άρθρο [19] διερευνά το χαρακτηριστικό του στιγματισμού και της αυτοοργάνωσης μεταξύ των ρομπότ που έχουν τις ίδιες δυνατότητες.

Ωστόσο, το 2004 ο G. Beni [21] έκανε άλλη μια προσπάθεια να περιγράψει ένα σμήνος με μεγαλύτερη ακρίβεια. Σύμφωνα με τον Beni, τα ρομπότ σε ένα σμήνος είναι απλά, πανομοιότυπα και αυτο-οργανούμενα, και το σύστημα πρέπει να είναι επεκτάσιμο, και μόνο η τοπική επικοινωνία είναι διαθέσιμη μεταξύ των μελών του σμήνος. Αυτές είναι οι ιδιότητες που εξακολουθούν να θεωρούνται ως τα βασικά στοιχεία για τον καθορισμό και τη διάκριση των ρομποτικών συστημάτων σμήνους από τ' άλλα ρομποτικά συστήματα. Τα ρομπότ που χρησιμοποιήθηκαν για τον πειραματισμό είχαν πολλά κοινά με τα κοινωνικά έντομα, για παράδειγμα την απλότητα και την αποκέντρωση ενός συστήματος. Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιήθηκε η λέξη «σμήνος».

Την ίδια χρονική περίοδο, μια άλλη ερευνητική εργασία [22] ασχολήθηκε επίσης με το θέμα της ρομποτικής σμήνους. Ο συγγραφέας όρισε τη ρομποτική σμήνους ως «...η ρομποτική σμήνους είναι η μελέτη του πώς μπορεί να σχεδιαστεί από έναν μεγάλο αριθμό σχετικά απλών φυσικά ενσωματωμένων παραγόντων έτσι ώστε μια επιθυμητή συλλογική συμπεριφορά να προκύπτει από τις τοπικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρακτόρων και μεταξύ των πρακτόρων και του περιβάλλοντος». Σύμφωνα με τον ίδιο, τα ρομπότ πρέπει να είναι αυτόνομα, αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να μπορούν να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους και να λαμβάνουν αποφάσεις ανάλογα. Δεύτερον, τα σμήνη θα πρέπει να αποτελούνται από έναν μικρό αριθμό ομοιογενών ομάδων και κάθε ομάδα πρέπει να έχει μεγάλο αριθμό ρομπότ. Επιπλέον, δεν είναι ακόμη σαφές τι μέγεθος μπορεί ή πρέπει να έχει ένα σμήνος.

Ο G. Beni δίνει έναν σύντομο ορισμό για το μέγεθος ενός σμήνους ως «Δεν ήταν τόσο μεγάλο όσο έπρεπε να αντιμετωπιστεί με στατιστικούς μέσους όρους, ούτε τόσο μικρό όσο ένα πρόβλημα λίγων σωμάτων». Σύμφωνα με τον συγγραφέα το μέγεθος ενός σμήνους πρέπει να είναι της τάξης του $10^2 - 10^3$. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των μελών είναι μεγαλύτερος από 100 και πολύ μικρότερος από 1023. Το μέγεθος εξαρτάται επίσης από τον τύπο των ρομποτικών συστημάτων σμήνους. Εάν τα συστήματα είναι για παράδειγμα, ετερογενή που περιλαμβάνουν ρομπότ με επιπλέον δυνάμεις, τότε πιθανότατα το μέγεθος του σμήνους δεν είναι τόσο μεγάλο. Αυτό οφείλεται στον λόγο ότι τα ισχυρά ρομπότ μπορούν να εκτελέσουν τα περισσότερα μέρη της εργασίας. Από την άλλη πλευρά, ένα σύστημα που έχει πολύ απλά ρομπότ που δεν μπορούν να εκτελέσουν καμία σημαντική εργασία από μόνα τους, θα μπορούσε να έχει ένα τεράστιο μέγεθος σμήνους. Έχουν υπάρξει αρκετοί άλλοι ορισμοί των σμηνών, όλοι τους είναι παρόμοιοι με τον τρόπο, ότι η κύρια ιδέα είναι να πραγματοποιηθεί το φυσικό σμήνος, συμπεριλαμβανομένων των βασικών ιδιοτήτων τους, όπως οι τοπικές αλληλεπιδράσεις και ο συντονισμός, σε εφαρμογές πραγματικής ζωής με σμήνη ρομπότ ([23]).

Οι ερευνητές και οι προγραμματιστές στοχεύουν να κατασκευάσουν ρομποτικά συστήματα, γνωστά ως ρομποτικά συστήματα σμήνους, που αποτελούνται από μεγάλο αριθμό απλά αυτόνομων ρομπότ, που συντονίζονται και συνεργάζονται, όπως τα φυσικά σμήνη, για να επιτύχουν απλές έως πολύ περίπλοκες εργασίες. Ο συντονισμός και η συνεργασία επιτυγχάνεται με πολύ απλούς κανόνες. Η ρομποτική σμήνους είναι η μελέτη του πώς να καταστεί δυνατός ο συντονισμός και η συνεργασία σε μια μεγάλη ομάδα ρομπότ. Ασχολείται με την υλοποίηση αυτών των ιδιοτήτων σμήνους που είναι εμπνευσμένες από φυσικά σμήνη, στον τομέα της ρομποτικής.

§1.3. ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΣΜΗΝΟΥΣ: ΜΙΑ ΑΡΧΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η ρομποτική Σμήνους είναι ένας τομέας της ρομποτικής που εστιάζει στη μελέτη της συμπεριφοράς ομάδων σχετικά απλών ρομπότ που συνεργάζονται για να ολοκληρώσουν εργασίες. Η ιδέα πίσω από τη ρομποτική σμήνους είναι να αντλήσουμε έμπνευση από τη συμπεριφορά κοινωνικών εντόμων, όπως τα μυρμήγκια και οι μέλισσες, τα οποία είναι σε θέση να ολοκληρώσουν πολύπλοκα καθήκοντα μέσω της συλλογικής συμπεριφοράς μεγάλων ομάδων ατόμων.

Μια αρχική προσέγγιση για τη ρομποτική σμήνους περιλαμβάνει το σχεδιασμό ρομπότ που είναι σχετικά απλά και φθηνά, αλλά μπορούν να εκτελέσουν χρήσιμες εργασίες όταν εργάζονται μαζί σε μεγάλες ομάδες. Αυτά τα ρομπότ είναι συνήθως σχεδιασμένα για να επικοινωνούν μεταξύ τους και να συντονίζουν τη συμπεριφορά τους με αποκεντρωμένο τρόπο, χωρίς την ανάγκη κεντρικού ελεγκτή.

Μια σημαντική πτυχή της ρομποτικής σμήνους είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων και στρατηγικών ελέγχου που επιτρέπουν σε ομάδες ρομπότ να συνεργάζονται με συντονισμένο τρόπο. Αυτοί οι αλγόριθμοι και οι στρατηγικές σχεδιάζονται συνήθως για να είναι ισχυροί και προσαρμοστικοί, επιτρέποντας στα ρομπότ να ανταποκρίνονται σε αλλαγές στο περιβάλλον ή στη συμπεριφορά άλλων ρομπότ στο σμήνος.

Μια άλλη βασική πτυχή της ρομποτικής σμήνους είναι η ανάπτυξη φυσικών ρομπότ που μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά σε μεγάλες ομάδες. Αυτό περιλαμβάνει το σχεδιασμό ρομπότ που είναι σχετικά απλά και φθηνά, αλλά εξακολουθούν να έχουν τις απαραίτητες δυνατότητες για να εκτελούν χρήσιμες εργασίες, όπως η αίσθηση του περιβάλλοντος, η κίνηση και ο χειρισμός αντικειμένων.

Συνολικά, μια αρχική προσέγγιση στη ρομποτική σμήνους περιλαμβάνει το σχεδιασμό απλών, αποκεντρωμένων συστημάτων που επιτρέπουν σε ομάδες ρομπότ να συνεργάζονται με συντονισμένο τρόπο. Καθώς το πεδίο συνεχίζει να αναπτύσσεται και να εξελίσσεται, είναι πιθανό να δούμε ακόμη πιο εξελιγμένα συστήματα ρομποτικής σμήνους που είναι ικανά να εκτελούν ακόμη πιο σύνθετες εργασίες σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

§1.3.1. Σμήνος- Τύποι στην Επιστήμη

Η συμπεριφορά του σμήνους είναι ένα φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων, συμπεριλαμβανομένης της βιολογίας, της φυσικής και της επιστήμης των υπολογιστών. Σε καθένα από αυτά τα πεδία, οι ερευνητές έχουν εντοπίσει διαφορετικούς τύπους σμηνών που παρουσιάζουν διαφορετικά πρότυπα συμπεριφοράς.

Μερικά παραδείγματα επεξηγούνται όπως παρακάτω:

- **Βιολογικά σμήνη:** Τα βιολογικά σμήνη είναι ίσως το πιο γνωστό είδος σμήνους και περιλαμβάνουν κοινωνικά έντομα όπως μυρμήγκια, μέλισσες και τερμίτες. Αυτά τα σμήνη χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό συνεργασίας και συντονισμού μεταξύ των μεμονωμένων μελών, που επιτρέπει στο σμήνος να ολοκληρώσει πολύπλοκες εργασίες που θα ήταν αδύνατες για ένα μεμονωμένο άτομο.
- **Φυσικά σμήνη:** Τα σωματικά σμήνη είναι συλλογές φυσικών οργανισμών που παρουσιάζουν συλλογική συμπεριφορά, όπως κοπάδια πουλιών ή κοπάδια ψαριών. Αυτά τα

σμήνη χαρακτηρίζονται από αναδυόμενη συμπεριφορά, στην οποία σύνθετα πρότυπα κίνησης και συντονισμού προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεμονωμένων μελών.

• **Χημικά σμήνη:** Τα χημικά σμήνη είναι συλλογές χημικών παραγόντων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για να παράγουν πολύπλοκα πρότυπα συμπεριφοράς. Ένα παράδειγμα χημικού σμήνους είναι μια αποικία βακτηρίων που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω χημικών σημάτων.

• **Ρομποτικά σμήνη:** Τα ρομποτικά σμήνη είναι συλλογές ρομπότ που συνεργάζονται για να ολοκληρώσουν εργασίες, όπως έρευνα και διάσωση ή περιβαλλοντική παρακολούθηση. Αυτά τα σμήνη χαρακτηρίζονται από αποκεντρωμένο έλεγχο, στον οποίο μεμονωμένα ρομπότ επικοινωνούν μεταξύ τους και προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους με βάση τη συμπεριφορά των άλλων μελών του σμήνους.

Συνολικά, η μελέτη της συμπεριφοράς των σμήνους σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία έχει παράσχει πληροφορίες για τους μηχανισμούς που διέπουν τη συλλογική συμπεριφορά, καθώς και πιθανές εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα τομέων, από τη ρομποτική έως την περιβαλλοντική παρακολούθηση.

Επιστημονικοί τύποι σμηνών.

Τα σμήνη, όπως είναι γνωστό, είναι κινητές ομάδες οργανισμών του ίδιου είδους. Επιστημονικά μιλώντας, ωστόσο, ο όρος «σμήνος» αναφέρεται σε μια μεγάλη ποικιλία φαινομένων, συμπεριλαμβανομένων βιολογικών σμηνών, συμπεριφορών σμήνους, μηχανικής σμήνους και νοημοσύνης σμήνους. Σμήνη από έντομα, πουλιά, ψάρια ή άλλα ζώα είναι όλα παραδείγματα βιολογικών σμηνών. Οι συλλογικές συμπεριφορές διαμορφώνονται από τις συντονισμένες προσπάθειες αυτών των σμηνών. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι τα κύτταρα και οι οργανισμοί που κολυμπούν ελεύθερα. Αυτή η μορφή σμήνους χρησιμοποιείται [24] για να περιγράψει τα εξαιρετικά κινητικά βακτήρια που μεταναστεύουν στο υπόστρωμα. Η

νοημοσύνη του σμήνους είναι η ικανότητα μιας ομάδας οργανισμών να ενεργούν ως ενιαία οντότητα ενώ παίρνουν μια απόφαση ή μαθαίνουν κάτι νέο [10].

Η έμπνευση προέρχεται από φυσικά σμήνη όπως μυρμήγκια, μέλισσες και ψάρια που συνεργάζονται για διάφορες εργασίες. Συνεργάζονται ακόμα κι αν δεν μιλούν απευθείας μεταξύ τους. Τα μυρμήγκια αναζητούν τροφή και αφήνουν ενδείξεις (φερομόνες) για να το βρουν οι άλλοι. Τα ψάρια ταξιδεύουν μερικές φορές σε μεγάλες ομάδες που ονομάζονται κοπάδια όταν μετακινούνται μεταξύ διαφορετικών οικοτόπων. Τα κοπάδια ψαριών εξυπηρετούν πολλούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της άμυνας κατά των αρπακτικών. Επομένως, είναι η συλλογική νοημοσύνη της κυψέλης παρότι αυτή ενός μεμονωμένου μέλους. Το Σμήνος περιγράφει τη συμπεριφορά των ζώων, των εντόμων και άλλων ειδών (εικόνες 3, 4, 5 και 6).

Η συλλογική νοημοσύνη είναι αυτή που οδηγεί τη δραστηριότητα του σμήνους ([10]). Περιγράφει τις συντονισμένες προσπάθειες ομάδων πλασμάτων, όπως ψάρια, πουλιά, έντομα και άλλα, για την επίτευξη ενός κοινού στόχου. Η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των ανθρώπων είναι του ίδιου είδους. Ωστόσο, ένα σμήνος μπορεί επίσης να αναπτυχθεί από πλάσματα διαφορετικών μεγεθών και ειδών. Οι συλλογικές ενέργειες μιας ομάδας οργανισμών, είτε είναι έντομα, ζώα ή άνθρωποι, τους ορίζουν ως ένα σμήνος. Η μηχανική σμήνους αναφέρεται στην πρακτική της χρήσης μεθόδων που βασίζονται στη συμπεριφορά του σμήνους.

Στην εργασία [25] επινοήθηκε ο όρος «μηχανική σμήνους». Η μηχανική σμήνους, όπως περιγράφηκε από τον συγγραφέα, είναι μια «επίσημη διαδικασία δύο σταδίων» κατά την οποία μια ομάδα πρακτόρων δημιουργείται και προγραμματίζεται για να πραγματοποιήσει έναν συγκεκριμένο στόχο. Αρχικά, προτείνεται μια δήλωση προβλήματος που καθορίζει τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί κάθε πράκτορας για να ολοκληρωθεί η εργασία. Το δεύτερο στάδιο είναι ο σχεδιασμός μιας συμπεριφοράς ρομπότ ή ενός συνδυασμού συμπεριφορών ρομπότ που ικανοποιεί αυτές τις ανάγκες.

§1.3.2. Ιδιότητες

Η ρομποτική Σμήνους είναι ένας τομέας της ρομποτικής που εστιάζει στη συμπεριφορά ομάδων ρομπότ που συνεργάζονται για να ολοκληρώσουν εργασίες. Υπάρχουν κάποιες βασικές ιδιότητες που σχετίζονται με τη ρομποτική σμήνους:

- **Αποκέντρωση:** Τα συστήματα ρομποτικής Σμήνους είναι συνήθως αποκεντρωμένα, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής που να συντονίζει τη συμπεριφορά των ρομπότ. Αντίθετα, μεμονωμένα ρομπότ επικοινωνούν μεταξύ τους και λαμβάνουν αποφάσεις με βάση τη συμπεριφορά άλλων μελών του σμήνους.
- **Επεκτασιμότητα:** Τα συστήματα ρομποτικής Σμήνους έχουν σχεδιαστεί για να είναι επεκτάσιμα, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά με μεγάλες ομάδες ρομπότ. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση απλών ρομπότ χαμηλού κόστους που μπορούν εύκολα να αναπαραχθούν και να συντονιστούν.
- **Ανθεκτικότητα:** Τα συστήματα ρομποτικής Σμήνους έχουν σχεδιαστεί για να είναι στιβαρά, που σημαίνει ότι μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν ακόμη και αν μεμονωμένα ρομπότ αποτύχουν ή αφαιρεθούν από το σμήνος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση περιττών συστημάτων και αποκεντρωμένου ελέγχου.
- **Προσαρμοστικότητα:** Τα συστήματα ρομποτικής Σμήνους έχουν σχεδιαστεί για να είναι προσαρμόσιμα, που σημαίνει ότι μπορούν να ανταποκρίνονται σε αλλαγές στο περιβάλλον ή στη συμπεριφορά άλλων ρομπότ στο σμήνος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης μηχανισμών ανάδρασης που επιτρέπουν σε μεμονωμένα ρομπότ να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους σε πραγματικό χρόνο.

- **Συμπεριφορά έκτακτης ανάγκης:** Τα συστήματα ρομποτικής σμήνους είναι ικανά να επιδεικνύουν αναδυόμενη συμπεριφορά, πράγμα που σημαίνει ότι πολύπλοκα πρότυπα συμπεριφοράς μπορούν να προκύψουν από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεμονωμένων ρομπότ στο σμήνος. Αυτό επιτρέπει στο σμήνος να ολοκληρώσει εργασίες που θα ήταν αδύνατες για ένα μόνο ρομπότ.

Συνολικά, αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τη ρομποτική σμήνος μια ελκυστική προσέγγιση για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την παρακολούθηση του περιβάλλοντος έως την έρευνα και τη διάσωση. Καθώς το πεδίο συνεχίζει να εξελίσσεται, είναι πιθανό να δούμε ακόμη πιο εξελιγμένα συστήματα ρομποτικής σμήνος που είναι ικανά να εκτελούν ακόμη πιο σύνθετες εργασίες σε ένα ευρύ φάσμα τομέων.

Για να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά η έννοια του φυσικού σμήνους, ένα ρομποτικό σύστημα σμήνος πρέπει να παρουσιάζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που δείχνουν τα φυσικά σμήνη. Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά προτάθηκαν από τον G. Beni ([21])

- **Ample Adaptability.** Ο σκοπός των ρομπότ σμήνους είναι πολύπλευρος. Το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να καταλήξει σε πολλές προσεγγίσεις στα προβλήματα που αντιμετωπίζει μέσω της συλλογικής προσπάθειας από την πλευρά των ρομπότ. Επομένως, *τα ρομπότ θα πρέπει να συνεργάζονται για να βρουν απαντήσεις και οι ρόλοι τους θα πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτοι ώστε να προσαρμόζονται στα προβλήματα που αντιμετωπίζουν. πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκρίνονται ταυτόχρονα σε αλλαγές στο περιβάλλον τους.*

- **Ικανότητα επέκτασης.** Η ικανότητα των συστημάτων να κλιμακώνονται για να εξυπηρετούν χρήστες διαφορετικού αριθμού είναι απαραίτητη. Ακόμα κι αν τα ρομπότ σε ένα σμήνος δεν έχουν όλα το ίδιο μέγεθος, θα πρέπει να μπορούν όλα να συνεργαστούν για να ολοκληρώσουν την αποστολή. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος δεν πρέπει να ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος της ομάδας που το χρησιμοποιεί. Ως εκ τούτου, *τα ρομποτικά συστήματα σμήνους πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτα ώστε να λειτουργούν με ένα ευρύ φάσμα αριθμών μελών.* Όταν το σμήνος είναι μικροσκοπικό, το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί ομαλά. Όταν το σμήνος είναι τεράστιο, θα πρέπει να διευκολύνει την επικοινωνία και τη συνεργασία μεταξύ των μελών του.
- **Σταθερότητα/ανθεκτικότητα.** Εάν ένα σύστημα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί παρά τις εξωτερικές παρεμβολές ή εσωτερικές δυσλειτουργίες, λέμε ότι είναι στιβαρό. Μερικά παραδείγματα περιβαλλοντικών διαταραχών είναι οι αλλαγές στο περιβάλλον, η εισαγωγή νέων εμποδίων, οι αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες κ.λπ. Είναι πιθανό ορισμένα στοιχεία του συστήματος να δυσλειτουργούν ή να υπολειτουργούν. Τέτοιες συνθήκες απαιτούν την ανθεκτικότητα ενός ρομποτικού συστήματος σμήνους. Τα μεμονωμένα ρομπότ σε ρομποτικά συστήματα σμήνους είναι συνήθως αρκετά βασικά. Εξαιτίας αυτού, τα άτομα δεν είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν οποιαδήποτε ουσιαστική δραστηριότητα ανεξάρτητα. Επομένως, η συνολική απόδοση ενός συστήματος δεν θα πρέπει να επηρεάζεται αρνητικά από την απώλεια λίγων ρομπότ. Όταν οι άνθρωποι φεύγουν, μπορούν να αντικατασταθούν, αλλά η δουλειά πρέπει ακόμα να γίνει αποτελεσματικά.

Πρόσθετα χαρακτηριστικά διακρίνουν τα ρομποτικά συστήματα σμήνους από άλλα, όπως τα συστήματα πολλαπλών παραγόντων και τα συστήματα αισθητήρων, αλλά δεν υπάρχουν απαραίτητα στα ρομποτικά συστήματα σμήνους.

Κατά την ανάπτυξη ρομποτικών συστημάτων σμήνους, αυτά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται ως λίστα ελέγχου. Το πρόβλημα είναι ότι δεν έχουν όλα τα συστήματα ενσωματωμένες αυτές τις δυνατότητες.

Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα.

- **Αυτοοργάνωση.** Τα αυτόνομα ρομπότ είναι αυτά που μπορούν να σκιεφτούν μόνα τους και να ενεργήσουν ανάλογα. Είναι “αυτοδιοικούμενα” και δεν απαιτούν καμία εξωτερική αρχή να τα κατευθύνει. Τα αυτόνομα ρομπότ αυτοοργάνωσης είναι μηχανές που μπορούν να προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες αναδιατάσσοντας τα εσωτερικά τους στοιχεία. Η ρομποτική Σμήνους βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ικανότητα των μελών της να αυτοοργανώνονται. Τα περισσότερα ρομποτικά συστήματα σμήνους έχουν σχεδιαστεί για να συνεργάζονται για να ολοκληρώσουν μια εργασία χωρίς να χρειάζεται ηγέτης ή συντονιστής.
- **Αυτοσυναρμολόγηση.** Χωρίς τη βοήθεια ανθρώπινης ή άλλης συντονιστικής δύναμης, τα ρομπότ μπορούν να αυτοσυναρμολογηθούν σε πολύπλοκα σχέδια και δομές [26].
- **Αυτοδιακόρπιση.** Υπάρχει μια σειρά από προκλήσεις στον έλεγχο τεράστιων σμηνών ρομπότ, καθώς και δυσκολίες στην επίτευξη ευελιξίας, επεκτασιμότητας και ευρωστίας σε κεντρικά συστήματα, γι' αυτό και η ρομποτική σμήνος επιδιώκει να ολοκληρώσει εργασίες με έναν κεντρικό ηγέτη.
- **Χρήση Ιχνών και Στιγματοποίηση.** Ο όρος “Στιγματοποίηση (»stigmergy»)” περιγράφει τη “σιωπηρή” κατανόηση μεταξύ των ρομπότ. Αυτή η μέθοδος επικοινωνίας μιμείται τα ίχνη φερομόνης που δημιουργούνται από τα μυρμήγκια που αναζητούν τροφή για να ειδοποιήσουν άλλα μυρμήγκια για σημαντικές λεπτομέρειες, όπως η τοποθεσία του φαγητού και η καλύτερη διαδρομή για να φτάσετε εκεί.

§1.3.3. Πλεονεκτήματα και Θέματα

Υπάρχουν αναμφίβολα πολλά οφέλη από την ολοκλήρωση εργασιών από σμήνη σε αντίθεση με τις μοναχικές οντότητες. Όπως έχουμε ήδη συζητήσει, τα ρομποτικά συστήματα σμηνών εμπνέονται από φυσικά σμήνη όπως μυρμήγκια, πουλιά και ψάρια, τα οποία έχουν ποικίλες απόψεις και στόχους για συνεργασία σε σμήνη και όχι μόνο τους. Παρόμοια με αυτό, η ομαδοποίηση των ρομπότ σε ρομποτικά συστήματα σμήνους επιτρέπει την επίτευξη μιας ποικιλίας στόχων και εργασιών. Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους έχουν διάφορα πλεονεκτήματα, μερικά από τα οποία παρατίθενται παρακάτω ([1]):

- Τα αυτόνομα ρομπότ είναι σε θέση να προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Τα ρομπότ μπορούν να συνδυάσουν τις δυνάμεις και τα ταλέντα τους για να δημιουργήσουν περίπλοκα κτίρια και να παρέχουν έναν απεριόριστο αριθμό χαρακτηριστικών. Τα συστήματα είναι επεκτάσιμα, πράγμα που σημαίνει ότι όλα τα ρομπότ μπορούν να καταφέρουν να πετύχουν τους στόχους τους ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλο ή μικρό είναι το σμήνος. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να απασχοληθούν σε πολλούς τομείς και για ποικίλες δραστηριότητες.
- Ο παραλληλισμός επιταχύνει τη λειτουργία του συστήματος. Τα ρομπότ είναι σχετικά απλά σχεδιασμένα, γεγονός που τα καθιστά οικονομικά αποδοτικά. Ο παραλληλισμός σημαίνει ότι οι εργασίες μπορούν να χωριστούν σε δευτερεύουσες εργασίες και να ανατεθούν σε ξεχωριστά ρομπότ. Τα ρομποτικά συστήματα Σμήνους έχουν κάποιες προκλήσεις όπως κάθε άλλη εφαρμογή ή σύστημα. Τα ρομποτικά συστήματα Σμήνους έχουν πολλά οφέλη, όπως επεκτασιμότητα, ανθεκτικότητα, σταθερότητα, χαμηλό κόστος κ.λπ., αλλά έχουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα. Οι εφαρμογές του πραγματικού κόσμου είναι αυτό που έχει σχεδιαστεί κυρίως να κάνει ένα τέτοιο σύστημα. Τα ρομποτικά συστήματα Σμήνους διαθέτουν χιλιάδες πλατφόρμες

προσομοίωσης και πειραμάτων, αλλά η μετατροπή αυτών των πλατφορμών σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου δεν είναι πάντα απλή ή απλή. Ακολουθεί μια λίστα με μερικές από τις προκλήσεις που πρέπει να ξεπεράσουν τα ρομποτικά συστήματα σμήνος ([14]): Γιατί τα ρομποτικά συστήματα σμήνους είναι λιγότερο από ιδανικά για πολλές εφαρμογές λόγω του αποκεντρωμένου χαρακτήρα τους.

- Ως αποτέλεσμα της αυτονομίας τους, τα παιδιά θα ανταποκρίνονται στις αλλαγές στο περιβάλλον τους σε ατομική βάση και χωρίς προτροπή. Ακόμη και όταν μια ομάδα ρομπότ συνεργάζεται για να ολοκληρώσει μια εργασία, η αποκέντρωση μπορεί να προκαλέσει κάποια από τα άτομα να συμπεριφέρονται διαφορετικά από την υπόλοιπη ομάδα. Γιατί Αποτελεί πρόκληση η ανάπτυξη συστημάτων για εφαρμογές πραγματικού κόσμου με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνουν στόχους με 100% βεβαιότητα λόγω του απλού σχεδιασμού και υλοποίησης των ρομπότ.
- Η παροχή παγκόσμιας γνώσης στα ρομπότ είναι απαραίτητη για πολλές πρακτικές εφαρμογές.

§1.3.4. Περιοχές εργασιών και Εργασίες για Ρομποτικά Συστήματα Σμήνους

Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους τομείς εργασιών που απαιτούν συλλογική συμπεριφορά και κατανεμημένη νοημοσύνη. Μερικές από τις περιοχές εργασιών όπου μπορεί να εφαρμοστεί η ρομποτική σμήνος είναι:

Έρευνα και διάσωση: Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναζήτηση θυμάτων σε περιοχές που επλήγησαν από την καταστροφή. Τα ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για να καλύψουν μια μεγάλη περιοχή και να εντοπίσουν τους επιζώντες.

Γεωργία: Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη γεωργία για την παρακολούθηση των καλλιεργειών, τον ψεκασμό φυτοφαρμάκων και τη συγκομιδή φρούτων και λαχανικών. Τα ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για να καλύψουν μια μεγάλη περιοχή και να εκτελέσουν αυτές τις εργασίες πιο αποτελεσματικά.

Κατασκευές: Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή για τη συναρμολόγηση δομικών στοιχείων, τη μεταφορά υλικών και την εκτέλεση άλλων εργασιών. Τα ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για να κατασκευάσουν δομές πιο γρήγορα και πιο αποτελεσματικά.

Επιτήρηση: Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς επιτήρησης και ασφάλειας. Τα ρομπότ μπορούν να περιπολούν μια περιοχή, να εντοπίσουν εισβολείς και να ειδοποιήσουν τις αρχές.

Περιβαλλοντική Παρακολούθηση: Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, όπως η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού, της ποιότητας του αέρα και της άγριας ζωής. Τα ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για να συλλέξουν δεδομένα και να τα μεταδώσουν σε μια κεντρική τοποθεσία.

Περαιτέρω, μερικές από τις συγκεκριμένες εργασίες που μπορούν να εκτελέσουν τα ρομποτικά συστήματα σμήνους είναι:

Έλεγχος σχηματισμού: Τα ρομπότ μπορούν να διατηρήσουν έναν συγκεκριμένο σχηματισμό καθώς κινούνται μαζί για να εκτελέσουν μια εργασία.

Ανίχνευση και παρακολούθηση αντικειμένων: Τα ρομπότ μπορούν να ανιχνεύουν και να παρακολουθούν αντικείμενα ή ανθρώπους στο περιβάλλον.

Εντοπισμός στόχου: Τα ρομπότ μπορούν να εντοπίσουν έναν συγκεκριμένο στόχο στο περιβάλλον.

Κατανομή εργασιών: Τα ρομπότ μπορούν να αναθέσουν εργασίες στον εαυτό τους με βάση τις δυνατότητές τους και τους διαθέσιμους πόρους τους.

Σχηματισμός Μοτίβου: Τα ρομπότ μπορούν να δημιουργήσουν ένα συγκεκριμένο μοτίβο ή σχήμα χρησιμοποιώντας τη συλλογική τους συμπεριφορά.

Κάλυψη περιοχής: Τα ρομπότ μπορούν να καλύψουν μια μεγάλη περιοχή για να εκτελέσουν μια εργασία, όπως η αναζήτηση για θύματα σε μια περιοχή που επλήγη από καταστροφή.

Εξερεύνηση: Τα ρομπότ μπορούν να εξερευνήσουν άγνωστα περιβάλλοντα και να χαρτογραφήσουν την περιοχή.

Το Σμήνος ρομπότ έχει ένα ευρύ φάσμα χρήσεων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια ποικιλία θέσεων εργασίας, όταν η επίτευξη στόχων από ανθρώπους μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολη ή ακόμα και αδύνατη. Πολυάριθμες βιβλιογραφικές αξιολογήσεις ([27], [28] και [29]) απαριθμούν τους τύπους εργασιών που μπορεί να εκτελέσει η ρομποτική σμήνους.

Οι κύριες περιοχές όπου υπάρχουν ρομποτικά συστήματα σμήνους και μπορούν να εκτελέσουν εργασίες παρατίθενται παρακάτω ([22]).

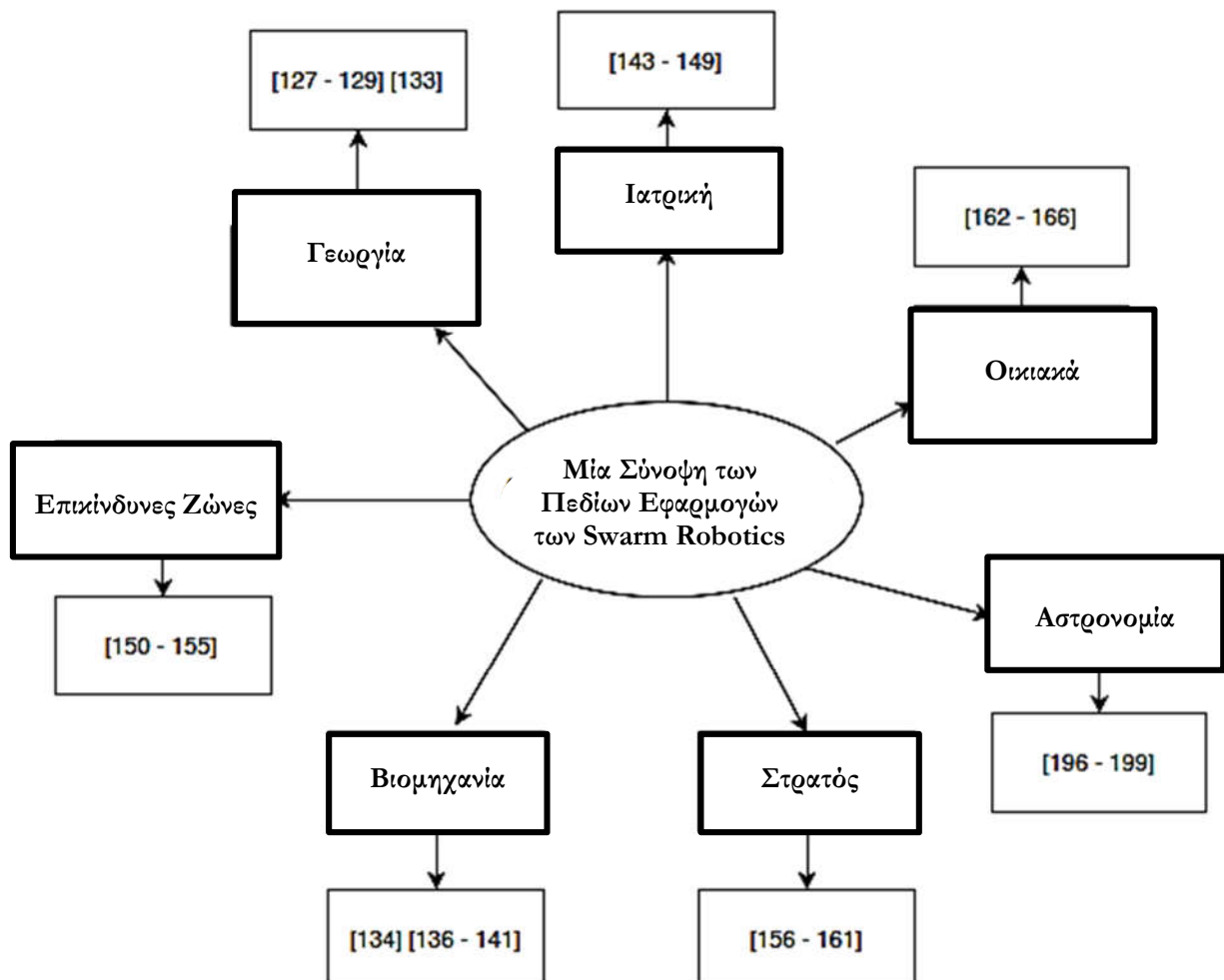
- **Εργασίες σε συγκεκριμένους τομείς.** Η ρομποτική σμήνους έχει πολλές χρήσεις που είναι εξαιρετικά συμφέρουσες. Σμήνη ρομπότ συνεργάζονται για να ολοκληρώσουν εργασίες στη συγκεκριμένη περιοχή και εμφανίζονται κυρίως σε τεράστιες περιοχές. Για παράδειγμα, η αφαίρεση σκουπιδιών από μια πόλη.
- **Εργασία σε επικίνδυνες περιοχές.** Δεν είναι δυνατό, ή ακριβέστερα, δεν είναι ασφαλές για τους ανθρώπους να εκτελούν μια εργασία σε επικίνδυνες περιοχές. Σε αυτές τις επικίνδυνες περιοχές, είναι χρήσιμο να στέλνουμε σμήνη ρομπότ. Μερικά

παραδείγματα περιλαμβάνουν την αναζήτηση πεδίων κινδύνου για επικίνδυνα πράγματα ή την κατάσβεση πυρκαγιάς σε μια κατασκευή.

- **Εργασίες που μπορούν να κλιμακωθούν προς τα πάνω ή προς τα κάτω.** Η ρομποτική σμήνους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση εργασιών που μπορούν να αυξηθούν ή να μειωθούν ανάλογα με την κατάσταση. Εάν μια εργασία κλιμακωθεί για κάποιο λόγο, ο αριθμός των μελών του σμήνους ρομπότ μπορεί να αυξηθεί και εάν μια εργασία μειωθεί, ο αριθμός των μελών μπορεί να μειωθεί ανάλογα. Οι φυσικές καταστροφές, για παράδειγμα, μπορούν να επιδεινωθούν πολύ γρήγορα.
- **Εργασία που απαιτεί πλεονασμό.** Η ρομποτική σμήνους χαρακτηρίζεται από πλεονασμό, η οποία προκύπτει από την ευρωστία που επιδεικνύουν τα ρομποτικά συστήματα σμήνους. Αυτό δείχνει ότι τα ρομπότ είναι ικανά να χειριστούν την αποτυχία μελών της ομάδας. Το γεγονός ότι ορισμένα από αυτά δεν είναι εκεί δεν πρέπει να επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας τους ή την καλή απόδοση τους. Τα ρομποτικά συστήματα Σμήνους μπορούν να κάνουν πολλά διαφορετικά είδη εργασιών στις κατηγορίες που αναφέρονται παραπάνω. Στη συνέχεια παρατίθενται αυτές οι κύριες εργασίες.
- **Δημιουργία μοτίβων και σχημάτων.** Τα ρομπότ μπορεί να συνεργαστούν για να δημιουργήσουν μια ποικιλία μοτίβων και μορφών, συμπεριλαμβανομένων των αστεριών, των αλφαβήτων και άλλων. Τοποθετούνται σε συγκεκριμένες γωνίες και αποστάσεις, γεγονός που προκαλεί την εμφάνιση μοτίβων και σχημάτων. Το Σμήνο-ρομπότ (SWARM-BOT) ([30, 31]) είναι ένα έργο που λειτουργεί με τις συνδέσεις και τις αλληλεπιδράσεις αυτόνομων ρομπότ με διάφορους τύπους δομών. Η δημιουργία σχημάτων βοήθειας που μπορούν να δουν τα αεροσκάφη διάσωσης είναι μια πρακτική εφαρμογή. Οι εργασίες [32], [33] αποτελούν μερικές έρευνες σχετικά με το σχηματισμό προτύπων.

- **Συνδυασμός.** Η ομαδοποίηση των ρομπότ μαζί σε μια περιοχή ονομάζεται "συσσώρευση". Το Aggregation στοχεύει να οργανώσει ένα σμήνος ρομπότ και να τους δώσει τη δυνατότητα να κάνουν εργασίες σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Τα ρομπότ μπορούν να αλληλεπιδρούν και να κινούνται αρκετά κοντά για να ολοκληρώσουν εργασίες. Τα ρομπότ που συγκεντρώνουν μπορεί να έχουν πρακτικές εφαρμογές, όπως η καλλιέργεια σμηνών. Η έρευνα ρομποτικής σμήνος για εργασίες συνάθροισης μπορεί να βρεθεί στις εργασίες [34], [35] και [36].
- **Συγχρονισμένες κινήσεις.** Τα ρομπότ κινούνται αρμονικά όταν οι κινήσεις τους είναι συγχρονισμένες. Αυτό σημαίνει ότι κινούνται διατηρώντας ένα συγκεκριμένο σχήμα. Τα κοπάδια ψαριών, ένα είδος φυσικού σμήνους, είναι μια συχνή απεικόνιση. Πολλά προβλήματα, συμπεριλαμβανομένης της αποφυγής εμποδίων ή της υπέρβασης δυσκολιών, μπορούν να λυθούν με τέτοιες κινήσεις. Μια τέτοια συμπεριφορά καθιστά απλή και επιτυχημένη τη μεταφορά βαρέων εμπορευμάτων. Μεταξύ των ερευνών προς αυτή την κατεύθυνση περιλαμβάνονται ([37], [38]).
- **Η τοποθέτηση ρομπότ για την κάλυψη μιας περιοχής.** Το αντίθετο από τη συγκέντρωση ρομπότ είναι η διασπορά ρομπότ. Τα ρομπότ είναι διασκορπισμένα σε αυτόν τον βιότοπο για να παρακολουθούν το περιβάλλον τους. Με αυτόν τον τρόπο, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος μπορεί να γίνει πιο γρήγορα. Ένας αλγόριθμος για κοινοτική εξερεύνηση εισάγεται στην εργασία [39]. Οι βιολογικοί αλγόριθμοι είναι η πηγή της έννοιας.
- **Εντοπισμός συγκεκριμένων πηγών.** Μία από τις κύριες λειτουργίες των ρομποτικών συστημάτων σμήνους είναι η αναζήτηση αντικειμένων. Αυτή η ιδέα επηρεάστηκε επίσης από σμήνη μυρμηγκιών και άλλων φυσικών εντόμων που αναζητούν τροφή μαζί. Η εύρεση μεθόδων που όχι μόνο θα σας βοηθήσουν να βρείτε τα αντικείμενα, αλλά και να το κάνετε πιο γρήγορα, είναι το θέμα που αντιμετωπίζετε. Για την εύρεση πηγών τροφής, η εργασία [40] προσφέρει ένα πιθανό μοντέλο για ρομποτικά σμήνη.

- **Σάρωση περιοχής και πλοήγηση.** Τα ρομπότ έχουν τη δυνατότητα να σαρώνουν το περιβάλλον τους και να πλοηγούνται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες-στόχους. Η αναζήτηση ανθρώπων σε μια ζώνη πυρκαγιάς μπορεί να χρησιμεύσει ως πρακτική απεικόνιση. Τα ρομπότ έχουν τη δυνατότητα να σαρώνουν την περιοχή της φωτιάς και να βρίσκουν τους στόχους τους. Ορισμένες μελέτες περιλαμβάνουν ([41], [42]).
- **Μεταφορά αντικειμένου.** Εάν ένα αντικείμενο δεν μπορεί να μεταφερθεί από ένα μόνο ρομπότ, τα ρομπότ συνεργάζονται για να το μεταφέρουν. Η εργασία [43] επικεντρώνεται στην προσομοίωση ενός ρομποτικού συστήματος σμήνους, στο οποίο τα ρομπότ μετακινούν αποτελεσματικά αγαθά συνεργαζόμενοι μεταξύ τους.



Σχήμα 7. Σύνοψη των τομέων εφαρμογής της θεωρίας των ρομποτικών σμήνων (εντός των αγκυλών αναγράφονται οι σχετικές βιβλιογραφικές παραπομπές)

§1.3.5. Πεδία Εφαρμογής

Η ρομποτική Σμήνου είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας που έχει πιθανές εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Μερικά από τα πιο πολλά υποσχόμενα πεδία εφαρμογής της ρομποτικής σμήνου είναι:

Γεωργία: Η ρομποτική σμήνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γεωργία ακριβείας, παρακολούθηση καλλιιεργειών και συγκομιδή. Τα ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις και να συλλέξουν δεδομένα για τις καλλιέργειες, το έδαφος και τις καιρικές συνθήκες.

Έρευνα και διάσωση: Η ρομποτική σμήνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης σε περιοχές καταστροφών, όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι έρευνας και διάσωσης μπορεί να είναι δύσκολες ή αδύνατες. Τα ρομπότ μπορούν να πλοηγηθούν μέσα από συντρίμια και ερείπια για να εντοπίσουν τους επιζώντες.

Επιτήρηση και ασφάλεια: Η ρομποτική σμήνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς επιτήρησης και ασφάλειας σε δημόσιους χώρους ή βιομηχανικούς χώρους. Τα ρομπότ μπορούν να παρακολουθούν την περιοχή για ύποπτη δραστηριότητα και να ειδοποιούν το προσωπικό ασφαλείας.

Εξερεύνηση: Η ρομποτική σμήνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξερεύνηση άγνωστων περιβαλλόντων, όπως σπηλιές, ωκεανούς ή διάστημα. Τα ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για να χαρτογραφήσουν και να συλλέξουν δεδομένα για το περιβάλλον.

Κατασκευή: Η ρομποτική σμήνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γραμμές παραγωγής και συναρμολόγησης, όπου πολλά ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για να εκτελέσουν περίπλοκες εργασίες, όπως συγκόλληση, βαφή ή επιθεώρηση.

Ιατρικές Εφαρμογές: Η ρομποτική Σμήνους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ιατρικές εφαρμογές, όπως η στοχευμένη χορήγηση φαρμάκων ή η ελάχιστα επεμβατική χειρουργική. Τα ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για να μεταφέρουν φάρμακα σε συγκεκριμένες περιοχές του σώματος ή να εκτελούν χειρουργικές επεμβάσεις με ακρίβεια.

Logistics και Διανομή: Η ρομποτική Σμήνους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές logistics και παράδοσης, όπως παράδοση δεμάτων και αυτοματισμός αποθήκης. Τα ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για να μεταφέρουν πακέτα και να μεταφέρουν αποθέματα.

Εκπαίδευση και Έρευνα: Η ρομποτική Σμήνους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, παρέχοντας μια πλατφόρμα για την εξερεύνηση της συμπεριφοράς και της δυναμικής μεγάλων ομάδων ρομπότ.

Συνολικά, οι πιθανές εφαρμογές της ρομποτικής σμήνους είναι τεράστιες και ποικίλες, καθιστώντας το ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο με σημαντικές δυνατότητες ανάπτυξης.

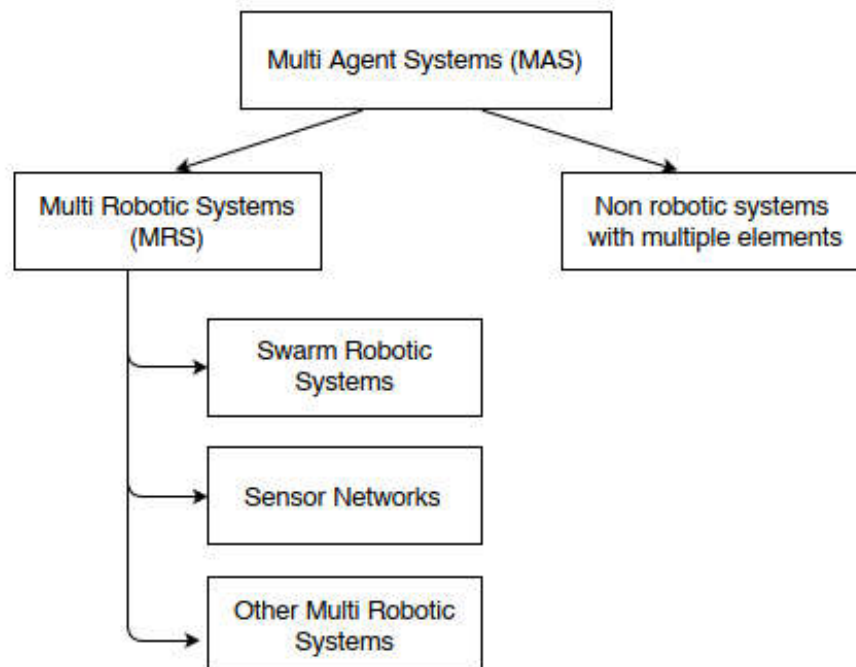
Τα ρομπότ σμήνους χρησιμοποιούνται σε ποικίλα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων βιομηχανικών πλαισίων, αστρονομικών ζωνών κινδύνου και ιατρικών και γεωργικών πλαισίων. Η παρακάτω λίστα περιλαμβάνει μερικά από τα βασικά πεδία εφαρμογής. Τα ρομποτικά συστήματα σμηνών χρησιμοποιούνται ήδη σε ορισμένους τομείς, αλλά βρίσκονται ακόμη σε στάδια έρευνας και ανάπτυξης σε άλλα.. Μια λίστα πεδίων εφαρμογών ρομποτικής σμήνους φαίνεται στο Σχήμα 7.

Τα σμήνη ρομπότ χρησιμοποιούνται στη γεωργία για να φέρουν επανάσταση στη γεωργία και να μειώσουν τον φόρτο εργασίας των αγροτών ([127–129], [133]). Τα ρομπότ μπορούν να ολοκληρώσουν αβίαστα όλες τις γεωργικές εργασίες, συμπεριλαμβανομένης της συγκομιδής, της σποράς σπόρων και άλλων σχετικών εργασιών.

- Η ρομποτική σμήνους χρησιμοποιείται επίσης σε βιομηχανικούς τομείς για μια ποικιλία εργασιών, όπως ο χειρισμός χημικών ([134] [136 - 141]). Σε αυτήν την περίπτωση, τα ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση των ανθρώπων για να ελαχιστοποιήσουν τον τραυματισμό ή τη ζημιά στους εργαζόμενους.
- Τα ρομποτικά αμυντικά συστήματα σμηνών έχουν πολλές πιθανές εφαρμογές στον στρατό ([156–161]). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για παράδειγμα, για την εύρεση και την εξουδετέρωση βομβών. Ως αποτέλεσμα, δεν θα υπήρχε ανάγκη για διαχύτες ανθρώπινης βόμβας. Είναι επίσης δυνατή η κατασκευή ενός στρατού ρομπότ για την εκτέλεση στρατιωτικών καθηκόντων.
- Οι εφαρμογές ρομπότ Health Swarm στον ιατρικό τομέα γίνονται όλο και πιο ενδιαφέρουσες και ελκυστικές. Για την εύρεση και τη θεραπεία διαταραχών όπως τα καρκινικά κύτταρα, τα νανορομπότ μπορούν να εισέλθουν στις φλέβες και τις αρτηρίες.
- Η ρομποτική Science Swarm μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη στον τομέα της αστρονομίας, παρά το γεγονός ότι αυτή η έρευνα δεν είναι καλά αναγνωρισμένη ([196–199]). Τα ρομπότ, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό των επιπτώσεων της σκοτεινής ενέργειας ([44]).
- Επικίνδυνες περιοχές Τα ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρακολουθούν ορισμένα αγαθά, όπως δηλητήρια και ρύπους, ή επιζώντες μετά από φυσική καταστροφή ([150–155]). Τα ρομπότ μπορούν επίσης να μεταφέρουν επικίνδυνα υλικά και μπορούν να εκτελούν εργασίες εξόρυξης χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Τα ρομπότ είναι τα πλέον κατάλληλα για να εκτελούν αυτά τα καθήκοντα, έτσι ώστε οι εργαζόμενοι να μην κινδυνεύουν.
- Οι εργασίες οικιακού καθαρισμού μπορούν να εκτελούνται συνεχώς από σμήνη μικρών, απλών ρομπότ ([162–166]). Πολλά συστήματα χρησιμοποιούνται ήδη.

§1.3.6. Ρομποτικά Συστήματα Σμήνους και άλλα Ρομποτικά Συστήματα

Το Σμήνος ρομπότ «Swarm robotics» είναι μόνο ένα από τα πολλά συστήματα που ασχολούνται με πολλά ρομπότ, είτε είναι φυσικά είτε εικονικά. Αλλά αυτά τα συστήματα και τα ρομποτικά συστήματα σμήνους διαφέρουν κατά πολλούς τρόπους. Η δομή του ρομποτικού συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 8 ([45]). Τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων (MAS), τα οποία ταξινομούνται περαιτέρω σε συστήματα με ρομπότ και συστήματα χωρίς, είναι η κύρια κατηγορία όπως μπορείτε να δείτε.



Σχήμα 8. Τοπολογία ρομποτικού συστήματος ([45])

Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους ανήκουν στην κατηγορία των πολυρομποτικών συστημάτων. Στην παρούσα Ενότητα συγκρίνεται η ρομποτική σμήνους με άλλα παρόμοια συστήματα και παρέχει μια σύντομη επισκόπηση καθενός προκειμένου να καταστεί σαφής η διάκριση της ρομποτικής σμήνους από άλλα συστήματα.

Η σύγκριση και οι παραλλαγές μεταξύ των συστημάτων περιγράφονται παρακάτω. Πολλαπλοί πράκτορες λογισμικού που είναι ανεξάρτητοι, προσαρμόσιμοι και αλληλεπιδρούν σε μια ρύθμιση για την εκτέλεση εργασιών συνθέτουν ένα **σύστημα πολλαπλών πρακτόρων (MAS)**.

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί του πράκτορα στη βιβλιογραφία. Ένα υπολογιστικό σύστημα είναι ένας πράκτορας σύμφωνα με την εργασία [46] εάν μπορεί να ανιχνεύσει και να ενεργήσει αυτόνομα σε ένα σύνθετο, δυναμικό περιβάλλον, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει ένα σύνολο στόχων ή εργασιών για τις οποίες δημιουργήθηκε. Αυτοί οι πράκτορες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός δικτύου για την ανταλλαγή πληροφοριών. Με άλλα λόγια, αναφέρεται σε ένα σύστημα του οποίου τα στοιχεία υλικού ή λογισμικού είναι διασκορπισμένα μεταξύ δικτυωμένων υπολογιστών και που συντονίζουν τις λειτουργίες τους και επικοινωνούν μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων ([47]).

Το χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει τα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων από άλλα ρομποτικά συστήματα είναι η ανταλλαγή πληροφοριών μέσω ενός δικτύου. Οι πράκτορες μπορεί είτε να συνεργάζονται για την επίτευξη ενός στόχου είτε να έχουν ο καθένας τους δικούς του στόχους. Η ικανότητα των πρακτόρων να επικοινωνούν μεταξύ τους είναι χαρακτηριστικό του MAS.

Τα **πολυ-ρομποτικά συστήματα (MRS)** είναι μια ομάδα ρομπότ που συνεργάζονται για να ολοκληρώσουν μια ενιαία εργασία. Όταν ένα ρομπότ δεν μπορεί να ολοκληρώσει την εργασία, πολλά ρομπότ μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ολοκλήρωση της αποστολής ([48]). Επομένως, εάν ένα μόνο ρομπότ δεν μπορεί να ολοκληρώσει μια συγκεκριμένη εργασία, η χρήση πολλών ρομπότ είναι απαραίτητη. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να είναι δύσκολο ή αδύνατο για ένα μόνο ρομπότ να μετακινήσει ένα βαρύ αντικείμενο. Ένα σύνολο από απλά σχεδιασμένα ρομπότ αντί για ένα μόνο περίπλοκο ρομπότ είναι προτιμότερο ή η καλύτερη επιλογή για ορισμένες συγκεκριμένες εργασίες.

Ο Πίνακας Ι (βλέπε σελίδα 35, παρακάτω) δείχνει πώς το MRS διαφέρει από τη ρομποτική σμήνους. Τα ετερογενή πολυρομποτικά συστήματα είναι ο κανόνας. Αυτό σημαίνει ότι τα ρομπότ είναι ικανά για διάφορα πράγματα. Στο MRS, ο πληθυσμός είναι πολύ μικρός σε σύγκριση με τα ρομποτικά συστήματα σμήνους και συχνά ελέγχεται από ένα μόνο άτομο, καθιστώντας το σύστημα συγκεντρωμένο. Το υπεύθυνο ρομπότ έχει περισσότερες δεξιότητες από τα άλλα. Αυτό μπορεί να αυξήσει το κόστος, μειώνοντας τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας του συστήματος.

Τα ρομπότ στο MRS είναι κινητά όπως αυτά της ρομποτικής σμήνος, αλλά σε αντίθεση με τη ρομποτική σμήνος, είναι γενικά συνηθισμένα στο περιβάλλον τους. Τα ρομποτικά συστήματα Σμήνους είναι πολύ πιο ευέλικτα, επεκτάσιμα και στιβαρά από το MRS όσον αφορά αυτούς τους τρεις παράγοντες. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ρομποτικά συστήματα σμήνος έχουν τεράστιους πληθυσμούς, οι οποίοι μειώνουν την πιθανότητα κακής απόδοσης σε περίπτωση βλάβης του ρομπότ. Τα ρομπότ μπορούν να συνεργάζονται και να συντονίζονται ακόμη και όταν βρίσκονται σε τεράστια σμήνη, και τέτοια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλές εργασίες.

Ένα κατανεμημένο δίκτυο αισθητήρων, σύμφωνα με την εργασία [49], αποτελείται από εκατοντάδες έως χιλιάδες κόμβους αισθητήρων διασκορπισμένους σε ένα πεδίο εφαρμογής. Οι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν αισθητήρες για να παρακολουθούν το περιβάλλον τους και επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους. Κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με άλλα μέλη και να συμμετέχει ενεργά στην παρακολούθηση. Επομένως, οι κόμβοι δεν περιορίζονται στην ενασχόληση με μία μόνο δραστηριότητα.

Ένας μεγάλος αριθμός αισθητήρων είναι εγκατεστημένος σε ένα περιβάλλον και εργάζονται από κοινού για να παράγουν δεδομένα σε αυτό το περιβάλλον. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, την τοπική πυκνότητα αέρα.

Οι μέθοδοι ασύρματης επικοινωνίας περιλαμβάνουν ραδιοκύματα, υπέρυθρα κύματα και οπτικά μέσα ([50]). Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από κάθε αισθητήρα μεταδίδονται σε ένα σταθμό βάσης που ονομάζεται *καταβόθρα*. Ένας διαχειριστής εργασιών είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των δεδομένων και ο διαχειριστής εργασιών και ο νεροχύτης επικοινωνούν μέσω διαδικτύου ή δορυφόρου.

Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους (Swarm) διαφέρουν από άλλα ρομποτικά συστήματα με διάφορους τρόπους:

- **Αριθμός ρομπότ:** Τα ρομποτικά συστήματα σμήνους αποτελούνται συνήθως από πολλά απλά ρομπότ που συνεργάζονται, ενώ άλλα ρομποτικά συστήματα μπορεί να αποτελούνται από ένα ή μερικά πιο πολύπλοκα ρομπότ.
- **Κατανομή εργασιών:** Στη ρομποτική σμήνους, οι εργασίες κατανέμονται μεταξύ των ρομπότ, με κάθε ρομπότ να εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία για την επίτευξη ενός κοινού στόχου. Σε άλλα ρομποτικά συστήματα, οι εργασίες συχνά ανατίθενται σε ένα μόνο ρομπότ που εκτελεί όλες τις απαιτούμενες ενέργειες.
- **Επικοινωνία και συντονισμός:** Η επικοινωνία και ο συντονισμός είναι ζωτικής σημασίας στη ρομποτική σμήνους, καθώς τα ρομπότ πρέπει να συνεργάζονται και να συντονίζουν τις ενέργειές τους για να επιτύχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σε άλλα ρομποτικά συστήματα, η επικοινωνία και ο συντονισμός μπορεί να είναι λιγότερο σημαντικά, καθώς τα ρομπότ είναι συχνά σχεδιασμένα να εκτελούν συγκεκριμένες εργασίες αυτόνομα.
- **Συμπεριφορά έκτακτης ανάγκης:** Η συμπεριφορά έκτακτης ανάγκης είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό της ρομποτικής σμήνους. Η συμπεριφορά του σμήνους στο σύνολό του προκύπτει από τις μεμονωμένες συμπεριφορές κάθε ρομπότ, καθιστώντας δύσκολη την πρόβλεψη του αποτελέσματος. Άλλα ρομποτικά συστήματα μπορεί να είναι πιο προβλέψιμα, καθώς η συμπεριφορά του ρομπότ είναι συχνά προ-προγραμματισμένη.

- **Επεκτασιμότητα:** Τα ρομποτικά συστήματα Σμήνους είναι εξαιρετικά επεκτάσιμα, καθώς μπορούν να προστεθούν περισσότερα ρομπότ στο σμήνος για να επιτευχθεί ένας μεγαλύτερος στόχος. Άλλα ρομποτικά συστήματα μπορεί να είναι λιγότερο επεκτάσιμα, καθώς ο αριθμός των ρομπότ συχνά περιορίζεται από το σχεδιασμό και τη λειτουργικότητά τους.
- **Κόστος:** Τα ρομποτικά συστήματα Σμήνους είναι συχνά λιγότερο ακριβά από άλλα ρομποτικά συστήματα, καθώς χρησιμοποιούν απλά, χαμηλού κόστους ρομπότ που μπορούν να εκτελέσουν περίπλοκες εργασίες όταν συνεργάζονται. Άλλα ρομποτικά συστήματα μπορεί να είναι πιο ακριβά, καθώς συχνά απαιτούν πιο περίπλοκα και εξελιγμένα ρομπότ.

Συνοπτικά, τα ρομποτικά συστήματα σμήνους είναι μοναδικά στην προσέγγισή τους στην κατανομή εργασιών, την επικοινωνία και τον συντονισμό και την αναδυόμενη συμπεριφορά. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα καθιστούν κατάλληλα για ορισμένες εφαρμογές, όπως η γεωργία, η έρευνα και διάσωση και η εξερεύνηση, όπου ένας μεγάλος αριθμός απλών ρομπότ μπορούν να συνεργαστούν για την επίτευξη ενός κοινού στόχου. Άλλα ρομποτικά συστήματα, όπως τα βιομηχανικά ρομπότ ή τα ιατρικά ρομπότ, ενδέχεται να απαιτούν διαφορετική προσέγγιση, ανάλογα με την εργασία και το περιβάλλον.

§1.3.7. Ταξινόμηση Ρομποτική Σμήνους

Η ρομποτική σμήνους μπορεί να ταξινομηθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται. Ακολουθούν ορισμένες κοινές ταξινομήσεις της ρομποτικής σμήνους:

- **Μέγεθος σμήνους:** Η ρομποτική σμήνους μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τον αριθμό των ρομπότ στο σμήνος, που κυμαίνεται από λίγα ρομπότ έως χιλιάδες ή και εκατομμύρια ρομπότ.

- **Έλεγχος:** Η ρομποτική σμήνους μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τον μηχανισμό ελέγχου που χρησιμοποιείται, όπως ο κεντρικός έλεγχος, ο αποκεντρωμένος έλεγχος ή η αυτοοργάνωση.
- **Εργασία:** Η ρομποτική σμήνους μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τον τύπο της εργασίας που εκτελεί το σμήνος, όπως η εξερεύνηση, η έρευνα και διάσωση, η γεωργία ή η επιμελητεία.
- **Περιβάλλον:** Η ρομποτική σμήνους μπορεί να ταξινομηθεί με βάση το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί το σμήνος, όπως σε εσωτερικό, εξωτερικό, υποβρύχιο ή διαστημικό.
- **Τύπος ρομπότ:** Η ρομποτική σμήνους μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τον τύπο του ρομπότ που χρησιμοποιείται στο σμήνος, όπως τροχοφόρα ρομπότ, ιπτάμενα ρομπότ, ρομπότ κολύμβησης ή ρομπότ ερπυσμού.
- **Επικοινωνία:** Η ρομποτική σμήνους μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τον μηχανισμό επικοινωνίας που χρησιμοποιούν τα ρομπότ στο σμήνος, όπως η άμεση επικοινωνία, η έμμεση επικοινωνία ή η στιγματοποίηση .
- **Εμφάνιση:** Η ρομποτική σμήνους μπορεί να ταξινομηθεί με βάση το επίπεδο ανάδυσης στη συμπεριφορά του σμήνους, που κυμαίνεται από την ανάδυση χαμηλού επιπέδου έως την ανάδυση υψηλού επιπέδου.

Συνολικά, η ρομποτική σμήνους είναι ένα ποικίλο και ταχέως αναπτυσσόμενο πεδίο, με πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις και εφαρμογές. Με την ταξινόμηση της ρομποτικής σμήνους με αυτούς τους διάφορους τρόπους, οι ερευνητές μπορούν να κατανοήσουν καλύτερα τα δυνατά σημεία και τους περιορισμούς των διαφορετικών προσεγγίσεων και να αναπτύξουν πιο αποτελεσματικές λύσεις για προβλήματα του πραγματικού κόσμου.

Η ρομποτική Σμήνους μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία βιομηχανιών. Σμήνη ρομπότ εκτελούν διάφορες εργασίες, από μικρές έως μεγάλες. Αυτό σημαίνει ότι η ανάθεση θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη μετακίνηση ενός μόνο σωματιδίου μεταξύ δύο τοποθεσιών ή τη μετακίνηση ογκωδών δομικών στοιχείων. Όλες οι εργασίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε διάφορα ρομποτικά χαρακτηριστικά σμήνους, όπως σμήνη που κάνουν κρίσεις με βάση την κατάσταση ή σύμφωνα με προπρογραμματισμένα κριτήρια, εάν η εργασία απαιτεί συλλογική μεταφορά ή συλλογική εξερεύνηση κ.λπ.

Σε αυτή την ενότητα, καλύπτονται όλες αυτές οι πιθανές κατηγορίες συλλογικών συμπεριφορών. Απαιτείται επίσης αποτελεσματική μοντελοποίηση και ανάλυση για αυτές τις συμπεριφορές και ομάδες. Δύο διαφορετικοί τύποι διαδικασιών - οι μέθοδοι σχεδιασμού και οι μέθοδοι ανάλυσης - προσφέρονται για να επιτευχθεί αυτό ([51]).

Η ανάλυση είναι η σε βάθος, μεθοδική μελέτη και εξέταση των μερών, της δομής και της οργάνωσης ενός συστήματος. Η ανάλυση ενός συστήματος είναι, στην πραγματικότητα, ένα κρίσιμο βήμα πριν το χρησιμοποιήσετε στην πραγματική ζωή.

Η λήψη αποφάσεων σχετικά με το σύστημα υποβοηθάται από αυτό. Για παράδειγμα, ποιο στοιχείο πρέπει να βελτιωθεί, να εξαλειφθεί ή πιθανώς να εισαχθεί και ποιες δυνατότητες εξακολουθούν να χρειάζονται κ.λπ. Δεδομένου ότι οι απαντήσεις του ρομπότ είναι συχνά αυθόρμητες, μπορεί να είναι δύσκολο να προβλέψουμε τι θα συμβεί στη συνέχεια. Για παράδειγμα, εάν το περιβάλλον είναι γεμάτο εμπόδια, τα ρομπότ μπορεί να αποφασίσουν να ακολουθήσουν μια διαφορετική διαδρομή ή, εάν τα εμπόδια είναι κατασκευασμένα κατάλληλα και έχουν τις κατάλληλες ιδιότητες, μπορεί ακόμη και να τα πηδήξουν. Μπορεί να υπάρχουν τιμές παραμέτρων που είναι άγνωστες, παρόλο που η γενική συμπεριφορά και τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά είναι γνωστά. Το μοντέλο ταξινόμησης που παρέχεται παρακάτω αντλείται από τις εργασίες [52], [53], [29] και [51]

Μέθοδοι ανάλυσης:

- α) **Μικροσκοπικές Προσεγγίσεις:** Στις μικροσκοπικές προσεγγίσεις η μοντελοποίηση των ρομπότ γίνεται σε μικροσκοπικό επίπεδο, δηλαδή σε ατομικό επίπεδο. Η εμφάνιση, οι δραστηριότητες και οι αλληλεπιδράσεις κάθε ρομπότ με το περιβάλλον του μοντελοποιούνται αναλυτικά. Αυτή η ανάλυση λαμβάνει επίσης υπόψη τον τρόπο με τον οποίο τα ρομπότ αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με το περιβάλλον τους.
- β) **Μακροσκοπικές προσεγγίσεις:** Αντί να μοντελοποιούν τη συμπεριφορά στο επίπεδο ενός μεμονωμένου ρομπότ, οι μακροσκοπικές προσεγγίσεις μοντελοποιούν τη συμπεριφορά στο επίπεδο ενός σμήνους. Ως αποτέλεσμα, για να προσδιοριστεί η κατάσταση του συστήματος, ολόκληρο το σύστημα μελετάται μία φορά αντί να εξετάζεται πρώτα κάθε ρομπότ ξεχωριστά. Αν και είναι σαφές ότι μια τέτοια τεχνική είναι ταχύτερη από τη μικροσκοπική προσέγγιση, μικροσκοπικές πειραματικές αστοχίες δεν μπορούν να ανιχνευθούν και μόνο μια ωμή συνολική εικόνα του συστήματος μπορεί να δημιουργηθεί.
- γ) **Μέθοδοι που βασίζονται σε αισθητήρες:** Παρόμοια με τη μικροσκοπική μοντελοποίηση, οι μέθοδοι που βασίζονται σε αισθητήρες επικεντρώνονται στο άτομο. Οι αισθητήρες είναι το κύριο συστατικό της μοντελοποίησης, όπως υποδηλώνει το όνομα. Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει την αίσθηση, την ενεργοποίηση και την αλληλεπίδραση μεμονωμένων ρομπότ καθώς και εκείνων των ρομπότ με το περιβάλλον τους. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις προορίζονται να είναι απλές και ρεαλιστικές ([52]). Αυτά τα χαρακτηριστικά ξεχωρίζουν αυτή τη στρατηγική από άλλες. Όταν πραγματοποιούνται πειράματα για την επαλήθευση της επεκτασιμότητας του συστήματος, οι αλληλεπιδράσεις πρέπει να είναι απλές επειδή η πολυπλοκότητά τους είναι κρίσιμη. Τα ρομποτικά συστήματα Swarm επωφελούνται επίσης από το ότι είναι ρεαλιστικά.

δ) **Αλγόριθμοι μοντελοποίησης νοημοσύνης Swarm:** Οι αλγόριθμοι νοημοσύνης Swarm είναι χρήσιμοι για μια ποικιλία εργασιών, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου ρομπότ, της έρευνας ρομπότ, της πρόβλεψης της συμπεριφοράς του σμήνους και της μοντελοποίησης της ρομποτικής σμήνους. Παρέχεται μια επισκόπηση των αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους ([54]) που αντλούν την έμπνευσή τους από μυρμήγκια, μέλισσες, πυγολαμπίδες, σκουλήκια λάμψης, νυχτερίδες, πρωτεύοντα θηλαστικά, λιοντάρια και λύκους. Για μοντελοποίηση και ανάλυση, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) χρησιμοποιείται συχνά ([55], [56] και [57]).

ε) **Μέθοδοι για ανάλυση πραγματικών ρομπότ:** Τα πραγματικά ρομπότ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για λόγους μοντελοποίησης και ανάλυσης αντί για προσομοίωση όλων των πραγματικών ρομποτικών καταστάσεων. Τα πραγματικά ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση συλλογικών συμπεριφορών σμήνους, οι οποίες μπορεί να φαίνονται προκλητικές όταν υπάρχουν πολλά ρομπότ και συμπεριφορές, αλλά μπορούμε να επιτύχουμε καλά και ρεαλιστικά ευρήματα. Το πρόβλημα με την ταχύτητα είναι κυρίως πρόβλημα. Τα πραγματικά ρομπότ είναι συνήθως πιο αργά και πιο δύσκολα στη χρήση από τα μοντέλα και τους προσομοιωτές. Αυτός είναι επίσης ο λόγος που η έρευνα για την πραγματική ανάλυση ρομπότ είναι πολύ λιγότερο ανεπτυγμένη από την έρευνα για μοντέλα και προσομοιωτές.

| Robotic Systems | Swarm Robotic Systems | Multi-Robotic systems | Multi-Agent Systems | Sensor Networks |
|---|--|---|---|---|
| Number of members | Large (as compared to other robotic systems) | Small (as compared to swarm robotic systems) | Small (as compared to swarm robotic systems) | Large (as compared to MAS and MRS) |
| Design and implementation of robots | Very simple. Single robots are unable to do anything significant | Single robots can perform significant parts of a task | Single robots are able to perform significant parts of a task | Nodes can be designed simple or complex |
| Self-organisation | Yes | Yes | Yes | Yes |
| System Control (centralized or decentralized) | decentralised | Both | Both | Both |
| Homogeneity or heterogeneity | Mostly homogeneous | Mostly heterogeneous | Both | Homogeneous |
| Autonomy | Yes | No | No | Yes |
| Environment | unstructured (unknown) | structured and unstructured (known and unknown) | structured (known) | structured (known) |
| Movement | Yes | Yes | Mostly not | No |
| Robustness | yes (high) | Yes | Yes | Yes |
| Scalability | yes (high) | Yes (low) | Yes | Yes |
| Flexibility | yes (high) | Yes (low) | Yes | Yes |
| Cost | Low | Medium | Medium | High |

Πίνακας 1. Διαφορές και ομοιότητες σμήνους ρομποτικής με άλλα ρομποτικά συστήματα ([35])

Μέθοδοι σχεδιασμού:

Οι τεχνικές σχεδιασμού περιλαμβάνουν:

α) **Προσεγγίσεις που βασίζονται στη συμπεριφορά.** Η πιο τυπική μέθοδος δημιουργίας συστημάτων ρομποτικής σμήνους είναι οι τεχνικές που βασίζονται στη συμπεριφορά, που συνήθως αναφέρονται ως προσεγγίσεις ad-hoc ([53]).

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη χειροκίνητη εφαρμογή μιας εμπνευσμένης συμπεριφοράς στην αρχή και στη συνέχεια τη βελτίωσή της όπως είναι απαραίτητο για την παραγωγή της απαιτούμενης συμπεριφοράς για κάθε μοναδικό ρομπότ.

Η εργασία [51] διαχώρισε περαιτέρω τις τεχνικές που βασίζονται στη συμπεριφορά σε κατηγορίες σχεδιασμού μηχανών πιθανολογικής πεπερασμένης κατάστασης και σχεδίασης που βασίζεται στην εικονική φυσική. Λόγω της ικανότητάς τους να αλλάζει μεταξύ καταστάσεων, οι μηχανές πεπερασμένης κατάστασης (FSM) χρησιμοποιούνται συχνά στη ρομποτική σμήνος. Αυτή η ικανότητα βοηθά στην ανάπτυξη συμπεριφορών ρομπότ σμήνους που βασίζονται σε αισθητήρες ή εισόδους.

Όταν ένα ρομπότ επιδεικνύει συμπεριφορά βασισμένη στις εισροές, ανταποκρίνεται σε εξωτερικά ερεθίσματα όπως εμπόδια. Οι αλλαγές κατάστασης σε μια πιθανολογική πεπερασμένη μηχανή (PFSM) έχουν πιθανότητα μετάβασης. Ανάλογα με την κατάσταση, αυτές οι πιθανότητες μπορεί να αυξηθούν ή να μειωθούν με την πάροδο του χρόνου.

Το πιθανοτικό FSM χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μιας ποικιλίας συμπεριφορών σμήνους. Η αναζήτηση τροφής ([58]), η κατανομή θέσεων εργασίας ([59], [60]), η συγκέντρωση ([36]) και η δημιουργία αλυσίδων ([41]) είναι μερικές από αυτές τις συμπεριφορές.

β) **Εικονική προσομοίωση φυσικής.** Ο σχεδιασμός είναι ένας εικονικός σχεδιασμός στον οποίο κάθε ρομπότ είναι ένα εικονικό σωματίδιο που εκτελεί εικονικές συμπεριφορές. Αυτές οι εικονικές ενέργειες είναι αντιδράσεις στις εικονικές δυνάμεις, οι οποίες παρακινούνται από τους κανόνες της φυσικής ([61]).

Υποτίθεται ότι τα ρομπότ διαθέτουν ειδικές δυνατότητες, όπως η αίσθηση του εικονικού τους περιβάλλοντος. Μπορούν να ανιχνεύσουν άλλα ρομπότ στο περιβάλλον τους, να αναγνωρίσουν συγκεκριμένα ρομπότ και να υπολογίσουν τις αποστάσεις και τις θέσεις τους μεταξύ τους. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη συμπεριφορών σμήνους όπως ο σχηματισμός προτύπων και η συντονισμένη κίνηση.

γ) **Αυτόματες Μεθοδολογίες.** Στις αυτόματες τεχνικές, οι προγραμματιστές δεν ενσωματώνουν χειροκίνητα τη συμπεριφορά σμήνους. Ένα σμήνος ρομπότ μπορεί να αποκτήσει μια ποικιλία συμπεριφορών αλληλεπιδρώντας με διάφορα περιβαλλοντικά ερεθίσματα, όπως άλλα ρομπότ, εμπόδια κ.λπ. Αυτές οι τεχνικές σχεδιασμού ανήκουν στη μηχανική μάθηση, τη βαθιά μάθηση και την ενισχυτική μάθηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

§2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρομποτική σμήνους είναι σήμερα ένα από τα πιο δημοφιλή θέματα μελέτης. Υπάρχει άφθονη βιβλιογραφία για αυτό το θέμα. Οι ερευνητικές πρωτοβουλίες αντλούν έμπνευση από τα φυσικά σμήνη και στοχεύουν στη δημιουργία μιας πλατφόρμας που θα λειτουργεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στα φυσικά σμήνη.

Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων είναι ότι

- τα ρομπότ συχνά προγραμματίζονται αρκετά απλά,
- οι πληθυσμοί είναι τεράστιοι
- και το κόστος είναι μέτριο έως μέτριο.

Ο παράγοντας του κόστους διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, λόγω του ότι τα μεμονωμένα ρομπότ δημιουργούνται εξαιρετικά απλά και έχουν λίγες δυνατότητες. Επομένως, οι εργασίες ολοκληρώνονται με τον συντονισμό και την αυτονομία των ρομπότ. Βλ. Πίνακα 2.

Ο παρακάτω πίνακας παρέχει μια επισκόπηση των πολλών έργων ρομποτικού σμήνους. Για την ανάπτυξη ενός συστήματος σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου, πρέπει πρώτα να υποβληθεί σε εκτεταμένες δοκιμές για να διασφαλιστεί ότι όλα λειτουργούν σωστά και ότι οι επιδιωκόμενες εργασίες εκτελούνται αποτελεσματικά.

| Projects | Objectives | Basic Properties | Researches |
|------------|---|---|------------------------------|
| SWARM-BOT | To form simple, reliable, flexible, scalable, self organized and self assembling micro-robotic systems | Robots show robustness, flexibility and are able to solve complex problems via self organisation | [70], [71], [34], [72], [67] |
| Swarmanoid | The main goal is to design a heterogeneous distributed swarm robotic system that operates in 3-dimensional human environments | In addition to s-bots, Swarmanoid consists of hand- and eye-bots that can climb objects and fly, respectively | [73], [74], [75], [76], [77] |
| I-SWARM | The goal of the I-SWARM project is to build the largest robotic swarm that consists of up to 1000 mini robots of size 3*3*3 mm and a single robot looks and moves like an insect. But it consists of various modules that enables it to perform significant tasks. These modules include, power, electronics, locomotion and communication module | [78], [79] | |
| SensorFly | To build an aerial mobile sensor network of robots that can perform monitoring in indoor emergency situations | The aerial robots are low-cost, autonomous, and are capable of 3D sensing, obstacle detection, path identification and adapting to network disruptions | [80], [81] |
| Marsbee | Exploring Mars | Consists of a colony of small flying robotic bees that can sense their environments via sensors. There is a charge station where the marsbees can recharge themselves | [68] |
| Kilobot | It is a low-cost swarm of small robots designed to study collective swarm behavior | Each kilobot has a programmable controller, is capable for locomotion, local communication and can sense its environment | [82], [83], [84], [85], [86] |
| Kobot | A circular shaped, cheap, small, and expendable robot. These features make it very suitable for various swarm robotic applications | Has IR-based short-range sensors, supports wireless and parallel robot programming and has a battery that can last up to 10 hours. | [69] |

Πίνακας 2. Σύνοψη μερικών έργων ρομποτικής σμήνους ([67-86])

Ωστόσο, η δοκιμή αυτών των συστημάτων με πραγματικά ρομπότ μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρή. Αυτό είναι το κύριο πλεονέκτημα των πλατφορμών προσομοίωσης για την ανάλυση και τη μοντελοποίηση ρομποτικών συστημάτων σμήνους.

Οι προσομοιωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μίμηση ρομποτικών συστημάτων σμήνους, επιτρέποντας την πραγματοποίηση αλλαγών σε λιγότερο χρόνο και με λιγότερα χρήματα. Είναι δυνατοί πολλοί τύποι πειραμάτων και τα αποτελέσματα μπορούν να εξεταστούν. Μόλις επιτευχθούν τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα, μπορούν να μεταφερθούν σε συστήματα χρησιμοποιώντας πραγματικά ρομπότ.

Στον πίνακα 3, παρέχεται σύγκριση πολλών προσομοιωτών. Υπάρχουν πολυάριθμες εφαρμογές για ρομποτικά συστήματα σμήνους ([62], [63], [64], [65] και [66]).

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες πλατφόρμες προσομοίωσης και πραγματικά συστήματα ρομπότ για τη μελέτη και την αξιολόγηση της σημασίας της ρομποτικής σμήνους σε πραγματικές συνθήκες. Όπως Πίνακας 3.

| Simulator | Objective | Developers | Open source | supported languages | Supported OS | 2D or 3D | Status | Researches |
|----------------------|---|---|-------------|---|--|-----------|------------------|---|
| Swarm-Sim | A round based simulator developed for modeling swarm robotic systems in a 2D/3D environment. | Heinrich Heine University of Düsseldorf [87] | Yes | Python | Linux, MacOS, and Windows | 2D and 3D | Active | [89], [90], [91], [101], [92], [93], [94] |
| Player and stage | offers free software for robots, sensors and actuators research | Brian Gerkey [102], Richard Vaughan, Andrew Howard, and Nathan Koenig | Yes | any language | Linux, Solaris, BSD and MacOSX | 2D | Last update 2010 | [103], [104], [105], [96] |
| Gazebo | offers opportunity to simulate robotic swarms accurately and efficiently in various indoor and outdoor environments | Open Source Robotics Foundation (OSRF) [106] | Yes | mostly ROS (Robot Operating System) [107] | MacOS, Linux and Windows (a binary package available only for Linux) | 3D | Active | [108], [109] |
| Robot Virtual Worlds | High-end simulation environment for students to learn programming | Robomatter Incorporated [110] | No | ROBOTC [111] | Windows and Mac | 3D | Active | [98] |
| Teambots | Offers java classes and APIs to support research in mobile multi-agent systems | Georgia Tech's Mobile Robot Laboratory [112] | Yes | Java | Windows, NT, Solaris, SunOS, MacOS, OS X, Linux and IRIX | 2D | Last update 2000 | [113], [114], [115] |
| V-REP | A universal simulator with integrated development environment, where each item can be controlled individually | Coppelia Robotics [116] | Yes | C, Python, C++, Java, Lua, Matlab, Octave and Urbi | MacOSX, windows and linux, | 3D | Active | [117], [118], [119], [120] |
| ARGoS | Aims to simulate heterogeneous robotic swarms in real-time | Developed within the swarmanoid project [74] | Yes | ASEBA scripting language (others are under study) [121] | Linux and MacOSX | 2D and 3D | Active | [122], [123] |
| Webots | high-quality professional mobile robot simulator used for educational purposes | Cyberbotics Ltd. [124] | Yes | C, C++, Java and from third party software (via TCP/IP) | Windows, Linux and MacOSX | 3D | Active | [125], [99], [126] |
| Workspace | An Offline Simulation and programming platform. Offers simulation solutions for industrial and educational purposes | Watson Automation Technical Solutions Ltd. [127] | No | Many robotic languages e.g. AB G-Code and Adept V-Plus | Windows | 3D | Active | [128] |
| OpenHRP | A virtual platform to investigate humanoid robotics | AIST [129] | Yes | C, Python, C++, Java | Linux, Windows | 3D | Last update 2012 | [130], [131], [132] |
| SCRIMMAGE | Used for the testing and comparing of mobile robotic algorithms and behaviors | Georgia Institute of Technology | Yes | Python, C++ | Linux, MacOS | 3D | Active | [95] |

Πίνακας 3. Διαφορές και ομοιότητες μεταξύ ορισμένων σμήνους ρομποτικής εξομοιωτών ([62-66])

§2.2. Το SWARMBOT

Το SWARMBOT: SWARM-BOT ([30], [31], [67]) είναι ένα έργο για τη ρομποτική σμήνη που χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα Future and Emerging Technologies της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. (IST- 2000-31010). Αυτό το έργο επιδιώκει να διερευνήσει τον σχεδιασμό και την υλοποίηση σμηνών ρομπότ ικανών να αυτοοργάνωση και να αυτοσυναρμολογηθεί.

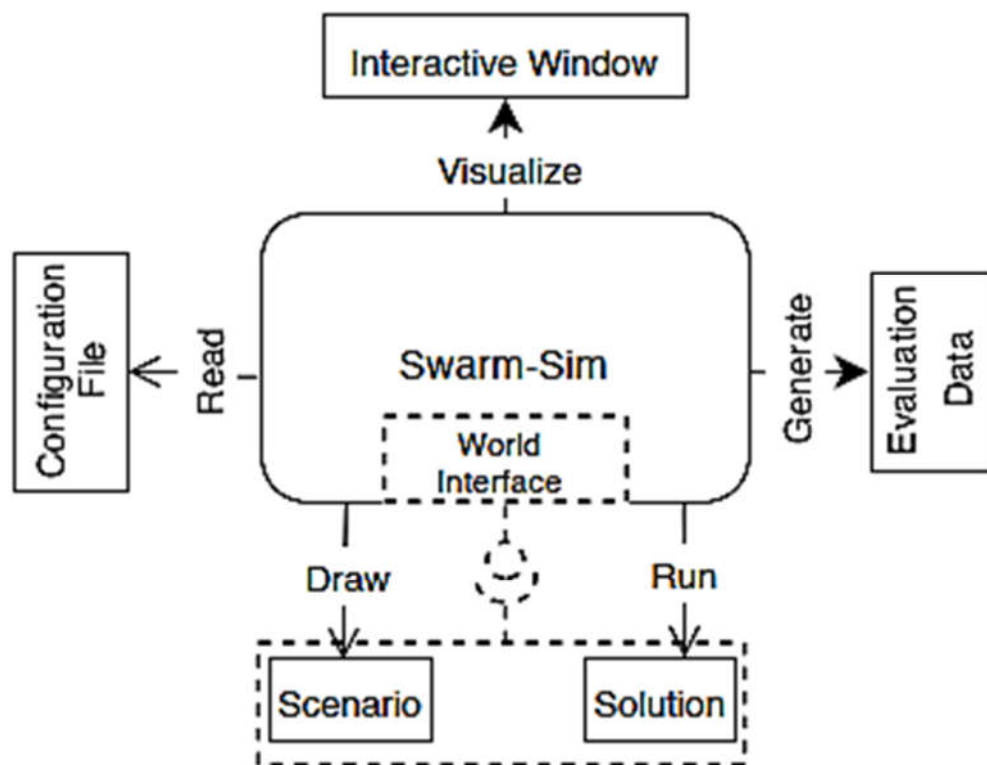
Η αυτοσυναρμολόγηση είναι ένα χαρακτηριστικό που επιτρέπει στα ρομπότ να δημιουργούν φυσικές συνδέσεις και να κατασκευάζουν σχέδια και σχήματα για να ξεπερνούν δύσκολες συνθήκες και εμπόδια. Το σύστημα αποτελείται από s-bots, τα οποία είναι μικρά αυτόνομα ρομπότ. Τα s-bots είναι εξοπλισμένα με πολλαπλούς αισθητήρες, όπως αισθητήρες φωτός ή υπέρυθρες, αισθητήρες έλξης και ενεργοποιητές. Έχουν περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες και έχουν πρόσβαση σε βασικές συσκευές επικοινωνίας για την επικοινωνία με άλλα μέλη. Εκτός από αυτά τα θεμελιώδη στοιχεία, διαθέτουν φυσικούς μηχανισμούς σύνδεσης που τους επιτρέπουν να προσκολλώνται και να αποσπώνται από άλλα μέλη. Τα s-bots συνεργάζονται για να παράγουν σμήνη-bots με μεγαλύτερες δυνατότητες από ένα μεμονωμένο s-bot. Επομένως, ένα σμήνος-bots θα πρέπει να είναι ένας ενιαίος οργανισμός με πολλαπλά αποσπώμενα συστατικά που μπορούν να αποσπαστούν ανά πάσα στιγμή με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σύμφωνα με τις δυνατότητές του, ακόμη και ένα μόνο s-bot είναι ικανό να ολοκληρώσει απλές εργασίες. Αυτές οι απλές εργασίες μπορεί να περιλαμβάνουν το πιάσιμο μικρών πραγμάτων, την αυτόνομη πλοήγηση ή τη μεταφορά μικρών αντικειμένων. Εάν παρουσιαστεί ένας στόχος που δεν μπορεί να επιτευχθεί, το ρομπότ ενώνεται με άλλους για να σχηματίσει ένα σμήνος-bot. Το διαμορφωμένο swarm-bot μπορεί να αλλάξει το σχήμα του και να συνδεθεί ή να αποσυνδεθεί από άλλα s-bot.

Το s-toy είναι ένα πρόσθετο εξάρτημα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεταβιβάσιμο αντικείμενο ή ως σημάδι για τον εντοπισμό συγκεκριμένων αγαθών. Η φυσική

εμφάνιση ενός s-toy και ενός s-bot είναι πανομοιότυπη. Μπορεί να ενώνεται και να διαχωρίζεται από τα s-bots. Ένα s-bot αποτελείται από δύο εξαρτήματα: ένα άνω εξάρτημα παρακολούθησης και ένα κάτω εξάρτημα με τροχούς.

Το εξάρτημα παρακολούθησης μπορεί να περιστρέφεται σε σχέση με τον πυργίσκο, που είναι το πάνω μέρος του σώματος του ρομπότ. Η περιστροφή του πυργίσκου τροφοδοτείται από έναν μηχανοκίνητο σύνδεσμο. Επιπλέον, ο πυργίσκος είναι εξοπλισμένος με δύο λαβές, μια σκληρή λαβή και μια εύκαμπτη λαβή. Μέσω αυτών των λαβών, τα s-bots μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους.



Σχήμα 9. Αρχιτεκτονική σμήνους ([87])

A. Marsbee και Kobot

Το χρηματοδοτούμενο από τη NASA έργο **Marsbee** ([68]) επιδιώκει να μεταφέρει ένα σμήνος ρομποτικών μελισσών (marsbees) στον Άρη. Αυτά τα marsbees έχουν σχεδιαστεί για να εξερευνούν τον Άρη, ένα έργο που είναι δύσκολο για τους ανθρώπους να επιτύχουν.

Η εξερεύνηση του Κόκκινου πλανήτη ξεκίνησε πριν από αιώνες, αν και μόνο ένα μικρό μέρος του κόσμου έχει εξερευνηθεί μέχρι στιγμής. Ως εκ τούτου, η NASA αποφάσισε να μελετήσει τον πλανήτη με ρομποτικές μέλισσες. Αυτές οι ρομποτικές μέλισσες, γνωστές ως marsbees, έχουν το μέγεθος των βομβόρων και έχουν φτερά που χτυπάνε. Τα φτερά τους είναι μεγαλύτερα από αυτά των βομβόρων.

Σε κάθε marsbee είναι ενσωματωμένοι αισθητήρες για αποτελεσματική εξερεύνηση περιοχής. Μέσω αυτών των αισθητήρων, μπορούν να μελετήσουν το περιβάλλον τους, για παράδειγμα παρακολουθώντας τη θερμοκρασία ή την υγρασία, αναζητώντας μορφές εμποδίων, εξετάζοντας τον τύπο της επιφάνειας και αναζητώντας πηγές νερού και τροφής, μεταξύ άλλων. Τα marsbees εκτοξεύονται και φορτίζονται χρησιμοποιώντας έναν κινητό σταθμό βάσης. Χρησιμοποιείται επίσης ως διεπαφή για την επικοινωνία μεταξύ των marsbees και της κύριας βάσης.

Σημειώνεται πως τα marsbees επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους και με τον σταθμό βάσης.

Το έργο αποτελείται από δύο μέρη. Ο σχεδιασμός, η κίνηση και το βάρος των πτερυγίων που χτυπούν θα καθοριστούν στην αρχική φάση. Αυτά τα χαρακτηριστικά απαιτούνται για να μπορούν τα marsbees να πετούν ομαλά και με επαρκή ισχύ στον Άρη και να προσαρμοστούν στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Στη δεύτερη φάση, εξετάζονται τα εργαλεία κινητικότητας, τηλεπισκόπησης και βελτιστοποίησης.

Περαιτέρω, το Kobot είναι ένα κυκλικού σχήματος, φθινό, συμπαγές ρομπότ μιας χρήσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν ιδανική πλατφόρμα για ρομπότ σμήνους. Έχει διαστάσεις συμπαγούς δίσκου και ζυγίζει 350 γραμμάρια. Διαθέτει μπαταρίες, μοτέρ και αισθητήρες. Το σώμα ενός kobot αποτελείται από δύο μέρη: μια κυλινδρική βάση και ένα κυλινδρικό καπάκι. Οι μπαταρίες, οι κινητήρες και οι αισθητήρες βρίσκονται στο κυλινδρικό σχήμα της βάσης. Το κυλινδρικό καπάκι καλύπτει τη βάση.

Το Kobot αποτελείται από δύο υψηλής ποιότητας κινητήρες ταχυτήτων DC που χρησιμοποιούνται για την πρόωση και μια μπαταρία με μέγιστη διάρκεια ζωής 10 ωρών. Ένα διαμορφωμένο σύστημα υπερύθρων (IR) είναι επίσης εξοπλισμένο με τη δυνατότητα διάκρισης μεταξύ φραγμών και ρομπότ. Το IEEE802.15.4/ZigBee είναι η ασύρματη πλατφόρμα επικοινωνίας που χρησιμοποιείται από το σύστημα. Αυτό το πρωτόκολλο επιτρέπει τον ταυτόχρονο προγραμματισμό των ρομπότ και την επικοινωνία peer-to-peer.

B. Προσομοιωτές .

Το εργαστήριο τεχνολογίας των κοινωνικών δικτύων στο Heinrich-Heine-University Dusseldorf ([87]) δημιούργησε το Swarm-Sim για τη μοντελοποίηση ρομποτικών συστημάτων σμήνους. Είναι γραμμένο με Python. Είναι ανοιχτού κώδικα και είναι διαθέσιμο για λήψη από το [88].

Ο προσομοιωτής μοντελοποιεί τόσο τη συνεργασία όσο και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ρομπότ και του περιβάλλοντος τους. Ο προσομοιωτής εξηγεί τη μοντελοποίηση των λειτουργιών που κάνει ένας πράκτορας στο περιβάλλον του και τις διασυνδέσεις όλων των στοιχείων του συστήματος. Παρέχει στους πελάτες μια απλή και απλή διεπαφή για τη διαμόρφωση των ρυθμίσεών τους σύμφωνα με τις συγκεκριμένες ανάγκες τους. Ως εκ τούτου, ο προσομοιωτής προσφέρει μια βασική αλλά προσαρμόσιμη πλατφόρμα για τη δοκιμή και την αξιολόγηση παραγόντων σε διάφορες καταστάσεις.

Ο προσομοιωτής αποτελείται από ένα αρχείο διαμόρφωσης, μια μονάδα σεναρίου, μια ενότητα λύσης, μια ενότητα οπτικοποίησης και δεδομένα αξιολόγησης. Το Σχήμα 9 (στη σελίδα 41) απεικονίζει τη δομή του Swarm-Sim.

Οι προσομοιώσεις Swarm-Sim μπορούν να διαμορφωθούν χρησιμοποιώντας ένα αρχείο διαμόρφωσης (config.ini). Αυτό το αρχείο επιτρέπει στους χρήστες να αλλάξουν πολλές παραμέτρους, όπως τον μέγιστο αριθμό γύρων, είτε το παιχνίδι είναι 2D είτε 3D, κ.λπ., εκτός του πραγματικού κώδικα.

Το περιβάλλον είναι ένας 2D ή 3D εικονικός χώρος στον οποίο τοποθετούνται ρομπότ και άλλα αντικείμενα και εκτελούνται εργασίες. Οι πράκτορες, τα στοιχεία και οι τοποθεσίες είναι παραδείγματα πραγμάτων που μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα περιβάλλον. Οι πράκτορες είναι αυτοκινούμενα ρομπότ, ενώ τα Αντικείμενα είναι ακίνητα πράγματα που μπορούν να μετακινηθούν από Πράκτορες.

Τοποθεσίες είναι οι συντεταγμένες μέσα σε ένα περιβάλλον όπου μπορούν να τοποθετηθούν Αντικείμενα και Πράκτορες. Τα αντικείμενα μπορούν να λειτουργήσουν ως εμπόδια ή αντικείμενα που μπορούν να μεταφέρουν οι Πράκτορες. Οι πράκτορες, τα αντικείμενα και οι θέσεις διαθέτουν όλα μια μνήμη στην οποία μπορούν να γραφτούν ή να διαβαστούν οι πληροφορίες.

Οι πράκτορες είναι επίσης σε θέση να σαρώνουν το περιβάλλον τους, να δημιουργούν και να αφαιρούν Αντικείμενα ή Τοποθεσίες και να γράφουν και να διαβάζουν από τη μνήμη άλλων πραγμάτων, εκτός από την κινητικότητα και τη μεταφορά.

Τα περιβάλλοντα που δημιουργούνται από τον χρήστη αποθηκεύονται στη λειτουργική μονάδα Scenario. Οι λύσεις που εκτελούνται αποθηκεύονται στη λειτουργική μονάδα Solution. Το πρόγραμμα δημιουργίας δεδομένων αξιολόγησης (csv generator.py) στο Swarm-sim παράγει αρχεία csv που περιέχουν αποτελέσματα προσομοίωσης.

Αυτό το αρχείο περιέχει όλα τα στατιστικά δεδομένα που δημιουργούνται κατά τις προσομοιώσεις για agents. Για παράδειγμα, ο αριθμός των Αντικειμένων που δημιουργούνται ή διαγράφονται από έναν Πράκτορα, καθώς και ο αριθμός των Αντικειμένων ή των Αντιπροσώπων που έχουν διαβαστεί ή γραφτεί από έναν Πράκτορα.

Επιπλέον, συντάσσονται και οι διάφορες παράμετροι προσομοίωσης. Για παράδειγμα, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και ο αριθμός των κινήσεων που απαιτούνται για μια συγκεκριμένη εργασία. Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται στο τέλος κάθε προσομοίωσης. Αυτό επιτρέπει την αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε ξεχωριστό αρχείο, συγκεκριμένα στις εξόδους. Το swarm-sim παρέχει μια ενότητα οπτικοποίησης που ονομάζεται vis.py και αποδίδει κάθε διαδικασία προσομοίωσης ως κινούμενη εικόνα. Αυτή η ενότητα είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση προσομοιώσεων και τη λήψη στιγμιότυπων οθόνης. Παρέχει γραφικές προσομοιώσεις σε διαφορετικό παράθυρο. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να προβάλλουν μια κινούμενη εικόνα των σεναρίων και των λύσεών τους που έχουν υλοποιήσει, καθώς και να αξιολογούν τη συμπεριφορά του Agent όταν εκτελεί διάφορα καθήκοντα.

Υπάρχει δημοσιευμένη έρευνα που χρησιμοποιεί τον προσομοιωτή Swarm-Sim. Συμπεριλαμβανομένης της κάλυψης ενός αντικειμένου με τη βοήθεια ενός σμήνους ([89], [90]), της συρρέουσας κίνησης των σμηνών σε ένα τριγωνικό γράφημα ([91]), μιας προσομοίωσης επισήμανσης οποιουδήποτε δεδομένου πεδίου με ένα εμπόδιο και τρία ακόμη ([92], [93], [94]).

§2.3 Το SCRIMMAGE

Το SCRIMMAGE ([95]) είναι ένα τρισδιάστατο περιβάλλον προσομοίωσης ανοιχτού κώδικα για τη δοκιμή και την αξιολόγηση αλγορίθμων και συμπεριφορών ρομποτικής κινητής τηλεφωνίας.

Το SCRIMMAGE επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά που παρέχει το στάδιο ([96]), ιδιαίτερα την προσομοίωση πολλών ρομπότ, τη διεπαφή πρόσθετων για ρομποτικό έλεγχο, μοντέλα κίνησης, αισθητήρες και αυτόνομη επικοινωνία μεταξύ ρομπότ.

Ο πρωταρχικός στόχος της ανάπτυξης αυτού του προσομοιωτή ήταν η αντιμετώπιση της έλλειψης τρισδιάστατων προσομοιωτών ανοιχτού κώδικα ικανούς να προσομοιώνουν όχι μόνο τυπικά ρομπότ περπατώντας αλλά και εναέρια ρομπότ.

Το SCRIMMAGE είναι ικανό να επεξεργάζεται κατά παρτίδες και να αναλύει δεδομένα προσομοίωσης. Παρέχει πολλαπλές προσθήκες, όπως προσθήκες αυτονομίας, μοντέλου κίνησης, ελεγκτή, αισθητήρα, αλληλεπίδρασης οντοτήτων και προσθηκών μετρήσεων.

Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να επισκεφτεί την αρχική σελίδα του SCRIMMAGE ([97]) για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με αυτές τις προσθήκες. Οι διεπαφές τέτοιων προσθηκών προσφέρουν διάφορα επίπεδα πιστότητας προσομοίωσης.

Είναι επίσης δυνατή η δημιουργία πρόσθετων προσθηκών, όπως για την ανίχνευση σύγκρουσης. Η έρευνα μπορεί να σταματήσει και να τερματίσει τις προσομοιώσεις. Αυτό το χαρακτηριστικό επιταχύνει την ανάπτυξη της αυτονομίας. Το SCRIMMAGE προσομοιώνει όχι μόνο αερομεταφερόμενα αλλά και επίγεια και υδρόβια ρομπότ

Robot Virtual Worlds:

Το Robot Virtual Worlds ([98]) είναι ένας εικονικός προσομοιωτής ρομπότ. Πρόκειται για μια νέα και συμφέρουσα μέθοδο που απευθύνεται σε νέους ερευνητές και μαθητές για να μάθουν και να δοκιμάσουν τον προγραμματισμό χωρίς τη χρήση πραγματικού υλισμικού (hardware).

Υποστηρίζει τη γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των ρομπότ NXT-G, EV3 και LABVIEW, ROBOTC. Συνήθως, οι ερευνητές και οι προγραμματιστές δημιουργούν πραγματικό ρομποτικό υλικό πριν προσομοιώσουν τον προγραμματισμό του. Επομένως, η μοντελοποίηση και οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται μετά τη δημιουργία πραγματικών ρομπότ.

Με τους εικονικούς κόσμους των ρομπότ, η μοντελοποίηση και οι δοκιμές πραγματοποιούνται χωρίς την ανάγκη πραγματικών ρομπότ. Είναι δυνατή η προσομοίωση και η δοκιμή κωδικών και λειτουργιών. Αυτός ο προσομοιωτής επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των καθολικών υλοποιήσεων. Εξαιτίας αυτού, οι εικονικοί κόσμοι ρομπότ είναι πολύ χρήσιμοι για μαθητές που συχνά δεν διαθέτουν τα μέσα για την κατασκευή δοκιμαστικών ρομπότ.

Ο προσομοιωτής εικονικών κόσμων ρομπότ παρέχει στους μαθητές μια ποικιλία βασικών εργαλείων για να σχεδιάσουν οτιδήποτε σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους. Αυτά τα όργανα αποτελούνται από έναν εισαγωγέα επιπέδου, έναν εισαγωγέα μοντέλων και ένα πακέτο εργαλείων μέτρησης. Με τη βοήθεια του εισαγωγέα επιπέδου, μπορεί κανείς να τοποθετήσει σε τραπέζια πράγματα καθημερινής χρήσης όπως καθίσματα, τραπέζια, μπάλες κ.λπ.

Με μια τέτοια τοποθέτηση, οι επιχειρήσεις μπορούν να δημιουργήσουν διαφορετικές ρυθμίσεις δοκιμών και να παρέχουν στα προϊόντα τους μοναδικά προβλήματα. Ο εισαγωγέας μοντέλων επιτρέπει στους μαθητές να εισάγουν και να αναπτύξουν αντικείμενα σε τρισδιάστατο χώρο σύμφωνα με τις ανάγκες τους.

Το πιο χρήσιμο εργαλείο είναι το εργαλείο μέτρησης που επιτρέπει την ανίχνευση του σχεδιασμού διαδρομής αντικειμένων. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη των μαθητών να προβλέψουν ποια μονοπάτια θα ακολουθήσουν τα ρομπότ ή πόσο καιρό θα διανύσουν.

§2.4 Το Webbots:

Το Webbots ([99]) είναι ένας δημοφιλής, υψηλής ποιότητας φορητός προσομοιωτής ρομπότ για επαγγελματίες. Χρησιμοποιείται κυρίως για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Διαθέτει ένα πρωτότυπο περιβάλλον ανάπτυξης που επιτρέπει στους χρήστες να σχεδιάζουν τρισδιάστατα περιβάλλοντα με χαρακτηριστικά όπως όγκος, μάζα, συνδέσεις και συντελεστές τριβής. Το περιβάλλον μπορεί να δημιουργηθεί και να τροποποιηθεί με την προσθήκη ή την αφαίρεση ρομπότ.

Αυτά τα ρομπότ μπορούν να πάρουν διάφορα σχήματα και μεγέθη, συμπεριλαμβανομένων ρομπότ με πόδια ή φτερά. Ένας χρήστης μπορεί επίσης να προσθέσει αισθητήρες και ενεργοποιητές, όπως αισθητήρες φωτός, αισθητήρες ανέμου, κάμερες κ.λπ., στα αντικείμενα.

Η προσομοίωση αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία: τις υλοποιήσεις του περιβάλλοντος και τους διάφορους ελεγκτές. Το περιβάλλον είναι ουσιαστικά ένα σύμπαν που οι χρήστες γεμίζουν με ρομπότ και άλλα αντικείμενα. Υπάρχουν και επόπτες ελεγκτές εκτός από τους τυπικούς ελεγκτές ρομπότ. Οι επόπτες ελεγκτές είναι ρομπότ με πρόσθετα δικαιώματα και δυνατότητα εκτέλεσης εργασιών που είναι αδύνατες για τα τυπικά ρομπότ.

Για παράδειγμα, η μετεγκατάσταση ενός ρομπότ σε μια νέα τοποθεσία, η συλλογή ενός στιγμιότυπου οθόνης ή βίντεο της προσομοίωσης, κ.λπ. Αυτά τα ρομπότ σχετίζονται με τυπικούς ελεγκτές και μπορούν να προγραμματιστούν στις ίδιες γλώσσες με τους ελεγκτές. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν φυσικά πρόσθετα για την τροποποίηση της φυσικής συμπεριφοράς της προσομοίωσης.

Η φυσική μηχανή Webots υλοποιείται με το πακέτο ανοιχτού κώδικα 3D δυναμικής φυσικής Open Dynamic Engines ([100]) και πολλές γλώσσες προγραμματισμού, συμπεριλαμβανομένων των C, C++, Java και άλλων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία των ρομπότ μέσω TCP/IP. Οι ελεγκτές ρομπότ μπορούν να προγραμματιστούν σε πολλές γλώσσες, συμπεριλαμβανομένων των C, C++, Java, MATLAB και Python. Επειδή δεν υπάρχουν καθορισμένα πρότυπα για την αξιολόγηση της απόδοσης ή της ποιότητας, η διαδικασία προσομοίωσης είναι γρήγορη. Για να βοηθήσετε τους χρήστες.

Το Webbot διαθέτει ολοκληρωμένη τεκμηρίωση σχετικά με τον τρόπο χρήσης και εργασίας με αυτό. Επιπλέον, περιέχει πολλά παραδείγματα προγραμμάτων ελέγχου και μοντέλων ρομπότ.

Εφαρμογές πραγματικού κόσμου

Γεωργία: SAGA

Το SAGA ([133], [134] και [135]) είναι μια πειραματική πλατφόρμα για ρομποτικά συστήματα σμήνους στη γεωργία. Ο σκοπός του έργου είναι να καταδείξει τη σημασία της ρομποτικής σμήνους στη γεωργία ακριβείας ([136]). Οι δοκιμές καταδεικνύουν την ανάπτυξη ενός σμήνους μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) σε ένα χωράφι με σκοπό την παρακολούθηση του χωραφιού και την εκτέλεση ζιζανίων.

Τα UAV είναι μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα που δημιουργούνται από την avular.BV ([137], [138]). Η πλατφόρμα SAGA ενισχύει αυτά τα UAV προσθέτοντας περισσότερες λειτουργίες και εξαρτήματα. Εξαρτήματα και χαρακτηριστικά, όπως κάμερες επί του σιάφους, οπτική επεξεργασία, συστήματα ραδιοεπικοινωνίας και πρωτόκολλα θα διευκολύνουν τις ασφαλείς λειτουργίες σμήνους.

Χρησιμοποιώντας το ενσωματωμένο σύστημα όρασης, η ανίχνευση ζιζανίων θα πραγματοποιηθεί επί του σκάφους προκειμένου να μετρηθεί ο αριθμός των ζιζανίων σε μια δεδομένη περιοχή και να υποδειχθούν οι περιοχές όπου τα ζιζάνια είναι άφθονα. Τα UAV αναζητούν εθελοντικές πατάτες και ζαχαρότευτλα προκειμένου να ανακαλύψουν δυνητικά επικίνδυνες τοποθεσίες. Στη συνέχεια ξεκινά η διαδικασία του βοτανίσματος.

Τα UAV πετούν αργά κοντά στο χωράφι για να λάβουν φωτογραφίες και να αναγνωρίσουν ζιζάνια ανάμεσα στα φυτά. Το έργο λαμβάνει υπόψη μόνο τοποθεσίες όπου υπάρχουν επαρκή ζιζάνια. Πολλαπλά UAV αναζητούν ζιζάνια και εάν απαιτούνται πρόσθετες εργασίες, όπως ο μικροφεικασμός σε ορισμένα φυτά, ορισμένα UAV μπορούν να χειριστούν αυτές τις πρόσθετες δουλειές. Αυτό καταδεικνύει επίσης τη σημασία της ύπαρξης πολλών UAV και όχι μόνο ενός.

Χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα SAGA και διάφορες ρυθμίσεις, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για να προσδιοριστεί η επίδραση αυτών των παραμέτρων στην κύρια εργασία. Αυτό περιλαμβάνει τον αριθμό των UAV που έχουν αναπτυχθεί, τον ρυθμό ανίχνευσης ζιζανίων και τη διασπορά των ζιζανίων στα χωράφια. Αυτές οι παράμετροι αξιολογήθηκαν σε πεδία που επιλέχθηκαν τυχαία.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο χρόνος που απαιτείται για την ανίχνευση ζιζανίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ρυθμό ανίχνευσης ζιζανίων. Το σύστημα χειρίστηκε επίσης αποτελεσματικά χαμηλά ποσοστά αναγνώρισης ζιζανίων και κλιμάκωσε καλά.

Βιομηχανικά FIBERBOTS

Το FIBERBOTS ([140]) είναι μια πολύ πρόσφατη πρωτοβουλία (που δημιουργήθηκε το 2018) στην οποία τα ρομπότ μπορούν να λειτουργήσουν ως κατασκευαστές σμήνων και να σχεδιάσουν δομές που κατασκευάζονται. Συνεργάζονται για την κατασκευή σωληνοειδών κατασκευών.

Τα ρομπότ παίρνουν ίνες και ρητίνη από μια εγκατάσταση αποθήκευσης στο έδαφος (ένα καρούλι από υαλοβάμβακα) και τις τυλίγουν γύρω από το σώμα τους. Κατασκευάζουν τις δομές τυλίγοντας τους εαυτούς τους σε σωλήνες ινών.

Η κατασκευή της δομής περιλαμβάνει πολλαπλές διαδικασίες. Ένας περιστρεφόμενος βραχίονας εξάγει ίνες και ρητίνη από την επίγεια εγκατάσταση αποθήκευσης. Αυτές οι δύο ουσίες συνδυάζονται στη ρινική κοιλότητα και στη συνέχεια εισπνέονται. Στο επόμενο στάδιο, η υπεριώδης ακτινοβολία χρησιμοποιείται για τη σκλήρυνση της ίνας. Χρησιμοποιώντας τον μικροσκοπικό κινητήρα και τους τροχούς του, το fiberbot κλίνει πάνω από τη σκληρυσμένη ίνα μετά τη σκλήρυνση της ίνας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να κατασκευαστεί η επιθυμητή δομή. Η εμφάνιση της δομής μπορεί να αλλάξει αλλάζοντας τα σχέδια περιέλιξης της δομής.

Τα ρομπότ δεν συγκρούονται επειδή επικοινωνούν μέσω ενός δικτύου υπολογιστών και γνωρίζουν το ένα τις τρέχουσες καταστάσεις του άλλου. Δεν χρειάζεται να κουμαντάρετε τα ρομπότ. Αντίθετα, το σύστημα χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο σχεδίασης που βασίζεται σε συρρέουν ([141]) για να ενημερώσει τις τροχιές του ρομπότ κατά την ανάπτυξη της δομής.

To FLYZOO FUTURE HOTEL

Πέραν των ανωτέρω, ένα ξενοδοχείο απασχολεί ρομποτικούς ξενοδόχους που είναι υπεύθυνοι για σχεδόν κάθε εργασία στο ξενοδοχείο, από το check-in μέχρι την παράδοση γευμάτων και οτιδήποτε άλλο απαιτείται σε ένα ξενοδοχείο.

Οι επισκέπτες ενός ξενοδοχείου κάνουν check in σαρώνοντας τα διαβατήριά τους από ένα ρομπότ που χρησιμοποιεί επίσης την αναγνώριση προσώπου για να τους παρέχει πρόσβαση σε όλους τους άλλους ζωτικούς χώρους, όπως το ασανσέρ και τα δωμάτιά τους. Κάθε δωμάτιο έχει τον δικό του εικονικό βοηθό που μπορεί να λάβει οδηγίες να κλείνει τα παράθυρα, να τραβάει τις κουρτίνες, να παίζει μουσική ή να κάνει παραγγελία για υπηρεσία δωματίου.

Επίσης, η μπάρα στο μπαρ του ξενοδοχείου περιέχει ρομπότ που παρασκευάζουν ποτά. Οι επισκέπτες μπορούν να επιλέξουν ποτά μέσω μιας εφαρμογής, τα οποία στη συνέχεια παράγονται και παραδίδονται από ρομπότ.

Ωστόσο, η ανθρώπινη εργασία εξακολουθεί να απαιτείται για ορισμένες εργασίες, όπως η προετοιμασία φαγητού. Είναι μια νέα ιδέα που βρίσκεται υπό ανάπτυξη. Ίσως στο εγγύς μέλλον, τα ξενοδοχεία να στελεχωθούν εξ ολοκλήρου από ρομπότ.

Το πιο σύγχρονο τέτοιο ξενοδοχείο στον κόσμο είναι το FLYZOO FUTURE HOTEL ([142]), μια πρόσφατη ξενοδοχειακή ανάπτυξη στην Κίνα. Το ξενοδοχείο απασχολεί ρομποτικούς ξενοδόχους που είναι υπεύθυνοι για σχεδόν κάθε εργασία στο ξενοδοχείο, από το check-in μέχρι την παράδοση γευμάτων και οτιδήποτε άλλο απαιτείται σε ένα ξενοδοχείο.

Οι επισκέπτες ενός ξενοδοχείου κάνουν check in σαρώνοντας τα διαβατήριά τους από ένα ρομπότ που χρησιμοποιεί επίσης την αναγνώριση προσώπου για να τους παρέχει πρόσβαση σε όλους τους άλλους ζωντικούς χώρους, όπως το ασανσέρ και τα δωμάτιά τους.

Κάθε δωμάτιο έχει τον δικό του εικονικό βοηθό που μπορεί να λάβει οδηγίες να κλείνει τα παράθυρα, να τραβάει τις κουρτίνες, να παίζει μουσική ή να κάνει παραγγελία για υπηρεσία δωματίου.

Το μπαρ περιέχει ρομπότ που παρασκευάζουν ποτά. Οι επισκέπτες μπορούν να επιλέξουν ποτά μέσω μιας εφαρμογής, τα οποία στη συνέχεια παράγονται και παραδίδονται από ρομπότ.

Ωστόσο, τονίζουμε ότι η ανθρώπινη εργασία εξακολουθεί να απαιτείται για ορισμένες εργασίες, όπως η προετοιμασία φαγητού. Είναι μια νέα ιδέα που βρίσκεται υπό ανάπτυξη. Ίσως στο εγγύς μέλλον, τα ξενοδοχεία να απασχολούν αποκλειστικά ρομπότ και να μην έχουν ανθρώπους εργαζόμενους.

Ιατρική:

Η θεραπεία του καρκίνου είναι ένας πολύ συναρπαστικός τομέας έρευνας για ρομποτικά συστήματα σμήνος. Ακόμη και ενώ η τεχνολογία προχωρά και σχεδόν όλοι οι τύποι καρκίνου είναι ιάσιμοι, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές περιπτώσεις καρκίνου που δεν μπορούν να θεραπευτούν. Ωστόσο, οι ανεπιθύμητες ενέργειες που σχετίζονται με αυτές τις θεραπείες εξακολουθούν να αποτελούν μείζονα ανησυχία.

Το πρωταρχικό ζήτημα είναι η καταστροφή υγιών κυττάρων. Αυτό το ζήτημα μπορεί να επιλυθεί μόνο με μια θεραπεία που εστιάζει αποκλειστικά σε άρρωστα κύτταρα. Μια τέτοια θεραπευτική προσέγγιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξάλειψη των καρκινικών κυττάρων χωρίς να βλάψει τα υγιή κύτταρα είναι το σμήνος νανορομπότ.

Τα νανορομπότ μπορούν να σχεδιαστούν για να στοχεύουν αποκλειστικά τα καρκινικά κύτταρα. Θα πρέπει να μπορούν να πλοηγούνται στο περιβάλλον τους, που είναι το ανθρώπινο σώμα, και να εντοπίζουν και να αναγνωρίζουν συγκεκριμένα αντικείμενα, δηλαδή καρκινικά κύτταρα. Η θεραπεία μπορεί να λάβει διάφορες μορφές.

Τα νανορομπότ μπορούν είτε να εντοπίσουν καρκινικά κύτταρα και να τα εξαλείψουν με έγχυση φαρμάκων, είτε μπορούν να τρυπήσουν στα κύτταρα ([148]) και να τα καταστρέψουν χωρίς να χρειάζονται φάρμακα. Όταν ένα σμήνος από αυτά τα νανορομπότ κινείται μέσα από ένα κακόηθες σώμα, μπορούν να εξαλείψουν γρήγορα τα καρκινικά κύτταρα.

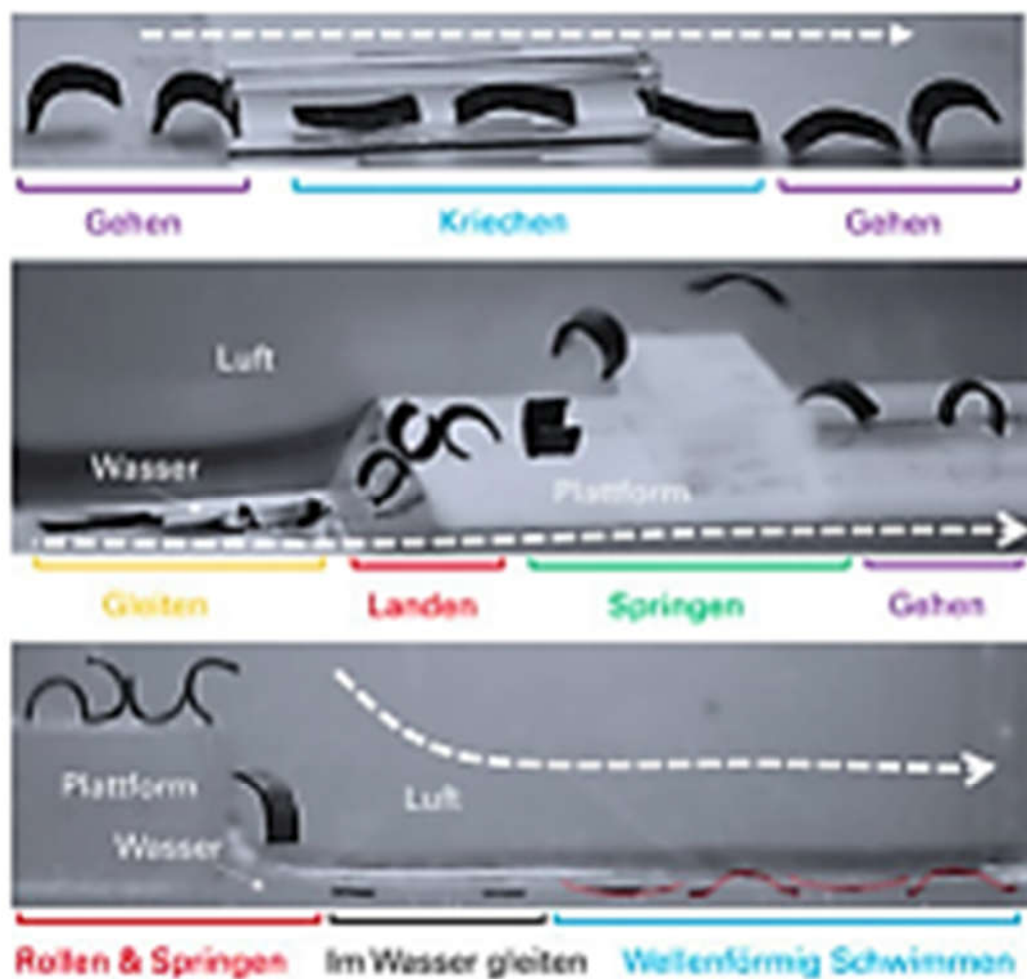
Οι επιστήμονες του Ινστιτούτου Max Planck έχουν δημιουργήσει **millirobots** ([149], [150]) με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Είναι σε θέση να περπατούν, να σέρνονται, να κυλούνται, να κολυμπούν και να μετακινούν αντικείμενα. Αυτό δείχνει ότι τα ρομπότ μπορούν να κινηθούν τόσο στη στεριά όσο και στο νερό (βλ. Σχήμα 11).

Αυτό το millirobot έχει μήκος μόλις τέσσερα χιλιοστά (βλ. Σχήμα 10) και είναι σε θέση να εκτελεί ποικίλες κινήσεις χάρη στα μαγνητικά μικροσκοπικά σωματίδια που τοποθετούνται στο σώμα του από καουτσούκ πυριτίου.



Σχήμα 10. Το millirobot συγκρινόμενο με το μέγεθος ενός νομίσματος [149].

Τα ρομπότ είναι ελεγχόμενα μέσω ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Μεταβάλλοντας την ισχύ και την κατεύθυνση των μαγνητικών πεδίων, οι ερευνητές μπορούν να αλλάξουν το σχήμα του ρομπότ. Έτσι, τα ρομπότ μιμούνται τον ανθρώπινο αυθορμητισμό στις πράξεις τους (βλ. Σχήμα 11) Για παράδειγμα, μπορεί να πηδήξουν πάνω από εμπόδια, να σέρνουν μέσα από στενούς χώρους κ.λπ. Στόχος αυτής της έρευνας είναι η ανάπτυξη millirobots που είναι ικανά να μεταφέρουν φάρμακα σε πολλά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπινου σώματος.

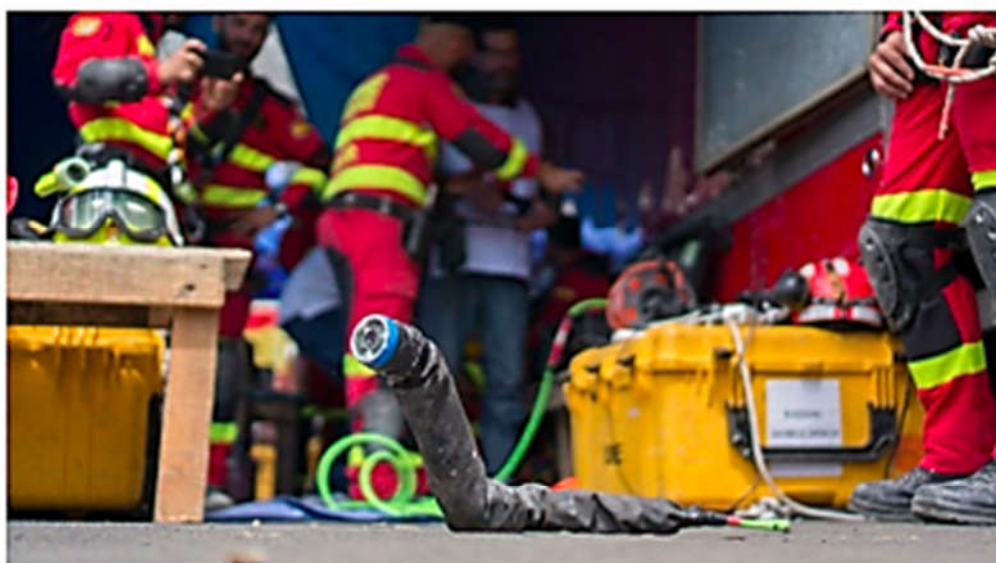


Σχήμα 11. Τύπου κινήσεων του millirobot που δύναται να υλοποιήσει [149].

Επικίνδυνες Ζώνες

Η ερευνητική ομάδα του Howie Choset του Πανεπιστημίου Carnegie Mellon στο Πίτσμπουργκ της Πενσυλβάνια, ανέπτυξε ρομπότ φιδιών ([156]) που μπορούν να διασχίσουν στενές σήραγγες και δρόμους που οι άνθρωποι και άλλες μηχανές δεν μπορούν. Αυτά τα ρομπότ αποτελούνται από μέταλλο και είναι ικανά να σέρνονται, να κολυμπούν, να αναρριχούνται και πολλές άλλες συμπεριφορές. Έχουν μήκος περίπου ένα μέτρο και πάχος πέντε εκατοστών.

Με 16 αρθρώσεις, μπορούν να κάνουν αβίαστα ελιγμούς γύρω από περιορισμένους χώρους. Τα ρομπότ φιδιών είναι επίσης εξοπλισμένα με φωτισμό και κάμερες, έτσι ώστε το κέντρο ελέγχου να μπορεί να δει καθαρά πλάνα από κάθε περιοχή. Αυτά τα ρομπότ βοήθησαν στην αναζήτηση επιζώντων μετά από έναν σεισμό του 2017 που έπληξε το Μεξικό (Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Το ρομπότ – φίδι που έλαβε μέρος στους σεισμούς του 2017 στο Μεξικό ([160]).

Κατά τη διάρκεια της επιχείρησης, ωστόσο, δεν ανακαλύφθηκαν άνθρωποι από τα ρομπότ φιδιών. Οι ερευνητές σκοπεύουν να βελτιώσουν τα συστήματα και τα σχέδια των ρομπότ. Για παράδειγμα, με την ενσωμάτωση νέων αισθητήρων και εργαλείων οπτικοποίησης. Η ερευνητική ομάδα αναπτύσσει άλλα ρομπότ, όπως το φίδι κορμού ([157]), το ιατρικό φίδι ([158]), το fullabot ([159]) και άλλα.

Η Endeavor Robotics ([162]) δημιούργησε έναν αριθμό ρομπότ που χρησιμοποιήθηκαν από τον στρατό των Ηνωμένων Πολιτειών για μια ποικιλία λειτουργιών. Το ρομπότ κόμπρα χρησιμοποιείται για την ανύψωση μεγάλων εμπορευμάτων. Μπορεί να σηκώνει έως και 150 κιλά.

Το packbot ([164]) χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση βομβών.

Τα AlphaDogs ([165]) είναι ρομπότ που κατασκευάστηκαν από την Boston Dynamics που μοιάζουν με σκύλους και χρησιμοποιούνται για τη μετακίνηση μεγάλων αντικειμένων για στρατιώτες. Μπορεί να μεταφέρει έως και 180 κιλά και να περπατήσει έως και 20 χιλιόμετρα. Η ενδιαφέρουσα πτυχή αυτών των ρομπότ είναι ότι δεν χρειάζεται να κατευθύνονται προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Χρησιμοποιώντας την όραση υπολογιστή, θα ακολουθήσουν αυτόματα τον αρχηγό τους.

Ο Adrian Perez Zapata από την Κολομβία παρουσίασε το σχέδιο "MAB" για ένα αυτοματοποιημένο σύστημα καθαρισμού ([168]) που αποτελείται από μεγάλο αριθμό μικρών ιπτάμενων ρομπότ. Αυτά τα ρομπότ καθαρισμού είναι φορτωμένα με προμήθειες καθαρισμού και πετούν γύρω από τα σπίτια για να καθαρίσουν τις περισσότερες επιφάνειες. Μπορούν επίσης να μεταφέρουν και να εναποθέτουν επιφανειακή σκόνη και σωματίδια βρωμιάς. Τα μικρά ρομπότ επικοινωνούν περιβαλλοντικές πληροφορίες μέσω άμεσης επικοινωνίας. Αυτή η ιδέα συστήματος έλαβε την πρώτη θέση στον διαγωνισμό του Electrolux Design Lab το 2013.

Η αστρονομία

Περαιτέρω, η αστρονομία είναι ένα από τα πιο ενδιαφέροντα νέα πεδία για ρομποτικά συστήματα σμηνών. Οι ερευνητές προσπαθούν να προσδιορίσουν πώς τα ρομπότ μπορούν να βοηθήσουν στην εξερεύνηση εξωγήινων πλανητών όπως ο Άρης, ο ήλιος και η σελήνη. Ο όρος «ρομποτικό τηλεσκόπιο» επινοήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ([171]). Ήταν ακριβώς και δύσκολο να αναπτυχθούν εκείνη την εποχή λόγω των περιορισμένων πόρων. Το έργο eSTAR ([174]) αναπτύχθηκε μέσω έρευνας στο Πανεπιστήμιο John Mores του Λίβερπουλ. είναι μια ρομποτική τεχνολογία για την εκτέλεση ή τηλεσκοπική εργασία. Είναι ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων που αποτελείται από μια συλλογή ετερογενών ρομποτικών τηλεσκοπίων.

Η εργασία [175] είναι μια άλλη προσπάθεια που ασχολείται με ετερογενή ρομποτικά τηλεσκόπια. Οι χρησιμοποιούμενοι πράκτορες είναι αυτόνομοι και ικανοί να συντονιστούν μεταξύ τους. Οι συγγραφείς επινόησαν πρωτόκολλα για τον συντονισμό και τη συνεργασία των πρακτόρων. Επιπλέον, μια γλώσσα προγραμματισμού και μια αρχιτεκτονική πράκτορα αναπτύχθηκαν για αυτά τα πρωτόκολλα.

Η εργασία [176] παρέχει μια επισκόπηση της χρήσης των ρομπότ στον τομέα της αστρονομίας. Ο συγγραφέας καλύπτει την εξέλιξη των ρομπότ στον βιομηχανικό και αστρονομικό τομέα, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης τους. Κάθε πτυχή διερευνάται σε βάθος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

V. ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

§3.1 Εισαγωγή

Ο τομέας των ρομπότ σμήνους έχει προχωρήσει σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Από πλατφόρμες προσομοίωσης έως εφαρμογές πραγματικού κόσμου, κάθε στοιχείο αυξάνεται συνεχώς. Πολλά συστήματα έχουν ήδη αναπτυχθεί ενώ άλλα είναι ακόμη υπό κατασκευή και δοκιμές.

Η ανάπτυξη ρομπότ σμήνους για εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο, ωστόσο, είναι ακόμη στα σπάργανα. Τα περισσότερα συστήματα πραγματικού κόσμου χρησιμοποιούνται για εργασίες που δεν περιλαμβάνουν απαραίτητα ανθρώπινη αλληλεπίδραση, καθώς πρέπει να είναι εξαιρετικά ασφαλή πριν αναπτυχθούν σε περιοχές με άμεση ανθρώπινη αλληλεπίδραση.

Η πλειοψηφία των δοκιμών για ρομποτικά συστήματα σμήνος αποτελείται από προσομοιώσεις. Η πλειονότητα αυτών των προσομοιώσεων δεν μπορεί να εξηγήσει τις πραγματικές συνθήκες. Ένα σύστημα που έχει δοκιμαστεί με επιτυχία σε προσομοιωτή μπορεί να μην είναι πάντα επιτυχημένο στον πραγματικό κόσμο.

Επιπλέον, οι πρωτοβουλίες που δοκιμάζουν αυτά τα συστήματα με πραγματικά ρομπότ περιορίζονται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της έλλειψης στοιχείων υλικού ή λογισμικού και, το πιο σημαντικό, των σχετικών δαπανών. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η ανάπτυξη και η ανάπτυξη των σημερινών ρομποτικών συστημάτων σμήνους επιταχύνθηκε. Το SWARMBOT ήταν μια από τις πρώτες προσπάθειες σε αυτόν τον τομέα που είχε σκοπό να δημιουργήσει πλήρως αυτόνομα ρομπότ, συγκεκριμένα τα s-bots. Αυτά τα s-bots θα μπορούσαν να μεταφέρουν αγαθά ενώνοντας άλλα s-bot και αρπάζοντάς τα.

Το 2010, εισήχθη το έργο kilobot ([177]), το οποίο αποτελούνταν από χιλιάδες μικρά, απλά, αυτόνομα ρομπότ (βλέπε Σχήμα 13) ικανά να εκτελούν μια ποικιλία εργασιών μέσω της συγκέντρωσης και της αυτοοργάνωσης.



Σχήμα 13. Ένα σμήνος χιλιάδων ρομπότ

Σχετικά με τις βιομηχανικές εφαρμογές των ρομπότ σμήνους, οι TERMES [143], [144] και FIBERBOTS είναι δύο πρόσφατες προσπάθειες. Και τα δύο επί τούτων έργα προορίζονται για ανάπτυξη.

Ο βιομηχανικός αυτοματισμός επεκτείνεται εκθετικά. Όλο και περισσότερες χώρες, συμπεριλαμβανομένων της Ιαπωνίας, των Ηνωμένων Πολιτειών, της Γερμανίας και της Κίνας, δημιουργούν εφαρμογές για την αυτοματοποίηση των βιομηχανικών εφαρμογών. Περισσότερα από 1.400.000 βιομηχανικά ρομπότ θα εγκατασταθούν σε εταιρείες έως το 2019 ([178]), σύμφωνα με τη Διεθνή Ομοσπονδία Ρομποτικής (IFR). Αυτές οι μελέτες αποδεικνύουν ότι η εξέλιξη των ρομπότ σμήνους όχι μόνο προχωρά, αλλά και τείνει προς μια εντυπωσιακή ομοιότητα με τα φυσικά σμήνη. Η έμπνευση για την έννοια της ρομποτικής σμήνους προέρχεται από τα φυσικά σμήνη. Αυτά τα φυσικά σμήνη είναι αυτόνομα, δεν έχουν

άμεση επικοινωνία, είναι αυτοοργανωμένα, συντονισμένα και συνεργάσιμα και στερούνται άμεσης επικοινωνίας.

Αυτά είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά που επιτρέπουν στα φυσικά σμήνη να αναπτύξουν περίπλοκες συμπεριφορές σμήνους που έχουν ως αποτέλεσμα την ολοκλήρωση πολλαπλών σύνθετων εργασιών. Επομένως, το επίκεντρο της κατασκευής ρομποτικών συστημάτων σμήνους παραμένει στην ιδέα ότι τα συστήματα πρέπει να είναι ικανά να επιτυγχάνουν πολύπλοκους στόχους ενώ είναι απλά.

Ωστόσο, η κατασκευή συστημάτων με τέτοια χαρακτηριστικά δεν είναι απλή. Υπάρχουν προβλήματα και ζητήματα που δεν έχουν ακόμη επιλυθεί ή δεν έχουν επιλυθεί πλήρως. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην επίλυση αυτών προκειμένου να δημιουργηθούν συστήματα που έχουν σχεδόν ίδια χαρακτηριστικά με τα φυσικά σμήνη και είναι ικανά να κάνουν όλα τα καθήκοντα που περιμένουν οι άνθρωποι από αυτά.

Αυτή η προοπτική θα μπορούσε να αποβεί πολύ χρήσιμη για την προώθηση της ανάπτυξης πιο πρακτικών ρομποτικών εφαρμογών σμήνους. Χωρίζουμε τα προβλήματα που περιγράφουμε σε δύο κατηγορίες: προβλήματα υλικού και λογισμικού. Τα επόμενα δύο μέρη θα διερευνήσουν αυτές τις δύο πτυχές της ανάπτυξης.

§3.2.Ανησυχίες υλισμικού και λογισμικού

Το υλικό και το λογισμικό των ρομπότ σμήνους πρέπει να έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν τα τρία βασικά χαρακτηριστικά ενός ρομπότ σμήνος: ευελιξία, επεκτασιμότητα και ανθεκτικότητα. Επιπλέον, η συνιστώσα του κόστους είναι κρίσιμης σημασίας. Τα ρομπότ πρέπει να επιδεικνύουν τόσο αυτοοργάνωση όσο και διανεμητική συμπεριφορά για να αποκτήσουν ευελιξία. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να είναι σε θέση να συγκεντρώνουν και να διαδίδουν δεδομένα σύμφωνα με τις ανάγκες των καθορισμένων θέσεων εργασίας. Τα συστήματα πρέπει να μπορούν να φιλοξενήσουν διάφορα μεγέθη

ομάδων. Αυτό οδηγεί στην επεκτασιμότητα του συστήματος. Η ευρωστία είναι η ικανότητα των ρομπότ να προσαρμόζονται στο κυμαινόμενο μέγεθος του σμήνους τους. Επομένως, ακόμη και αν ορισμένα μέλη δεν μπορούν να λειτουργήσουν, θα πρέπει να συνεχίσουν να λειτουργούν με την ίδια αποτελεσματικότητα.

Οι βλάβες δεν πρέπει επίσης να έχουν καμία επίδραση στη συνολική απόδοση του συστήματος. Συνιστούμε τις ακόλουθες προδιαγραφές υλικού για ρομπότ σμήνους:

- Σχεδιασμός πρόσθετων, που επιτρέπει την απλή και γρήγορη τροποποίηση του υλικού.
- Εξοπλισμένο με έναν ελάχιστο αριθμό αισθητήρων ικανών να ανιχνεύουν αντικείμενα, χημικές ουσίες ή να αναγνωρίζουν το δικό τους είδος.
- Εξαρτήματα για κινητικότητα, όπως τροχοί, για να ταξιδέψετε από ένα σημείο (τόπο) Α στο σημείο (τόπο) Β
- Εξαρτήματα για να πιάνουν αντικείμενα.
- Στοιχεία ασύρματης επικοινωνίας, όπως το WIFI, για επικοινωνία με άλλους

Αυτές είναι μερικές από τις απαιτούμενες προδιαγραφές υλικού. Προτού μπορέσουμε να σχεδιάσουμε ένα σύστημα σμήνους που λειτουργεί πραγματικά σαν ένα φυσικό σμήνος, υπάρχουν ακόμη πολλά αναπάντητα ερωτήματα που πρέπει να επιλυθούν.

Πολλά συστήματα προσφέρουν τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, το kilobot ([177]) είναι απλό, συμπαγές, αυτόνομο και οικονομικό. Η SWARMBOT ([30]) κατασκεύασε s-bots που είναι αυτοσυναρμολογούμενα και αυτοοργανωμένα ρομπότ, ενώ το έργο I-SWARM ([78]) κατασκεύασε μικροσκοπικά ρομπότ ($3 \times 3 \times 3$ mm) και προσπάθησε να δημιουργήσει το μεγαλύτερο ρομποτικό σμήνος χρησιμοποιώντας αυτά τα μίνι ρομπότ.

Ορισμένα συστήματα αξιολόγησαν το στοιχείο ετερογένειας των ρομποτικών συστημάτων σμήνους. Παρόμοιο με το έργο swarmanoid, το οποίο είναι ο διάδοχος του

SWARM-BOT και έχει επεκτείνει το έργο του εστιάζοντας σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον. Ο στόχος ήταν να κατασκευαστούν ετερογενή σμήνη.

Το έργο UB-swarm ([180]) κατασκεύασε επίσης ένα σμήνος από διαφορετικά ρομπότ. Επομένως, πιστεύουμε ότι η υλοποίηση των ακόλουθων αναγκών λογισμικού είναι απαραίτητη:

- Ένα λειτουργικό σύστημα
- Πρωτόκολλα επικοινωνίας
- Ένας ευέλικτος, ισχυρός και επεκτάσιμος αλγόριθμος σμήνους
- Πρόσθετες λειτουργίες όπως πλοήγηση, σάρωση και αποφυγή εμποδίων.

Η δημιουργία ρομπότ που μπορούν να λειτουργούν σε φυσικές καταστάσεις είναι ένα κρίσιμο έργο. Επειδή, σε αντίθεση με τους προσομοιωτές και τα δοκιμαστικά περιβάλλοντα, τα φυσικά περιβάλλοντα είναι απρόβλεπτα και υπόκεινται σε αυθόρμητες αλλαγές. Επομένως, τα ρομπότ πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμόζονται σε αυτές τις απρόβλεπτες αλλαγές και να λειτουργούν καλά σε αχαρτογράφητες καταστάσεις.

Είναι ακόμη πιο δύσκολο όταν τα μικρορομπότ σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε περιβάλλοντα στα οποία δεν μπορούν να εισέλθουν οι άνθρωποι, όπως κτίρια που έχουν καταρρεύσει, ραδιενεργά περιβάλλοντα ή το ανθρώπινο σώμα. Τα νανορομπότ είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Πρέπει να είναι σε θέση να εργάζονται, να εξερευνούν και να περιηγούνται στο ανθρώπινο σώμα με τον πιο αποτελεσματικό δυνατό τρόπο, έτσι ώστε η απαιτούμενη εργασία να μπορεί να ολοκληρωθεί χωρίς να προκληθεί βλάβη στο ανθρώπινο σώμα.

Η επικοινωνία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη ρομποτικών συστημάτων σμήνους. Η επικοινωνία στα φυσικά σμήνη είναι ρητή, δηλαδή όχι άμεση. Τα φυσικά σμήνη επικοινωνούν κυρίως μέσω φερομονών, οι οποίες είναι χημικά μόρια που χρησιμοποιούνται για να ειδοποιήσουν άλλα μέλη του σμήνους. Απαιτούνται πολύπλοκοι αλγόριθμοι για την παροχή τέτοιας επικοινωνίας για τη ρομποτική σμήνος.

Οι μελλοντικοί στόχοι θα πρέπει να περιλαμβάνουν την αντιμετώπιση των προβλημάτων υλικού και λογισμικού που περιγράφονται παραπάνω και την ανάπτυξη συστημάτων που μοιάζουν και συμπεριφέρονται όσο το δυνατόν πιο κοντά σε φυσικά σμήνη. Αυτό θα είναι ένα βήμα προς την ανάπτυξη ρομποτικών συστημάτων σμήνους πραγματικού κόσμου που είναι απλά, οικονομικά και αποτελεσματικά.

Από αμνημονεύτων χρόνων, οι επιστήμονες λαχταρούσαν να δημιουργήσουν ρομποτικά συστήματα σμήνους που είναι εντελώς αυτόνομα και ικανά για όλα αυτά τα ζωτικά χαρακτηριστικά. Πολυάριθμες πρωτοβουλίες καταδεικνύουν ότι αυτά τα πρότυπα πληρούνται πιο συχνά αν και όσο εξελίσσεται η τεχνολογία, το πεδίο γίνεται όλο και πιο δύσκολο.

Οι ρυθμίσεις γίνονται πιο περίπλοκες, οι εργασίες γίνονται πιο προκλητικές και το ίδιο και οι απαιτήσεις για την κατασκευή αποτελεσματικών ρομποτικών συστημάτων σμήνους για εφαρμογές πραγματικού κόσμου.

Η πολυπλοκότητα και η δυσκολία των εργασιών που εκτελούν τα ρομπότ πρέπει να αυξηθεί, ενώ πρέπει να αυξηθεί και η αποτελεσματικότητά τους. Λόγω περιορισμών λογισμικού ή υλικού, τα ρομποτικά συστήματα σμήνους που εφαρμόζονται σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου δεν έχουν απόδοση, όπως αποδεικνύεται από την τρέχουσα κατάσταση της ρομποτικής σμήνους. Επομένως, υπάρχει πολλή δουλειά που πρέπει να γίνει στη δημιουργία λογισμικού και υλικού για τη ρομποτική σμήνους.

§3.3 Μελλοντικές Δυνητικές Εφαρμογές

1) Νανορομπότ σε ιατρικές εφαρμογές:

Η νανοτεχνολογία γίνεται μια από τις πιο υποσχόμενες εφαρμογές των ρομπότ σμήνους. Χρησιμοποιούνται για πολλούς σκοπούς, με την ιατρική να είναι ο πιο σημαντικός. Οι επιστήμονες αναζητούν τρόπους για να δημιουργήσουν τεχνολογία νανορομπότ που θα

μπορούσε να εξαλείψει πολλές ασθένειες. Η χρήση αυτών των νανορομπότ για την εξάλειψη του καρκίνου είναι ένας από τους πρωταρχικούς στόχους που έχουν θέσει οι επιστήμονες για τον εαυτό τους. Τα νανορομπότ θα πρέπει να είναι ικανά να πλοηγούνται μέσα στο ανθρώπινο σώμα και να εντοπίζουν άρρωστα κύτταρα.

Η θανάτωση μπορεί να επιτευχθεί απευθείας με διάτρηση στα κύτταρα ([148]) ή μέσω ενός φαρμάκιου που μεταφέρουν τα ρομπότ. Το Ινστιτούτο Max Planck έχει δημιουργήσει νανορομπότ ([149, 150]) με σκοπό τη θεραπεία του καρκίνου. Πρόσφατα, το 2018, δημιούργησαν επίσης νανορομπότ σχεδιασμένα να ταξιδεύουν μέσω του ματιού ([181]). Αυτές οι νανο-έλικες μπορούσαν προηγουμένως να περάσουν μόνο από υγρά ή μοντέλα, αλλά όχι μέσα από ιστούς. Ωστόσο, αυτά τα πρόσφατα σχεδιασμένα νανορομπότ μπορούν να διασχίσουν πραγματικούς ιστούς και να παραδώσουν το απαραίτητο φάρμακο ακριβώς εκεί που χρειάζεται στο ανθρώπινο σώμα. Αυτές οι έννοιες και οι καινοτομίες συνιστούν μια επαναστατική ανακάλυψη στον τομέα της ιατρικής.

Ωστόσο, μέχρι στιγμής δεν έχουν γίνει δοκιμές σε ανθρώπους. Εκτός από τον HIV, η νανοτεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θεραπεία μιας ποικιλίας άλλων ανίατων ή αναποτελεσματικών ασθενειών. Δεν υπάρχει διαθέσιμη ειδική θεραπεία για τη θεραπεία του HIV. Στους ασθενείς χορηγούνται φάρμακα που μπορούν να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής τους αλλά δεν μπορούν να εξαλείψουν εντελώς τη μόλυνση. Τα νανορομπότ είναι ικανά να καταστρέψουν τα σωματίδια του HIV. Τα νανορομπότ μπορούν να κατασκευαστούν με την ικανότητα να εντοπίζουν και να καταστρέφουν σωματίδια HIV που είναι περίπου 60 φορές μικρότερα από τα ερυθρά αιμοσφαίρια. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Ο σχεδιασμός τέτοιων νανορομπότ μπορεί να είναι δαπανηρός και δύσκολος. Επιπλέον, πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβείς και ακριβείς, ώστε να στοχεύουν μόνο άρρωστα κύτταρα και όχι υγιή, χωρίς να προξενούν καμία βλάβη στο ανθρώπινο σώμα.

2) Ένοπλες Δυνάμεις και Ναυτικό:

Ο στρατός χρησιμοποιεί ήδη συστήματα ρομποτικής σμήνος για μια ποικιλία αποστολών.

Ωστόσο, αυτά τα ρομπότ χρησιμοποιούνται κυρίως για δραστηριότητες που είτε είναι αδύνατο να εκτελέσουν οι άνθρωποι είτε είναι εξαιρετικά απαιτητικές. Για παράδειγμα, η μεταφορά μεγάλων εμπορευμάτων, η απόρριψη ρύπων και η εξερεύνηση περιοχών όπου οι άνθρωποι μπορεί να μην έχουν πρόσβαση. Η επόμενη φάση μπορεί να είναι η χρήση σμηνών ρομπότ ως στρατιωτικών δυνάμεων. Αυτό συνεπάγεται την αντικατάσταση του ανθρώπινου στρατού με έναν στρατό από ρομπότ σμήνους. Ήδη, η ανάπτυξη τέτοιων ρομπότ έχει ξεκινήσει.

Η DARPA επιχειρεί ήδη να δημιουργήσει οπλισμένα σμήνη ρομπότ που μπορούν να αντικαταστήσουν τους ανθρώπους στρατιώτες στο στρατό [(182), (183)].

Όχι μόνο ο στρατός, αλλά ακόμα και το ναυτικό, μπορεί να χρησιμοποιήσει τέτοια σμήνη. Για παράδειγμα, τα ρομπότ μπορούν να συλλέγουν υποθαλάσσια δεδομένα. Αυτά τα ρομπότ θα πρέπει να είναι αυτόνομα και ικανά να αλληλεπιδρούν με άλλα μέλη του σμήνους, επομένως να εκτελούν καθήκοντα μέσω της νοημοσύνης και της συμπεριφοράς του σμήνους τους.

Η παρακολούθηση, το κυνήγι ορισμένων αντικειμένων ή απλώς η θέαση του υποβρύχιου περιβάλλοντος είναι παραδείγματα πιθανών εργασιών. Μια ουσιαστική πτυχή αυτής της έρευνας θα ήταν η ανάπτυξη μιας αποτελεσματικής μεθόδου επικοινωνίας μεταξύ ρομπότ σε ένα υποβρύχιο περιβάλλον.

Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να λάβετε υπόψη είναι η τιμή. Η επεκτασιμότητα, η προσαρμοστικότητα και η ευρωστία από μόνες τους δεν θα επαρκούσαν για την ανάπτυξη τέτοιων πολύπλοκων συστημάτων.

3) Αντικατάσταση Εργασίας

Τα ρομποτικά σμήνη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντικαταστήσουν την ανθρώπινη εργασία. Ως εκ τούτου, τα ρομποτικά σμήνη μπορούν να αναπτυχθούν σε μέρη όπως το λιανικό εμπόριο, τα ξενοδοχεία και οι επιχειρήσεις αντί για ανθρώπινη εργασία.

Ορισμένες πρωτοβουλίες βιομηχανικής ρομποτικής σμήνος είναι ήδη σε λειτουργία ([147], [146], [145]), όπου τα ρομπότ είναι υπεύθυνα για τη συσκευασία των ειδών παντοπωλείου, τη μεταφορά προϊόντων και την ταξινόμηση αντικειμένων. Ωστόσο, είναι σημαντικό αυτά τα ρομπότ να διαθέτουν Τεχνητή Νοημοσύνη. μόνο τότε μπορούν να αντικατασταθούν οι άνθρωποι από αυτοματισμό. Με τη βοήθεια ρομπότ, οι άνθρωποι μπορούν να εξαιρεθούν από πολλά διαφορετικά επαγγέλματα ή να μειωθεί η εμπλοκή τους.

Τα επαγγέλματα δεν χρειάζεται να είναι δύσκολο για τα ρομπότ να τα αντικαταστήσουν, καθώς ακόμη και απλές εργασίες μπορούν να αυτοματοποιηθούν, μειώνοντας τα εργατικά έξοδα. Για παράδειγμα, ρομποτικά σμήνη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν στον καθαρισμό σε ένα εργοστάσιο ή κατάστημα, να βοηθήσουν τους πελάτες να μεταφέρουν βαριά προϊόντα στα αυτοκίνητά τους, να βοηθήσουν στην προετοιμασία φαγητού ή ποτών ή να παραδώσουν φαγητό σε τραπέζια σε ένα εστιατόριο. Τέτοιες απλές δραστηριότητες μπορούν να επιτευχθούν με σμήνη φθηνών ρομπότ με απλά σχέδια.

4) Φίδια Robots για πολυάριθμες εφαρμογές:

Τα συστήματα επιτήρησης μπορούν να ενσωματώσουν αποτελεσματικά τη ρομποτική σμήνους. Τα ρομπότ Σμήνους μπορούν να παρακολουθούν περιοχές που είναι άγνωστες, πολύ επικίνδυνες ή απρόσιτες για τον άνθρωπο. Τα μεμονωμένα ρομπότ είναι αναποτελεσματικά για τέτοιες δραστηριότητες για διάφορους λόγους, όπως η περιοχή που είναι πολύ μεγάλη για να καλυφθεί από ένα μόνο ρομπότ.

Επίσης, τα σταθερά ρομπότ δεν είναι η καλύτερη επιλογή. Τα κινητά ρομπότ απαιτούνται για να αποκτήσουν ακριβή αναπαράσταση του περιβάλλοντος. Για αυτό το έργο, τα σμήνη από ρομπότ ψιδιών μπορεί να είναι μια εξαιρετικά αποτελεσματική επιλογή.

Υπάρχουν εφαρμογές για τα ρομπότ ψιδιών, συμπεριλαμβανομένης της ιατρικής, της βιομηχανίας και της κατασκευής. Η επιτήρηση είναι μια από τις πιο κρίσιμες ευθύνες τους.

Τα ψίδια ρομπότ είναι αυτόνομα μηχανήματα που μπορούν να έχουν πρόσβαση σε τοποθεσίες απρόσιτες για τον άνθρωπο. Για παράδειγμα, αναζήτηση επιζώντων σε μια κατασκευή που έχει καταρρεύσει ή σε ένα επικίνδυνο περιβάλλον. Λόγω του λεπτού τους σώματος και των πολυάριθμων αρθρώσεων τους, είναι εξαιρετικά εύκαμπτοι και μπορούν να κολυπήσουν και να περάσουν από σχετικά στενούς χώρους. Αυτά τα ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποστολές διάσωσης και να ενισχύσουν την πιθανότητα επιτυχίας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κατασκοπευτικές κάμερες, για συμβατική ανοιχτή χειρουργική, υποβρύχια επιτήρηση, αναρρίχηση σε βουνά ή κτίρια και για διάφορους άλλους σκοπούς.

5) Ρομπότ στο Διάστημα:

Από εκατοντάδες έως χιλιάδες χρόνια πριν, το ηλιακό μας σύστημα έχει ερευνηθεί. Η Σελήνη έχει επισκεφθεί άνθρωποι, αλλά απομένουν πολλά να ανακαλυφθούν για αυτήν και για το υπόλοιπο ηλιακό μας σύστημα, το οποίο αποτελείται από αρκετούς πλανήτες, αστεροειδείς και αστέρια.

Η εξερεύνηση του Άρη ήταν ένας στόχος εδώ και πολλά χρόνια. Η NASA ήθελε να στείλει ανθρώπους να μελετήσουν τον πλανήτη εδώ και πολύ καιρό, αλλά προς το παρόν δεν υπάρχει κανένα έργο που να προσδιορίζει πότε θα συμβεί αυτό. Η NASA θα μπορούσε να είχε μεταφέρει ανθρώπους στον Άρη πριν από δεκαετίες, σύμφωνα με τον πρώην διοικητή του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού Κρις Χάντφιλντ, όπως ακριβώς μετέφερε ανθρώπους στη Σελήνη.

Αλλά δεν συνέβη αφού η πιθανότητα θανάτου στον Άρη ήταν εξαιρετικά μεγάλη ([184]). Αυτό μπορεί να μας οδηγήσει στο να σχεδιάσουμε πρωτοβουλίες στις οποίες μόνο τα ρομπότ εκτελούν καθήκοντα εξερεύνησης διαστήματος ή πλανητών.

Η πλειονότητα των εργασιών εξερεύνησης του διαστήματος σε αποστολές επανδρωμένης σελήνης εκτελούνται ήδη από ρομπότ. Μπορούμε να εξαλείψουμε την ανάγκη για αστροναύτες και να βάλουμε τα σμήνη ρομπότ να κάνουν τις εργασίες εξ ολοκλήρου. Αυτό θα ήταν μια λιγότερο δαπανηρή και ακίνδυνη προσπάθεια για την ανθρώπινη ζωή. Υπήρξαν πολλοί θάνατοι και τραυματισμοί αστροναυτών στο διάστημα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, της εκτόξευσης και της ατμοσφαιρικής επανεισόδου.

Το 1967, η NASA γνώρισε το πρώτο της ατύχημα, γνωστό ως καταστροφή του Apollo 1, στο οποίο ολόκληρο το πλήρωμα χάθηκε λόγω πυρκαγιάς στο πιλοτήριο. Για τις διαστημικές αποστολές, η έρευνα και η ανάπτυξη της ρομποτικής σμήνους μπορεί να είναι μια επαναστατική ανακάλυψη. Η εξερεύνηση πλανητών είναι δυνατή με εκατοντάδες έως χιλιάδες χαμηλού κόστους, απλά σχεδιασμένα ρομποτικά σμήνη. Αυτά τα ρομπότ θα πρέπει να κατασκευαστούν ώστε να είναι συνεργάσιμα και ικανά να ανιχνεύουν διαφορετικά αέρια του περιβάλλοντος σε αυτούς τους πλανήτες, να αναζητούν προμήθειες νερού και τροφής, να τραβούν φωτογραφίες και ταινίες, να συλλέγουν δείγματα και να μεταδίδουν αυτά τα δεδομένα πίσω στη Γη.

6) Επιθεώρηση:

Στον βιομηχανικό τομέα, τα ρομπότ σμήνος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επιθεωρήσεις. Μικρές έως μεγάλες βιομηχανικές κατασκευές, όπως σωλήνες, τουρμπίνες, δεξαμενές, λέβητες και πλοία, απαιτούν επιθεωρήσεις ρουτίνας. Αυτοί οι έλεγχοι μπορεί να είναι επικίνδυνοι και ακατάστατοι. Η επιτυχής επιθεώρηση δεν είναι πάντα δυνατή επειδή οι άνθρωποι μπορεί να μην μπορούν να φτάσουν σε όλα τα εξαρτήματα.

Εδώ, η ρομποτική σμήνος μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο. Με την απομάκρυνση των ανθρώπων, τόσο οι πόροι όσο και το κόστος θα μειωθούν και η πτυχή του κινδύνου θα εξαλειφθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Το πεδίο μελέτης γνωστό ως «ρομποτική σμήνους» επικεντρώνεται στην ανάπτυξη σμηνών ρομπότ που είναι τόσο βασικά όσο και αυτόχειρες. Έχουν την ικανότητα να οργανώνονται και να λειτουργούν αυτόνομα. Ο σχεδιασμός τέτοιων συντονισμένων ομάδων ρομπότ είναι πρόκληση. Οι εκτιμήσεις κόστους είναι επίσης κρίσιμες σε όλη τη φάση σχεδιασμού.

Η συμπεριφορά σμήνους και η νοημοσύνη σμήνους αναφέρονται στη συλλογική συμπεριφορά και νοημοσύνη μιας ομάδας ρομπότ που συνεργάζονται για να ολοκληρώσουν μια δύσκολη δουλειά. Απαιτούνται πολύπλοκοι αλγόριθμοι για να επιτευχθούν οι επιθυμητές συμπεριφορές σμήνους και πρέπει να ληφθεί υπόψη η επεκτασιμότητα, η ευελιξία και η ανθεκτικότητα.

Τα ρομπότ σμήνους έχουν μελετηθεί από τα τέλη του 1900, με τις εργασίες ανάπτυξης να ξεκινούν στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Από εικονικά περιβάλλοντα έως πραγματικές υλοποιήσεις, υπάρχει μεγάλη εργασία έρευνας και ανάπτυξης σε κάθε πτυχή αυτής της ταχέως αναπτυσσόμενης βιομηχανίας. Αυτή η μελέτη κάλυψε την ιστορία της ρομποτικής σμήνους και την τρέχουσα κατάσταση ανάπτυξής της. Από τα κύρια χαρακτηριστικά της μέχρι τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και την κατηγοριοποίησή της, η έννοια της ρομποτικής σμήνος διατυπώνεται πλήρως.

Οι πρώιμοι αλγόριθμοι των ρομποτικών σμηνών αξιολογήθηκαν κυρίως σε περιβάλλοντα προσομοίωσης, ωστόσο μερικοί ακολούθησαν τον ρυθμό τους χρησιμοποιώντας φυσικά ρομπότ. Εξετάζονται διάφορα πλαίσια προσομοίωσης και τρέχοντα ή ολοκληρωμένα έργα.

Η ρομποτική σμήνους έχει αναπτυχθεί πρόσφατα για εφαρμογές στην πραγματική ζωή σε πολλούς τομείς, όπως η γεωργία, το σπίτι και η ιατρική. Αυτές οι πρακτικές συνέπειες αναλύονται σε αυτή τη μελέτη. Αυτό το έγγραφο καλύπτει επίσης τη πιθανή μελλοντική ανάπτυξη της ρομποτικής σμήνους παρέχοντας μια περίληψη πολλών βασικών θεμάτων και εφαρμογών. Η θεμελιώδης έμπνευση για τον τομέα της ρομποτικής σμήνους είναι η ανάπτυξη συστημάτων που μοιάζουν και λειτουργούν σαν φυσικά σμήνη, ωστόσο, παρά τον τεράστιο όγκο έρευνας που έχει γίνει σε αυτόν τον τομέα, υπάρχει ακόμη πολύς δρόμος.

Παρόλο που έχουν ξεκινήσει οι πραγματικές δοκιμές τέτοιων συστημάτων, απαιτείται πολύ περισσότερη έρευνα για να διασφαλιστεί ότι δεν θα παραβλεφθεί κανένα τέτοιο σημείο. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας όχι μόνο για την αποτελεσματικότητα των συστημάτων αλλά και για την ασφάλεια των ανθρώπων, καθώς τέτοια συστήματα έχουν αναπτυχθεί τελικά για να βοηθήσουν τους τελευταίους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. C. Barca and Y. A. Sekercioglu, “Swarm robotics reviewed,” *Robotica*, vol. 31, no. 3, pp. 345–359, 2013.
- [2] J. Sokol, “Army Ants Act Like Algorithms to Make Deliveries More Efficient,” <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/army-ants-act-algorithms-make-deliveries-more-efficient-180957367/> , 2015.
- [3] J. Heimbuch, “Nature Blows My Mind! Miraculous Termite Mounds”, <https://www.treehugger.com/natural-sciences/nature-blows-my-mind-miracles-termite-mounds.html>, 2012
- [4] “Why and how bees swarm,” <https://www.perfectbee.com/learn-about-bees/the-life-of-bees/how-and-why-bees-swarm>
- [5] “Birds of a feather flock together to confuse potential predators,” <https://phys.org/news/2017-01-birds-feather-flock-potential-predators.html>
- [6] “Human swarming and the future of collective intelligence,” <https://www.singularityweblog.com/human-swarming-and-the-future-of-collective-intelligence/>
- [7] “Locust swarm,” <https://www.independent.co.uk/news/world/africa/madagascar-locust-crisis-in-pictures-9456788.html>.
- [8] G. Beni, “The concept of cellular robotic system,” in *Proceedings IEEE International Symposium on Intelligent Control* 1988, Aug 1988, pp. 57–62.
- [9] T. Fukuda and S. Nakagawa, “Approach to the dynamically reconfigurable robotic system,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 55–72, 1988.
- [10] G. Beni and J. Wang, “Swarm intelligence (proceedings seventh annual meeting of the robotics society of japan),” 1989.

- [11] C. R. Kube and H. Zhang, “Collective robotics: From social insects to robots,” *Adaptive behavior*, vol. 2, no. 2, pp. 189–218, 1993.
- [12] G. Dudek, M. Jenkin, E. Milios, and D. Wilkes, “A taxonomy for swarm robots,” in *Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS ’93)*, vol. 1, July 1993, pp. 441–447 vol.1.
- [13] M. J. Mataric, “Designing emergent behaviors: From local interactions to collective intelligence,” in *Proceedings of the Second International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, 1993, pp. 432–441.
- [15] J.-L. Deneubourg, S. Goss, N. Franks, A. Sendova-Franks, C. Detrain and L. Chrétien, “The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots,” in *Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior on from animals to animats*, 1991, pp. 356–363. [14] M. J. Mataric et al., “The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots,” in *Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior on From animals to animates*, 1991, pp. 356–363.
- [16] D. W. Gage, “Command control for many-robot systems,” *Naval Command Control and Ocean Surveillance Center Rdt and E Div San Diego CA*, Tech. Rep., 1992.
- [17] C. R. Kube and E. Bonabeau, “Cooperative transport by ants and robots,” *Robotics and autonomous systems*, vol. 30, no. 1-2, pp. 85–101, 2000.
- [18] R. Beckers, O. Holland, and J.-L. Deneubourg, “From local actions to global tasks: Stigmergy and collective robotics,” in *Artificial life IV*, vol. 181, 1994, p. 189.
- [19] O. Holland and C. Melhuish, “Stigmergy, self-organization, and sorting in collective robotics,” *Artificial life*, vol. 5, no. 2, pp. 173–202, 1999.
- [20] P.-P. Grasse, “La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes* sp. la theorie de la stigmergie: Essai

d'interpretation du comportement des termites constructeurs,” *Insectes sociaux*, vol. 6, no. 1, pp. 41–80, 1959.

- [21] G. Beni, “From swarm intelligence to swarm robotics,” in *International Workshop on Swarm Robotics*. Springer, 2004, pp. 1–9.
- [22] E. Sahin, “Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application”, in *International workshop on swarm robotics*. Springer, 2004, pp. 10–20.
- [23] R. C. Eberhart, Y. Shi, and J. Kennedy, “Swarm intelligence”, Elsevier, 2001.
- [24] D. B. Kearns, “A field guide to bacterial swarming motility,” *Nature Reviews Microbiology*, vol. 8, no. 9, p. 634, 2010.
- [25] S. T. Kazadi, “Swarm engineering”, Ph.D. dissertation, California Institute of Technology, 2000.
- [26] G. M. Whitesides and B. Grzybowski, “Self-assembly at all scales,” *Science*, vol. 295, no. 5564, pp. 2418–2421, 2002.
- [27] B. Khaldi and F. Cherif, “An overview of swarm robotics: Swarm intelligence applied to multi-robotics,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 126, no. 2, 2015.
- [28] Y. Tan, “Swarm robotics: collective behavior inspired by nature,” *J.Comput Sci Syst Biol*, vol. 6, p. e106, 2013.
- [29] Y. Tan and Z.-y. Zheng, “Research advance in swarm robotics,” *Defence Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 18–39, 2013.
- [30] M. Dorigo, “Swarm-bot: An experiment in swarm robotics,” in *Swarm Intelligence Symposium, 2005. SIS 2005. Proceedings 2005 IEEE*. IEEE, 2005, pp. 192–200.
- [31] M. Dorigo, E. Tuci, V. Trianni, R. Gro, S. Nouyan, C. Ampatzis, T. Labella, R. O’Grady, M. Bonani, and F. Mondada, *SWARM-BOT: Design and implementation of colonies of self-assembling robots*, 01 2006, pp. 103–135.

- [32] V. Trianni, E. Tuci, C. Ampatzis, and M. Dorigo, “Evolutionary swarm robotics: A theoretical and methodological itinerary from individual neuro-controllers to collective behaviours,” *The horizons of evolutionary robotics*, vol. 153, 2014.
- [33] P. M. Maxim, W. M. Spears, and D. F. Spears, “Robotic chain formations,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 42, no. 22, pp. 19–24, 2009.
- [34] M. Dorigo, V. Trianni, E. Sahin, R. Groß, T. H. Labella, G. Baldassarre, S. Nolfi, J.-L. Deneubourg, F. Mondada, D. Floreano et al., “Evolving self-organizing behaviors for a swarm-bot,” *Autonomous Robots*, vol. 17, no. 2-3, pp. 223–245, 2004.
- [35] O. Soysal, E. Bahceci, and E. Sahin, “Aggregation in swarm robotic systems: Evolution and probabilistic control,” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 199–225, 2007.
- [36] O. Soysal and E. Sahin, “Probabilistic aggregation strategies in swarm robotic systems,” in *Swarm Intelligence Symposium, 2005. SIS 2005. Proceedings 2005 IEEE*. IEEE, 2005, pp. 325–332.
- [37] E. Ferrante, A. E. Turgut, C. Huepe, A. Stranieri, C. Pinciroli, and M. Dorigo, “Self-organized flocking with a mobile robot swarm: a novel motion control method,” *Adaptive Behavior*, vol. 20, no. 6, pp. 460–477, 2012.
- [38] A. T. Hayes and P. Dormiani-Tabatabaei, “Self-organized flocking with agent failure: Off-line optimization and demonstration with real robots,” in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA’02. IEEE International Conference on*, vol. 4. IEEE, 2002, pp. 3900–3905.
- [39] M. Masar, “A biologically inspired swarm robot coordination algorithm for exploration and surveillance,” in *2013 IEEE 17th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, June 2013, pp. 271–275.
- [40] W. Liu and A. Winfield, “Modeling and optimization of adaptive foraging in swarm robotic systems,” *I. J. Robotic Res.*, vol. 29, pp. 1743–1760, 12 2010.

- [41] S. Nouyan, A. Campo, and M. Dorigo, “Path formation in a robotswarm,” *Swarm Intelligence*, vol. 2, no. 1, pp. 1–23, 2008.
- [42] F. Ducatelle, G. A. Di Caro, C. Pinciroli, F. Mondada, and L. Gambardella, “Communication assisted navigation in robotic swarms: self-organization and cooperation,” in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 4981–4988.
- [43] R. Groß and M. Dorigo, “Evolution of solitary and group transport behaviors for autonomous robots capable of self-assembling,” *Adaptive Behavior*, vol. 16, no. 5, pp. 285–305, 2008.
- [44] “A swarm of robots assembled to detect effects of dark energy,” <https://astronomynow.com/2018/10/27/using-a-swarm-of-robots-to-detect-effects-of-dark-energy/>
- [45] A. Ronzhin, G. Rigoll, and R. Meshcheryakov, *Interactive Collaborative Robotics: Third International Conference, ICR 2018, Leipzig, Germany, September 18–22, 2018, Proceedings*. Springer, 2018, vol. 11097.
- [46] P. Maes, “Artificial life meets entertainment: lifelike autonomous agents,” *Communications of the ACM*, vol. 38, no. 11, pp. 108–114, 1995.
- [47] G. F. Coulouris, J. Dollimore, and T. Kindberg, *Distributed systems: concepts and design*. pearson education, 2005.
- [48] Z. Shi, J. Tu, Q. Zhang, L. Liu, and J. Wei, “A survey of swarm robotics system,” in *International Conference in Swarm Intelligence*. Springer, 2012, pp. 564–572.
- [49] S. Shakkottai, T. S. Rappaport, and P. C. Karlsson, “Cross-layer design for wireless networks,” *IEEE Communications magazine*, vol. 41, no. 10, pp. 74–80, 2003.
- [50] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” *IEEE Communications magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, 2002.

- [51] M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari, and M. Dorigo, “Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective,” *Swarm Intelligence*, vol. 7, no. 1, pp. 1–41, 2013.
- [52] L. Bayindir and E. Sahin, “A review of studies in swarm robotics,” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 115–147, 2007.
- [53] E. Sahin, S. Girgin, L. Bayindir, and A. E. Turgut, “Swarm robotics,” in *Swarm intelligence*. Springer, 2008, pp. 87–100.
- [54] A. Chakraborty and A. Kar, *Swarm Intelligence: A Review of Algorithms*, 03 2017, pp. 475–494.
- [55] R. Eberhart, P. Simpson, and R. Dobbins, *Computational intelligence PC tools*. Academic Press Professional, Inc., 1996.
- [56] R. Eberhart and J. Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory,” in *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS’95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*. IEEE, 1995, pp. 39–43.
- [57] J. Kennedy, “The particle swarm: social adaptation of knowledge,” in *Evolutionary Computation, 1997., IEEE International Conference on*. IEEE, 1997, pp. 303–308.
- [58] W. Liu, A. F. Winfield, and J. Sa, “Modelling swarm robotic systems: A case study in collective foraging,” *Towards Autonomous Robotic Systems*, pp. 25–32, 2007.
- [59] W. Liu, A. F. Winfield, J. Sa, J. Chen, and L. Dou, “Towards energy optimization: Emergent task allocation in a swarm of foraging robots,” *Adaptive behavior*, vol. 15, no. 3, pp. 289–305, 2007.
- [60] T. H. Labella, M. Dorigo, and J.-L. Deneubourg, “Division of labor in a group of robots inspired by ants’ foraging behavior,” *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*, vol. 1, no. 1, pp. 4–25, 2006.

- [61] W. M. Spears, D. F. Spears, J. C. Hamann, and R. Heil, “Distributed, physics-based control of swarms of vehicles,” *Autonomous Robots*, vol. 17, no. 2-3, pp. 137–162, 2004.
- [62] S. Camazine, N. R. Franks, J. Sneyd, E. Bonabeau, J.-L. Deneubourg, and G. Theraula, *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2001.
- [63] I. Navarro and F. Mat’ia, “A survey of collective movement of mobile robots,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 1, p. 73, 2013.
- [64] M. Schwager, J. McLurkin, J.-J. E. Slotine, and D. Rus, “From theory to practice: Distributed coverage control experiments with groups of robots,” in *Experimental Robotics*. Springer, 2009, pp. 127–136.
- [65] A. T. Hayes, A. Martinoli, and R. M. Goodman, “Swarm robotic odor localization,” in *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180)*, vol. 2. IEEE, 2001, pp. 1073–1078.
- [66] A. Brutschy, G. Pini, C. Pinciroli, M. Birattari, and M. Dorigo, “Self- organized task allocation to sequentially interdependent tasks in swarm robotics,” *Autonomous agents and multi-agent systems*, vol. 28, no. 1, pp. 101–125, 2014.
- [67] M. Dorigo, E. Tuci, R. Groß, V. Trianni, T. H. Labella, S. Nouyan, C. Ampatzis, J.-L. Deneubourg, G. Baldassarre, S. Nolfi et al., “The swarm-bots project,” in *International Workshop on Swarm Robotics*. Springer, 2004, pp. 31–44.
- [68] J. E. Bluman, C.-K. Kang, D. B. Landrum, F. Fahimi, and B. Mesmer, “Marsbee-can a bee fly on mars?” in *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2017, p. 0328.
- [69] A. E. Turgut, F. Gokce, H. Celikkanat, L. Bayindir, and E. Sahin, “Kobot: A mobile robot designed specifically for swarm robotics research,” *Middle East Technical University, Ankara, Turkey, METU- CENG-TR Tech. Rep*, vol. 5, no. 2007, 2007.

- [70] E. Sahin, T. H. Labella, V. Trianni, J.-L. Deneubourg, P. Rasse, D. Floreano, L. Gambardella, F. Mondada, S. Nolfi, and M. Dorigo, “Swarm-bot: Pattern formation in a swarm of self-assembling mobile robots,” in IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 4. IEEE, 2002, pp. 6–pp.
- [71] F. Mondada, A. Guignard, M. Bonani, D. Bar, M. Lauria, and D. Floreano, “Swarm-bot: From concept to implementation,” in Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No. 03CH37453), vol. 2. IEEE, 2003, pp. 1626–1631.
- [72] F. Mondada, G. C. Pettinaro, A. Guignard, I. W. Kwee, D. Floreano, J.-L. Deneubourg, S. Nolfi, L. M. Gambardella, and M. Dorigo, “Swarm-bot: A new distributed robotic concept,” Autonomous robots, vol. 17, no. 2-3, pp. 193–221, 2004.
- [73] M. Dorigo, “Swarm-bots and swarmanoid: Two experiments in embodied swarm intelligence,” in Web intelligence, 2009, pp. 2–3.
- [74] C. Pinciroli, “The swarmanoid simulator,” Bruxelles: Universit´ de Bruxelles, 2007.
- [75] F. Ducatelle, G. A. Di Caro, C. Pinciroli, and L. M. Gambardella, “Self-organized cooperation between robotic swarms,” Swarm Intelligence, vol. 5, no. 2, p. 73, 2011.
- [76] M. Dorigo, D. Floreano, L. M. Gambardella, F. Mondada, S. Nolfi, T. Baaboura, M. Birattari, M. Bonani, M. Brambilla, A. Brutschy et al., “Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms,” IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 20, no. 4, pp. 60–71, 2013.
- [77] A. Decugniere, B. Poulain, A. Campo, C. Pinciroli, B. Tartini, M. Osee, M. Dorigo, and M. Birattari, “The cart-bot and the cooperative transport of multiple objects in the swarmanoid project,” Technical Report TR/IRIDIA/2008–014 IRIDIA, Universite Libre de Bruxelles, 2008.

- [78] H. Woern, M. Szymanski, and J. Seyfried, “The i-swarm project,” in ROMAN 2006- The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. IEEE, 2006, pp. 492–496.
- [79] J. Seyfried, M. Szymanski, N. Bender, R. Estaorn, “The i-swarm project: Intelligent small world autonomous robots for micro-manipulation,” in International Workshop on Swarm Robotics. Springer, 2004, pp. 70–83.
- [80] A. Purohit, F. Mokaya, and P. Zhang, “Demo abstract: Collaborative indoor sensing with the sensorfly aerial sensor network,” in 2012 ACM/IEEE 11th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). IEEE, 2012, pp. 145–146.
- [81] A. Purohit, Z. Sun, F. Mokaya, and P. Zhang, “Sensorfly: Controlled- mobile sensing platform for indoor emergency response applications,” in Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2011 10th International Conference on. IEEE, 2011, pp. 223–234.
- [82] M. Rubenstein, C. Ahler, and R. Nagpal, “Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors,” in Robotics and Automation ee, J. Sharpe et al., “Kilombo: a kilobot simulator to enable effective research in swarm robotics,” arXiv preprint arXiv:1511.04285, 2015.
- [83] G. Valentini, A. Antoun, M. Trabattoni, B. Wiandt, Y. Tamura, E. Hocquard, V. Trianni, and M. Dorigo, “Kilogrid: a novel experimental environment for the kilobot robot,” Swarm Intelligence, vol. 12, no. 3, pp. 245–266, 2018.
- [84] F. Jansson, M. Hartley, M. Hinsch, I. Slavkov, N. Carranza, T. S.Olsson, R. M. Dries, J. H. Gronqvist, A. F. Maree, J. Sharpe et al., “Kilombo: a kilobot simulator to enable effective research in swarm robotics,” arXiv preprint arXiv:1511.04285, 2015.

- [85] Y. K. Lopes, A. B. Leal, T. J. Dodd, and R. Groß, “Application of supervisory control theory to swarms of e-puck and kilobot robots,” in International Conference on Swarm Intelligence. Springer, 2014, pp. 62–73.
- [86] M. Rubenstein and R. Nagpal, “Kilobot: A robotic module for demonstrating behaviors in a large scale (2^{10} units) collective.” Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
- [87] A. R. Cheraghi, K. Actun, S. Shahzad, and K. Graffi, “Swarm-sim: A 2d & 3d simulation core for swarm agents,” in 3rd Int. Conf. of Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE 2020), 2020.
- [88] A. R. Cheraghi and U. Duesseldorf. (2020) Swarm-sim. [Online]. Available: <https://gitlab.cs.uni-duesseldorf.de/cheraghi/swarm-sim>
- [89] A. R. Cheraghi, G. Wunderlich, and K. Graffi, “General coating of arbitrary objects using robot swarms,” in 2020 5th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). IEEE, 2020, pp. 59–67.
- [90] A. R. Cheraghi and K. Graffi, “A leader based coating algorithm for simple and cave shaped objects with robot swarms,” in 2020 5th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). IEEE, 2020, pp. 43–51.
- [91] A. R. Cheraghi, A. B. Janete, and K. Graffi, “Robot swarm flocking on a 2d triangular graph,” in 2020 5th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). IEEE, 2020, pp. 154–162.
- [92] A. R. Cheraghi, F. S. Vila, and K. Graffi, “Phototactic movement of battery-powered and self-charging robot swarms,” in 2020 5th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). IEEE, 2020, pp. 73–79.
- [93] A. R. Cheraghi, J. Peters, and K. Graffi, “Prevention of Ant Mills in Pheromone-Based Search Algorithm for Robot Swarms,” in Submitted to 3rd Int. Conf. of Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE’20), 2020.

- [94] A. R. Cheraghi, J. Zenz, and K. Graffi, “Opportunistic network behavior in a swarm: Passing messages to destination,” in 2020 5th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). IEEE, 2020, pp. 138–144.
- [95] K. DeMarco, E. Squires, M. Day, and C. Pippin, “Simulating collaborative robots in a massive multi-agent game environment (scrimmage),” in Distributed Autonomous Robotic Systems. Springer, 2019, pp. 283–297.
- [96] R. Vaughan, “Massively multi-robot simulation in stage,” Swarm intelligence, vol. 2, no. 2-4, pp. 189–208, 2008.
- [97] “Scrimmage,” <https://www.scrimmagesim.org>, 2018
- [98] “Robot virtual worlds,” <http://www.robotvirtualworlds.com>
- [99] M. Olivier, “Cyberbotics ltd-webotstm: Professional mobile robot simulation,” International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 1, no. 1, pp. 40–43, 2004.
- [100] “Open dynamics engine,” <http://www.ode.org>
- [101] A. R. Cheraghi, A. Abdelgalil, and K. Graffi, “Universal 2-dimensional terrain marking for autonomous robot swarms,” in 2020 5th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS). IEEE, 2020, pp. 24–32.
- [102] “Brian gerkey’s website,” <https://brian.gerkey.org>
- [103] R. T. Vaughan and B. P. Gerkey, “Reusable robot software and the player/stage project,” in Software Engineering for Experimental Robotics. Springer, 2007, pp. 267–289.
- [104] B. P. Gerkey, R. T. Vaughan, K. Stoy, A. Howard, G. S. Sukhatme, and M. J. Mataric, “Most valuable player: A robot device server for distributed control,” in Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180), vol. 3. IEEE, 2001, pp. 1226–1231.

- [105] B. Gerkey, R. T. Vaughan, and A. Howard, “The player/stage project: Tools for multi-robot and distributed sensor systems,” in Proceedings of the 11th international conference on advanced robotics, vol. 1, 2003, pp. 317–323.
- [106] “Open robotics,” <https://www.openrobotics.org>
- [107] “Robot operating system,” <http://www.ros.org>
- [108] J. Meyer, A. Sendobry, S. Kohlbrecher, U. Klingauf, and O. Von Stryk, “Comprehensive simulation of quadrotor uavs using ros and gazebo,” in International conference on simulation, modeling, and programming for autonomous robots. Springer, 2012, pp. 400–411.
- [109] N. Koenig and A. Howard, “Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator,” in 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566), vol. 3. IEEE, 2004, pp. 2149–2154.
- [110] “Robomatter incorporated,” <http://www.robomatter.com>
- [111] “Robotc,” <http://www.robotc.net>
- [112] “Georgia tech’s mobile robot laboratory,” <https://www.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/>
- [113] T. Balch, “Teambots software and documentation,” Available through the World-Wide Web at <http://www.teambots.org>, 2001.
- [114] —, “The teambots environment for multi-robot systems development,” Working notes of Tutorial on Mobile Robot Programming Paradigms, ICRA, 2002.
- [115] —, “Behavioral diversity in learning robot teams,” Georgia Institute of Technology, Tech. Rep., 1998.
- [116] “V-rep,” <http://www.coppeliarobotics.com>
- [117] M. Freese, S. Singh, F. Ozaki, and N. Matsuhira, “Virtual robot experimentation platform v-rep: A versatile 3d robot simulator,” in International Conference on

- Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. Springer, 2010, pp. 51–62.
- [118] M. A. Olivares-Mendez, S. Kannan, and H. Voos, “Vision based fuzzy control autonomous landing with UAVs: From v-rep to real experiments,” in 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). IEEE, 2015, pp. 14–21.
- [119] E. Peralta, E. Fabregas, G. Farias, H. Vargas, and S. Dormido, “Development of a khepera iv library for the v-rep simulator,” IFAC- PapersOnLine, vol. 49, no. 6, pp. 81–86, 2016.
- [120] E. Rohmer, S. P. Singh, and M. Freese, “V-rep: A versatile and scalable robot simulation framework,” in Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2013, pp. 1321–1326.
- [121] S. Magnenat, P. Retornaz, M. Bonani, V. Longchamp, and F. Mondada, “Aseba: A modular architecture for event-based control of complex robots,” IEEE/ASME transactions on mechatronics, vol. 16, no. 2, pp. 321–329, 2011.
- [122] M. Allwright, N. Bhalla, C. Pinciroli, and M. Dorigo, “Argos plugins for experiments in autonomous construction,” Technical report TR/IRIDIA/2018-007, IRIDIA, Universite’ Libre de Bruxelles, Tech. Rep., 2018.
- [123] C. Pinciroli, V. Trianni, R. O’Grady, G. Pini, A. Brutschy, M. Brambilla, N. Mathews, E. Ferrante, G. Di Caro, F. Ducatelle et al., “Argos modular, multi-engine simulator for heterogeneous swarm robotics,” in 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2011, pp. 5027–5034.
- [124] “Webots open source robot simulator,” <https://cyberbotics.com>
- [125] O. Michel, “Webots: Symbiosis between virtual and real mobile robots,” in International Conference on Virtual Worlds. Springer, 1998, pp. 254–263.

- [126] L. Wang, K. Tan, and V. Prahlaḁ, “Developing khepera robot applications in a webots environment,” in MHS2000. Proceedings of 2000 International Symposium on Micromechatronics and Human Science (Cat. No. 00TH8530). IEEE, 2000, pp. 71–76.
- [127] “Watsolutions,” <http://www.watsolutions.com>
- [128] “Work space robot simulation,” <http://www.workspace5.com>
- [129] “Aist,” https://www.aist.go.jp/index_en.html
- [130] F. Kanehiro, H. Hirukawa, and S. Kajita, “Openhrp: Open architecture humanoid robotics platform,” The International Journal of Robotics Research, vol. 23, no. 2, pp. 155–165, 2004.
- [131] R. Mittal, A. Konno, and S. Komizunai, “Implementation of hoap-2 humanoid walking motion in openhrp simulation,” in 2015 International Conference on Computing Communication Control and Automation. IEEE, 2015, pp. 29–34.
- [132] H. Hirukawa, F. Kanehiro, K. Kaneko, S. Kajita, K. Fujiwara, Y. Kawai, F. Tomita, S. Hirai, K. Tanie, T. Isozumi et al., “Humanoid robotics platforms developed in hrp,” Robotics and Autonomous Systems, vol. 48, no. 4, pp. 165–175, 2004.
- [133] V. Trianni, J. IJsselmuiden, and R. Haken, “The saga concept: Swarm robotics for agricultural applications,” Technical Report. 2016. Available online: [http://liral.istc.cnr.it/saga ...](http://liral.istc.cnr.it/saga...), Tech. Rep., 2016.
- [134] D. Albani, J. IJsselmuiden, R. Haken, and V. Trianni, “Monitoring and mapping with robot swarms for agricultural applications,” in 2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [135] “Saga swarm robotics for agriculture applications,” <http://liral.istc.cnr.it/saga/> .
- [136] S. Blackmore, “Precision farming: an introduction,” Outlook on agriculture, vol. 23, no. 4, pp. 275–280, 1994.
- [137] “Avular howpublished = <https://www.avular.com> ”

- [138] “Drones.nl,” <https://www.drones.nl/bedrijven/avular> .
- [139] “Swarm farm robotic agriculture how published,” <https://www.youtube.com/channel/UCI1Zg1LxU8nk634IrhxrSMw> ”
- [140] M. Kayser, L. Cai, C. Bader, S. Falcone, N. Inglessis, B. Darweesh, J. Costa, and N. Oxman, “Fiberbots: Design and digital fabrication of tubular structures using robot swarms,” in *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. Springer, 2018, pp. 285–296.
- [141] C. W. Reynolds, “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model,” in *ACM SIGGRAPH computer graphics*, vol. 21, no. 4. ACM, 1987, pp. 25–34.
- [142] “Introducing alibaba’s flyzoo future hotel, <https://www.alizila.com/introducing-alibabas-flyzoo-future-hotel/>
- [143] J. Werfel, K. Petersen, and R. Nagpal, “Designing collective behavior in a termite-inspired robot construction team,” *Science*, vol. 343, no. 6172, pp. 754–758, 2014.
- [144] “Building structures with robot swarms,” <https://www.oreilly.com/ideas/building-structures-with-robot-swarms>.
- [145] “Amazon warehouse robots: Mind blowing video,” <https://www.youtube.com/watch?v=cLVCGEmkJs0> .
- [146] “Robots dominate smart logistics in east china”, <https://www.youtube.com/watch?v=y3u1xjoQ0KU>
- [147] “Inside a warehouse where thousands of robots’ pack groceries,” <https://www.youtube.com/watch?v=4DKrcpa8ZE> .
- [148] V. Garc’ia-Lopez, F. Chen, L. G. Nilewski, G. Duret, A. Aliyan, A. B. Kolomeisky, J. T. Robinson, G. Wang, R. Pal, and J. M. Tour, “Molecular machines open cell membranes,” *Nature*, vol. 548, no. 7669, p. 567, 2017.
- [149] “Millirobot with a talent for versatility of movement,” <https://www.mpg.de/11895964/millirobot->

- [150] “Nature-inspired soft millirobot makes its way through enclosed spaces,” <https://www.is.mpg.de/news/nature-inspired-soft-millirobot-makes-its-way-through-enclosed-spaces>
- [151] D. Hougen and S. Chandrasekaran, “Swarm intelligence for cooperation of bio-nano robots using quorum sensing,” in 2006 Bio Micro and Nanosystems Conference. IEEE, 2006, pp. 104–104.
- [152] A. Cavalcanti, B. Shirinzadeh, M. Zhang, and L. Kretly, “Nanorobot hardware architecture for medical defense,” *Sensors*, vol. 8, no. 5, pp. 2932–2958, 2008.
- [153] A. Cavalcanti, B. Shirinzadeh, R. A. Freitas Jr, and T. Hogg, “Nanorobot architecture for medical target identification,” *Nanotechnology*, vol. 19, no. 1, p. 015103, 2007.
- [154] A. Cavalcanti and R. A. Freitas, “Nanorobotics control design: A collective behavior approach for medicine,” *IEEE Transactions on Nanobioscience*, vol. 4, no. 2, pp. 133–140, 2005
- [155] M. M. al Rifaie, A. Aber, and R. Raisys, “Swarming robots and possible medical applications,” *International Society for the Electronic Arts (ISEA 2011)*, Istanbul, Turkey, 2011.
- [156] “Biorobotics laboratory,” <http://biorobotics.ri.cmu.edu/robots/index.php>.
- [157] “Trunk snake robot,” <http://biorobotics.ri.cmu.edu/robots/trunkSnake.php>.
- [158] “Medical snake robot,” <http://biorobotics.ri.cmu.edu/robots/medSnake.php>.
- [159] “Fullabot,” <http://biorobotics.ri.cmu.edu/robots/fullabot.php>
- [160] “Searching for survivors of the mexico earthquake—with snake robots,” <https://www.sciencemag.org/news/2017/10/searching-survivors-mexico-earthquake-snake-robots>

- [161] J. Wang, R. Zhang, Y. Yan, X. Dong, and J. M. Li, “Locating hazardous gas leaks in the atmosphere via modified genetic, mcmc and particle swarm optimization algorithms,” *Atmospheric environment*, vol. 157, pp. 27–37, 2017.
- [162] “Endeavor robotics,” <http://endeavorrobotics.com/products>.
- [163] “Kobratm the powerful, heavy-payload robot”,
<http://endeavorrobotics.com/media/docs/English>
- [164] “Packbot,” <https://robots.ieee.org/robots/packbot/>
- [165] “Ls3 legged squad support systems,” <https://www.bostondynamics.com/ls3>
- [166] S. Young and A. Kott, “A survey of research on control of teams of small robots in military operations,” *arXiv preprint arXiv:1606.01288*, 2016.
- [167] A. Krishnan, *Killer robots: legality and ethicality of autonomous weapons*. Routledge, 2016.
- [168] “Flying mini-robot cleaners win electrolux design lab 2013 contest”,
<https://www.electroluxgroup.com/en/flying-mini-robot-cleaners-win-electrolux-design-lab-2013-contest-18007/>
- [169] M. A. Gupta, M. A. Saxena, P. Anand, P. Sharma, P. R. Goyal, and R. Singh, “Robo-cleaner,” *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, vol. 2, no. 5, 2016.
[Online]. Available:
<http://www.imperialjournals.com/index.php/IJIR/article/view/457>
- [170] V. Prabakaran, M. R. Elara, T. Pathmakumar, and S. Nansai, “Floor cleaning robot with reconfigurable mechanism,” *Automation in Construction*, vol. 91, pp. 155–165, 2018.
- [171] A. Pandey, A. Kaushik, A. K. Jha, and G. Kapse, “A technological survey on autonomous home cleaning robots,” *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 4, no. 4, pp. 1–7, 2014.

- [172] P. Fiorini and E. Prassler, “Cleaning and household robots: A technology survey,” *Autonomous robots*, vol. 9, no. 3, pp. 227–235, 2000.
- [173] M. Trueblood and R. Genet, “Microcomputer control of telescopes,” Richmond: Willmann-Bell, 1985, 1985.
- [174] A. Allan, T. Naylor, I. Steele, D. Carter, T. Jenness, F. Economou, and A. Adamson, “estar: Astronomers, agents and when robotic telescopes aren’t...” in *Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XIII*, vol. 314, 2004, p. 597.
- [175] C. Mason, “Collaborative networks of independent automatic telescopes,” in *Optical Astronomy from the Earth and Moon*, vol. 55, 1994, p. 234.
- [176] J. E. Baruch, “Robots in astronomy,” *Vistas in Astronomy*, vol. 35, pp. 399–438, 1992.
- [177] M. Rubenstein and R. Nagpal, “Kilobot: A robotic module for demonstrating behaviors in a large scale (2^{10} units) collective.” Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.
- [178] “World robotics report 2016,” <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-report-2016>.
- [179] “A swarm of one thousand robots,” <https://www.youtube.com/watch?v=G1t4M2XnlhI>
- [180] M. Patil, T. Abukhalil, S. Patel, and T. Sobh, “Ub swarm: Hardware implementation of heterogeneous swarm robot with fault detection and power management,” *International Journal of Computing*, vol. 15, pp. 162–176, 09 2016.
- [181] “Nanorobots propel through the eye,” <https://is.mpg.de/news/nanorobots-propel-through-the-eye>
- [182] “The pentagon is imagining an army of autonomous robot swarms,” <https://www.motherjones.com/politics/2018/04/darpa-drone-swarm-robots/c> ,

“Reinforcement learning in the multi-robot domain,” in Robot colonies. Springer, 1997, pp. 73–83.

[183] “Swarm robotics: New horizons in military research”,
<https://www.roboticsbusinessreview.com/unmanned/swarm-robotics-new-horizon-military/>

[184] “Nasa shocker: Astronaut reveals humans could have been on mars in the 1960s,”
<https://www.foxnews.com/science/nasa-shocker-astronaut-reveals-humans-could-have-been-on-mars-in-the-1960s> .

