



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Swarm Intelligence

Επισκόπηση και Εφαρμογές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Ν. Τζίμας

Επιβλέπων : Γεώργιος Π. Παπαβασιλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2003



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Swarm Intelligence

Επισκόπηση και Εφαρμογές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Ν. Τζίμας

Επιβλέπων : Γεώργιος Π. Παπαβασιλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Οκτωβρίου 2003.

.....
Γ. Παπαβασιλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Τζαφέστας
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2003

.....
Αναστάσιος Ν. Τζίμας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αναστάσιος Ν. Τζίμας

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρόλογος

Η μελέτη αφορά το πεδίο των πολύπλοκων συστημάτων (complex systems), στις βασικές έννοιες των οποίων εισαγόμαστε μέσω των πιο απλών μορφών των κυτταρικών αυτομάτων και το RBN.

Αντικείμενο της μελέτης αποτελεί η εφαρμογή μεθόδων εμπνευσμένων από τα κοινωνικά έντομα (swarm intelligence) για την στα πεδία των συλλογικών ρομπότ (collective robotics) και της εξισορρόπησης υπολογιστικού φορτίου σε κατανεμημένα ομότιμα συστήματα (P2P load balancing). Σκοπός είναι η ανάπτυξη ενός συνόλου απλών κανόνων, που δεν απαιτούν πολλούς πόρους για την υλοποίησή τους, και την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση προβλημάτων στα παραπάνω πεδία. Επιθυμητό είναι να αποκτήσουν τα συστήματα αυτά την ικανότητα της αυτοργάνωσης αλληλεπιδρώντας μέσω της stigmergy, ένα πολύ απλό μηχανισμό επικοινωνίας μεταξύ αυτόνομων agent. Επίσης να κληρονομήσουν από τα πολύπλοκα συστήματα την ευρωστία τους και την ικανότητά τους στην προσαρμογή σε διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Κατά την ανάπτυξη των εφαρμογών κυρίαρχο στοιχείο της συμπεριφοράς των συστημάτων είναι η επιλογή του τρόπου επικοινωνίας μεταξύ των αυτόνομων agent. Επιθυμητή είναι η πολύ απλή υλοποίηση ακολουθώντας τις αρχές της stigmergy. Οι κανόνες αφορούν τον τρόπο με τον οποίο επιδρά ο agent στο περιβάλλον του (διαδίκτυο ή φυσικός χώρος) ανάλογα με τα ερεθίσματα που δέχεται από αυτό. Οι κανόνες αυτοί υλοποιούνται μέσω γενικευμένων «ελκτικών-απωστικών δυνάμεων», καθορίζοντας την κατανομή της δραστηριότητας των agent.

Από τη θεωρητική μελέτη των δύο εφαρμογών, των συλλογικών ρομπότ και του καταμερισμού διεργασιών σε P2P δίκτυα, εμφανίζονται να είναι αλληλόμορφες. Παριστάνονται και οι δύο από ένα γράφο όπου οι κόμβοι είναι οι agent και οι ακμές τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης μεταξύ των agent. Ο γράφος έχει βάρη στις ακμές και στους κόμβους, όπου η δυναμική συμπεριφορά των agent μεταβάλλει τα μεγέθη των βαρών αυτών και την τοπολογία του γράφου. Καθοριστικός παράγοντας αποδεικνύεται η συνεκτικότητα του γράφου. Η δυνατότητα οι πληροφορίες να διαδίδονται από γειτονιά σε γειτονιά σε όλο το γράφο και οποία καθορίζει την ταχύτητα διάδοσης.

Πρώτου προχωρήσω στη περαιτέρω ανάπτυξη του θέματος θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Καθηγητή Γεώργιο Παπαβασιλόπουλο για την ουσιαστική του συμβολή στην ανάπτυξη και στη διερεύνηση του θέματος σε βάθος. Στην αρχή οι οδηγίες του και συμβουλές έμοιαζαν με τους χρησμούς της Πυθίας, αλλά όσο προχωρούσε η μελέτη αποδεικνυόντουσαν προφητικές.

Πεδία αναζήτησης: πολύπλοκα συστήματα, swarm intelligence, multi agent, αυτοργάνωση, κοινωνικά έντομα, stigmergy, συλλογικά ρομπότ, flocking, καταμερισμός εργασιών, εξισορρόπηση φορτίου, δυναμική τοπολογία γράφων

Abstract

This diploma thesis is an attempt to investigate possible application of methods inspired by social insects (swarm intelligence), in collective robotics and P2P cpu sharing (load balancing). Our purpose is the development of a set of rules able to effectively solve problems in the above fields, due to a minimal use of resources. It is desirable, for the systems we deploy, to self organize through stigmergy mechanisms. Also to inherit robustness and flexibility, which is shown by complex systems (e.g. social insects) in rapidly changing environments.

The application in collective robotics is about a swarm of robots moving as a flock through a rough terrain. The swarm consists of non-homogenous robots, with different characteristics and abilities. As effect of this event the robots cannot satisfy their need for resources acting independently, so they have to cooperate because they depend each other.

At the field of P2P cpu sharing is developed an algorithm inspired by the division of labor in social insects.

Finally, it is revealed that these applications are isomorphic to a same model. Both of them can be represented by a weighted graph (weights on edges and vertices). In these models edges stands for the interactions among the agents. The dynamics of the agents are constantly altering the weights and the topology of the graph. The connectivity of the graph is proved to be crucial for its stable behavior and ability to adapt in new conditions.

Key words: Complex systems, swarm intelligence, multi agent, self organization, social insects, stigmergy, collective robotics, flocking, division of labor, load balancing, dynamic graph topology

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
	<i>ΣΥΝΟΨΗ.....</i>	<i>16</i>
2	ΚΥΤΤΑΡΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΚΑΙ RANDOM BOOLEAN NETWORKS	19
2.1	ΚΥΤΤΑΡΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΑ	19
2.1.1	<i>ΤΟ ΠΑΙΧΝΙΔΙ ΤΗΣ ΖΩΗΣ.....</i>	<i>21</i>
2.1.2	<i>ΤΟ ΚΥΤΤΑΡΙΚΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΩΣ ΜΕΣΟ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΙΕΡΓΕΣΕΩΝ</i>	<i>21</i>
2.1.3	<i>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΒΙΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΥΤΤΑΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΩΝ... ..</i>	<i>25</i>
2.2	Η ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ RBN ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΓΟΝΙΔΙΩΝ	26
2.3	ΚΡΙΣΙΜΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΗΝ ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΗ ΑΥΤΟΡΓΑΝΩΣΗ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	31
3	SWARM INTELLIGENCE	35
3.1	ΑΠΟΙΚΙΕΣ ΕΝΤΟΜΩΝ ΩΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	35
3.2	ΑΥΤΟΡΓΑΝΩΣΗ.....	35
3.3	ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΣΤΑ ΜΕΡΜΗΓΚΙΑ.....	36
3.3.1	<i>ΕΝΤΡΟΠΙΑ ΚΑΙ ΑΥΤΟΡΓΑΝΩΣΗ ΣΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΦΕΡΜΟΝΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΜΕΡΜΗΓΚΙΑ</i>	<i>36</i>
3.3.2	<i>Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΟΠΑΤΙΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΜΕΡΜΗΓΚΙΑ</i>	<i>39</i>
3.4	ΝΕΚΡΟΤΑΦΕΙΑ ΜΕΡΜΗΓΚΙΩΝ.....	41
3.4	ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΑΠΟΙΚΙΕΣ ΤΩΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΕΝΤΟΜΩΝ.....	42
3.4.1	<i>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΕΙΟΔΟΣΙΑΣ</i>	<i>45</i>
3.5	BOIDS.....	46
3.5.1	<i>Η ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΜΗΝΟΥΣ ΤΩΝ ΑΚΡΙΑΩΝ</i>	<i>47</i>
4	ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ.....	49
4.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ SWARM INTELLIGENCE ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΠΕΔΙΩΝ	49
4.1.1	<i>ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΜΕΡΜΗΓΚΙΩΝ.....</i>	<i>50</i>
4.1.2	<i>ΠΤΗΣΗ ΣΕ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ</i>	<i>51</i>
4.1.3	<i>ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</i>	<i>51</i>
4.1.4	<i>ΚΥΝΗΓΙ ΛΥΚΩΝ.....</i>	<i>52</i>
4.1.5	<i>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ ΕΠΙΣΚΕΠΤΩΝ.....</i>	<i>53</i>
4.2	ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ	55
4.2.1.1	<i>ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ</i>	<i>57</i>
4.2.1.2	<i>ΦΥΛΑΞΗ ΧΩΡΟΥ ΑΠΟ ΕΙΣΒΟΛΕΙΣ</i>	<i>57</i>
4.2.1.3	<i>ΕΞΟΥΔΕΤΕΡΩΣΗ ΝΑΡΚΩΝ.....</i>	<i>58</i>
4.2.2.1	<i>SPRING LAWS.....</i>	<i>59</i>
4.2.2.2	<i>RIGID ΓΡΑΦΟΣ (ΑΚΑΜΠΤΟΣ ΑΚΕΡΑΙΟΣ ΓΡΑΦΟΣ)</i>	<i>59</i>
4.3	ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ MULTI-AGENT ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ: ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ	61
4.3.1	<i>ΙΔΙΟΤΙΜΕΣ LAPLACIAN-ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΓΡΑΦΟΥ-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</i>	<i>64</i>
5	ΣΥΛΛΟΓΙΚΑ ΡΟΜΠΟΤ COLLECTIVE ROBOTICS	67
5.1	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΤΟΙΒΕΣ ΑΠΟ ΜΙΑ ΟΜΑΔΑ ΚΗΡΕΡΑ ΡΟΜΠΟΤ.....	67
5.2	SWARM-BOT	70
5.3	ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΡΟΜΠΟΤ ΙΚΑΝΩΝ ΝΑ ΕΠΙΔΕΙΞΟΥΝ ΣΥΛΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ.....	74
5.4	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΣΗ ΡΟΜΠΟΤ ΣΕ ΚΟΠΑΔΙ	75
5.4	ΚΙΝΗΣΗ ΠΛΕΙΑΔΑΣ ΜΙΚΡΟ-ΡΟΜΠΟΤ ΣΕ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ	77
6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ: SWARM-FISH	81
6.1.1	<i>ΤΟ ΚΥΤΤΑΡΟ</i>	<i>81</i>
6.1.2	<i>ΤΟ ΑΤΟΜΟ.....</i>	<i>81</i>
6.1.3	<i>ΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ</i>	<i>83</i>
6.2	ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ	84
6.2.1	<i>ΕΝΑ ΕΙΛΟΣ</i>	<i>84</i>

6.2.2	ΤΡΙΑ ΕΙΔΗ ΙΣΟΙ ΠΛΗΘΥΣΜΟΙ.....	85
6.2.3	ΑΝΟΜΟΙΟΙ ΠΛΗΘΥΣΜΟΙ ΤΡΙΩΝ ΕΙΔΩΝ.....	87
6.2.3.1	ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ Κ.....	89
6.2.3.2	ΒΛΑΒΕΣ ΑΤΟΜΩΝ.....	90
6.2.4.1	ΚΙΝΗΣΗ ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ.....	93
6.2.4.2	ΚΙΝΗΣΗ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Κ.....	96
6.2.4.3	ΚΙΝΗΣΗ ΠΡΟΣ ΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΤΟΜΩΝ ΟΔΗΓΩΝ.....	97
6.2.5.1	ΚΙΝΗΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΕΜΠΟΔΙΑ.....	98
6.2.5.2	ΚΙΝΗΣΗ ΑΝΑΜΕΣΑ ΑΠΟ ΕΜΠΟΔΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ ΑΤΟΜΩΝ.....	99
6.2.6	ΑΚΟΛΟΥΘΩΝΤΑΣ ΤΟ ΜΟΝΟΠΑΤΙ.....	101
6.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	102
7	ΕΦΑΡΜΟΓΗ: SWARM-FISH ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	103
7.1	ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	103
7.2	ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ.....	104
7.2.1.1	ΈΝΑ ΕΙΔΟΣ.....	105
7.2.1.2	ΈΝΑ ΕΙΔΟΣ ΜΕ ΤΑΣΗ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΑ.....	106
7.2.2.1	ΤΡΙΑ ΕΙΔΗ AGENT ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥΣ.....	107
7.2.2.2	ΤΡΙΑ ΕΙΔΗ AGENT ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥΣ ΜΕ ΤΑΣΗ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ.....	107
7.2.2.3	ΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΩΝ ΟΔΗΓΩΝ.....	109
7.2.3.1	ΤΡΙΑ ΕΙΔΗ AGENT ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥΣ ΜΕ ΤΑΣΗ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ.....	110
7.2.3.2	ΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΩΝ ΟΔΗΓΩΝ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΕΜΠΟΔΙΩΝ.....	113
7.3	Η ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤ SWARM-FISH.....	115
7.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	117
8	ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ LOAD BALANCING.....	119
8.1	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΥΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΜΝΗΜΗ.....	119
8.1.2	Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	120
8.2	MESSOR: ΕΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΣΩ ΕΝΟΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ AGENT.....	123
9	ΕΦΑΡΜΟΓΗ: SWARM-NET.....	127
9.1	ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ SWARM-NET.....	128
9.1.1.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΟ SWARM-NET.....	128
9.1.1.2	ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΜΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΟ SWARM-NET.....	129
9.1.1.3	ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΟΜΟΤΙΜΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ (P2P).....	130
9.1.2.1	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (HEAT DIFFUSION).....	131
9.1.2.2	ΑΠΛΗΣΤΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ (GREEDY).....	132
9.1.3	ΤΟ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΦΟΡΤΙΟ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝ ΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΥΤΟΙ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΣΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ.....	132
9.2	Η ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ.....	133
9.2.1	ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ.....	133
9.2.1.1	ΚΑΤΩΦΛΙ $\theta(j, s_i, t) = 0.05 m^2(j, s_i, t) + 0.05 D^2(J, T) + 0.05 Q(T)$	133
9.2.1.2	ΚΑΤΩΦΛΙ $\theta(j, s_i, t) = 0.000002 m^2(j, s_i, t) + 0.05 D^2(J, T) + 0.00005 Q(T)$	136
9.2.2	ΔΙΠΛΑΣΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ, ΣΕ ΚΑΘΕ ΚΥΚΛΟ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΔΥΟ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	138
9.2.3	ΑΝΙΣΟΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ.....	141
9.2.4	ΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ.....	144
9.3	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ SWARM-NET.....	147
9.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	148
10	ΣΧΟΛΙΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	149
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	151
	ΒΙΒΛΙΑ.....	151

ΆΡΘΡΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	155

1 Εισαγωγή

Τα κοινωνικά έντομα, όπως τα μερμήγκια, οι τερμίτες, οι μέλισσες και οι σφίγγες, πάντοτε εντυπωσίαζαν τους ανθρώπους με τη δομή κοινωνιών και την οργάνωση της ζωής τους. Κοινωνικά θεωρούνται τα έντομα που ζουν σε αποικίες και η γενικότερη συμπεριφορά τους κατευθύνεται από την ανάγκη επιβίωσης της ομάδας και όχι του μεμονωμένου ατόμου. Η εκπληκτικά πολύπλοκη συμπεριφορά των κοινωνιών τους και τα θαυμαστά τους έργα έρχονται σε αντίθεση με την πολύ απλή δομή των ατόμων και τις περιορισμένες ικανότητες που διαθέτουν. Συνεπώς οι η κοινωνική ευφυΐα (swarm intelligence) που αναπτύσσουν για να επιλύουν δύσκολα προβλήματα, αναδύεται από τον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται (emergent behavior).



Παράδειγμα των απλών μηχανισμών που χρησιμοποιούν τα έντομα για τον έλεγχο της συμπεριφοράς τους, είναι ο έλεγχος της ταχύτητας πτήσης της μέλισσας. Οι μέλισσες καθορίζουν τις ταχύτητες με τις οποίες πετούν και μετρούν τη διανυθείσα απόσταση ανάλογα με την «οπτική ροή» στους αμφιβληστροειδείς τους. Όταν πετούν χαμηλά η ροή είναι έντονη και αναπτύσσουν μικρή ταχύτητα, αφού είναι πιο πιθανό να εμφανιστεί ένα εμπόδιο. Όταν αυξάνεται το ύψος ελαττώνεται η ροή πληροφοριών και επιταχύνουν. Με αυτό το μηχανισμό καταφέρνουν να έχουν ομαλές προσγειώσεις χωρίς να έχουν ακριβή γνώση της ταχύτητάς του και του ύψους τους. Αυτά τα απλά μέσα-μηχανισμούς διαθέτουν για την πραγματοποίηση των αναγκαίων εργασιών.

Τα κοινωνικά έντομα εργάζονται χωρίς επίβλεψη. Στη πραγματικότητα, η ομαδική τους εργασία αυτοοργανώνεται και ο συντονισμός αναδύεται από τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα άτομα της αποικίας. Αν και αυτές οι αλληλεπιδράσεις μπορεί να είναι πρωτόγονες (π.χ. ένα μερμήγκι ακολουθεί αποκλειστικά το ίχνος της φερμόνης που άφησε ένα άλλο) συνολικά όμως οι ενέργειες των ατόμων πορεύονται προς μια αποτελεσματική λύση για κάθε δύσκολο πρόβλημα (π.χ. η επιλογή του συντομότερου μονοπατιού προς μια πηγή τροφής ανάμεσα από μυριάδες άλλα πιθανά μονοπάτια). Η συλλογική συμπεριφορά που επιδεικνύεται από μια ομάδα κοινωνικών εντόμων αποκαλείται Swarm Intelligence.

Ο τρόπος που τα κοινωνικά έντομα αντιμετωπίζουν δύσκολα προβλήματα αποτελεί πηγή έμπνευσης. Παράδειγμα εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί από τον τρόπο καταμερισμού της εργασίας από τα κοινωνικά έντομα.

Σε ένα μελίσσι, τα άτομα εξειδικεύονται σε συγκεκριμένες εργασίες, για την αποδοτικότερη λειτουργία της κυψέλης. Παρόλα αυτά η ανάθεση εργασιών παραμένει πολύ ευέλικτη. Όταν το φαγητό είναι δυσεύρετο ακόμα και η νοσοκόμα μέλισσα θα βοηθήσει στη συγκομιδή. Οι πληθυσμοί των εξειδικευμένων ατόμων ως προς κάποια εργασία συνεχώς μεταβάλλονται ανάλογα με τις ανάγκες της κοινότητας.

Χρησιμοποιώντας τις μέλισσες ως πρότυπο, αναπτύχθηκε ένα σύστημα για το προγραμματισμό των θαλάμων βαφής σε ένα εργοστάσιο παραγωγής φορτηγών. Κατά τη λειτουργία τους, στους θαλάμους βάφονται τα φορτηγά που εξέρχονται της γραμμής παραγωγής. Όταν είναι απαραίτητο, ένα θάλαμος μπορεί να αλλάξει το χρώμα που

χρησιμοποιείται για τη βαφή, αλλά αυτό συνεπάγεται καθυστέρηση στη διαδικασία και κοστίζει. Αν θεωρήσουμε τους θαλάμους ως μέλισσες που ακολουθούν τον παρακάτω κανόνα: ένα άτομο εκτελεί ένα έργο για το οποίο είναι εξειδικευμένο εκτός εάν αντιλαμβάνεται μια σημαντική ανάγκη για να πραγματοποιήσει κάποια άλλη λειτουργία. Επομένως, ένας θάλαμος με κόκκινη μپογιά θα συνεχίσει να αναλαμβάνει παραγγελίες αυτού του χρώματος έως ότου κάποια εργασία που χαρακτηρίζεται «επείγουσα» απαιτεί ένα λευκό φορηγό και οι ουρές στους άλλους θαλάμους, ιδιαίτερα σε αυτούς που ειδικεύονται στο λευκό, είναι κατά πολύ μεγαλύτερες.

Αν και ο κανόνας μοιάζει απλός, στην πράξη είναι εκπληκτικά αποτελεσματικός. Έχει εμπλέξει τους θαλάμους βαφής στο να καθορίζουν το φορτίο τους πιο αποτελεσματικά (μέσω λιγότερων αλλαγών χρώματος) από ότι ένα κεντρικά ελεγχόμενο σύστημα. Αυτό το αυτοργανώμενο σύστημα διαθέτει τα πλεονεκτήματα της swarm intelligence: ευελιξία και ευρωστία. Η ομάδα μπορεί να προσαρμόζεται σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Όταν προκύψει απρόσμενα ένα πλήθος φορηγών που πρέπει να βαφτεί μπλε, άλλοι θάλαμοι εγκαταλείπουν το χρώμα που έχουν ειδικευτεί για να προσαρμοστούν στην έντονη ζήτηση για αυτό το χρώμα. Ενώ στην περίπτωση που ένα ή περισσότερα άτομα πάνουν να «λειτουργούν» η ομάδα συνεχίζει να εκτελεί την εργασία της, π.χ. όταν ένας θάλαμος τεθεί εκτός λειτουργίας, οι υπόλοιποι ανταποκρίνονται διαμοιράζοντας το επιπλέον φορτίο. Και όλα αυτά χάρις την αυτοργάνωση: η ομάδα δεν χρειάζεται να διαθέτει ένα ισχυρό και πολύπλοκο σύστημα κεντρικού ελέγχου. Οι απλοί κανόνες που



ακολουθεί το άτομο επαρκούν για την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας.

Οι αποικίες των κοινωνικών εντόμων αποτελούν επιτυχημένα παραδείγματα μιας ευρύτερης οικογένειας όπου εμφανίζονται τέτοιες συμπεριφορές, τα πολύπλοκα συστήματα (complex systems). Πολύπλοκα συστήματα αποτελούν το διαδίκτυο, οι αγορές προϊόντων, οι νευρώνες, τα συγκοινωνιακά δίκτυα κ.α. Το όνομα τους το οφείλουν στην πολυπλοκότητα της συμπεριφοράς τους, που προκαλείται από το μεγάλο πλήθος διακριτών οντοτήτων στις οποίες συνίστανται.

Η κλάση αυτή συστημάτων παρουσιάζει ενδιαφέρουσες ιδιότητες που αναδεικνύονται στις περιπτώσεις που αναζητείται εγγενής αποκεντρωμένη λύση στην αντιμετώπιση των προβλημάτων. Τα πολύπλοκα συστήματα είναι δυναμικά συστήματα. Εμπεριέχουν δυναμικά στοιχεία, δηλαδή στοιχεία που μεταβάλλονται ή προκαλούν μεταβολές, υπακούοντας σε συγκεκριμένους νόμους. Η πολυπλοκότητά της συμπεριφοράς τους, αποτελεί πλεονέκτημά αλλά και ταυτόχρονα μειονέκτημα αφού η συμπεριφορά τους δεν είναι προβλέψιμη.

Η κατηγορία αυτών των συστημάτων δεν είναι η εξαίρεση αλλά η πλειοψηφία των συστημάτων που συναντούμε στη φύση έχει τέτοια συμπεριφορά. Παλαιότερα τη χαρακτήριζαν τυχαία αλλά πια ως χαοτική. Η συμπεριφορά των συστημάτων αυτών δεν είναι τυχαία ούτε πηγάζει από έλλειψη κανόνων, αλλά το σύνολο των κανόνων και των μεταβλητών που περιγράφουν την συμπεριφορά τους είναι τόσο περίπλοκη που πρόβλεψη μπορεί να υπάρξει μόνο για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Τα πολύπλοκα συστήματα παρουσιάζουν συμπεριφορές που μπορούμε

να θεωρήσουμε ότι αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία των δυναμικών συστημάτων.

Τα συστήματα αυτά που αποτελούνται από σύνολα αυτόνομων συστημάτων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και παρουσιάζουν σύνθετες συμπεριφορές μακροσκοπικά.

Αυτόνομα, διότι η συμπεριφορά-αντίδρασή τους στα ερεθίσματα του περιβάλλοντός καθορίζεται από ένα σύνολο κανόνων ιδιαίτερο για το καθένα.

Οι κανόνες που καθορίζουν την κατάσταση του συστήματος έχουν τοπική εμβέλεια. Η έννοια της «γειτονίας» είναι ένα καθοριστικό χαρακτηριστικό των συστημάτων.

Τα στοιχειώδη συστήματα αυτά παρόλο που δεν μπορούν να εκτελέσουν σύνθετες εργασίες, στο σύνολό τους μπορούν να επιτελέσουν πολύπλοκες εργασίες (emergent property). Η επιθυμητή αυτή ιδιότητα εκφράζεται μέσω της αυτοργάνωσης. Η αυτοργάνωση πηγάζει ένα σύνολο δυναμικών μηχανισμών με τους οποίους σχηματίζονται δομές σε ένα σύστημα από αλληλεπιδράσεις των συνιστωσών του. Αλληλεπιδράσεις που βασίζονται σε καθαρά τοπικές πληροφορίες χωρίς να έχουν καθολική εικόνα του συστήματος.

Φανταστείτε ένα πολύ ισχυρό ενισχυτή, που αποτελείται από μυριάδες στοιχειώδεις ενισχυτές (περιορισμένων δυνατοτήτων). Οι στοιχειώδεις αυτοί ενισχυτές είναι τοπικά διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους (δεν υπάρχει άμεση σύνδεση-αλληλεπίδραση μεταξύ οποιαδήποτε δύο ενισχυτών). Κάθε στοιχειώδης ενισχυτής μπορεί να αλληλεπιδρά με τους γειτονικούς του. Κάθε χρονική στιγμή η κατάσταση

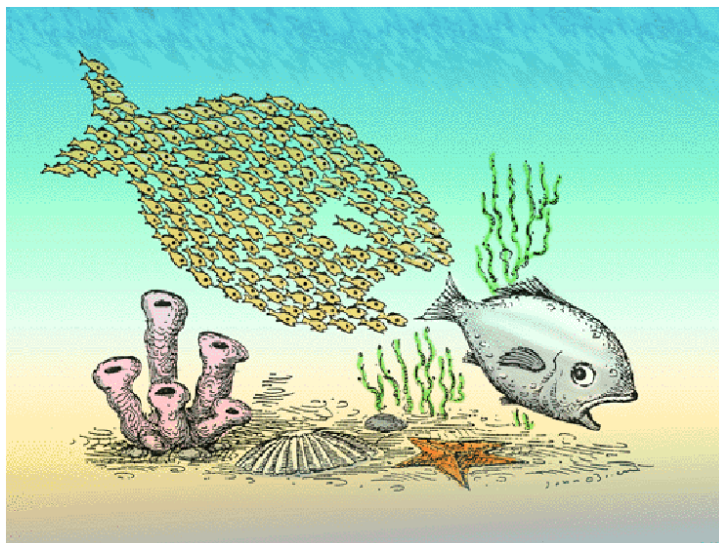
λειτουργίας του καθορίζεται από τις καταστάσεις λειτουργίας των γειτόνων του. Δεν έχει άμεση και ακριβή γνώση για καθένα από αυτούς. Παράδειγμα η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη γειτονιά του ενισχυτή καθώς και τα πεδία επηρεάζουν την απόδοσή του. Ο έλεγχος τόσο πολλών υποσυστημάτων δεν είναι εφικτός κεντρικά. Οι μορφή των αλληλεπιδράσεων και ο τρόπος που καθορίζουν την αντίδραση του κάθε ενισχυτή, αποτελούν το κατανοημένο μοντέλο ελέγχου. Σε περίπτωση βλάβης κάποιων από τους στοιχειώδεις ενισχυτές υπάρχουν χιλιάδες άλλοι που λειτουργούν.

Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλη ευρωστία και προσαρμοστικότητα σε έντονα μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα, η σπουδαιότητα των ιδιοτήτων αυτών ενισχύεται από το γεγονός ότι τα επιμέρους

συστήματα ακολουθούν σχετικά απλούς κανόνες. Η ιδιότητα αυτή της ευφυΐας που παρουσιάζει το συνολικό σύστημα ενώ βασίζεται σε «απλοϊκά» συστήματα, της κοινωνικής ευφυΐας, έχει αποδεδειγμένα μεγάλη αξία.. Το ερώτημα που τίθεται είναι:

*ποσότητα έναντι ποιότητας
ή*

λιτότητα έναντι πλεονασμού.



Σύνοψη

Στα επόμενα κεφάλαια θα επιχειρήσουμε αρχικά να παρουσιάσουμε τα βασικά στοιχεία του πεδίου της Swarm Intelligence, μέσα από την επισκόπηση μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητές. Ακολουθούν εφαρμογές στο χώρο των collective robotics και load balancing όπου γίνεται χρήση μεθοδολογιών από της Swarm Intelligence. Σε αυτά τα δύο πεδία προτείνουμε και νέες εφαρμογές.

Η μία αφορά την περιοχή των collective robotics, όπου το μοντέλο που αναπτύσσεται «δοκιμάζεται» σε ένα εικονικό περιβάλλον παρόμοιο με αυτό των άλλων εφαρμογών (π.χ. η κίνηση σαν κοπάδι ανάμεσα από εμπόδια).

Στο πεδίο του load balancing προτείνουμε έναν αλγόριθμο που εμπνέεται από τον τρόπο που τα κοινωνικά έντομα καταμερίζουν τις εργασίες στις κοινότητές τους. Ο αλγόριθμος αυτός συγκρίνεται, μέσα από την εξομοίωση σε ένα δίκτυο ομοτίμων υπολογιστών (P2P), με παραλλαγές (για λόγους προσαρμογής στο μοντέλο προσομοίωσης) διαδεδομένων αλγορίθμων.

Αναλυτικότερη περιγραφή του περιεχομένου των κεφαλαίων ακολουθεί.

Αρχικά στο κεφάλαιο 2 επιχειρείται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες των πολύπλοκων συστημάτων, μέσα από την παρουσίαση των κυτταρικών αυτομάτων και των Boolean δικτύων των απλούστερων πολύπλοκων συστημάτων (στην περιγραφή τους και όχι στην συμπεριφορά τους). Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση ενός κρίσιμου χαρακτηριστικού για την συμπεριφορά των συστημάτων αυτών, τη συνεκτικότητα του γράφου που αναπαριστά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οντοτήτων. Το χαρακτηριστικό αυτό «κληρονομείται» και στα υπόλοιπα συστήματα που θα μελετηθούν και έχει τη δική του θέση σε κάθε κεφάλαιο.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται μοντέλα που προσπαθούν να εξηγήσουν την επιδέξια συμπεριφορά κοινωνικών εντόμων.

Η επιτυχημένη συμπεριφορά των οποίων οφείλεται κυρίως, σε τέσσερα χαρακτηριστικά του τρόπου που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι μεθοδολογίες που εμπνέονται για την από τα κοινωνικά έντομα αποτελούν την βάση για την ανάπτυξη όλων των παρακάτω εφαρμογών. Οι μεθοδολογίες αυτές εμπεριέχουν αυτά τα τέσσερα χαρακτηριστικά που αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο.

Στο επόμενο κεφάλαιο αφορά τεχνητές μεθόδους αναπαράστασης-αναπαραγωγής των τρόπων με τους οποίους τα κοινωνικά έντομα ανταλλάσσουν μηνύματα (αλληλεπιδρούν) και αντιλαμβάνονται των φυσικό του κόσμο. Στην φύση τα έντομα χρησιμοποιούν είτε την οσμή τους εναποθέτοντας φερμόνες είτε παράγουν οπτικά ερεθίσματα που ενεργοποιούν τα υπόλοιπα. Σε εφαρμογές έξω από το φυσικό κόσμο όπως στη ρομποτική η χρήση φερμόνων δεν είναι αποτελεί μέθοδο αλληλεπίδρασης μεταξύ των ρομπότ. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι αναπαριστούν τις αλληλεπιδράσεις μέσα από τεχνητά πεδία.

Μια από τις περιοχές εφαρμογών που χρόνια προσπαθεί να «αντιγράψει» την συμπεριφορά των εντόμων, είναι η ρομποτική. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται προσπάθειες συντονισμού μυριάδων απλών ρομπότ για τη συλλογική τους δράσης.

Η πρώτη εφαρμογή που αναπτύσσεται σε αυτή αφορά το πεδίο των συλλογικών ρομπότ (collective robotics). Αποτελεί μια απόπειρα για ένα μοντέλο συμπεριφοράς των ρομπότ που θα οδηγήσει σε δράση των ρομπότ σε κοπάδι, όπως παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα ρομπότ σε αυτή την εφαρμογή δεν είναι μια ομογενής ομάδα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (όπως στις εφαρμογές που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο), αλλά τα ρομπότ είναι διαφοροποιημένα (εξειδικευμένα) και αλληλεξαρτώνται. Το μοντέλο της συμπεριφοράς τους διαθέτει τα τέσσερα χαρακτηριστικά των κοινωνιών των εντόμων, και στοχεύει σε μια απλούστερη δομή των ρομπότ με μικρότερες ικανότητες επικοινωνίας από τις εφαρμογές του κεφαλαίου 5.

Το κεφάλαιο 7 αποτελεί μια παραλλαγή του παραπάνω μοντέλου που είναι

πιο κοντά στα παραδείγματα της φύσης. Συνέπεια αυτού του γεγονότος, η πορεία προς την υλοποίηση του μοντέλου αυτού είναι πιο ξεκάθαρη. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τα προσχέδια για την κατασκευή πραγματικών ρομπότ.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια εφαρμογή για καταμερισμού υπολογιστικού φορτίου σε δίκτυα ομότιμων υπολογιστών (P2P), εμπνεόμενη από τον τρόπο που τα κοινωνικά έντομα κατανέμουν την εργασία. Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται και άλλες στρατηγικές για την εξισορρόπηση φορτίου (load balancing). Ενώ στο κεφάλαιο 9 περιγράφεται ο αλγόριθμος swarm-net και συγκρίνεται με δημοφιλής αλγορίθμους στον καταμερισμό φορτίου σε ένα μοντέλο P2P υπολογιστών.

Στην πορεία ανάπτυξης των μεθόδων για τα δύο πεδία (collective robotics-load balancing) και τη μελέτη της συμπεριφοράς του παρατηρείται ότι αποτελούν ισομορφικές αναπαραστάσεις του ίδιου προβλήματος. Και τα δύο προβλήματα εκφράζονται μέσω ενός δυναμικά μεταβαλλόμενου γράφου, όπου η συνεκτικότητά του καθορίζει την συμπεριφορά του συστήματος, όπως παρουσιάστηκε και στο 2^ο κεφάλαιο.

2 Κυτταρικά Αυτόματα και Random Boolean Networks

Σε αυτό το κεφάλαιο επιχειρείται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες των πολύπλοκων συστημάτων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δύο είδη πολύπλοκων συστημάτων που διαθέτουν τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά και απλή δομή αλλά όχι και απλή συμπεριφορά. Αρχικά παρουσιάζονται τα κυτταρικά αυτόματα και κάποιες εφαρμογές παραδείγματα πάνω σε αυτά.

Συνήθως ορίζουμε ένα κυτταρικό αυτόματο ως ένα πίνακα κυττάρων, καθένα από τα οποία έχει ένα πεπερασμένο σύνολο καταστάσεων, και ανανεώνουν την κατάστασή τους σε διακριτό χρόνο σε συνάρτηση της κατάστασης των κοντινότερων σε αυτό γειτόνων τους, την προηγούμενη χρονική στιγμή.

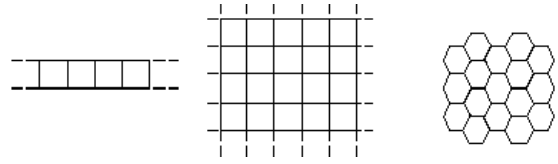
Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται μια γενικότερη μορφή των κυτταρικών αυτομάτων τα Boolean δίκτυα, που μελετήθηκαν ιδιαίτερα στο πεδίο αλληλεπίδρασης των γονιδίων.

2.1 Κυτταρικά αυτόματα

Τα κυτταρικά αυτόματα [2] εισήχθησαν και μελετήθηκαν κατ' αρχήν στη δεκαετία του '60 από τον Ούγγρο μαθηματικό John von Neumann που ερευνούσε την ύπαρξη και τις ιδιότητες μοντέλων "αυτομάτων" που έχουν την ιδιότητα της αναπαραγωγής, δηλαδή της παραγωγής αντιγράφων.

Τα κυτταρικά αυτόματα είναι δομές που μοντελοποιούν τη συμπεριφορά κατανεμημένων συστημάτων με συγκεκριμένη χωρική (γεωμετρική) διάταξη. Ονομάζονται "κυτταρικά" επειδή είναι εμπνευσμένα από κυτταρικές διατάξεις όπου κάθε κύτταρο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του στο χώρο και είναι "αυτόματα" επειδή η συμπεριφορά κάθε κυττάρου είναι πλήρως

καθορισμένη από το αντίστοιχο μοντέλο, άρα "αυτόματη".



Χαρακτηριστικοί τύπου κυτταρικών αυτομάτων είναι τα μονοδιάστατα, τα δισδιάστατα και τα εξαγωνικά κυτταρικά αυτόματα, όπου κάθε κύτταρο εξαρτάται από τα 2, 8, 6 γειτονικά του, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Εσωτερικά, το κάθε κύτταρο έχει ένα συγκεκριμένο αριθμό δυνατών καταστάσεων και μία μηχανή μετάβασης από κατάσταση σε κατάσταση. Π.χ. για ένα κυτταρικό αυτόματο όπου τα κύτταρα μπορούν να έχουν δύο καταστάσεις, 0 ή 1, μία μηχανή μετάβασης μπορεί να περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους κανόνες του τύπου "Εάν όλα τα γειτονικά κύτταρα είναι στην κατάσταση 0, μεταβαίνω στην κατάσταση 0".

Η χωρική διάταξη ενός κυτταρικού αυτομάτου προσδιορίζει σχεδόν μονοσήμαντα τις εξαρτήσεις κυττάρων από κύτταρα, αφού κάθε κύτταρο εξαρτάται από τα γειτονικά του. Σε πιο προχωρημένα μοντέλα, ένα κύτταρο μπορεί να εξαρτάται από πιο απομακρυσμένους γείτονες (π.χ. ένα κύτταρο ενός μονοδιάστατου κυτταρικού αυτομάτου να "βλέπει" δύο θέσεις δεξιά και τρεις αριστερά), να έχει μνήμη που καθορίζει το βαθμό εξάρτησής του (π.χ. ένα κύτταρο ενός δισδιάστατου κυτταρικού αυτομάτου να παύει να βλέπει κάποιο γειτονικό κύτταρο, όταν εκείνο έχει βρεθεί συνεχώς σε μία ορισμένη κατάσταση) κ.ο.κ.

Η συμπεριφορά όλων των κυττάρων ενός κυτταρικού αυτομάτου είναι η ίδια, ενώ σε πιο προχωρημένα μοντέλα μπορεί να χρησιμοποιούνται μεταβλητές μνήμης που διαφοροποιούν τα κύτταρα ανάλογα με το περιβάλλον και την αρχική κατάσταση του καθενός.

Ένα δισδιάστατο κυτταρικό αυτόματο αποτελείται από:

- ✓ έναν δισδιάστατο πίνακα από κύτταρα
- ✓ ένα σύνολο κανόνων μετάβασης των κυττάρων

Κάθε στοιχείο του πίνακα αντιπροσωπεύει μία θέση στον χώρο, δηλαδή ένα κύτταρο. Κάθε κύτταρο μπορεί να βρίσκεται σε μία από 2 ή περισσότερες καταστάσεις, οι οποίες μπορούν να αντιστοιχηθούν σε διάφορες φάσεις της "ζωής" και τον "θάνατο". Σκεφτείτε τις καταστάσεις σαν χρώματα: η μαύρη κατάσταση αντιστοιχεί στην ζωή και η λευκή στον θάνατο. Αν η θέση είναι "μαύρη" (κατειλημμένη), αυτό σημαίνει ότι εκεί ζει ένα "ον", ένα κύτταρο. Σε μία δεδομένη χρονική στιγμή, το κύτταρο που πιθανώς ζει σε αυτήν την θέση θα συνεχίσει να επιβιώνει αν το επιτρέπουν οι κανόνες. Οι κανόνες λαμβάνουν υπόψη τον αριθμό των άλλων κυττάρων στην γειτονιά: αν αυτά είναι λίγα, το κύτταρο πεθαίνει από μοναξιά, αν είναι πολλά πεθαίνει από υπερπληθυσμό, αλλιώς συνεχίζει να ζει ή ακόμη και αναπαράγεται (γεμίζει διπλανές άδειες θέσεις). Το πώς ακριβώς θα ερμηνευθεί το "πολλά" και "λίγα" εξαρτάται από τις παραμέτρους του κυτταρικού αυτόματου.

Στη δεκαετία του 1980 ο Steve Wolfram προχώρησε στην ταξινόμηση των κυτταρικών αυτομάτων σύμφωνα με τη συμπεριφορά τους και τα αποτελέσματα έδειξαν πολλές ομοιότητες με τα δυναμικά συστήματα. Η τέσσερις κατηγορίες των κυτταρικών αυτομάτων σύμφωνα με τον Steve Wolfram:

Κατηγορία 1 – σημεία ισορροπίας: το σύστημα καταλήγει σε μια καθορισμένη κατάσταση μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα (τη μεταβατική συμπεριφορά).

Κατηγορία 2 – οριακοί κύκλοι: το σύστημα αναπτύσσει περιοδική συμπεριφορά.

Κατηγορία 3 – χαοτική: το σύστημα γίνεται απεριοδικό, διαρκώς μεταβάλλεται με απρόβλεπτο τυχαίο τρόπο.

Κατηγορία 4 – δομημένη: το σύστημα μπορεί να αναπτύσσει δομημένη, με ύπαρξη σχηματισμών – μορφών και τοπικών σχηματισμών που κινούνται στο χώρο και στο χρόνο. Όμως αυτή η συμπεριφορά του συστήματος είναι ασταθής και παρουσιάζει στοιχεία από συστήματα της κατηγορία 1, 2 και 3, ιδιαίτερα για τα συστήματα που

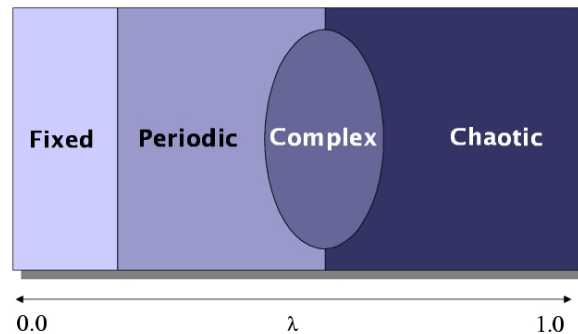
παρουσιάζουν συμπεριφορές μεταξύ της κατηγορίας 2 και 3, αποκαλούνται συστήματα στο «χείλος του χάους».

Όπως τα παραπάνω φαίνεται η αντιστοιχία των κατηγοριών 1 έως 3 με τη συμπεριφορά των δυναμικών συστημάτων, η κατηγορία που διαφοροποιείται είναι η 4. Για μια πιο αυστηρά καθορισμένη ταξινόμηση εισάγεται η παράμετρος Langton λ . Η παράμετρος επιτρέπει την αντιστοίχιση της συμπεριφοράς του συστήματος με ένα βαθμωτό μέγεθος, του οποίου τιμή κοντά στο μηδέν καταδεικνύει σύστημα της κατηγορίας 1, ενώ για τιμές κοντά στο 1 παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά.

Για δεδομένο κυτταρικό αυτόματο με k διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να μεταβεί το κάθε κύτταρο του συστήματος και r το μέγεθος που καθορίζει την ακτίνα τις γειτονιάς κάθε κυττάρου, τότε ο συνολικός αριθμός διαφορετικών κανόνων για το κυτταρικό αυτόματο είναι k^{2r+1} .

Ένα σύνολο από τους κανόνες του κυτταρικού αυτόματου οδηγεί σε αδρανή συστήματα, αν n_q το πλήθος των κανόνων που οδηγούν σε αδρανή συμπεριφορά τότε η

$$\text{παράμετρος Langton } \lambda = \frac{k^{2r+1} - n_q}{k^{2r+1}}.$$



Η τιμή $\lambda=1-1/k$ αποτελεί το σημείο μετάβασης φάσης κατάστασης του συστήματος από την οργανωμένη συμπεριφορά (που καταλήγουν σε κάποιο σημείο ισορροπίας ή οριακό κύκλο μετά από σύντομη μεταβατική περίοδο) σε χαοτική συμπεριφορά. Κυτταρικά αυτόματα κοντά στη κρίσιμη τιμή χαρακτηρίζονται από πολύπλοκη συμπεριφορά και εμφανίζουν δομημένους σχηματισμούς. Για τιμές μεταξύ $\lambda=0$ και $\lambda=1-1/k$ έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι τα κυτταρικά αυτόματα ανήκουν στις κατηγορίες

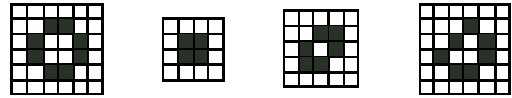
2 και 4, με τα κυτταρικά αυτόματα της κατηγορίας 4 να έχουν κατά μέσο όρο μεγαλύτερη τιμή λ από αυτά της κατηγορίας 2, επιβεβαιώνοντας την υπόθεση του Wolfram. Η περιοχή όπου εντοπίζονται τα συστήματα που ανήκουν στη κατηγορία 4 ονομάζεται και κρίσιμη περιοχή Langton.

2.1.1 Το παιχνίδι της ζωής

Πρόκειται για το πλέον γνωστό δισδιάστατο κυτταρικό αυτόματο, επινοήθηκε από τον John Conway (δεκαετία 1960), και βασίζεται στους παρακάτω κανόνες μετάβασης. Μετράμε γειτονίες 8 θέσεων (τα διπλανά και διαγώνια στοιχεία μίας θέσης). Κάθε κύτταρο έχει μόνο δύο καταστάσεις (ζωή-θάνατος). Οι κανόνες μετάβασης από κατάσταση σε κατάσταση ανάλογα με τον αριθμό των ζωντανών γειτόνων είναι:

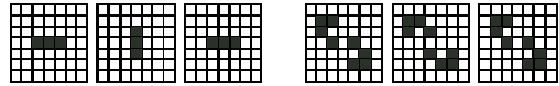
- ✓ Αν ένα ζωντανό κύτταρο έχει κάτω από 2 (ζωντανούς) γείτονες, πεθαίνει από μοναξιά
- ✓ Αν ένα ζωντανό κύτταρο έχει πάνω από 3 (ζωντανούς) γείτονες, πεθαίνει από υπερπληθυσμό
- ✓ Αν ένα ζωντανό κύτταρο έχει ακριβώς 2 (ζωντανούς) γείτονες, συνεχίζει να ζει
- ✓ Αν ένα νεκρό κύτταρο έχει ακριβώς 3 (ζωντανούς) γείτονες, γεννιέται.

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, οι κανόνες αυτοί μεταφράζουν ποιοτικά τον τρόπο που τα πραγματικά έμβια όντα αλληλεπιδρούν μέσω του περιβάλλοντός τους για να αναπαραχθούν. Έτσι, ακόμη και με τυχαία αρχικοποίηση, προκύπτουν μορφές που μπορούν να κινηθούν, να ταλαντωθούν περιοδικά ή ακόμη και να αναπαραχθούν στο χώρο (εξ' ου και "παιχνίδι της ζωής"). Τα σχήματα 2, 3 και 4 παρουσιάζουν τρία είδη σχηματισμών, τους στατικούς ή ακίνητους, τους περιοδικούς και τους μετακινούμενους, αντίστοιχα.



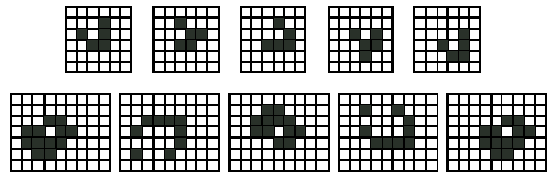
Σ

χήμα 2. Στατικοί ή ακίνητοι σχηματισμοί στο παιχνίδι της ζωής



Σ

χήμα 3. Περιοδικοί σχηματισμοί στο παιχνίδι της ζωής (περίοδος 2 βημάτων)



Σ

χήμα 4. Μετακινούμενοι σχηματισμοί στο παιχνίδι της ζωής

Άλλα πιο πολύπλοκα και ενδιαφέροντα δισδιάστατα κυτταρικά αυτόματα μπορούν να κατασκευασθούν με τη βοήθεια γενικευμένων ποιοτικών κανόνων, με χρήση μνήμης, με προσθήκη συναρτήσεων προσαρμογής ή εξειδίκευσης κ.ο.κ. όπως αναφέρθηκε πιο πάνω.

2.1.2 Το κυτταρικό αυτόματο ως μέσο διάδοσης διεργάσεων

Ένα διεργέσιμο μέσο είναι ένα χωρικά κατανομημένο σύστημα από πανομοιότυπα και τοπικά διασυνδεδεμένα στοιχεία, που χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να μεταδίδουν σήματα (διαδίδεται διαμέσου τους σήμα) για μεγάλη απόσταση [10].

Ένα κυτταρικό αυτόματο ορίζεται $A = \langle L, Q, u, f \rangle$ για ένα d -διάστατο πίνακα με m ομοιόμορφα κύτταρα, $d \geq 1$, $m \geq 1$, ένα πεπερασμένο σύνολο Q των καταστάσεων των κυττάρων, $|Q| > 1$, και δύο συναρτήσεις $u: L \rightarrow L^k$ που δίνει τη γειτονιά κάθε κυττάρου και $f: Q^k \rightarrow Q$ η συνάρτηση μετάβασης της κατάστασης του κυττάρου. Κάθε κύτταρο $x \in L$ μεταβάλλει την κατάστασή του σε διακριτό χρόνο με το κανόνα: $x^{t+1} = f(u(x)^t) = f(y_1^t, \dots, y_k^t)$.

Το μοντέλο ενός διεργέσιμου με αλληλεπιδράσεις μεταξύ των γειτόνων του μέσου ως κυτταρικό αυτόματο ορίζεται ως $E = \langle \mathbb{Z}^2, \{+, -, 0\}, u, f \rangle$ όπου $\forall x \in \mathbb{Z}^2, |\mathbb{Z}^2| = m$, $u(x) = \{y \in \mathbb{Z}^2 \mid \|x - y\|_\infty \leq 1\}$ και

$$x^{t+1} \begin{cases} +, ((x^t = 0) \cap (\theta_1 \leq |\{y \in u(x) \mid y^t = +\}|)) \\ -, x^t = + \\ 0, \text{ διαφορετικά} \end{cases}$$

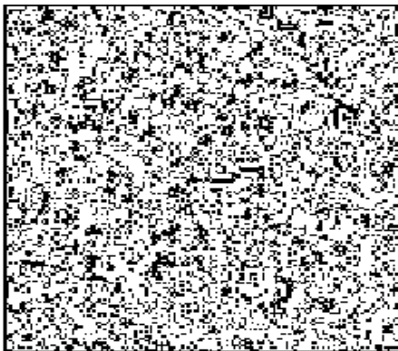
για $1 \leq \theta_1 \leq \theta_2 \leq 8$ και το διάστημα (θ_1, θ_2) καλείται διάστημα διέργησης.

Για διαφορετικές διαστήματα (θ_1, θ_2) μελετάμε την συμπεριφορά του κυτταρικού αυτομάτου ως μέσο διάδοσης της διέργησης. Φαινομενολογικά ταξινομούμε τις συμπεριφορές σύμφωνα με τις κατηγορίες του εισήγαγε ο Wolfram.

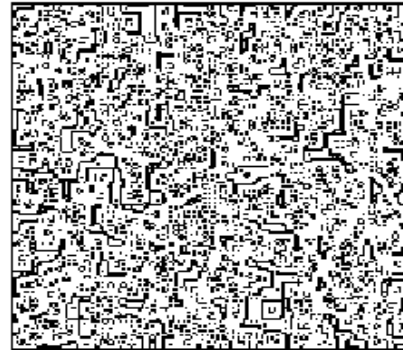
Κατηγορία 1: Το σύστημα εξελίσσεται σε ένα αδρανές σύστημα, όλα τα κύτταρα βρίσκονται στην κατάσταση 0, η διέργηση «αποσβέστηκε». Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα συστήματα με $\theta_1 > 2$, ήτοι το 58,3% των συστημάτων.

Κατηγορία 2: Τα συστήματα σε αυτή την κατηγορία οδηγούνται στην «απόσβεση» της διέργησης ή σε μία «παλλόμενη» συμπεριφορά, όπου τα κύτταρα διεγείρονται περιοδικά, και η εξέλιξη τους στην μία ή στην άλλη μορφή εξαρτάται από την αρχική κατανομή των διεργεμένων κυττάρων. Τα συστήματα που εμφανίζουν αυτού του είδους την συμπεριφορά έχουν $\theta_1 = 1$ και $\theta_2 = 3, \dots, 8$ και $\theta_1 = 2$ και $\theta_2 = 4, \dots, 8$. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκει το 30,6% των συστημάτων.

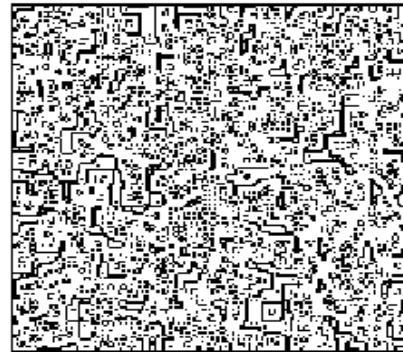
$$\theta_1 = 1, \theta_2 = 3$$



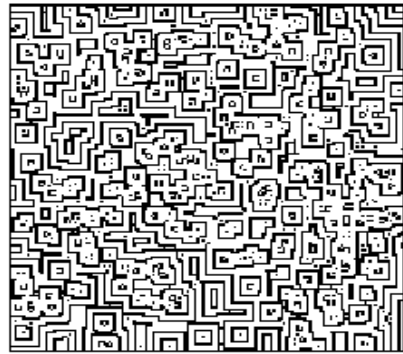
$$\theta_1 = 1, \theta_2 = 4$$



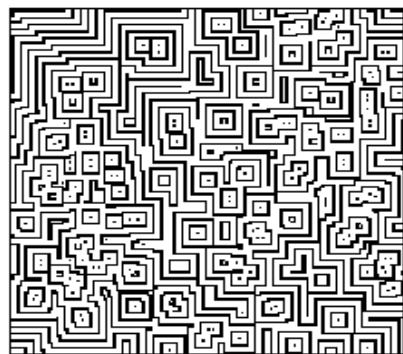
$$\theta_1 = 1, \theta_2 = 4$$



$$\theta_1 = 1, \theta_2 = 5$$



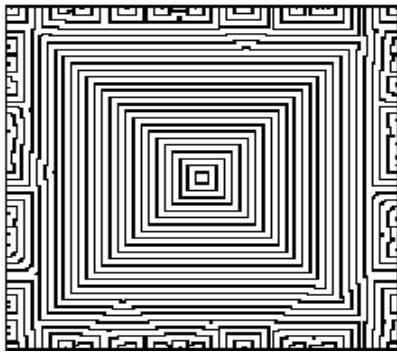
$$\theta_1 = 1, \theta_2 = 6$$



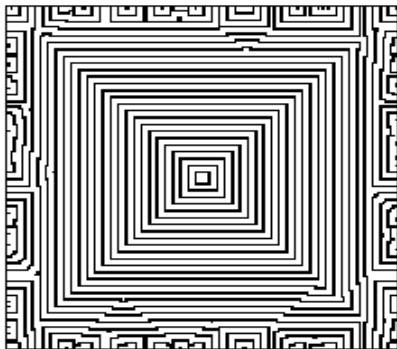
Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε το σχηματισμό «νησίδων» διεργεμένων κυττάρων που είναι γεννήτορες κυμάτων. Όσο αυξάνεται το πάνω κατώφλι παρατηρούμε το

σχηματισμό μεγαλύτερων και ταυτόχρονα λιγότερων «νησίδων».

$$\theta_1 = 1, \theta_2 = 7$$

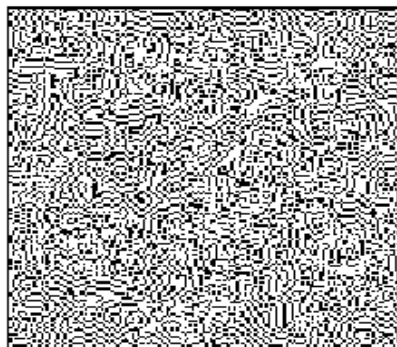


$$\theta_1 = 1, \theta_2 = 8$$

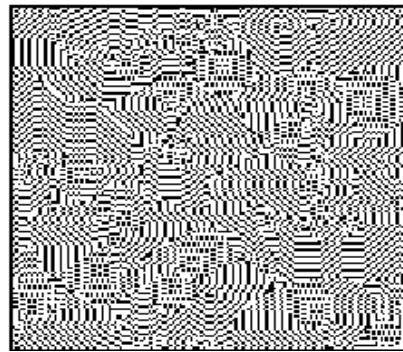


Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε το σχηματισμό ενός κύριου κύματος με πηγή το κέντρο του πίνακα και το παράλληλα μικρές νησίδες στα όρια του πίνακα.

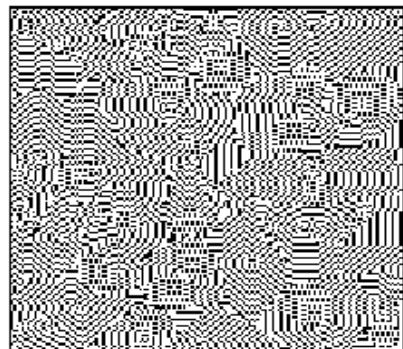
$$\theta_1 = 2, \theta_2 = 4$$



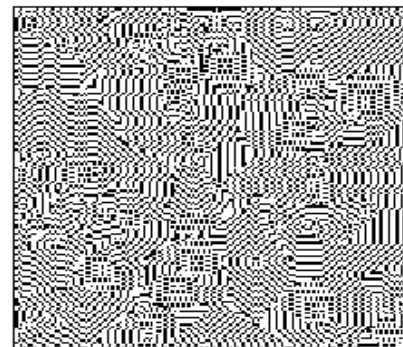
$$\theta_1 = 2, \theta_2 = 5$$



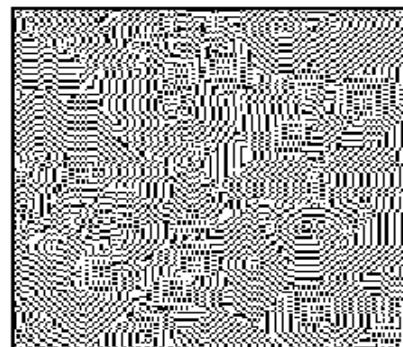
$$\theta_1 = 2, \theta_2 = 6$$



$$\theta_1 = 2, \theta_2 = 7$$



$$\theta_1 = 2, \theta_2 = 8$$

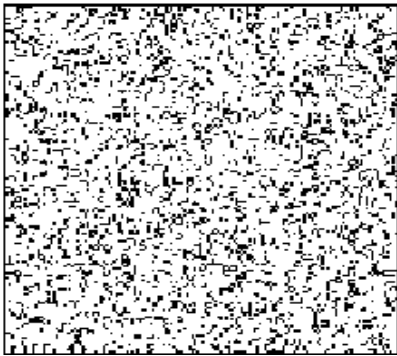


Με την αύξηση του κάτω φράγματος παρατηρούμε τη δημιουργία συσσωματώσεων ενεργών κυττάρων που ταξιδεύουν και εξισορροπούνται «ακουμπώντας» το ένα το άλλο. Παράλληλα λειτουργούν και ως

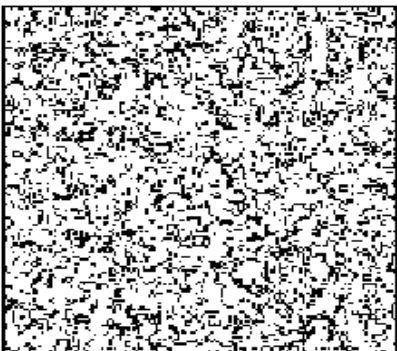
γεννιήτορες κυμάτων που έχουν έντονα ακανόνιστη μορφή.

Κατηγορία 3: Η συμπεριφορά του μέσου χαρακτηρίζεται από απεριοδικές απρόβλεπτες (χαοτικές) ταλαντώσεις. Τα συστήματα που εμφανίζουν αυτού του είδους την συμπεριφορά έχουν $\theta_1=1$ και $\theta_2=1,2$ και $\theta_1=2$ και $\theta_2=3$. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκει το 8,3% των συστημάτων.

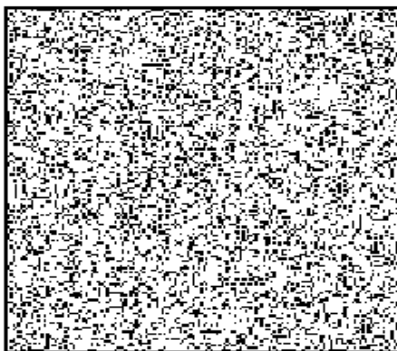
$$\theta_1 = 1, \theta_2 = 1$$



$$\theta_1 = 1, \theta_2 = 2$$



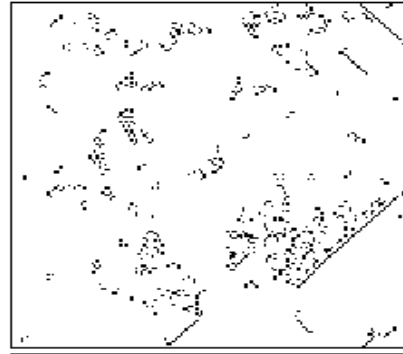
$$\theta_1 = 2, \theta_2 = 3$$



Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε το σχηματισμών μικρών ομάδων διεργεμένων κυττάρων, που απλώνονται συγκρούονται με άλλες ομάδες και σχηματίζουν μεγαλύτερες και ξανά διασπώνται σε μικρότερες.

Κατηγορία 4: Το σύστημα εμφανίζει διαδιδόμενους τοπικούς σχηματισμού, μορφώματα διέργησης. Τα συστήματα που εμφανίζουν αυτού του είδους την συμπεριφορά έχουν $\theta_1=2$ και $\theta_2=2$. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκει το 2,8% των συστημάτων.

$$\theta_1 = 2, \theta_2 = 2$$

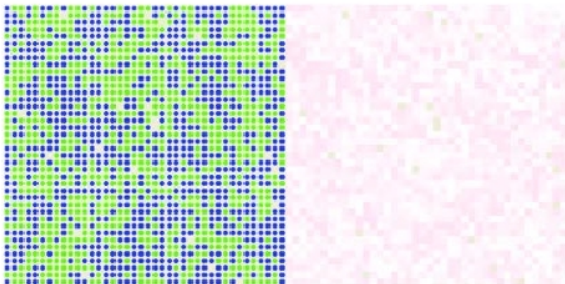


2.1.3 Μοντελοποιώντας την κοινωνική βία με τη χρήση κυτταρικών αυτομάτων

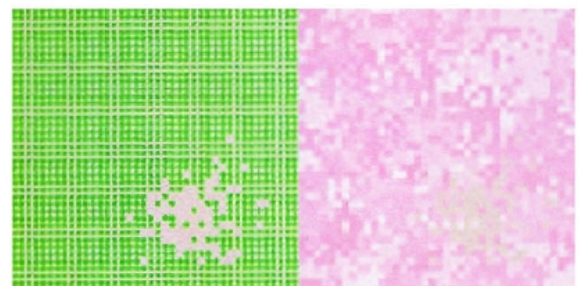
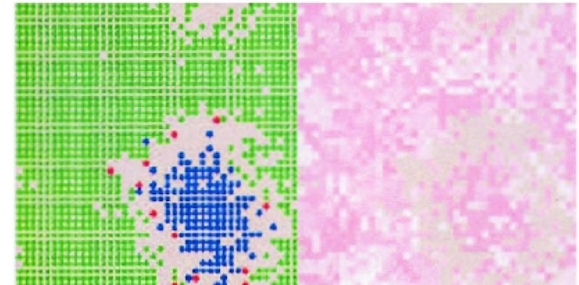
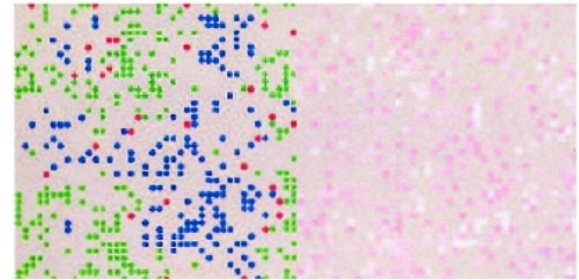
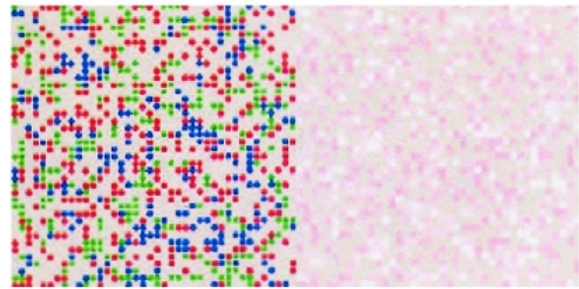
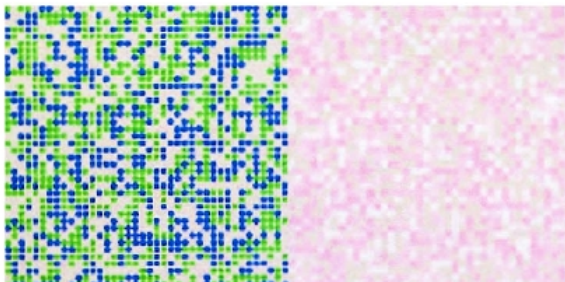
Αποτελεί μια προσπάθεια [11] προσέγγισης της κοινωνικής συμπεριφοράς με τη χρήση κυτταρικών αυτομάτων. Το θέμα αποτελεί την προσπάθεια καταστολής από την κεντρική εξουσία της κοινοτικής βίας μεταξύ δύο εχθρικών εθνικών ομάδων.

Έχουμε δύο εθνοτικές ομάδες μια με μπλε και μία με πράσινο χρώμα, και με μαύρο χρώμα συμβολίζεται η ομάδα καταστολής. Όταν ένα άτομο της ομάδας ενεργοποιείται, που σημαίνει ότι σκοτώνει ένα άτομο από την αντίπαλη ομάδα, γίνεται κόκκινο. Η πιθανότητα κάποιο άτομο να δολοφονήσει εξαρτάται από $1-L$, όπου L ο δείκτης νομιμοφροσύνης και σεβασμού της ζωής της αντίπαλης ομάδας, και από την παρουσία στη γειτονία του κάποιο οργάνου καταστολής που δρα ανασταλτικά.

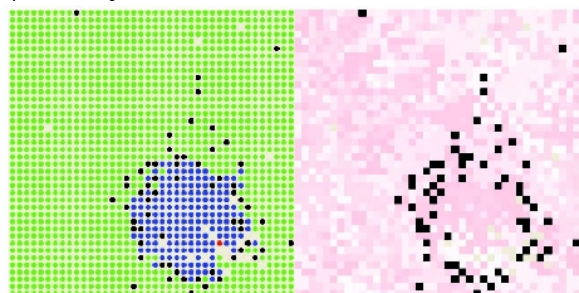
Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε την ειρηνική συμβίωση, χωρίς την παρουσία ομάδων καταστολής. Το γεγονός οφείλεται στη υψηλή νομιμοφροσύνη. Το δεξιό τμήμα της εικόνας με το χρώμα δείχνει πόσο άγριο, εξοργισμένο είναι το κάθε άτομο, όταν γίνει κόκκινο έχει φτάσει σε τέτοιο βαθμό που οδηγείται στο φόνο.



Εάν μειωθεί η νομιμοφροσύνη των ατόμων οδηγούμαστε στη γενοκτονία.



Με την παρουσία της ομάδας καταστολής δημιουργείται ένας ασφαλής φύλακας.



2.2 Η δυναμική συμπεριφορά RBN δικτύων αλληλεπίδρασης των γονιδίων

Το σύστημα [13] αποτελεί μια μορφή κατευθυνόμενου γράφου ή απλού νευρωνικού δικτύου Hopfield (όπου κάθε νευρώνα μπορεί να βρίσκεται μόνο σε δύο καταστάσεις). Το δίκτυο αυτό είναι δυναμικό, κάθε κόμβος μπορεί να βρίσκεται σε δύο καταστάσεις 0,1 ανάλογα με το κανόνα που εφαρμόζει πάνω στις καταστάσεις των κόμβων, με τους οποίους συνδέεται με ακμές κατευθυνόμενες προς αυτόν (είσοδοι).

Σε κάθε χρονική στιγμή κάθε κόμβος του δικτύου έχει τιμή 0 ή 1 (δυαδικό δίκτυο) η ακολουθία των 0, 1 που αντιστοιχούν στο κάθε κόμβο σχηματίζουν μία «λέξη», που είναι η ταυτότητα της κατάστασης που βρίσκεται το σύστημα. Για ένα σύστημα n κόμβων υπάρχουν 2^n καταστάσεις (πεπερασμένο σύνολο) τις οποίες μπορεί να μεταβεί. Η μετάβαση του συστήματος σε νέα κατάσταση γίνεται παράλληλα και κάθε κόμβος σύμφωνα με έναν κανόνα (διαφορετικό για κάθε κόμβο) μεταβαίνει στην επόμενη κατάσταση ανάλογα με την κατάσταση των κόμβων εισόδων του κόμβου αυτού, κατά την προηγούμενη χρονική στιγμή.

Οι καταστάσεις που δεν έχουν γεννήτορες, δεν μπορεί το σύστημα να μεταβεί σε αυτές από άλλη κατάσταση παρά μόνο εάν ξεκινήσει από αυτές, αποτελούν ένα σύνολο που αποκαλείται «κήπος της Εδέμ». Η ακολουθία μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη, αποτελεί τη «τροχιά» του συστήματος. Λόγω του πεπερασμένου των καταστάσεων, η τροχιά του συστήματος θα βρεθεί ξανά σε καταστάσεις που είχε «περάσει» και προηγουμένως, δημιουργώντας κύκλους (στην εκφυλισμένη του μορφή ο κύκλος μπορεί να αποτελείται και από μόνο μια κατάσταση). Οι κύκλοι που στους οποίους καταλήγει το σύστημα είναι οι λεκάνες έλξης.

Η συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία συγκλίνει στη λεκάνη έλξης-πηγάδι



Για δίκτυο n κόμβων, μια κατάσταση B είναι η 1010...11 το σύνολο των 2^n λέξεων είναι ο χώρος κατάστασης (state space) του συστήματος.

Ένας μέρος της τροχιάς στο χώρο κατάστασης, όπου C είναι η επόμενη της B και η A είναι ένας πιθανός γεννήτορας (pro-image) της B .

Αργά ή γρήγορα κάθε τροχιά θα συναντήσει μια κατάσταση που είχε επισκεφθεί και προηγουμένως- μπαίνοντας σε ένα κύκλο έλξης- ισορροπίας. Η τροχιά που οδηγεί σε ένα έναν κύκλο έλξης είναι σύνολο μεταβατικών καταστάσεων. Η περίοδος του κύκλου είναι το πλήθος των καταστάσεων, που των σχηματίζουν, που μπορεί να είναι ακόμη και μία.

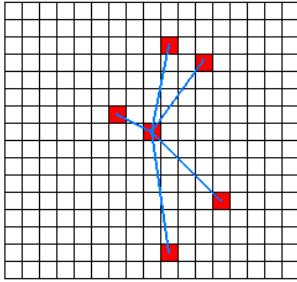
Από μία κατάσταση του ελκυστή βρίσκουμε τους γεννήτορες τις και τους γεννήτορες αυτών μέχρι να φτάσουμε στις καταστάσεις που ανήκουν στον κήπο της Εδέμ. Ο γράφος αυτός αποτελεί το μεταβατικό δένδρο με ρίζα στον ελκυστή.

Κατασκευάζοντας τα μεταβατικά δένδρα για καθεμία από τις καταστάσεις του ελκυστή έχουμε ολόκληρο το γράφο της λεκάνης έλξης.

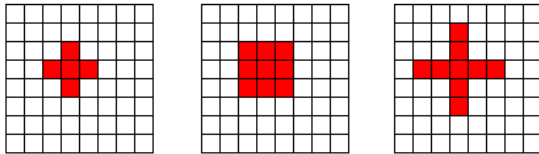
Τέλος κατασκευάζουμε την λεκάνη έλξης για κάθε ελκυστή στο χώρο κατάστασης του δικτύου.

ισορροπίας (attractor basin), μεγάλη ταχύτητα τάξη, μικρή ταχύτητα οδηγεί σε αταξία και χάος. Η ταχύτητα αυτή είναι άμεσα συσχετισμένη με το λόγο του πλήθους των καταστάσεων που ανήκουν στον «κήπο της Εδέμ» προς το σύνολο.

Με τη μορφή αυτή των δυναμικών δικτύων, μπορούν να παρασταθούν και τα κυτταρικά αυτόματα. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι τα κυτταρικά αυτόματα αποτελούν ένα μικρό υποσύνολο των δυναμικών δικτύων. Το κυτταρικό αυτόματο δεν είναι παρά ένα δίκτυο με τη μορφή πλέγματος, όπου κάθε κόμβος συνδέεται με τους 4, 6 ή 8 γειτονικούς κόμβους και όλοι οι κόμβοι ακολουθούν τον ίδιο κανόνα.



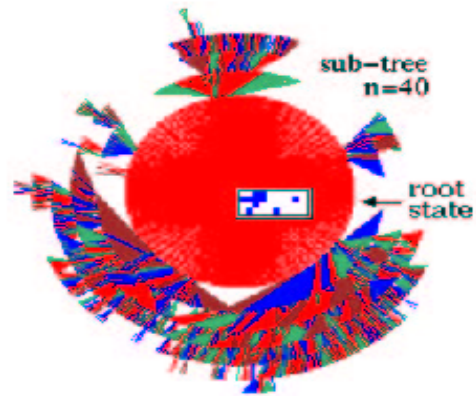
Αν θεωρήσουμε ότι οι κόμβοι ενός RBN δικτύου αντιστοιχούν σε ένα κύτταρο του παραπάνω πλέγματος τότε παρατηρήστε πως ορίζεται, η γειτονιά του ενός κόμβου.



Αντίθετα ο προσδιορισμός της γειτονιάς για τα κυτταρικά αυτόματα είναι ομοιογενής. Παραπάνω διαφορετικές γειτονιές ενός κυττάρου.

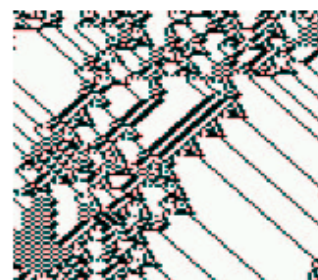
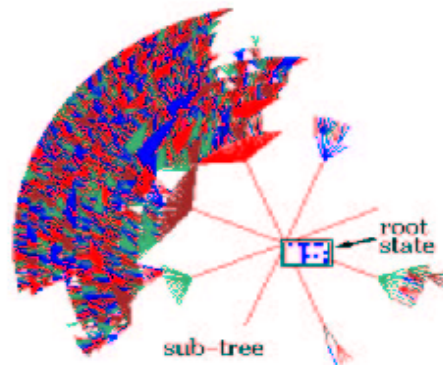
Στις παρακάτω εικόνες παρατηρούμε χαρακτηριστικά υποδένδρα από τις λεκάνες έλξης ενός κυτταρικού αυτομάτου μεγέθους $n=100$ (10×10) με γειτονία 4 κύτταρα (άρα ο κανόνας έχει $k=5$ εισόδους, 4 γειτονικοί κόμβοι και ο ίδιος ο κόμβος).

Αν τοποθετήσουμε ακολουθίες των bit (συμβολοσειρά μεγέθους 100) τη μία κάτω από την άλλη, που σε διαδοχικές χρονικά καταστάσεις, και τα 1 τα παριστάνουμε με μαύρες κουκίδες και τα 0 με λευκές προκύπτουν οι παρακάτω εικόνες του χώρου κατάστασης ως προς το χρόνο (κάθετος άξονας).



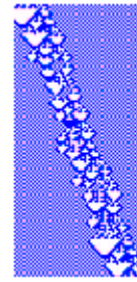
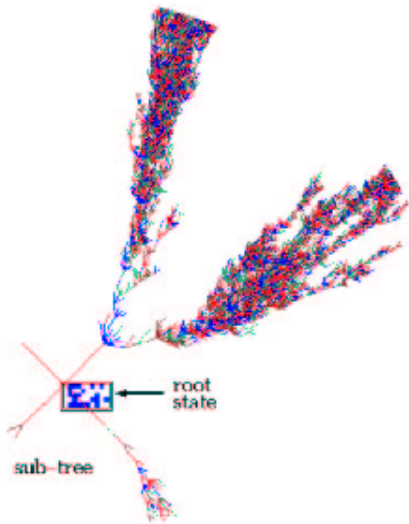
Ordered rule 01dc3610

Το σύστημα παρατηρούμε ότι πολύ γρήγορα φθάνει σε ισορροπία, δεν μεταβάλλεται η κατάσταση του.



Complex rule 6c1e53a8

Το σύστημα αυτό παρουσιάζει πιο πολύπλοκη συμπεριφορά, και το μεταβατικό δένδρο είναι πιο μεγάλο.

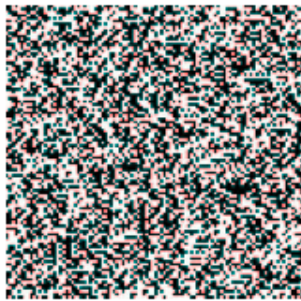


(d) b51e9ce8



(e) b51e9ce8

Ακολουθεί ένα παράδειγμα για ένα δίκτυο $n=16$ κόμβων που αποτελείται από 89 συνολικά λεκάνες έλξης, αλλά παρουσιάζονται μόνο λίγες από αυτές.



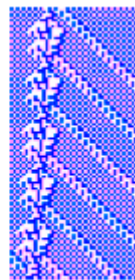
Chaotic rule 994a6a65

Η χαοτική συμπεριφορά, είναι εμφανής από την πολύ αργή σύγκλιση στο ελκυστή.

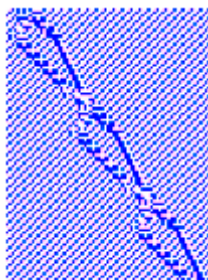
Ο παράσταση του χώρου κατάστασης ως προς το χρόνο για μονοδιάστατα αυτόματα με γείτονες τα δύο δεξιά και τα δύο αριστερά ($k=5$).



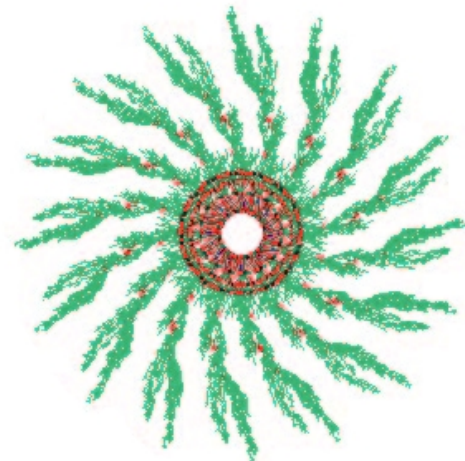
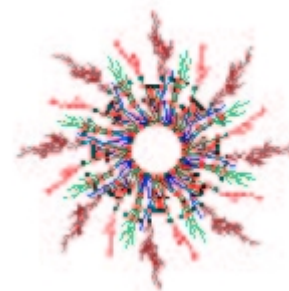
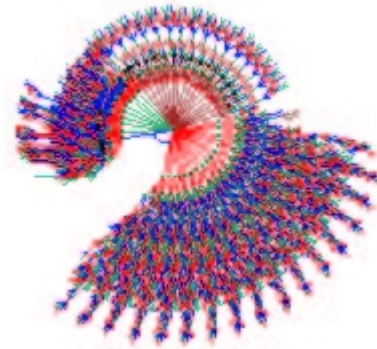
(a) 7e8696de

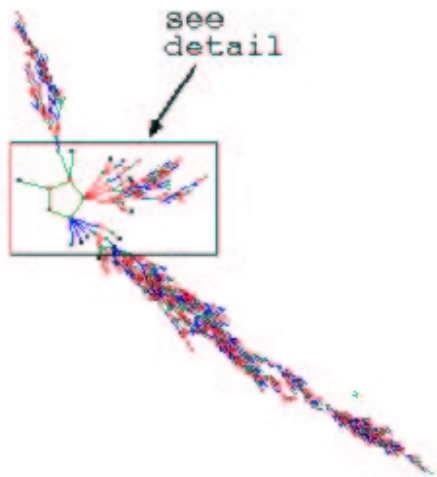


(b) 89ed7106



(c) 89ed7106

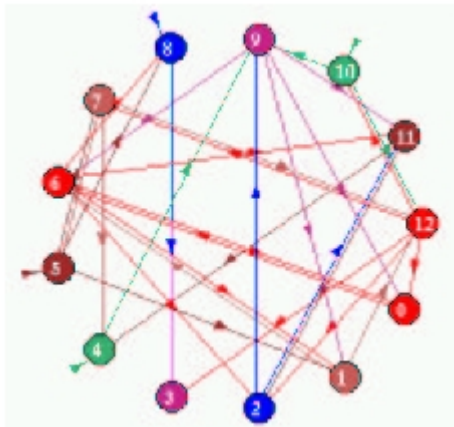




Η παρακάτω εικόνα είναι πιο λεπτομερής απεικόνιση του πλαισίου στην παραπάνω εικόνα.



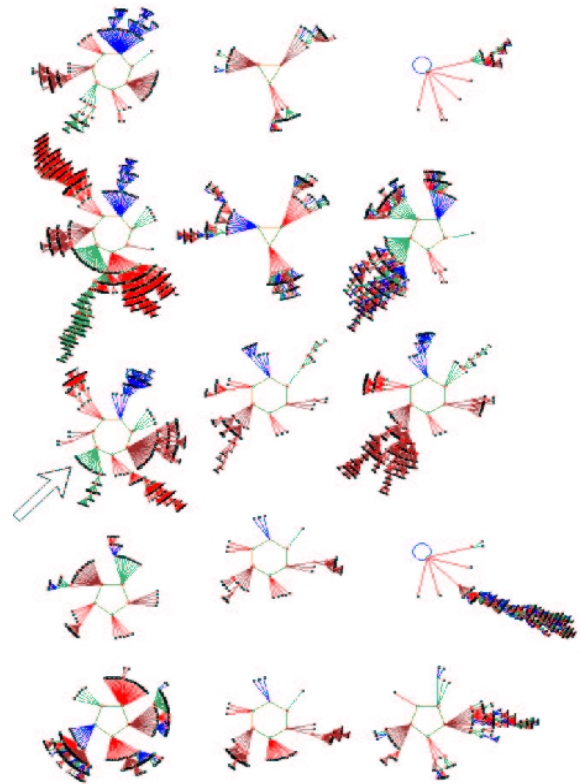
Ένα ακόμη μικρό δίκτυο με $n=13$ κόμβους και $k=3$ το πλήθος των κόμβων από τους οποίους εξαρτάται η επόμενη κατάσταση του κάθε κόμβου.



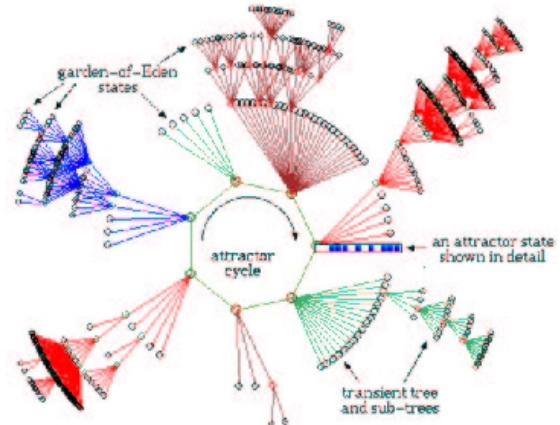
Ο πίνακας που περιγράφει τις συνδέσεις και τους κανόνες που χρησιμοποιεί κάθε κόμβος.

el.	wiring	rule
12	10, 1, 7	86
11	6, 2, 9	4
10	10, 10, 12	196
9	2, 10, 4	52
8	5, 6, 8	234
7	12, 5, 12	100
6	1, 9, 0	6
5	5, 7, 5	100
4	4, 11, 7	6
3	8, 12, 12	94
2	11, 6, 12	74
1	6, 5, 9	214
0	12, 9, 6	188

Οι $2^{13}=8192$ καταστάσεις του χώρου κατάστασης του δικτύου σχηματίζουν 15 λεκάνες έλξης με περίοδο από 1 έως 7 με κάθε λεκάνη να αποτελείται από 68 έως 2724 καταστάσεις.



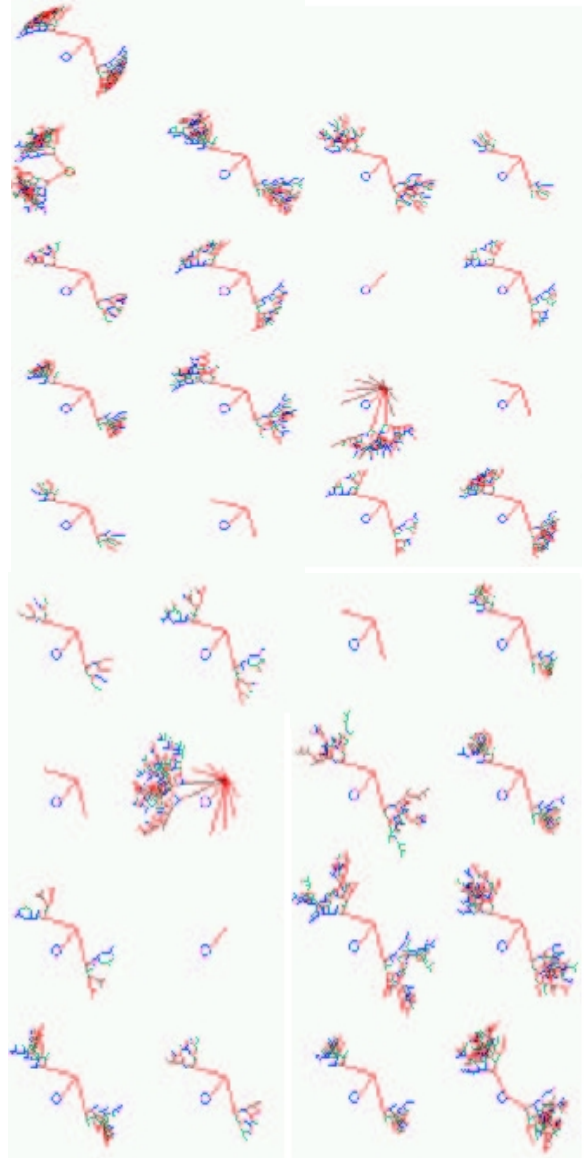
Ακολουθεί η λεκάνη έλξης που σημαδεύει το βέλος στην παραπάνω εικόνα. Το τις 604 καταστάσεις αυτής της κατάστασης οι 523 ανήκουν στον κήπο της Εδέμ, που δείχνει σύντομη μεταβατική περίοδο και ευστάθεια, με περίοδο 7.



Στη κατηγορία των γενετικών (Random Boolean Networks) που μελέτησε ο Kauffman τα γονίδια λειτουργούν ως δυαδικοί διακόπτες-είναι ενεργά ή όχι, κωδικοποιώντας την παραγωγή πρωτεϊνών και επηρεάζουν ταυτόχρονα την ενεργοποίηση και άλλων

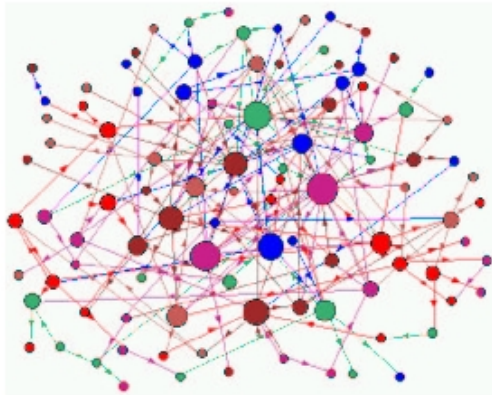
γονιδίων. Σε αυτά τα δίκτυα αν και το πλήθος των δυνατών καταστάσεων που μπορεί να βρεθούν (θεωρώντας ότι η κατάσταση του δικτύου αντιπροσωπεύεται από μία λέξη που το κάθε γράμμα της είναι $\{0,1\}$ ανάλογα αν το αντίστοιχο γονίδιο είναι ενεργό) είναι πολύ μεγάλο και για λίγους ακόμη κόμβους – γονίδια, η περιοδικότητα του χώρου καταστάσεων είναι σχετικά μικρή ακόμη και στα τυχαία κατασκευασμένα δίκτυα. Σύμφωνα με τον Kauffman αυτοί οι κύκλοι καθορίζουν χρονικά συγχρονίζουν κρίσιμες λειτουργίες, π.χ. την διαίρεση του κυττάρου. Επιπλέον οι κύκλοι αυτοί λειτουργούν ως ελκυστές (attractor ευσταθείς οριακοί κύκλοι) που εξασφαλίζουν την παραγωγή του ίδιου αποτελέσματος πέρα από κάθε διαταραχή που διέκοπτε την λειτουργία του κυττάρου, καθιστώντας πιο ευσταθείς τις διαδικασίες του ζώντος οργανισμού.

Στο παρακάτω παράδειγμα μελετούμε την επίδραση που έχει η «μετάλλαξη» του κανόνα κατά ένα bit. Πάνω αριστερά είναι η λεκάνη έλξης του αρχικού κανόνα με $k=3$ γείτονες και με κανόνα 195 (δεκαεξαδικός) και καταλήγει σε ένα και μοναδικό σημείο ισορροπίας. Μετατρέπουμε τον κανόνα στον ισοδύναμο του για $k=5$ γείτονες με κανόνα f00ff0f, όπου κάθε κατάσταση περιγράφεται και ο κανόνας με 32 bit. Οπότε για τις 32 «μετάλλαξης» κατά ένα bit, παρατηρούμε ότι καταλήγουν στην ίδια κατάσταση ισορροπίας. Αν θεωρούσαμε ότι ο κανόνας αποτελεί το γονότυπο τότε η κατάσταση ισορροπίας του δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως ο φαινότυπος.

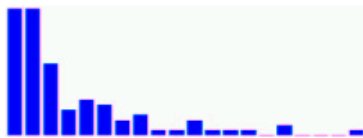


Μελετώντας τη δικτυακή τοπολογία των πραγματικών κυτταρικών σημάτων και των μεταβολικών δικτύων παρατηρούμε πως η συνεκτικότητα τους δεν είναι κλιμακωμένη (scale-free), όπου η συχνότητα των ακμών (το πλήθος των ακμών σε κάθε κόμβο) ισχνά ακολουθεί κάποια power law κατανομή. Τα περισσότερα μέλη έχουν λίγες εξαρτήσεις και λίγα πολλές. Το μονοπάτι που καθιστούν το δίκτυο συνεκτικό παίρνουν από αυτούς τους λίγους αλλά έντονα διασυνδεδεμένους κόμβους, ώστε αφαιρώντας έναν από αυτούς το δίκτυο να χωρίζεται σε υπογράφους.

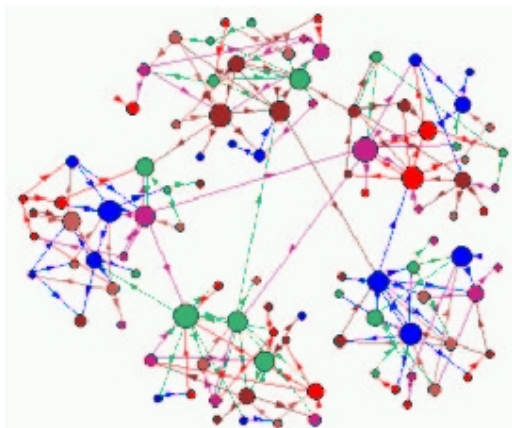
Στις παρακάτω εικόνες έχουμε δύο υποθετικούς γράφους με $n=100$ κόμβους και οι ακμές έχουν καταταξιωθεί με power law κατανομή, με μέσο βαθμό κάθε κόμβου $k \approx 2,2$.



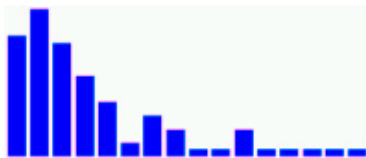
Πλήρως συνδεδεμένος γράφος



Στο x άξονα ο βαθμός κάθε κόμβου και στο y άξονα το πλήθος των κόμβων.



Ένα δίκτυο από 5 ισχνά συνδεδεμένους κόμβους που διασυνδέονται με 20 κόμβους σχηματίζοντας ένα συνεκτικό υπογράφο ο καθένας



Στο x άξονα ο βαθμός κάθε κόμβου και στο y άξονα το πλήθος των κόμβων. Παρατηρούμε ότι η δύο κατανομές είναι παρόμοιες παρά την έντονη μορφολογική και δυναμική διαφορά των γράφων.

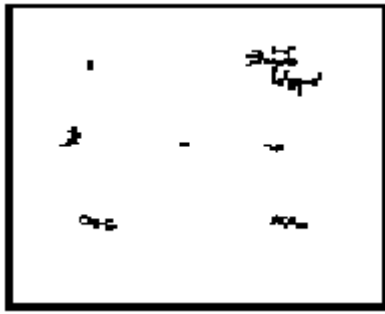
2.3 Κρίσιμα χαρακτηριστικά στην αναδυόμενη αυτοργάνωση βιολογικών συστημάτων

Υπαίτιες για πολλές μορφές αναδυόμενης (emergent) συμπεριφοράς στη βιολογία είναι η αλλαγές στη συνεκτικότητα-συνδεσιμότητα [12] που δημιουργείται, όταν αυξάνονται οι συνδέσεις-δεσμοί μεταξύ των στοιχείων του συστήματος. Η συμπεριφορά των συστημάτων με βαθμό συνεκτικότητας πλησίον της κρίσιμης τιμής παρουσιάζουν χαοτική συμπεριφορά, που πιθανόν να είναι η πηγή της ποικιλομορφίας στη φύση. Στα περισσότερα μοντέλα βιολογικών συστημάτων (π.χ. δυναμικά συστήματα, κυτταρικά αυτόματα) οι εκφάνσεις της συνεκτικότητας ανάμεσα στα στοιχεία τους είναι ισομορφικές κατευθυνόμενου γράφου.

Η βιολογία είναι από τους επιστημονικούς τομείς που αποτελεί παράδειγμα για το πώς μπορεί «το όλο να είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα το στοιχείων που το αποτελούν». Σε ένα οργανισμό τα επιμέρους μέρη του αλληλεπιδρούν μεταξύ τους αυτοργανώνονται. Η συνεκτικότητάς τους, πως συνδέονται, καθορίζει την αποτελεσματική λειτουργία και κατά πόσο μια τοπική μεταβολή επηρεάζει την λειτουργία του οργανισμού.

Παράδειγμα οι επιδημίες, που διαδίδονται καθώς ένα άτομο έρχεται σε επαφή με ένα άλλο και το μολύνει. Οι επιδημίες χαρακτηρίζονται ως διεισδυτική διήθηση, διότι «ρέει» δημιουργώντας τα δικά της «κανάλια» στο μέσο που διαδίδεται. Κρίσιμο μέγεθος που καθορίζει την εξάπλωση μιας επιδημίας είναι η πιθανότητα $R_{critical}$ να μεταδοθεί από ένα άτομο σε ένα άλλο. Για τιμές $R < R_{critical}$ επιδημία εξαλείφεται, ενώ για μεγαλύτερες εξαπλώνεται διαρκώς.

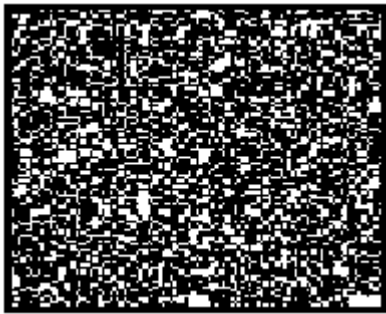
Στη παρακάτω μοντελοποίηση τη διάδοσης μιας επιδημίας, κάθε κύτταρο μπορεί να μεταδώσει την ασθένειά του στα τέσσερα γειτονικά με R στο καθένα. Για το σύστημα η κρίσιμη τιμή είναι $R_{critical} = 0,59$.



$R < R_{critical}$



$R = R_{critical}$

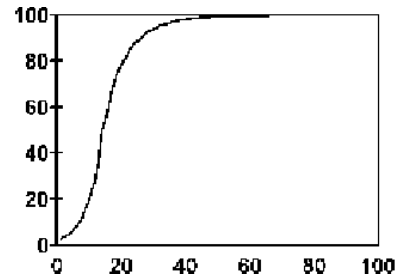


$R > R_{critical}$

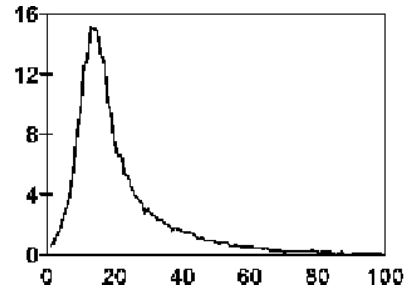
Θεωρώντας ότι τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την μελέτη των βιολογικών συστημάτων κατευθυνόμενοι γράφοι (δένδρα απόφασης), μήτρες (γραμμικά συστήματα, Μαρκοβιανές διαδικασίες) και κυτταρικά αυτόματα είναι ισομορφικά του κατευθυνόμενου γράφου τότε βασικό στοιχείο για τη συμπεριφορά του αποτελεί η συνεκτικότητάς τους.

Σε ένα γράφο δύο κόμβοι θεωρούνται συνεκτικοί εάν υπάρχει ένα μονοπάτι που να τους συνδέει. Ένας γράφος θεωρείται συνεκτικός εάν υπάρχει ένα μονοπάτι που να συνδέει όλους τους κόμβους. Ο χρόνος διάσχισης για ένα μονοπάτι είναι το πλήθος των βημάτων που απαιτούνται για παράδειγμα να μεταδοθεί μια επιδημία κατά μήκος του μονοπατιού. Αποτελεί μέγεθός για την εκτίμηση της επικοινωνίας των κόμβων και το χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση της πληροφορίας

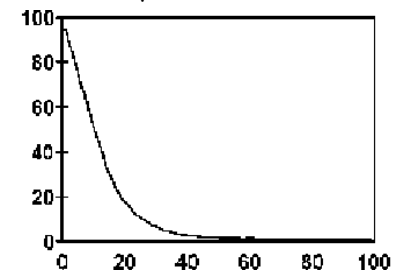
για ένα τοπικό γεγονός παντού. Το μέγεθος του μονοπατιού για δοσμένο αριθμό κόμβων σε συνάρτηση του πλήθους των ακμών, είναι ένα μέγεθος που παρουσιάζει κρίσιμο σημείο. Οι παρακάτω γραφικές παρουσιάζουν μετρήσεις πάνω σε γράφους με τον ίδιο αριθμό κόμβων αλλά με τυχαία καταναμημένες ακμές, για διάφορες τιμές τους πλήθους των ακμών.



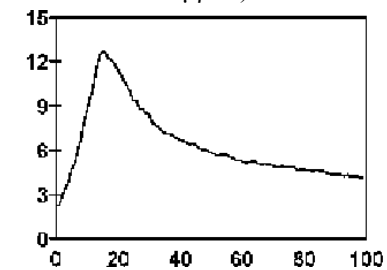
Το μέγεθος του μεγαλύτερου μονοπατιού.



Η απόκλιση στο μέσο μέγεθος του μεγαλύτερου μονοπατιού.



Το πλήθος των μη συνεκτικών μονοπατιών (συνόλων κόμβων).



Ο χρόνος διάσχισης του μεγαλύτερου μονοπατιού.

Παρατηρούμε ότι για ακμές λιγότερες από την κρίσιμη πληθηκότητά τους το μήκος του μέγιστου μονοπατιού είναι μικρό, καθώς όμως το πλήθος των ακμών πλησιάζει την κρίσιμη τιμή του το μέγεθος του μέγιστου

μονοπατιού αυξάνεται το μήκος του ραγδαία και καλύπτει σχεδόν όλους τους κόμβους του γράφου. Παράλληλα ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η μεταβλητότητα του μέγεθους του μέγιστου μονοπατιού μεγιστοποιείται στην κρίσιμη τιμή του πλήθους των ακμών όπως και ο χρόνος διάσχισης του μονοπατιού αυτού που καλύπτει σχεδόν όλους του κόμβους. Για μεγαλύτερο αριθμό ακμών ο χρόνος αυτός ελαττώνεται λόγω της δημιουργίας περισσότερων συνδέσεων που οδηγούν σε συντομότερα μονοπάτια. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι η κρίσιμη τιμή του πλήθους ακμών είναι το σύνορο για το γράφο για να περάσει από τα πολλά ασύνδετα μεταξύ τους υποσύνολα κόμβων (clusters), στη δημιουργία ενός μονοπατιού που ενώνει όλα τα υποσύνολα σε ένα κόμβο (παγκοσμιοποίηση).

Η συνεκτικότητα του χώρου καταστάσεων των συστημάτων καθορίζει τη συμπεριφορά τους. Χαμηλή συνεκτικότητα οδηγεί σε αδρανή συστήματα που είτε «παγώνουν»-ισορροπούν σε μία κατάσταση, είτε εγκλωβίζονται σε οριακούς κύκλους (μετάβαση από μία κατάσταση σε μια άλλη με κατάληξη μία από αυτές πάλι, με μικρή περίοδο). Η υψηλή συνεκτικότητα-συνδεσιμότητα δημιουργεί συστήματα όπου μεταβάλλεται διαρκώς η κατάστασή τους (κύκλους με μεγάλη περίοδο), που δεν επιτρέπουν τη δημιουργία δομών μεγάλης κλίμακας. Τα συστήματα όπου η συνεκτικότητά τους βρίσκεται κοντά στη κρίσιμη τιμή της είναι πιο πιθανό να παρουσιάσουν ενδιαφέρουσες δομές-μορφώματα.

Στο πεδίο της οικολογίας η συνδεσιμότητα στο φυσικό κόσμο έχει σημαντικό ρόλο στη γενετική διαφοροποίηση των ειδών. Σημαντικό ρόλο στην γενετική απομόνωση σύμφωνα με τους οικολόγους έχει η ύπαρξη φυσικών φραγμάτων, π.χ. ποταμών, βουνών, που δεν επιτρέπουν την επικοινωνία των ατόμων του είδους ή είναι σε υποκρίσιμο βαθμό οπότε δημιουργούνται μη συνεκτικές ομάδες.

3 Swarm intelligence

3.1 Αποικίες εντόμων ως πολύπλοκα συστήματα

Τα πολύπλοκα συστήματα είναι πολύ κοινά στη φύση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια σχετικά με το τρόπο οργάνωσης των κοινωνικών εντόμων. Όπως και στα πολύπλοκα συστήματα οι αποικίες εντόμων αποτελούνται από πολλά απλά συστατικά μέλη. Τα μέλη των αποικιών των εντόμων λειτουργούν κάτω από την έλλειψη πληροφόρησης για το όλο σύστημα, διαθέτουν μόνο χωρικά τοπική γνώση που αποκτούν με την αλληλεπίδραση τους με τα άλλα μέλη ή το περιβάλλον. Βελτιώνουν την απόδοσή τους εμφανίζοντας εξειδικευμένες συμπεριφορές, λειτουργώντας και δρώντας σε παραλληλία. Αποτέλεσμα το συνολικό έργο που παράγεται από την αποικία, είναι σημαντικότερο και πέρα από το άθροισμα του έργου που παράγουν τα μέλη της (emergent behavior).

Τα μέλη της αποικίας δρουν ως αυτόνομοι agent (autonomous agents). Δεν εκτελούν εντολές από κάποιον αρχηγό, ούτε είναι έχουν γνώση ενός καθολικού σχεδίου το οποίο καλούνται να εκτελέσουν. Κάθε μέλος της αποικίας (συλλογική οντότητα), αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του (που περιλαμβάνει τους γειτονικούς agents). Η συντονισμένη δράση των ατόμων χάρη στις τοπικές και απλοϊκές αλληλεπιδράσεις, οδηγεί σε καθολικά οργανωμένα συστήματα, αυτοργανώμενα.

Κλείνοντας, ένα swarm σύστημα είναι μια συλλογή από αυτόνομους agents που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε τοπικό επίπεδο, είτε άμεσα (μέσω επαφής ή βραχεία αντίληψη) είτε έμμεσα (μέσω του περιβάλλοντος stigmergy), και συλλογικά λύνουν προβλήματα.

3.2 Αυτοργάνωση

Η αυτοργάνωση ως το σύνολο των δυναμικών μηχανισμών, όπου οδηγούν στην εμφάνιση δομών στο μακροεπίπεδο ενός συστήματος και οφείλονται στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δομικών στοιχείων του συστήματος στο μικροεπίπεδο. Οι κανόνες που καθορίζουν την συμπεριφορά των ατόμων, στοιχειωδών μελών, βασίζουν την δράση τους σε μία φτωχή σε πληροφορίες αντίληψη της γειτονιάς τους. Η ανάδειξη αυτών των δομών, σχηματισμών στο μακροεπίπεδο είναι εσωτερική ιδιότητα του συστήματος και όχι αποτέλεσμα εξωτερικής παρέμβασης στη βούληση, συμπεριφορά του. Οι μηχανισμοί που οδηγούν σε τέτοια συμπεριφορά εν γένει είναι:

- ✓ *Θετική ανάδραση*: η δυνατότητα του συστήματος να προτιμά μια λύση από μια άλλη, προσπαθώντας να υιοθετήσει περισσότερες διευρυμένες συμπεριφορές οι οποίες έχουν αποδειχτεί πιο επιτυχημένες. Ενισχύει την επιτυχία και στρέφει και άλλα άτομα να κάνουν αυτό που κάποια άλλα έκαναν και είχε επιτυχία.
- ✓ *Αρνητική ανάδραση*: η εξισορρόπηση της θετικής ανάδρασης που βοηθά το σύστημα να σταθεροποιεί τη συλλογική δομή, σχηματισμό που αναπτύσσει. Η εγγενής τάση του συστήματος να μην οδηγείται στα άκρα αλλά να διατηρεί τις ισορροπίες
- ✓ *Αβεβαιότητα-Διαταραχές-Τυχαίες διακυμάνσεις*: επιτρέπει στο σύστημα να ανακαλύπτει νέες λύσεις και να βελτιώνει τη συμπεριφορά του. Η ύπαρξη ενός είδους τυχαίας συμπεριφοράς (στοχαστικότητας) στα μέλη του συστήματος επιτρέπει την εύρεση νέων λύσεων άγνωστες στο παρελθόν και μακριά από τις ήδη γνωστές λύσεις.
- ✓ *Stigmergy (Στίγμα + έργο)*: Είναι ο μηχανισμός επικοινωνίας και μεταφοράς πληροφορίας μεταξύ των αυτόνομων agent. Η επικοινωνία αυτή δεν επιτυγχάνεται άμεσα αλλά μέσω των μεταβολών που προκαλεί καθένας από τους agent στο άμεσο περιβάλλον του. Κάθε agent είναι σε θέση να μεταβάλλει το περιβάλλον του με τη δράση του. Οι

μεταβολές αυτές μπορούν να γίνουν αντιληπτές από άλλο γειτονικό του agent που θα αντιδράσει ανάλογα με τις συνθήκες του αντιλαμβάνεται χωρίς να έχει γνώση για τη δράση του agent που τις επηρέασε. Πρόκειται για ένα απλό μηχανισμό επικοινωνίας με μεγάλη ανοχή σε σφάλματα μετάδοσης με μικρές απαιτήσεις σε «εύρος ζώνης» (μεταδίδονται μικρά ποσά πληροφορίας). Η επιτυχία του οφείλεται κυρίως στη μεθοδολογία με την οποία χειρίζεται η πληροφορία που μεταδίδεται, ασαφή μηνύματα.

3.3 Συγκομιδή στα μερμήγκια

Ένα από τα πιο γνωστά πειράματα για τη συμπεριφορά των μερμηγκιών αφορά τον τρόπο με τον οποίον διαμορφώνουν τις διαδρομές από τη φωλιά τους στην πηγή τροφής. Σε αυτό το πείραμα η πηγή τροφής είναι προσβάσιμη από τη φωλιά μόνο μέσω μιας γέφυρας που αποτελείται από δύο ισομήκη σκέλη. Παρατηρήθηκε ότι στην πλειονότητάς τους μερμήγκια της κοινότητας επέλεξαν τυχαία το ένα από τα δύο σκέλη της γέφυρας. Ο μηχανισμός με τον οποίο διαμορφώνεται η τάση των μερμηγκιών να επιλέγουν τη μία διαδρομή λειτουργεί με τη χρήση φερμόνων. Κάθε μερμήγκι στην πορεία του εναποθέτει ποσότητες φερμόνη, η οσμή της οποίας του επιτρέπει να βρει το δρόμο της επιστροφής στη φωλιά του αλλά και για να ειδοποιήσει και τα υπόλοιπα μερμήγκια για την πιθανή νέα πηγή τροφής. Κάθε μερμήγκι που έλκεται από την οσμή της φερμόνης ενισχύει την οσμή της εναποθέτοντας και αυτό ποσότητα φερμόνης, οπότε η διαδρομή γίνεται όλο και πιο αισθητή και στα άλλα μερμήγκια. Με αυτό το τρόπο τα μερμήγκια προτιμώντας να ακολουθούν την κλίση του πεδίου φερμόνης ακολουθούν την κυρίαρχη διαδρομή, όμως μπορούν να επιλέξουν και κάποια άλλη διαδρομή. Εάν η νέα διαδρομή είναι συντομότερη, η ποσότητα φερμόνης που θα εναποτίθεται στη νέα διαδρομή στο ίδιο χρονικό διάστημα θα είναι μεγαλύτερη

αφού τα μερμήγκια θα μπορούν να εκτελούν περισσότερα δρομολόγια στο ίδιο χρόνο σε σχέση με την προηγούμενη διαδρομή. Παράλληλα ένας επιπλέον μηχανισμός επιτρέπει στην κοινότητα να «ξεχνά» διαδρομές που δεν χρησιμοποιούνται είτε διότι εξαντλήθηκε η πηγή τροφής είτε διότι υπάρχει συντομότερη διαδρομή. Η ποσότητα της φερμόνης και αντίστοιχα η αίσθηση της οσμής που δημιουργεί στα μερμήγκια ελαττώνεται με το χρόνο, λόγω εξάτμισης (εάν δεν ενισχύεται με νέες εναποθέσεις). Η ελαττωματική συμπεριφορά των μερμηγκιών, αν τα θεωρούσαμε μηχανές που ακολουθούν εντολές, δηλαδή να ξεστρατίζουν, να ενεργούν μη τηρώντας του κανόνες, δρα ευεργετικά διότι τους επιτρέπει να ανακαλύπτουν νέες διαδρομές και πιθανόν νέες πηγές τροφής. Ενώ η εξάτμιση της φερμόνης τους δίνει τη δυνατότητα να ξεχνούν τις λανθασμένες, ή όχι τόσο επιτυχημένες επιλογές τους και να προσαρμόζονται σε ένα γεωγραφικά και χρονικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον.

3.3.1 Εντροπία και αυτοοργάνωση στη χρήση των φερμόνων από τα μερμήγκια

Η αυτό-οργάνωση που εμφανίζεται στα multi-agent συστήματα φαίνεται να έρχεται σε αντίθεση με το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Αυτό το παράδοξο μπορεί να εξηγηθεί μέσα από τη σχέση στο μακρό-επίπεδο όπου τα άτομα αυτό-οργανώνονται (μείωση εντροπίας), στο μικρό-επίπεδο (όπου τυχαίες διεργασίες ενισχύουν την αύξηση της εντροπίας) [14]. Μεταφορικά, το μικρό-επίπεδο λειτουργεί σαν μια «καταβόθρα» εντροπίας, επιτρέποντας συνολικά η εντροπία του συστήματος να αυξάνεται με την εντροπία στις αλληλεπιδράσεις των ατόμων να μειώνεται επιτρέποντας την εμφάνιση αυτό-οργάνωσης. Ένα παράδειγμα των παραπάνω προκύπτει από τη μελέτη του προσανατολισμού των μερμηγκιών με τη χρήση των φερμόνων, όπου μετριέται η εντροπία κατά Shannon του μακρό-επιπέδου (μερμήγκια) και του μικρό-επιπέδου (φερμόνες).

Η φυσική τάση μίας ομάδας αυτόνομων διεργασιών είναι η αταξία, όχι η οργάνωση. Με τη «τροφοδότηση» πληροφορίας στις διεργασίες μπορεί να τις οδηγήσει σε πιο οργανωμένη δομή, όμως η «τροφοδότηση» αυτή πρέπει να γίνει με τον κατάλληλο τρόπο.

Τα μερμήγκια γνωστοποιούν την κατάσταση στην οποία που βρίσκονται μέσω του είδους της φερμόνης, που παράγουν. Κατευθύνουν την κίνησή τους σύμφωνα με τη κλίση (gradient) του πεδίου φερμόνης. Τα μερμήγκια που αναζητούν τροφή προσανατολίζονται στην κατεύθυνση που αυξάνεται η συγκέντρωση της φερμόνης.

Όμως στην πραγματικότητα η συμπεριφορά αναρρίχησης στο πεδίο φερμόνης των μερμηγκιών διακρίνεται από το στοιχείο στη στοχαστικότητα. Δεν ακολουθούν αυστηρά αιτιοκρατικά τη κλίση του πεδίου, αλλά τη χρησιμοποιούν για να σταθμίσουν ένα τροχό μιας ρουλέτας από τον οποίο καθορίζεται η κίνησή τους.

Σημαντικό ρόλο στη λειτουργία απόθεσης φερμόνης έχει το περιβάλλον, ο οποίος δεν είναι απλά παθητικός αλλά επιδρά πάνω στη λειτουργία υλοποιώντας τρεις τελεστικές διαδικασίες στις πληροφορίες που διαχειρίζονται με την απόθεση των φερμόνων.

1. Το περιβάλλον συγχωνεύει, συγκεράσει τις φερμόνες της ίδιας γεύσης που προέρχονται από διαφορετικά μερμήγκια, παρέχοντας μια μορφή διάχυσης και αποατομίκευσης της πληροφορίας ανάμεσα σε πολλά διαφορετικά άτομα διαφορετικές χρονικές στιγμές (data fusion), που διατρέχουν μια κοινή τοποθεσία.
2. Εξατμίζει τις φερμόνες με την πάροδο του χρόνου, ώστε να ξεχνά τις «αποξενωμένες» πληροφορίες. Αυτή η δυναμική συμπεριφορά είναι χρήσιμη ως ένα μηχανισμό διατήρησης της αλήθειας. Τα συστήματα των εντόμων ξεχνούν κάθε ισχυρισμό ο οποίος δεν ενισχύεται, ανανεώνεται τακτικά.
3. Η εξάτμιση παρέχει τη τρίτη λειτουργία της διασποράς της πληροφορίας από τη θέση που στην οποία την αποθέτει στις

κοντινές περιοχές. Ένα μερμήγκι δεν χρειάζεται να ανακαλύψει την ακριβή θέση στην οποία αποτέθηκε η φερμόνη αλλά, αλλά αισθάνεται την κατεύθυνση που του καθορίζει η κλίση του πεδίου της φερμόνης καθώς αυτή εξατμίζεται.

Το κλασικό μοντέλο θέλει τα άτομα (agents) να αντιλαμβάνονται το ένα το άλλο απευθείας και στη συνέχεια δρουν αιτιολογημένα. Το μοντέλο των μερμηγκιών αντιμετωπίζει τον προσανατολισμό τους να υλοποιείται με τη μεσολάβηση του περιβάλλοντος το οποίο μπορούν τα άτομα (agents) να μεταβάλλουν με τις δράσεις τους (π.χ. απόθεση φερμόνης) (stigmergy). Στο περιβάλλον δημιουργούνται δομές που μπορούν να αντιλαμβάνονται τα άτομα (agents), ώστε να επιτρέπει τη εμφάνιση δομημένης συμπεριφοράς στο επίπεδο των ατόμων (agents).

Το μοντέλο του συστήματος που παρουσιάζεται αποτελείται από δύο άτομα (agents) ένα στατικό και ένα κινητό.

Το στατικό άτομο βρίσκεται μονίμως σε μία σταθερή θέση και εναποθέτει φερμόνη, τα μόρια της οποίας διαχέονται στον περιβάλλοντα χώρο. Κάθε μόριο κάθε χρονική στιγμή επιλέγει τυχαία μια κατεύθυνση $[0, 2\pi]$ και κάνει ένα βήμα μεγέθους 2, μέχρι ωστόσο τα μόρια περάσουν τα όρια του πεδίου οπότε και χάνονται (τυχαίως περιπατος).

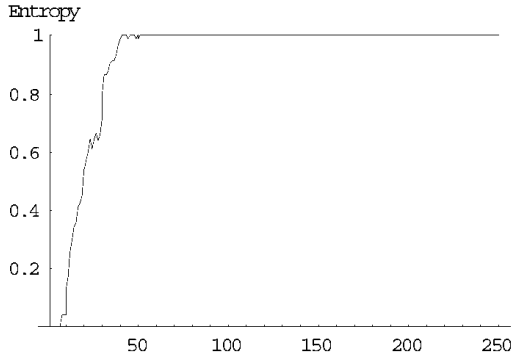
Το κινητό άτομο ακολουθεί τη κλίση του πεδίου που δημιουργούν οι φερμόνες που παράγει το στατικό άτομο. Το άτομο αυτό εκτελεί ένα βήμα κάθε πέντε χρονικές στιγμές. Η κατεύθυνσή του καθορίζεται από την παρακάτω σχέση $\vec{G} + \vec{R}$.

Όπου $\vec{G} = \sum_{|r_i| < \rho} \frac{g \vec{r}_i}{\|\vec{r}_i\|^2}$ με $\vec{r}_i$ το διάνυσμα θέσης

του i μορίου φερμόνης από το κινητό άτομο, g «σταθερά βαρύτητας» και το άτομο μπορεί να αντιληφθεί μόρια φερμόνης σε απόσταση έως ρ . Ενώ το $\vec{R}$ είναι ένα διάνυσμα τυχαίας κατεύθυνσης μεγέθους T (παράμετρος θερμότητας).

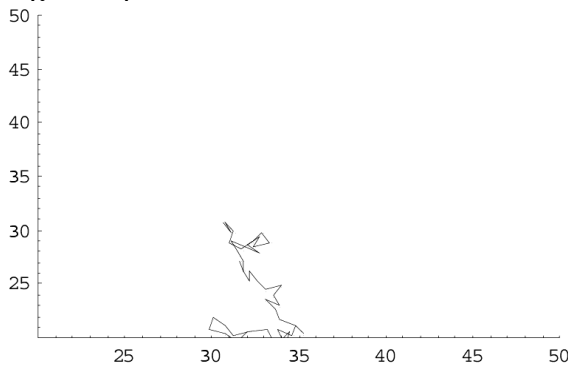
Το μοντέλο αυτό μπορεί να επεκταθεί με τη χρήση πολλών κινητών και στατικών, αλλά και φερμόνων διαφορετικής οσμής.

Η εντροπία του μικρό-συστήματος, δηλαδή του μηχανισμού εξάτμισης και διασποράς των φερμόνων συνεχώς αυξάνει έως τη μέγιστή τιμή ένα (ο τρόπος υπολογισμού της περιγράφεται αναλυτικότερα στο άρθρο).



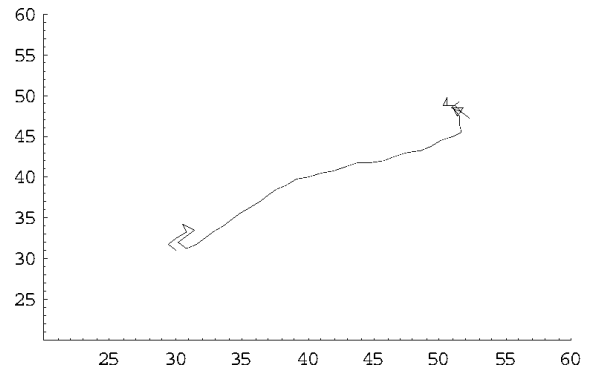
Η εντροπία του μικρο-συστήματος ως προς το χρόνο.

Όμοια συμπεριφορά έχει και ένα μερμήγκι το οποίο δεν κατευθύνει την κίνηση του με τη χρήση του πεδίου που παράγουν η φερμόνες, το οποίο εκτελεί και αυτό όπως και ένα μόριο φερμόνης έναν τυχαίο περίπατο.



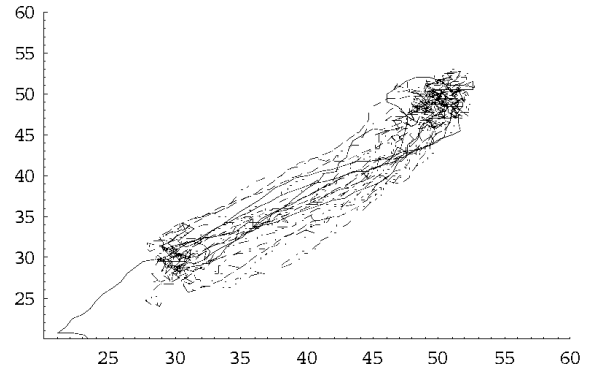
Χωρίς κάποια κατεύθυνση η κίνηση ενός agent.

Η εντροπία όμως στα «μερμήγκια» που ακολουθούν τις φερμόνες, έχει τελείως διαφορετική συμπεριφορά. Αρχικά έχει μεγάλη τιμή καθώς τα μερμήγκια κάνουν τυχαίους περιπάτους, αφού τα μόρια της φερμόνης δεν έχουν φθάσει το σημείο στο οποίο βρίσκονται τα μερμήγκια. Ακολούθως όταν το άτομο μπορεί να αντιληφθεί το πεδίο των φερμόνων κινείται προς την κατεύθυνση της πηγής τους με αποτέλεσμα η εντροπία να μειώνεται και σε αυτό το στάδιο να εμφανίζει τη χαμηλότερη τιμή της.

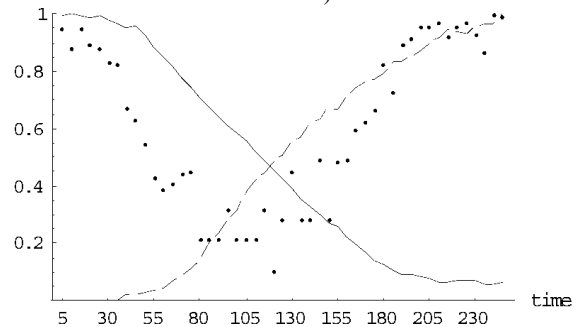


Το μονοπάτι ενός agent που κατευθύνεται από το πεδίο των φερμόνων ($\rho=20$, $T=0$).

Στο τελικό στάδιο, όταν τα μερμήγκια έχουν φθάσει στην πηγή, παρατηρούμε ότι εκτελούν πάλι τυχαίους περιπάτους διότι τα μόρια φερμόνης γύρω από τη πηγή είναι ομοιόμορφα κατανομημένα, συνεπώς εμφανίζεται πάλι αύξηση της εντροπίας.



Τα μονοπάτια πολλών κατευθυνόμενων agent ($\rho=20$, $T=0$).



Για τους κατευθυνόμενους agent: με κουκίδες η κατευθυντήρια (directional) εντροπία, με συνεχόμενη γραμμή η απόσταση από των στόχο (μέγιστο 28), με διακεκομμένη μέσος αριθμός των μορίων φερμόνης που αντιλαμβάνεται (μέγιστο 151).

3.3.2 Η δημιουργία μονοπατιών από τα μερμήγκια

Τα σμήνη των κοινωνικών εντόμων κατασκευάζουν μονοπάτια και δίκτυα μονοπατιών μέσω της διαδικασίας απόθεσης φερμόνης και ακολουθώντας την οσμή της [15].

Τα μερμήγκια καταγράφουν τη αντίληψή τους για το χώρο στο περιβάλλον, ενώ τα θηλαστικά την αναπτύσσουν και την διατηρούν στην μνήμη του εγκεφάλου τους. Η συστηματική ανάλυση του μηχανισμού των χημικών σημάτων των μερμηγκιών καταδεικνύει την χρησιμοποίηση δύο διαφορετικών λήψης δεδομένων και επεξεργασίας τους, οσμοτροποταξία, του μηχανισμού που προσανατολισμού κατά τη στιγμιαία κλίση του πεδίου φερμόνων, και η κλινοταξία η ακόλουθη διαδικασία. Η βασική οσμοτροπική αίσθηση είναι η αναφορά στη διαφορά της μετρούμενης συγκέντρωσης φερμόνης μεταξύ των δύο κεραιών. Αυτές οι μετρήσει όμως εμπεριέχουν ένα σημαντικό ποσό θορύβου, οπότε απαιτείται στοχαστική περιγραφή.

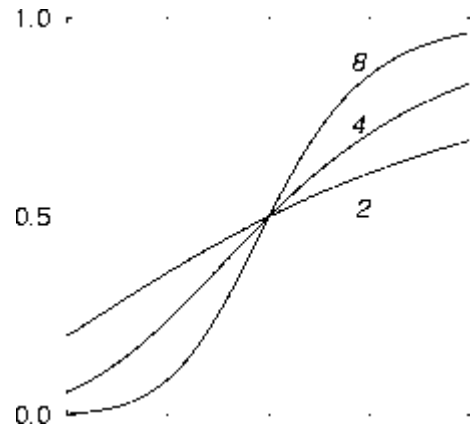
Η κατάσταση ενός μερμηγκιού μπορεί να περιγραφεί από τη θέση του $\vec{r}$ και τον προσανατολισμό του θ . Η επόμενη κίνηση του ατόμου εξαρτάται μονάχα από την παρούσα κατάσταση και είναι ανεξάρτητη του παρελθόντος, πρόκειται για μια συνεχή Μαρκοβιανή διαδικασία που ορίζεται από τη στιγμιαία κατανομή της φερμόνης $\sigma(\vec{x}, t)$.

Ο κανόνας μετάβασης χρησιμοποιεί

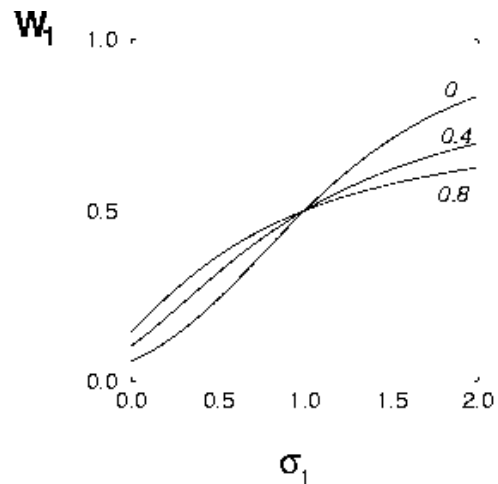
$$\text{την συνάρτηση βάρους } W = \left(1 + \frac{\sigma}{1 + \delta\sigma}\right)^\beta,$$

για το υπολογισμό της πιθανότητας να μετακινηθεί το μερμήγκι σε μία θέση $\vec{r}$ με συγκέντρωση φερμόνης $\sigma(\vec{r})$. Η παράμετρος β συσχετίζεται με την οσμοτροπική ευαισθησία, ελέγχει σε τι βαθμό καθορίζει τη κίνηση του μερμηγκιού η κλίση του πεδίου φερμόνης σε αντίθεση με τυχαία κίνηση (τυχαίους περιπάτους). Για χαμηλές τιμές της παραμέτρου β η συγκέντρωση της φερμόνης δεν επηρεάζει ουσιαστικά την κίνηση του μερμηγκιού. Για

υψηλές τιμές οδηγεί το μερμήγκι να καθορίζει την κίνηση του με βάση τη συγκέντρωση φερμόνης.



Η συνάρτηση απόκρισης για διάφορες τιμές του β με $\delta=0.2$.



Η συνάρτηση απόκρισης για διάφορες τιμές του δ με $\beta=4$.

Η παράμετρος $1/\delta$, η ευαισθησία του αισθητηρίου οργάνου του μερμηγκιού, μειώνει τη δυνατότητα του μερμηγκιού να αντιληφθεί τη συγκέντρωση της φερμόνης όταν αυτή βρίσκεται σε υψηλές τιμές. Αυτό το φαινόμενο κορεσμού επιτρέπει σε ένα μερμήγκι να παραμείνει σε ένα μονοπάτι (τροχιά) όπου η συγκέντρωση φερμόνης είναι υψηλή αλλά μεταβάλλεται.

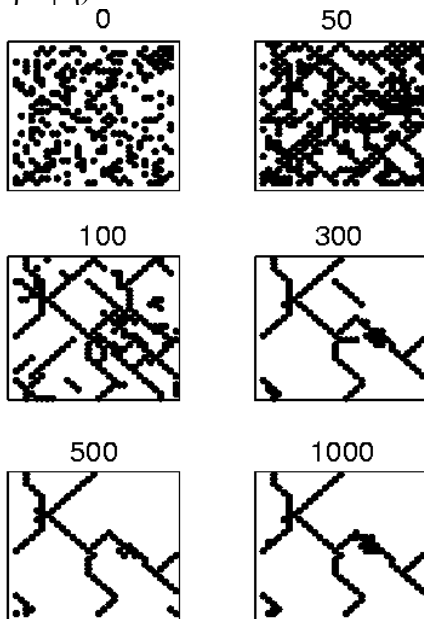
Ένα επιπλέον παράγοντας του κανόνα μετάβασης είναι η συνάρτηση βάρους για την αλλαγή της κατεύθυνσης $w(\Delta\theta)$. Για το μερμήγκι θεωρούμε πιο πιθανές τις μικρές μεταβολές από τις έντονες στροφές, οπότε η συνάρτηση $w(\Delta\theta)$ είναι φθίνουσα (συμμετρική).

Κάθε μερμήγκι εκκρίνει φερμόνη με ρυθμό η , η ποσότητα αυτή της φερμόνης σε αυτό το μοντέλο παραμένει στο ίδιο σημείο δε διασπείρεται, απλώς εξατμίζεται, «ξεχνιέται» με ρυθμό $\tau \approx 1/\kappa$. Τα μερμήγκια δεν έχουν καμία απευθείας επικοινωνία ούτε μνήμη, η πληροφόρηση για το χώρο γύρω τους περιορίζεται στη γνώση της τοπικής συγκέντρωσης φερμόνης. Το πεδίο φερμόνης περιέχει την πληροφορία για τις προηγούμενες κινήσεις των μερμηγκιών για καθορισμένο χρονικό στο παρελθόν που ορίζει η σταθερά τ .

Για τη πραγματοποίησή της προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθεί ένα διακριτό μοντέλο όπου κάθε μερμήγκι κινείται σε ένα ορθογώνιο πλέγμα, μπορεί κάθε φορά να κινείται μόνο σε ένα από τα οχτώ γειτονικά κελιά (στοιχεία του πλέγματος) σε αυτό. Ενώ στο κελί που βρίσκεται και στα 8 γειτονικά αφήνει μια συγκεκριμένη ποσότητα φερμόνης που εξατμίζεται με ρυθμό $1/\kappa$. Η πιθανότητα μετάβασης από το κελί k στο i δίνεται από

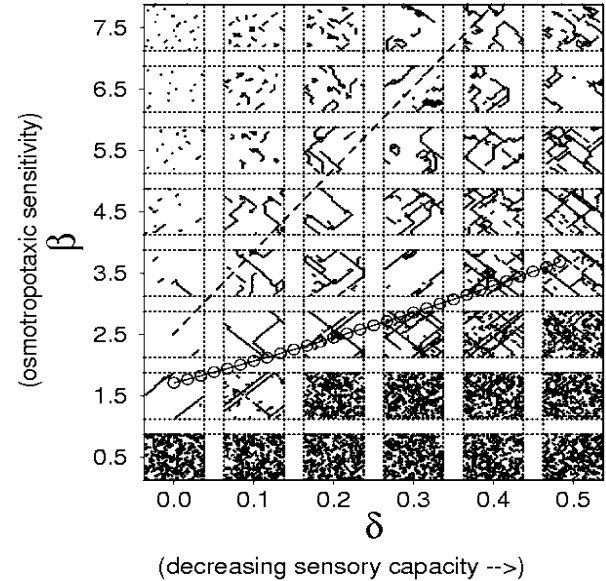
$$P_{ik} = \frac{W(\sigma_i)w(\Delta_i)}{\sum_{j \in \text{neighbour}(k)} W(\sigma_j)w(\Delta_j)}, \quad j$$

ανήκει στη γειτονιά του k , το Δ_i αντιστοιχεί στη μεταβολή του προσανατολισμού και παίρνει 1 (ίδια διεύθυνση), $1/2$, $1/4$, $1/12$, $1/20$ (αναστροφή).



Η εξέλιξη της κατανομής των μερμηγκιών για $\beta=3.5$ και $\delta=0.2$

Μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων β - δ εμφανίζονται τρεις διαφορετικές συμπεριφορές: αταξία, «μπαλώματα» και μονοπάτια.



Καλά σχηματισμένα μονοπάτια παρατηρούμε στην περιοχή πάνω από τη γραμμή μετάβασης της φάσης του συστήματος. Όσο κινούμαστε μακρύτερα από την περιοχή της αταξίας κυριαρχεί η τάση των μερμηγκιών να συσσωρεύονται έναντι της κατευθυνόμενης κίνησης. Για τη διαμόρφωση αυτής της συμπεριφοράς, σχηματισμός μονοπατιών, είναι αναγκαία η ανάπτυξη μη γραμμικής αντίδρασης των μερμηγκιών στα ερεθίσματα και της προτίμησής του να μην στρίβουν.

Η παράμετρος β ενισχύει την τάση των μερμηγκιών να σχηματίσουν κοινά μονοπάτια όπου η συγκέντρωση φερμόνης είναι πολύ υψηλή, ενώ παράλληλα περιοχές με χαμηλότερες συγκεντρώσεις «απωθούν», δεν έλκουν και τόσο τα μερμήγκια. Η παράμετρος δ εξασφαλίζει τα μερμήγκια να δείχνουν ανοχή σε μικρές μεταβολές της συγκέντρωσης της φερμόνης όταν η συγκέντρωση είναι μεγάλη άρα βρίσκονται σε κάποιο μονοπάτι και τα αποτρέπει μόλις παρατηρούν μια μικρή μείωση να γυρίζουν πίσω στη θέση που ήταν, σχηματίζοντας «μπαλώματα».

Επίσης στο σύστημα αυτό ενώ βρισκόταν σε κατάσταση αυτό-οργάνωσης, σχηματισμός μονοπατιών, μειώθηκε η τιμή της παραμέτρου $\beta < \beta_c$ κάτω από τη κρίσιμη

τιμή, το σύστημα αμέσως πέρασε σε κατάσταση αταξίας αφού τα μερμήγκια άρχισαν να εκτελούν και πάλι τυχαίους περιπάτους. Όταν όμως επανέρθει η τιμή της παραμέτρου β το σύστημα επανακάμπτει σε κατάσταση τάξης.

3.4 Νεκροταφεία μερμηγκιών

Η παρατήρηση αφορά τη συγκέντρωση των πτωμάτων των νεκρών μερμηγκιών από το πεδίο συγκομιδής σε ορισμένες τοποθεσίες. Συγκεκριμένα καθώς ένα μερμήγκι κινείται εκτελώντας ουσιαστικά ένα τυχαίο περίπατο, εάν συναντήσει ένα πτώμα τότε το «παιρνει-σηκώνει» με πιθανότητα p . Η πιθανότητα p μειώνεται όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πτωμάτων που βρίσκονται κοντά στο πτώμα. Εάν το μερμήγκι κουβαλά κάποιο πτώμα τότε συνεχίζει να κινείται εκτελώντας τυχαίο περίπατο και αν συναντήσει κάποιο νέο πτώμα το εναποθέτει και το πτώμα που μεταφέρει με πιθανότητα $1-p$. Εάν θεωρήσουμε ότι τα μερμήγκια ακολουθούν τα ίχνη της φερμόνης τότε βελτιώνεται η συμπεριφορά τους αφού μπορούν να ακολουθούν τις διαδρομές που θα τα οδηγούν ταχύτερα στα σημεία συγκέντρωσης.

Ο Deneudourg έχει προτείνει ένα μοντέλο για το φαινόμενο της συγκέντρωσης των πτωμάτων στα μερμήγκια.

Η γενική ιδέα είναι ότι απομονωμένα αντικείμενα μπορούν να μεταφερθούν και να αφεθούν σε άλλα σημεία όπου υπάρχουν πιο πολλά. Αν p_p η πιθανότητα, ένα μερμήγκι που περιπλανιέται τυχαία και δεν κουβαλά κάποιο φορτίο, να σηκώσει ένα αντικείμενο

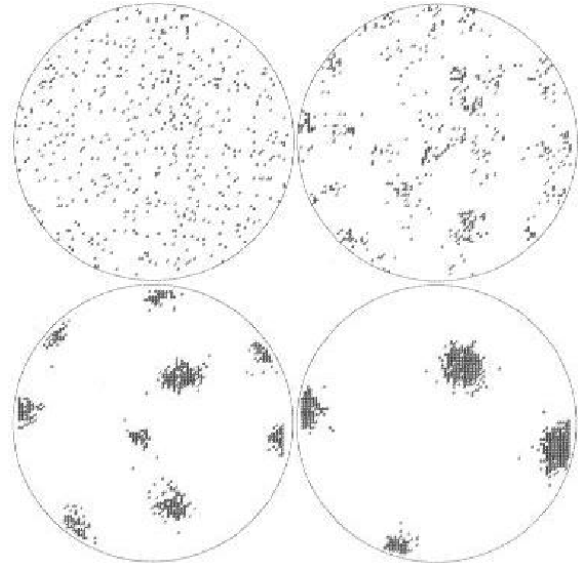
δίνεται από τη σχέση $p_p = \left(\frac{k_1}{k_1 + f} \right)^2$, όπου

f είναι το αντιληπτό κλάσμα αντικειμένων στη γειτονιά του μερμηγκιού και η μεταβλητή k_1 το κατώφλι. Όταν $f \ll k_1$, η πιθανότητα p_p είναι κοντά στο 1, οπότε είναι πολύ πιθανό να πάρει το αντικείμενο όταν δεν υπάρχουν πολλά αντικείμενα στη

γειτονιά. Αντίθετα για $f \gg k_1$, η πιθανότητα p_p είναι κοντά στο 0. Η πιθανότητα p_d για ένα τυχαία περιφερόμενο και φορτωμένο μερμήγκι να παρατήσει αυτό που κουβαλά

είναι $p_d = \left(\frac{k_2}{k_2 + f} \right)^2$, όπου k_2 ένα άλλο

κατώφλι. Όταν $f \ll k_2$, η πιθανότητα p_d είναι κοντά στο 0, αντίθετα για $f \gg k_2$, η πιθανότητα p_d είναι κοντά στο 1. Η τιμή του f μπορεί για παράδειγμα να εκτιμηθεί θεωρώντας ότι ο agent-μερμήγκι έχει μιας σύντομης διάρκειας μνήμη. Αν θυμάται τις τελευταίες T χρονικές στιγμές, τότε f είναι το πλήθος N των αντικειμένων που συνάντησε σε αυτό το χρονικό διάστημα, διαιρεμένο με το μέγιστο δυνατό αριθμό αντικειμένων που θα μπορούσε να συναντήσει σε αυτό το διάστημα. Αν θεωρήσουμε ότι το χρονικό διάστημα T μπορούν να βρεθούν κανένα ή ένα αντικείμενο, τότε $f = N/T$.

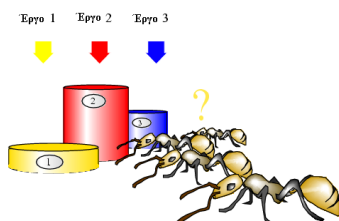


Μια προσομοίωση του παραπάνω μοντέλου για $T=50$, $k_1=0.1$, $k_2=0.3$, 10 agent μερμήγκια σε ένα χώρο όπου έχουν διασπαρθεί 5000 αντικείμενα, σε κυκλική αρένα διαμέτρου 200. Οι παραπάνω εικόνες αποτελούν στιγμιότυπα των χρονικών στιγμών $t=0$, $t=50000$, $t=1000000$, $t=5000000$, αντίστοιχα. Παρατηρούμε μικρές συγκεντρώσεις να εμφανίζονται γρήγορα, αλλά συγκλίνουν όλο και πιο αργά σε λιγότερες και μεγαλύτερες συσσωρεύσεις αντικειμένων.

3.4 Καταμερισμός εργασίας στις αποικίες των κοινωνικών εντόμων.

Στα κοινωνικά έντομα, διαφορετικές δραστηριότητες συχνά εκτελούνται από εξειδικευμένα άτομα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται κατανομή εργασίας. Η εκτέλεση των έργων από εξειδικευμένους εργάτες, θεωρείται πιο αποδοτική από την σειριακή τους εκτέλεση από ανειδίκευτους εργάτες. Ο παραλληλισμός αποτρέπει την εναλλαγή, η οποία κοστίζει σε χρόνο και ενέργεια. Η εξειδίκευση επιτρέπει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των ατόμων στην επίδοσή τους, διότι γνωρίζουν το έργο τους ή είναι καλύτερα εξοπλισμένα για αυτό.

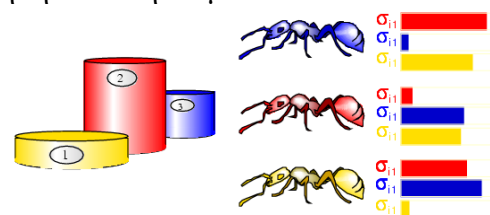
Το κύριο χαρακτηριστικό του καταμερισμού της εργασίας είναι η πλαστικότητά της. Το ποσοστό των εργατών που ασχολείται με το κάθε έργο μεταβάλλεται, ανταποκρινόμενο στις εσωτερικές διαταραχές ή εξωτερικές προκλήσεις. Παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα τροφής, οι θηρευτές, κλιματικές συνθήκες, η φάση εξέλιξης της αποικίας, το είδος και η ηλικία των εργατών, ωθούν τους εργάτες στην αναδιανομή των ευθυνών προσαρμοζόμενοι στις νέες συνθήκες.



Σε ένα πείραμα που πραγματοποίησε ο Wilson στο πολυμορφικό είδος *Pheidole dentata* μερμηγκιών, που αποτελείται από δύο κύριες κάστες τους μικρούς και τους μεγάλους εργάτες (στρατιώτες) παρατήρησε την ελαστικότητα με την οποία η μεταβάλλονταν οι πληθυσμοί των εργατών της κάθε κάστας που ασχολείται με το κάθε έργο. Μεταβάλλοντας με τεχνητό τρόπο την αναλογία των μεγάλων προς των μικρών εργατών, στη συγκεκριμένη περίπτωση αυξάνοντάς την, οι μεγάλοι εργάτες εμπλέκονται σε εργασίες που δεν συνηθίζουν να εκτελούν, εργασίες που εκτελούν συνήθως οι μικροί.



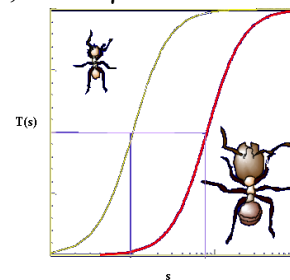
Για να εξηγήσουν τις παρατηρήσεις του Wilson, ο Bonabeau εισήγαγε την έννοια του κατώφλιου ανταπόκρισης στο κάθε έργο από το κάθε άτομο. Το κάθε άτομο εμπλέκεται στην εκτέλεση ενός έργου όταν τα ερεθίσματα, που προκαλεί η απαίτηση για την εκτέλεση του έργου, ξεπεράσουν το κατώφλι ανταπόκρισης στο έργο αυτό. Παράδειγμα η ανάγκη για την εκτροφή των νυμφών εκφράζεται με την έκκριση φερμόνων που έλκουν τα μερμήγκια. Η αύξηση του πληθυσμού που ασχολείται με την εκτροφή μειώνει την έκκριση των φερμόνων και την αύξηση του πληθυσμού.



Η σχέση που προσδιορίζει την πιθανότητα να ανταποκρίνονται τα άτομα στην εργασία με ένταση ερεθισμάτων s για με κατώφλι ανταπόκρισης σε αυτή θ είναι:

$$T_{\theta} = \frac{s^n}{s^n + \theta^n},$$

όπου $n > 1$ καθορίζει το πόσο απότομο θα είναι το κατώφλι. Για $s \ll \theta$ η πιθανότητα εμπλοκής στο έργο είναι κοντά στο μηδέν, και για $s \gg \theta$ κοντά στο 1, και $\frac{1}{2}$ για $\theta = s$.

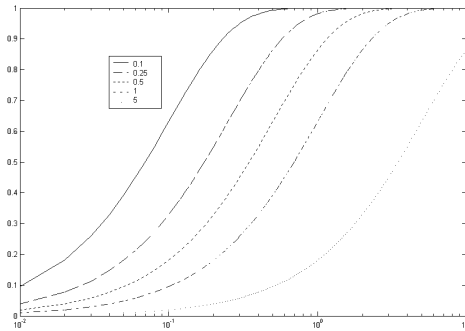


Το κατώφλι απόκρισης των μικρών με θ_1 και των μεγάλων εργατών θ_2 , ακολουθούν τη σχέση.

$$T_{\theta_i} = \frac{s^2}{s^2 + \theta_i^2}, \text{ όπου } \theta_1 < \theta_2.$$

Μια άλλη μορφή της συνάρτησης κατωφλιού δίνεται από τη σχέση:

$$T_{\theta} = 1 - e^{-\frac{s}{\theta}}.$$



Η μορφή αυτή έχει μια ιδιαίτερη σημασία. Αν άτομο όταν συναντήσει ένα αντικείμενο το παίρνει με πιθανότητα ρ , τότε η πιθανότητα να συναντήσει N και να μην πάρει ένα από αυτά, να μην ανταποκριθεί, είναι $(1-\rho)^N$. Οπότε η πιθανότητα $P(N)$ να ανταποκριθεί στα N αντικείμενα είναι $P(N)=1-(1-\rho)^N=1-e^{-N \ln(1-\rho)}$, θεωρώντας ότι η ένταση του ερεθίσματος είναι $s=N$, τότε το κατώφλι θα είναι $\theta = -\frac{1}{\ln(1-\rho)}$.

Αναπτύσσοντας ένα μοντέλο για τη συμπεριφορά ατόμων με δύο διαφορετικά κατώφλια απόκρισης θ_1, θ_2 με

$$T_{\theta_i} = \frac{s^2}{s^2 + \theta_i^2}.$$

Ένα άτομο όταν βρίσκεται στην κατάσταση $X_i=0$ είναι ανενεργό, όταν $X_i=1$ εμπλέκεται στο έργο. Η πιθανότητες μετάβασης είναι:

$$P(X_i=0 \rightarrow X_i=1) = T_{\theta_i} = \frac{s^2}{s^2 + \theta_i^2}$$

$$P(X_i=1 \rightarrow X_i=0) = p,$$

όπου p η πιθανότητα απεμπλοκής, δηλαδή ο μέσος χρόνος που αφιερώνει το κάθε άτομο στην ενασχόλησή του με το έργο είναι $1/p$. Αν N είναι το σύνολο των ατόμων και N_{ev} είναι το πλήθος των ατόμων, η μεταβολή της έντασης των ερεθισμάτων θα είναι:

$$s(t+1) = s(t) + \delta - a \frac{N_{ev}}{N}.$$

Η περιγραφή του παραπάνω συστήματος με διαφορικές εξισώσεις μέσου πεδίου (mean field), όπου n_1 και n_2 το

πλήθος των ατόμων με κατώφλια θ_1 και θ_2 αντίστοιχα, με $f = \frac{n_1}{N}$. N_1 και N_2 είναι τα πλήθη των ενεργών ατόμων κάθε ομάδας, που ορίζουν τις μεταβλητές x_1, x_2 με $x_i = \frac{N_i}{n_i}$. Οι

μέσες ντετερμινιστικές διαφορικές των x_1 και x_2 είναι:

$$\partial_t x_1 = T_{\theta_1}(s)(1-x_1) - p x_1$$

$$\partial_t x_2 = T_{\theta_2}(s)(1-x_2) - p x_2$$

Η συνεχής μορφή της μεταβολής των ερεθισμάτων:

$$\partial_t s = \delta - \frac{a}{N}(N_1 + N_2)$$

λόγω $(N_1 + N_2)/N = f x_1 + (1-f)x_2$ έχουμε:

$$\partial_t s = \delta - a f x_1 - a(1-f)x_2$$

Η μορφή των αντίστοιχων εξισώσεων στην περίπτωση m διαφορετικών έργων, όπου N_{ij} είναι το πλήθος των ατόμων της ομάδας i

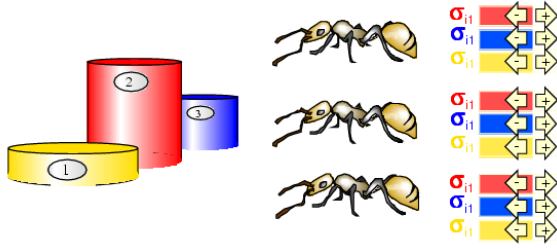
εμπλέκονται στο έργο j ($x_{ij} = \frac{N_{ij}}{n_i}$) είναι:

$$\partial_t x_{ij} = \frac{s_j^2}{s_j^2 + \theta_{ij}^2} \left(1 - \sum_{k=1}^m x_{ik} \right) - p x_{ij}$$

για $m=2$ και $i=1,2$:

$$\partial_t s_j = \delta - a f x_{1j} - a(1-f)x_{2j}.$$

Το μοντέλο του κατωφλιού απόκρισης που έχει μια καθορισμένη τιμή δεν μπορεί να καλύψει την περίπτωση που δεν υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των ατόμων και οδηγεί στην εξειδίκευση. Στην περίπτωση που τα άτομα είναι όμοια αρχικά και μπορούν με την ίδια αποτελεσματικότητα να εκτελέσουν κάθε έργο, καθοριστικό ρόλο παίζει ο χρόνος που έχει αφιερώσει το κάθε άτομο στην εκτέλεση ενός συγκεκριμένου έργου. Όσο αυξάνεται ο χρόνος αυτός αυξάνεται και η επιδεξιότητα του ατόμου με το έργο αυτό, αυξάνεται η απόδοσή του σε αυτό και πιθανότατα μειώνεται η ικανότητα του στην εκτέλεση των υπολοίπων. Το γεγονός αυτό πρέπει να λειτουργεί αποτρεπτικά στην αλλαγή της εργασίας που εκτελεί, μεταβολή που μεταφράζεται σε μεταβολή του κατωφλιού απόκρισης για τις διάφορες εργασίες.



Οπότε η πιθανότητα εμπλοκή στο έργο j του ατόμου i είναι:

$$T_{\theta_{ij}} = \frac{s_j^n}{s_j^n + \theta_{ij}^n},$$

όπου

$$\theta_{ij} \leftarrow \theta_{ij} - \xi \Delta t$$

αν το i άτομο εκτελεί το έργο j για Δt χρόνο και:

$$\theta_{ij} \leftarrow \theta_{ij} + \phi \Delta t$$

αν το i άτομο δεν εκτελεί το έργο j για Δt χρόνο. Αν x_{ij} το κλάσμα του χρόνου που ασχολείται το i άτομο με το έργο j το χρονικό διάστημα Δt , τότε:

$$\theta_{ij} \leftarrow \theta_{ij} - x_{ij} \xi \Delta t + (1 - x_{ij}) \phi \Delta t$$

Αν $\theta_{ij} \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ η μεταβολή του στο χρόνο θα περιγράφεται από τη σχέση:

$$\partial_t \theta_{ij} = [(1 - x_{ij}) \phi \Delta t - x_{ij} \xi \Delta t] u(\theta_{ij} - \theta_{\min}) u(\theta_{\max} - \theta_{ij})$$

όπου $u(\cdot)$ η βηματική συνάρτηση. Και:

$$\partial_t x_{ij} = \frac{s_j^2}{s_j^2 + \theta_{ij}^2} \left(1 - \sum_{k=1}^m x_{ik} \right) - p x_{ij} + \psi(i, j, t),$$

το πρώτο τμήμα αφορά το ποσοστό των ατόμων που ασχολούνται με το έργο j , το δεύτερο το ποσοστό των ατόμων που εγκαταλείπουν μετά από χρόνο $1/p$ και το τελευταίο είναι η $\psi(i, j, t)$ είναι μια Gaussian στοχαστική διαδικασία με διασπορά σ^2 ασυσχέτιστη στο χρόνο, ανάμεσα στα άτομα και τα έργα.

$$\forall i, j, t \langle \psi(i, j, t) \rangle = 0$$

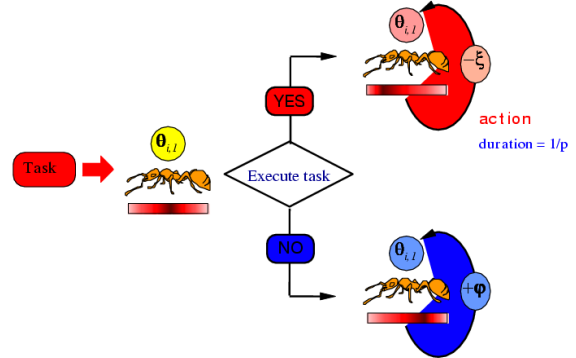
και

$$\forall i, j, h, k, t, t'$$

$$\langle \psi(i, j, t) \psi(h, k, t') \rangle = \sigma^2 \delta(i - h) \delta(j - k) \delta(t - t'),$$

όπου δ η συνάρτηση Dirac. Ο όρος $\psi(i, j, t)$ είναι ένας στοχαστικός στοιχείο στη συμπεριφορά των ατόμων που αντικατοπτρίζει την διαφορετική

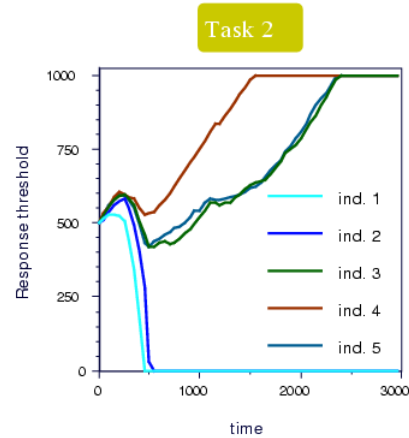
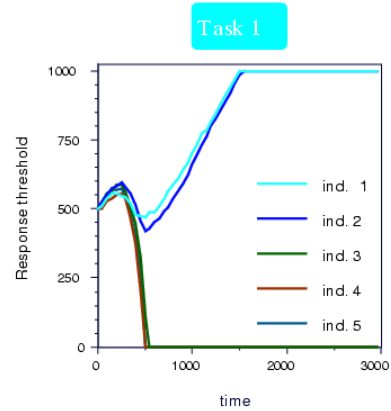
αντιμετώπιση των καταστάσεων από το κάθε άτομο, και γίνεται η αιτία κάποια άτομα ανάλογα με τις αρχικές τους επιλογές να εξειδικεύονται στη συνέχεια.



Η μεταβολή της έντασης των ερεθισμάτων για το έργο j είναι:

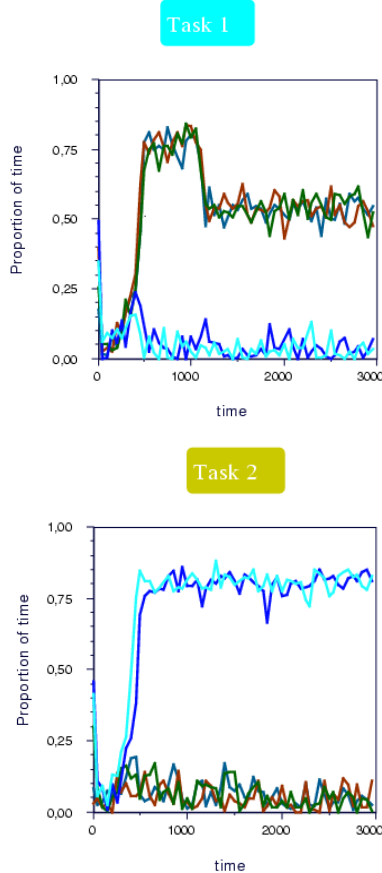
$$\partial_t s_j = \delta - \frac{a_j}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij},$$

όπου δ η αύξηση της έντασης κάθε χρονική μονάδα, a_j ο συντελεστής αποδοτικότητας για το έργο j .

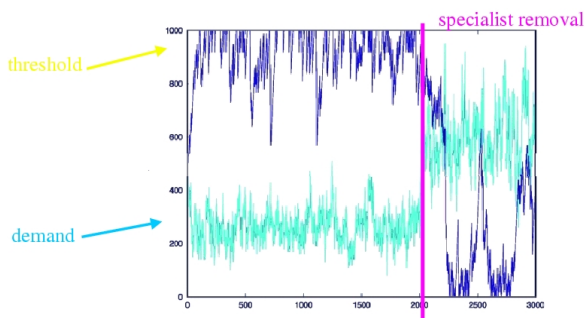


Για ένα μοντέλο προσομοίωσης που ακολουθεί την παραπάνω δυναμική παρακολούθουμε την χρονική εξέλιξη του κατωφλίου ανταπόκρισης σε δύο εργασίες από 5 διαφορετικά άτομα. Παρατηρείτε εξειδίκευση

των ατόμων 1 και 2 στην εργασία 2 και των υπολοίπων στην 2.



Παραπάνω η χρονική εξέλιξη του ποσοστού του χρόνου τους που αφιερώνουν 5 άτομα για την εκτέλεση 2 έργων. Παρατηρείτε η εξειδίκευση στην εργασία των ατόμων σύμφωνα με την μεταβολή του κατωφλίου ανταπόκρισής τους.



Παραπάνω παρατηρούμε τη χρονική εξέλιξη της τιμής της έντασης του ερεθίσματος μίας εργασίας και του κατωφλίου ενός ατόμου. Τη χρονική στιγμή που οροθετείται από την κάθετη γραμμή αφαιρείται ένα άτομο της κοινότητας που ήταν εξειδικευμένο στην εργασία αυτή. Αμέσως η ανάγκη για την κάλυψη της εργασίας αυτής αυξάνεται και οδηγεί και το άτομο αυτό να ασχοληθεί περισσότερο με αυτή την εργασία.

Η εμπλοκή του αυτή οδηγεί στη μείωση του κατωφλίου απόκρισης στην εργασία. Με αυτό τον τρόπο προσαρμόζεται η κοινότητα σε μια προβληματική κατάσταση, ανακατανέμονται οι εργασίες στα λιγότερα άτομα.

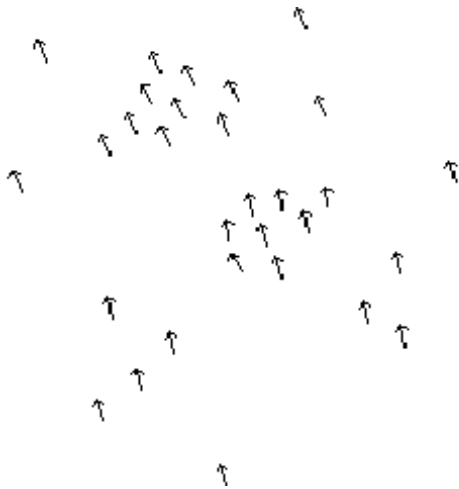
3.4.1 Εφαρμογές σε συστήματα πλειοδοσίας

Αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από την κατανομή εργασίας έχουν κοινά στοιχεία με τα συστήματα πολλαπλών agent που δρουν στο πεδίο της αγοράς για την διαχείριση των πόρων που διατίθενται μέσα από τη μορφή της πλειοδοσίας. Ο agent που κάνει την καλύτερη προσφορά είναι και ο αποδέκτης των πόρων ή της εκτέλεσης των εργασιών. Παράδειγμα ο Waldspruger έχει αναπτύξει το Spawn, ένα υπολογιστικό σύστημα, όπου κάθε εργασία ξεκινά με ένα ορισμένο ποσό «χρημάτων» που ανταποκρίνεται στην προτεραιότητά της και πλειοδοτεί για την χρήση της υπολογιστικής ισχύος άλλων μηχανών στο δίκτυο. Παραδείγματα εργασιών αποτελούν η αναζήτηση σε μια βάση δεδομένων, εκτύπωση εγγράφων. Μέσα από την διαδικασία της πλειοδοσίας για την χρήση των υπολογιστών κάθε εργασία κατανέμει τον προϋπολογισμό της σε αυτούς τους πόρους που θεωρεί πιο σημαντικούς για την εκτέλεσή της. Όταν οι τιμές είναι αρκετά χαμηλές, ορισμένα έργα έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν επιπλέον υπολογιστές για την εκτέλεσή τους σε παραλληλία. Το πλήθος των υπολογιστών και ο υπολογιστικός χρόνος που προσφέρουν στην κάθε εργασία προσαρμόζεται στις ανάγκες των εργασιών αυτών.

Σε ένα άλλο παράδειγμα, το πρόβλημα της διανομής θερμικών πόρων σε ένα κτίριο επιλύεται με τη χρήση agent που δρουν στο πεδίο της αγοράς (market based agents): οι agent αναπαριστούν ξεχωριστούς ελεγκτές θερμοκρασίας, που πλειοδοτούν για την αγορά ή την πώληση θερμού ή ψυχρού αέρα. Ο Clearwater παρουσίασε τα αποτελέσματα ενός συστήματος ισόνομης θερμοδίκης διανομής σε ένα κτίριο σε χαμηλό κόστος.

3.5 Boids

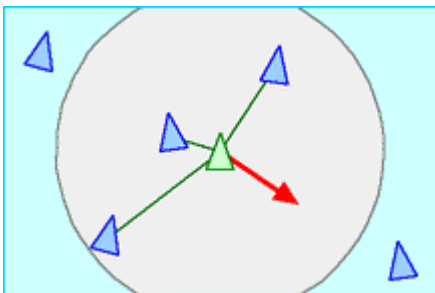
Το 1987 ο Craig Reynolds ανέπτυξε ένα μοντέλο για το συντονισμό – προσανατολισμό των ζώων κατά την κίνησή τους, όπως τα σμήνη πτηνών και τα κοπάδια ψαριών, με σκοπό μια πιο ρεαλιστική αντιμετώπιση τους στη χρήση τους στα γραφικά των υπολογιστών. Το γενικότερο μοντέλο ονομάστηκε boids, και βασίζεται σε τρεις απλούς κανόνες αλλαγής κατεύθυνσης κάθε boid με βάση την ταχύτητα και θέση των γειτονικών τους boids.



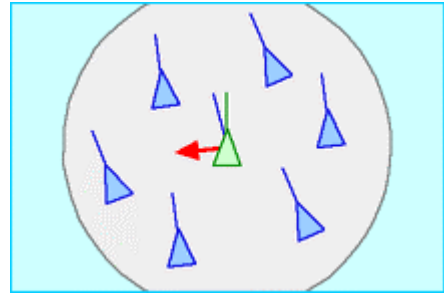
Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά τους μοιάζει πολύ με αυτή των πραγματικών πτηνών, που πετούν σε σχηματισμό V.

Οι κανόνες που ακολουθεί το μοντέλο είναι:

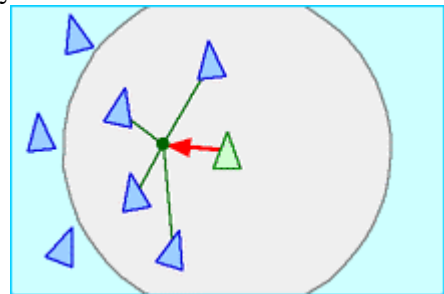
- ✓ **Αποφυγή:** Η προσπάθεια να μειωθεί η πιθανότητα σύγκρουσης με άλλα boids, απομακρυνόμενο από συνωστισμό των γειτόνων του.



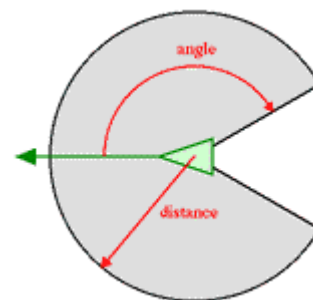
- ✓ **Συντονισμός:** Πετούν κατευθυνόμενα σύμφωνα με τη συνισταμένη κατεύθυνση των γειτόνων τους και τη συνισταμένη των ταχυτήτων των γειτόνων τους.



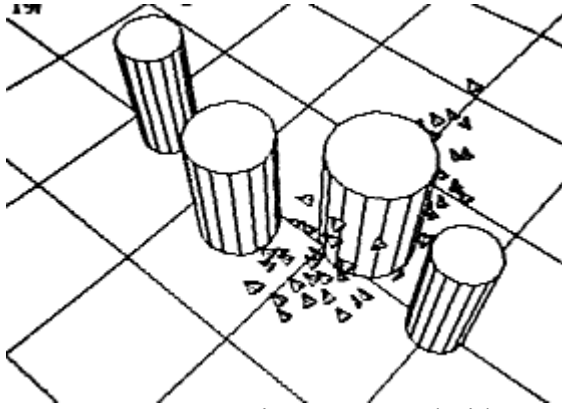
- ✓ **Συσπείρωση:** Κινούνται προς νοητό το κέντρο των αποστάσεων των γειτόνων τους.



Κάθε boid έχει άμεση πρόσβαση σε στη γεωμετρική περιγραφή όλης της σκηνής, όμως για το σχηματισμό των σμηνών απαιτείται μόνο η πληροφορία που αφορά τη γειτονιά του. Η γειτονιά χαρακτηρίζεται από την μια απόσταση (μετρούμενη από το κέντρο του boid) και μία γωνία (μετρούμενη με βάση τη κατεύθυνση που πετά το boid). Η συμπεριφορά του boid καθορίζεται μόνο από τα boid που βρίσκονται στη γειτονιά του και αγνοεί όσα βρίσκονται εκτός.



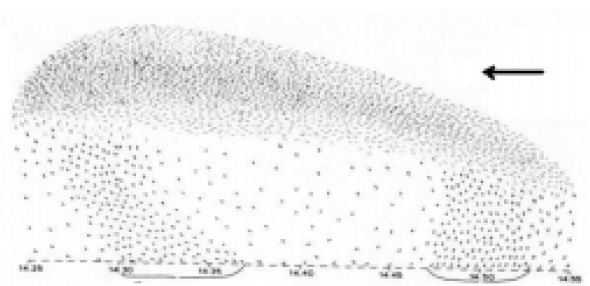
Σε ένα πιο αναβαθμισμένο μοντέλο συμπεριλήφθηκε η δυνατότητα αποφυγής αντικειμένων και κατεύθυνση προς ένα στόχο.



Στο μοντέλο των boids οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ απλών σε συμπεριφορά ατόμων παράγει μια πιο πολύπλοκη και οργανωμένη ομαδική συμπεριφορά. Οι επιμέρους συμπεριφορές είναι κληρονομικά μη γραμμικές, οπότε η σύνθεσή τους οδηγεί στην ανάδειξη μιας συνολικής συμπεριφοράς με χαοτικό χαρακτήρα. Ταυτόχρονα η αρνητική ανάδραση, που παρέχουν οι ελεγκτές της συμπεριφοράς των boids τείνουν να συγκρατούν τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος σε τάξη.

3.5.1 Η διαμόρφωση του σχήματος του σμήνους των ακριδών

Το είδος *Schistocerca gregaria* ακριδών της ερήμου διαθέτει την ικανότητα κινείται σε σμήνη δισεκατομμυρίων ατόμων ταξιδεύοντας με ταχύτητες 10-15km/hr για αποστάσεις εκατοντάδων έως χιλιάδων χιλιομέτρων [36]. Κατά την μετακίνηση τους οι ακρίδες δεν πετούν συνεχώς αλλά παλινδρομούν μεταξύ της παραμονής τους στο έδαφος και της πτήσης. Απογειώνονται αντίθετα προς την διεύθυνση του ανέμου (από το πίσω τμήμα του σμήνους) αλλά πετούν προς την κατεύθυνση του ανέμου, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα όπου η διεύθυνση του ανέμου φαίνεται από το βέλος.



Ο σχηματισμός του σμήνους κατά την μετακίνησή τους οφείλεται στις ελκτικές και απωστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των ακριδών.

Για την μελέτη της συμπεριφοράς του χρησιμοποιείται η συνάρτηση της πυκνότητάς του $p(x,t)$ (μονοδιάστατη μελέτη). Η τυχαία κίνησή τους περιγράφεται από μία σχέση διάχυσης $p_t = D\Delta p$, όπου D η παράμετρος της τυχαίας κίνησης. Στην περίπτωση που θεωρήσουμε ότι το σύστημα έχει εγγενή τάση να κινείται προς κάποια κατεύθυνση με ταχύτητα u και προς την αντίθετη τυχαία, με κατανομή Poisson με παράμετρο $\mu/2$, έχουμε:

$$p_t^+ + up_x^+ = \frac{\mu}{2}(p^- - p^+)$$

$$p_t^- - up_x^- = \frac{\mu}{2}(p^+ - p^-)$$

Η οποία αποτελεί την διαφορική εξίσωση του τηλεγραφητή:

$$\frac{1}{\mu} p_{tt} + p_t = \frac{u^2}{\mu} p_{xx}$$

Αν x η μεταβλητή που προσδιορίζει την κίνηση του σμήνους ως προς τον άξονα τότε $x \rightarrow +\infty$ το μπροστά $x \rightarrow -\infty$ το πίσω. $S(x,t)$ η πυκνότητα του πληθυσμού στο έδαφος και $F(x,t)$ αυτών που πετούν, τότε:

$$S_t = -R(S,F)S + G(S,F)F$$

$$F_t = DF_{xx} - UF_x + R(S,F)S - G(S,F)F$$

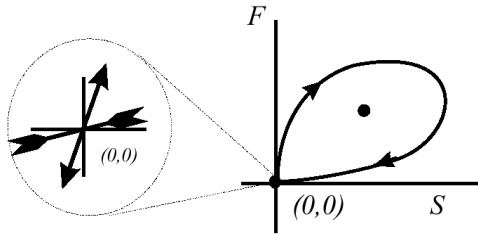
R, G οι ρυθμοί μετάβασης από το έδαφος σε πτήση. D η τυχαία κίνηση οφειλόμενη σε ατμοσφαιρικές μεταβολές και U η ταχύτητα του ρεύματος αέρος που συμπαρασύρει τις ακρίδες. Ο μετασχηματισμός $z=x-ct$ γίνεται για να μελετηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου καθώς αυτό κινείται, οπότε η μορφή των σχέσεων είναι:

$$-cS_z = -R(S,F)S + G(S,F)F$$

$$DF_z = -cS + (U - c)F$$

Από το πεδίο φάσεων είναι εμφανείς η κυκλική συμπεριφορά των ακριδών που

πετούν και στη συνέχεια προσγειώνονται ενώ άλλες απογειώνονται για να προσγειωθούν και αυτές λίγο παρακάτω.



Το σύστημα όμως δεν είναι ευσταθές οι τυχαίες κινήσεις οδηγούν στη συνεχή απώλεια μελών από το πίσω μέρος του σμήνους. Αν μία ακρίδα απομακρυνθεί από τις άλλες δεν υπάρχει κάποιο ερέθισμα σε αυτήν για να κινηθεί πίσω στις άλλες.

Η μορφή του σχηματισμού του σμήνους εξαρτάται από το είδος, την ισχύ και την εμβέλεια των ελκτικών και απωστικών δυνάμεων μεταξύ των ακριδών.

- ✓ Η πυκνότητα στο εσωτερικό του σμήνους εξαρτάται από τη συσχέτιση των δύο δυνάμεων. Ισχυρότερες ελκτικές δυνάμεις αυξάνουν την πυκνότητα και ο σχηματισμός αποκτά μικρότερη διάμετρο.
- ✓ Οι απωστικές δυνάμεις έχουν καθοριστικότερο ρόλο στην διαμόρφωση του σχηματισμού.
- ✓ Τα άτομα που βρίσκονται στο μπροστινό μέρος του σχηματισμού κινούνται προς τα πίσω όπως και αυτά που βρίσκονται πίσω προσπαθούν να προλάβουν τα άλλα. Όμως υπάρχει συνεχής απώλεια, αφού κάποια άτομα ξεμένουν πίσω, με αποτέλεσμα το σμήνος σταδιακά οδηγείται σε αφανισμό.
- ✓ Η διάρκεια ζωής του σμήνους (μέχρι να χάσει όλα τα μέλη του που ξεμένουν πίσω) είναι εκθετική ως προς τη διάμετρό του. Μειώνεται καθώς αυξάνονται οι απωστικές δυνάμεις και οι τυχαίες κινήσεις προς τα πίσω των ατόμων.

4 Μοντέλο δυναμικού τεχνητών κοινωνικών πεδίων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες μέθοδοι για την μοντελοποίηση multi agent συστημάτων όπου οι agent κινούνται στο χώρο (όχι μόνο σε δισδιάστατο). Αναπτύσσονται παρακάτω μοντέλα που μπορούν να περιγράψουν την κίνηση σε σχηματισμό, την κατανομή στο χώρο, την αποφυγή εμποδίων κ.α. ως αποτελέσματα της επιδράσεως στους agent δυνάμεων που καθορίζονται από το δυναμικό τεχνητών «κοινωνικών» πεδίων που παράγει κάθε agent ή στοιχείο του περιβάλλοντος.

4.1 Μοντελοποίηση swarm intelligence με τη χρήση τεχνητών πεδίων

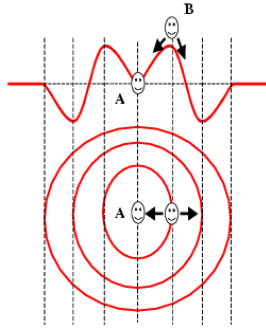
Η πορεία των swarm intelligence συστημάτων προς την επίλυση των προβλημάτων αναδεικνύεται από το αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα άτομα και μεταξύ των ατόμων και του περιβάλλοντος. Παρουσιάζεται μια κατευθυντήρια μεθοδολογία [21] στην οποία η συμπεριφορά των ατόμων στα συστήματα αυτά καθορίζεται από ένα αφαιρετικό πεδίο δυνάμεων και ο συντονισμός της συμπεριφοράς τους αναδύεται από τις αμοιβαίες αλληλεπιδράσεις των ατόμων με τα πεδία που δημιουργούν τα ίδια τα άτομα. Η μεθοδολογία αυτή παρέχει ένα γενικευμένο καθολικό μοντέλο για την περιγραφή αυτών των συστημάτων, παρέχοντας την δυνατότητα να εκφραστεί με τη μορφή των δυναμικών συστημάτων και να περιγραφεί με διαφορετικές εξισώσεις.

Το μοντέλο των συμπεδίων (co-fields) παρέχει ένα πλαίσιο για το σύστημα πολλαπλών agents (Multi Agent Systems), όπου το σύστημα θεωρείται μια ενότητα, όπου οι agents επιτυγχάνουν τους στόχους όχι βασιζόμενοι στις δικές τους ικανότητες μόνο, αλλά στο ότι είναι μέλη

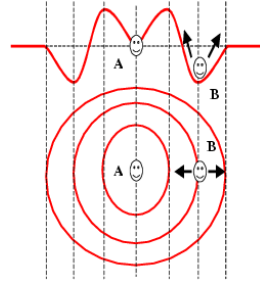
ενός αυτοργανώμενου συστήματος, που οδηγεί στην επίτευξη του στόχου. Το μοντέλο σχηματικά χαρακτηρίζεται από:

- ✓ Το περιβάλλον αναπαρίσταται με αφαιρετικό τρόπο από πεδία, που δημιουργούνται από τους agents και το ίδιο το περιβάλλον και διαδίδονται παντού. Αυτά τα πεδία κομίζουν χρήσιμη πληροφορία στους agents για το συντονισμό του έργου τους και διαμορφώνουν ένα ισχυρό πλαίσιο για τη προσαρμοζόμενη ενεργοποίηση για το συντονισμό του έργου τους.
- ✓ Η πολιτική του συντονισμού υλοποιείται αφήνοντας τους agents να κινούνται ακολουθώντας τη κυματομορφή των πεδίων αυτών.
- ✓ Η δυναμική του περιβάλλοντος και οι κινήσεις των agents υποβάλλουν σε συνεχείς αλλαγές την επιφάνεια του πεδίου, συνθέτοντας έναν βρόχο ανάδρασης που επηρεάζει την κίνηση των agents.
- ✓ Αυτός ο βρόχος ανάδρασης επιτρέπει στο σύστημα (περιβάλλον και agents) να αυτοργανώνονται, οπότε και ο συντονισμός του έργου τους επιτυγχάνεται.

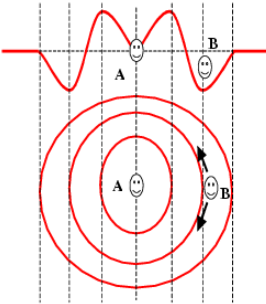
Αναλυτικότερα, το πεδίο ορίζεται ως κατανεμημένη δομή δεδομένων που συνίσταται σε ένα μοναδικό αναγνωριστικό, την τιμή του (που αναπαριστά το πλάτος του πεδίου στο συγκεκριμένο σημείο), και στο νόμο διάδοσής του. Τα πεδία δημιουργούνται είτε από τους agents είτε από το περιβάλλον, και διαδίδονται στο χώρο όπως περιγράφει ο νόμος διάδοσης τους, ο οποίος καθορίζει την μορφή της επιφάνειας του πεδίου. Ένα πεδίο μπορεί να είναι στατικό ή δυναμικό. Οι agents απλώς υπολογίζουν ένα είδος συνδυασμού των πεδίων που αντιλαμβάνονται. Το αποτέλεσμα του συνδυασμού είναι και αυτό ένα νέο πεδίο, το οποίο για τους agents αποτελεί το πεδίο συντονισμού τους. Οι agents ακολουθούν ντετερμινιστικά ή πιθανοτικά τη μορφή του πεδίου αυτού (την κλίση της επιφάνειας του πεδίου είτε προς την κατεύθυνση που αυτή μειώνεται



ή προς αυτή που αυξάνεται



ή τέλος προς τη κατεύθυνση που είναι μηδέν).



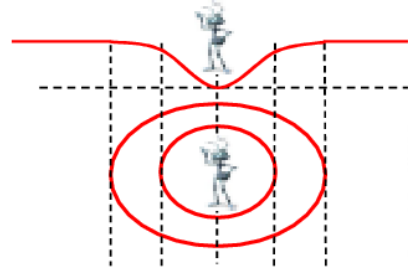
Οι πολύπλοκες κινήσεις των agents είναι αποτέλεσμα της δυναμικής μεταβολής της μορφής της επιφάνειας του πεδίου.

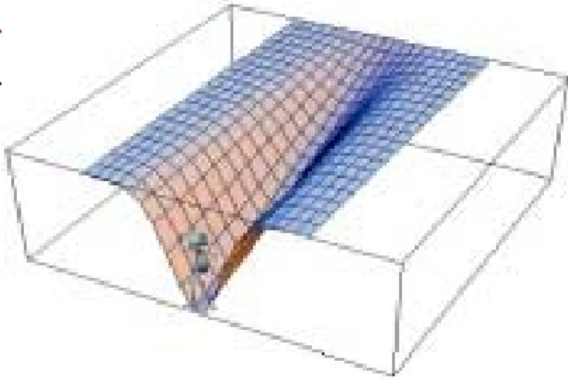
4.1.1 Συγκομιδή μερμηγκιών

Κατά τη συγκομιδή των μερμηγκιών διαμορφώνεται ένα δίκτυο μονοπατιών που συνδέει τη φωλιά τους με τις πηγές τροφής. Τα μονοπάτια αυτά διαμορφώνονται από τα μερμήγκια με την χρήση φερμόνων. Τα μερμήγκια χρησιμοποιούν δύο είδη φερμόνων. Το είδος της αναζήτησης το εναποθέτουν τα μερμήγκια στο μονοπάτι που ακολουθούν κατά την αναζήτηση τροφής, ενώ το είδος της επιστροφής κατά την επιστροφή τους στη φωλιά κουβαλώντας τη τροφή. Τα μερμήγκια περιπλανώνται τυχαία ακολουθώντας την φερμόνης αναζήτησης, ωστόσο βρουν τροφή οπότε ακολουθούν την φερμόνη επιστροφής για να επιστρέψουν. Η φερμόνη που

εναποθέτουν τα μερμήγκια γίνεται αντιληπτή από όλα τα άλλα μερμήγκια της κοινότητας, παράλληλα όμως η φερμόνη εξατμίζεται και η αντίληψή της χάνεται εάν δεν ενισχυθεί περνώντας από το σημείο αυτό ξανά ένα μερμήγκι.

Η περιγραφή του παραπάνω μηχανισμού υλοποιείται με την χρήση δύο πεδίων που αρχικά είναι επίπεδα. Το ένα είναι το πεδίο αναζήτησης και στα σημεία που υπάρχει παρουσία μερμηγκιών βυθίζεται (δημιουργείται μια λακκούβα). Το μερμήγκι κατά την αναζήτηση τροφής ακολουθεί (πιθανοτικά) τη μείωση του πεδίου αυτού, που οδηγεί στην πηγή τροφής. Παρατηρούμε τη δημιουργία του κύκλου ανάδρασης όπου η κίνηση του μερμηγκιού καθορίζει την μορφή του πεδίου και το πεδίο τη κίνηση του μερμηγκιού. Όμοια συμβαίνει και στο πεδίο επιστροφής, η παρουσία μερμηγκιού που επιστρέφει βυθίζει τη επιφάνεια του πεδίου, όπου το μερμήγκι κουβαλώντας την τροφή ακολουθεί την μείωση του πεδίου επιστροφής. Η κίνηση των μερμηγκιών και η παραμόρφωση της επιφάνειας του πεδίου δημιουργεί κανάλια. Τα κανάλια αυτά αντιστοιχούν στα μονοπάτια που ακολουθούν τα μερμήγκια και το βάθος των οποίων καθορίζεται από το πλήθος των μερμηγκιών που ακολουθεί αυτά τα μονοπάτια. Και στις δύο περιπτώσεις η επιφάνεια του πεδίου παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά τείνει να επανέλθει με την πάροδο του χρόνου στην αρχική της κατάσταση την επίπεδη, αν δεν υπάρχει η παρουσία μερμηγκιού στο σημείο. Η ιδιότητα αυτή του πεδίου προσομοιάζει την εξάτμιση της φερμόνης.





Αν ένα μερμήγκι βρεθεί στη θέση (X_w, Y_w) τότε το βούλιαγμα που δημιουργεί περιγράφεται στο χώρο και στο χρόνο από τα σχέση:

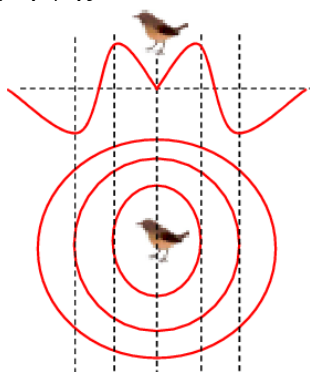
$$wrinkle(x, y, t) = -k(t - t_0)e^{-h((x - X_w)^2 + (y - Y_w)^2)}$$

$$k(t), h > 0$$

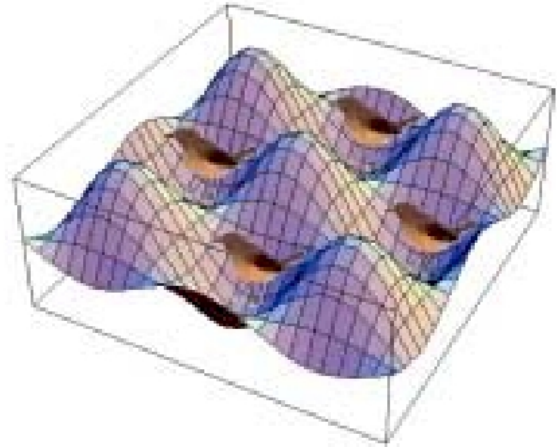
Η συνάρτηση $k(t)$ είναι φθίνουσα και περιγράφει την εξάτμιση της φερμόνης.

4.1.2 Πτήση σε σχηματισμό

Ο σχηματισμός του σμήνους από τα πτηνά, που έχει εφαρμογές στην ρύθμιση της εναέριας αλλά και της θαλάσσιας κίνησης, περιγράφεται θεωρώντας ότι κάθε πτηνό προσπαθεί να διατηρηθεί σε μία σταθερή απόσταση από τα κοντινά του και να συνταιριάζει την ταχύτητά του με αυτά. Το κάθε πτηνό δημιουργεί γύρω του ένα πεδίο της μορφής:

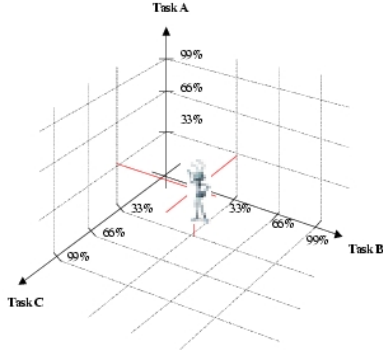


Καθένα από αυτά κινείται έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί το πεδίο που αντιλαμβάνεται και αποτελεί το άθροισμα των πεδίων που δημιουργεί το καθένα από αυτά. Όπως παρατηρούμε επιλέγοντας το καθένα τις θέσεις όπου εμφανίζονται τα τοπικά ελάχιστα, παίρνουν τις θέσεις τις στο σχηματισμό.

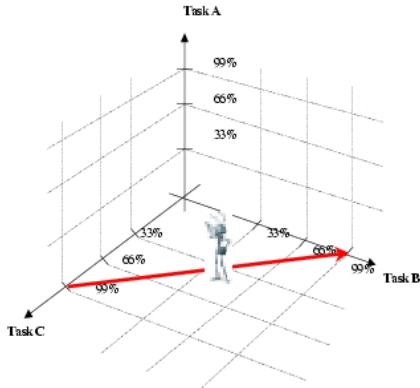


4.1.3 Καταμερισμός εργασίας

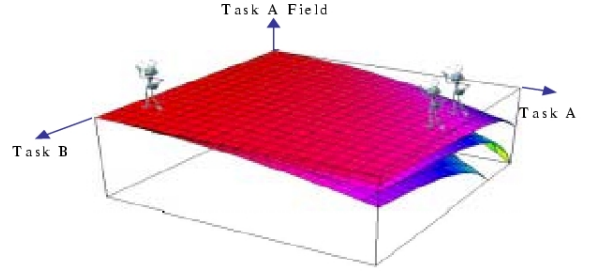
Η κατανομή εργασίας στα κοινωνικά έντομα χαρακτηρίζεται από μεγάλη πλαστικότητα και προσαρμογή στις ανάγκες της κοινότητας. Το ποσοστό των μελών της που ασχολείται με την κάθε εργασία εξαρτάται από την εξειδίκευση του κάθε ατόμου, τις μεταβολές της σύνθεσης του πληθυσμού και των αναγκών της. Κάθε άτομο ανταποκρίνεται στην απαίτηση να αφιερώσει ένα μέρος του χρόνου του στην κάθε εργασία ανάλογα με το κατώφλι ενεργοποίησης του για την εργασία αυτή. Το κατώφλι αυτό δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την εξειδίκευσή του (μειώνεται για μια εργασία όσο παραπάνω ασχολείται με αυτή το άτομο). Το μοντέλο της παραπάνω διεργασίας αποτελεί ένα πεδίο σε πολυδιάστατο χώρο, όπου κάθε εργασία αποτελεί μια διάσταση. Αν παράδειγμα υπάρχουν τρεις εργασίες A, B, C τότε ο χώρος έχει τρεις διαστάσεις. Η θέση του κάθε μερμηγκιού σε αυτό το χώρο εργασίας καθορίζει το κλάσμα του χρόνου που θα αφιερώσει για την κάθε εργασία. Αν αφιερώνει τον ίδιο χρόνο σε όλες (33% σε καθεμία).



Γενικά η θέση κάθε μερμηγκιού ακολουθεί το περιορισμό $\sum_{x_i \in \text{Tasks}} x_i \leq 100\%$. Η μετακίνηση του μερμηγκιού στο χώρο μεταφράζεται σε αλλαγή της εργασίας που εκτελεί, παράδειγμα από το έργο C στο B.



Η αύξηση της ζήτησης για μια εργασία προκαλεί την κύρτωση της επιφάνειας του πεδίου προς τον άξονα που αντιπροσωπεύει αυτήν την εργασία. Τα μερμηγκία που βρίσκονται στην επιφάνεια αυτή γλιστρούν στην κατεύθυνση και κινούνται προς την κατεύθυνση του άξονα αυτού. Η παρουσία περισσότερων μερμηγκιών κοντά στον άξονα άρα και αύξηση της ενασχόλησης με την αντίστοιχη εργασία μειώνει την ζήτηση, οπότε ανάλογα μειώνεται η κύρτωση που εμφανίστηκε. Παρατηρούμε τα μερμηγκία να κάνουν «τραμπάλα» πάνω στο πεδίο, προσπαθώντας να εξισορροπήσουν τις ανάγκες για τις διάφορες εργασίες, επίπεδο πεδίο. Η βαθμιαία αύξηση της κύρτωσης καθώς πλησιάζει τον άξονα προσπαθεί να προσομοιώσει την εξειδίκευση των μερμηγκιών στην εργασία αυτή, αφού όσο πιο κοντά στον άξονα είναι τόσο περισσότερο ενασχολούνται με την εργασία.



4.1.4 Κυνήγι λύκων

Το κυνήγι το λύκων για ένα τάρανδο, που προσπαθεί να απομακρυνθεί από τον κοντινότερο αρπακτικό, καθώς αυτοί προσπαθούν να το κυκλώσουν απομακρυνόμενοι ο ένα από τον άλλο. Ο τάρανδος όταν βρίσκεται στη θέση (X_m, Y_m) παράγει το πεδίο:

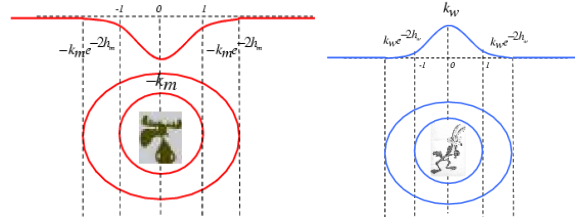
$$moose(x, y, t) = -k_m e^{-h_m((x-X_m)^2 + (y-Y_m)^2)}$$

όπου $k_m, h_m > 0$.

Ο λύκος i στη θέση (X_w^i, Y_w^i) παράγει το πεδίο:

$$wolf_i(x, y, t) = k_w e^{-h_w((x-X_w^i)^2 + (y-Y_w^i)^2)}$$

όπου $k_w, h_w > 0$.



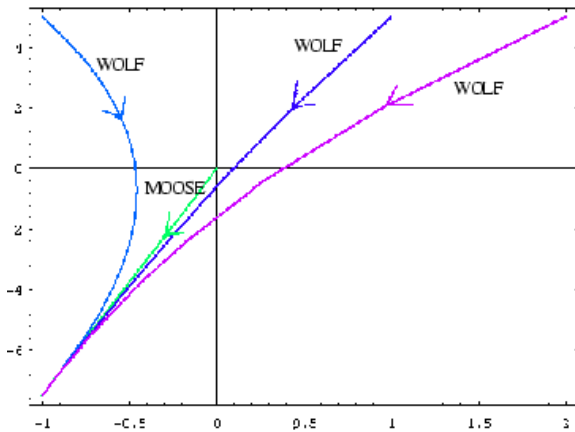
Το πεδίο που ακολουθεί ο τάρανδος συνίσταται στο άθροισμα των πεδίων των λύκων και κινείται προς την κατεύθυνση που αυτό μειώνεται.

$$coord_{moose}(x, y, t) = \sum_{i=1}^n wolf_i(x, y, t)$$

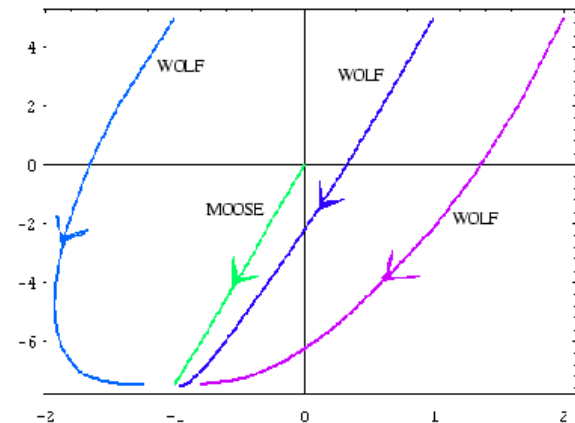
Το πεδίο που ακολουθούν οι λύκοι αποτελείται από το πεδίο του τάρανδου και το πεδίο των άλλων λύκων.

$$coord_{wolf_i}(x, y, t) = moose(x, y, t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n wolf_j(x, y, t)$$

Η εξέλιξη του κυνηγιού με βάση τα παραπάνω.



Στην περίπτωση που κάθε λύκος δεν λαμβάνει υπόψη του την κίνηση των άλλων.



Όταν λαμβάνουν υπόψη τους άλλους λύκους είναι ικανοί να περικυκλώσουν το θήραμα.

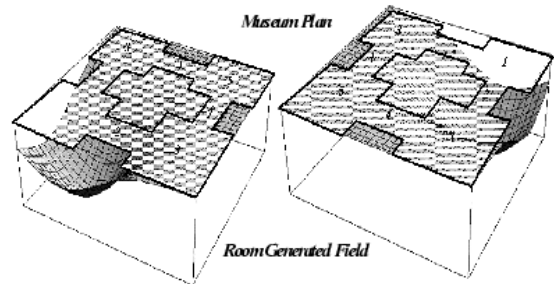
4.1.5 Εφαρμογές πλοήγησης επισκεπτών

Η μεθοδολογία των πεδίων αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ενός συστήματος για την περιήγηση σε ένα μουσείο, καθώς και την διαχείριση των περιηγητών σε αυτό. Σε ένα μουσείο όπου οι επισκέπτες φέρουν μια φορητή συσκευή (PDA), με μικρή υπολογιστική ισχύ και δυνατότητα σύνδεσης ασύρματα με το τοπικό δίκτυο (802.11). Αυτή η συσκευή τρέχει ένα agent που παρέχει πληροφορίες, οπτικές και ηχητικές, για τα εκθέματα του μουσείου που βρίσκονται στο ίδια αίθουσα με τον επισκέπτη και τον καθοδηγεί στην επόμενη αίθουσα. Κάθε αίθουσα αποτελεί ένα ξεχωριστό υποδίκτυο, οπότε περνώντας ο επισκέπτης από αίθουσα σε αίθουσα, μεταβαίνει από το ένα υποδίκτυο στο άλλο και με αυτό τον τρόπο αντιλαμβάνεται το σύστημα τη θέση του επισκέπτη, από το υποδίκτυο που ανήκει η συσκευή που κρατά.

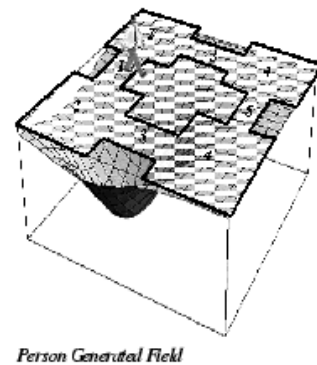
Το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα να επιλέξει τις αίθουσες που επιθυμεί να επισκεφθεί, και να τον καθοδηγεί με το συντομότερο δρόμο αποφεύγοντας τα σημεία όπου είναι συγκεντρωμένοι πολύ επισκέπτες (αποφυγή συνωστισμού-ισορροπημένη κατανομή επισκεπτών). Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα στο επισκέπτη να ορίσει ή να αφήσει το σύστημα να επιλέξει το σημείο συνάντησης, των επισκεπτών που αποτελούν μία ομάδα.

Για την επίτευξη αυτής της συμπεριφοράς χρησιμοποιούνται τρία είδη πεδίων.

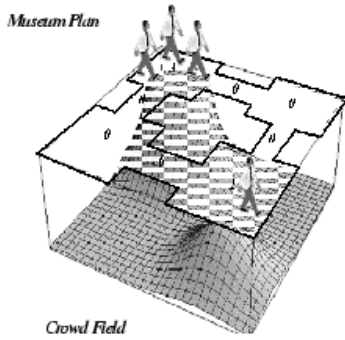
Το πεδίο της κάθε αίθουσας RF_i που έχει τιμή 1 στην αίθουσα αυτή και σε κάθε αίθουσα πιο μακριά αυξάνεται κατά ένα. Το πεδίο αυτό είναι στατικό.



Παρόμοιο πεδίο PF_i με αυτό της αίθουσας δημιουργεί και ο κάθε επισκέπτης, μόνο που αυτό είναι μεταβλητό καθώς μετακινείται ο επισκέπτης. Έχει τιμή 1 στην αίθουσα που βρίσκεται ο επισκέπτης και αυξάνεται καθώς απομακρυνόμαστε από το δωμάτιο.



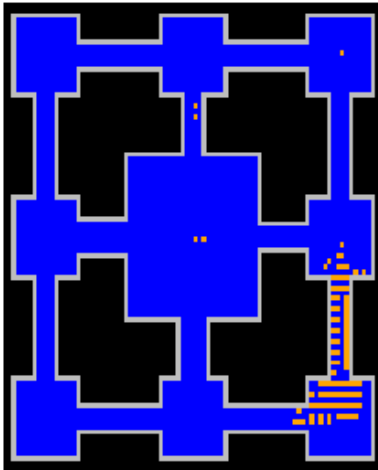
Το τρίτο είναι το πεδίο συνωστισμού CWF, το οποίο παράγεται από το πεδίο των επισκεπτών. Έχει τιμή ίση με το πλήθος των επισκεπτών στην αίθουσα, αθροίζει τα πεδία των επισκεπτών με τιμή 1.



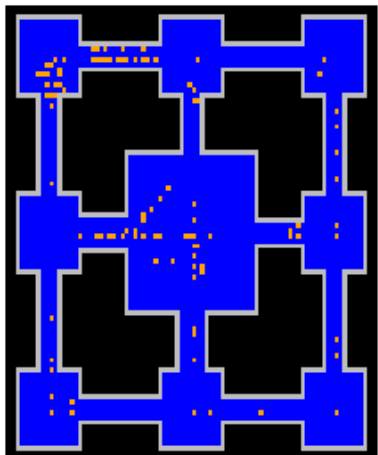
Η ισοκατανομή των επισκεπτών στις αίθουσες και η αποφυγή συνωστισμού, επιτυγχάνεται όταν οι επισκέπτες ακολουθούν την μείωση του πεδίου που ορίζεται:

$$CF = \min(RF_1, RF_2, \dots, RF_n) + \mu CWF$$

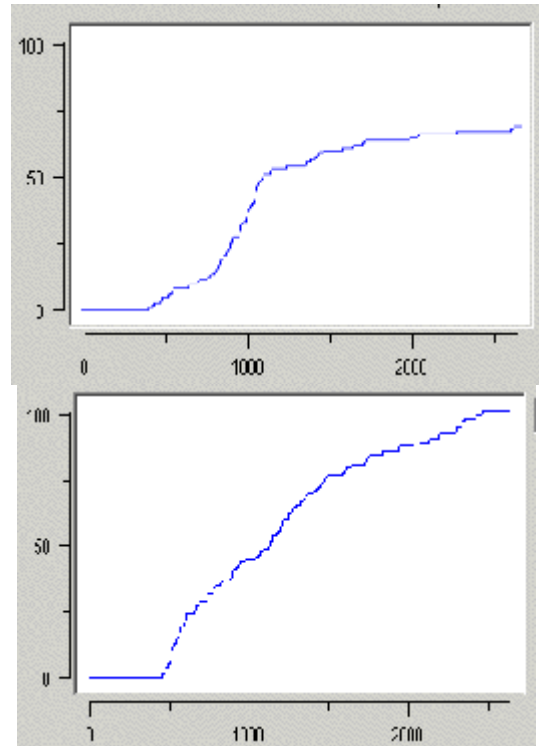
όπου $RF_1, RF_2, \dots, RF_n$ οι αίθουσες που επιθυμεί να επισκεφθεί ο επισκέπτης. Η τιμή του μ καθορίζει το πόσο διατεθειμένος είναι ο επισκέπτης να ακολουθήσει μεγαλύτερη διαδρομή για να αποφύγει το συνωστισμό.



Χωρίς τη χρήση του μηχανισμού αποφυγής συνωστισμού.



Με τη χρήση του μηχανισμού αποφυγής συνωστισμού.



Το πλήθος των ολοκληρωμένων περιηγήσεων προς το χρόνο, (πάνω) χωρίς και (κάτω) με τη χρήση του μηχανισμού αποφυγής συνωστισμού.

Η συνάντηση όλων των επισκεπτών μιας ομάδας σε ένα σημείο επιτυγχάνεται ακολουθώντας το πεδίο που ορίζεται:

$$CF = RF_x + \mu CWF$$

Όπου RF_x το πεδίο της αίθουσας που θα συναντηθούν οι επισκέπτες.

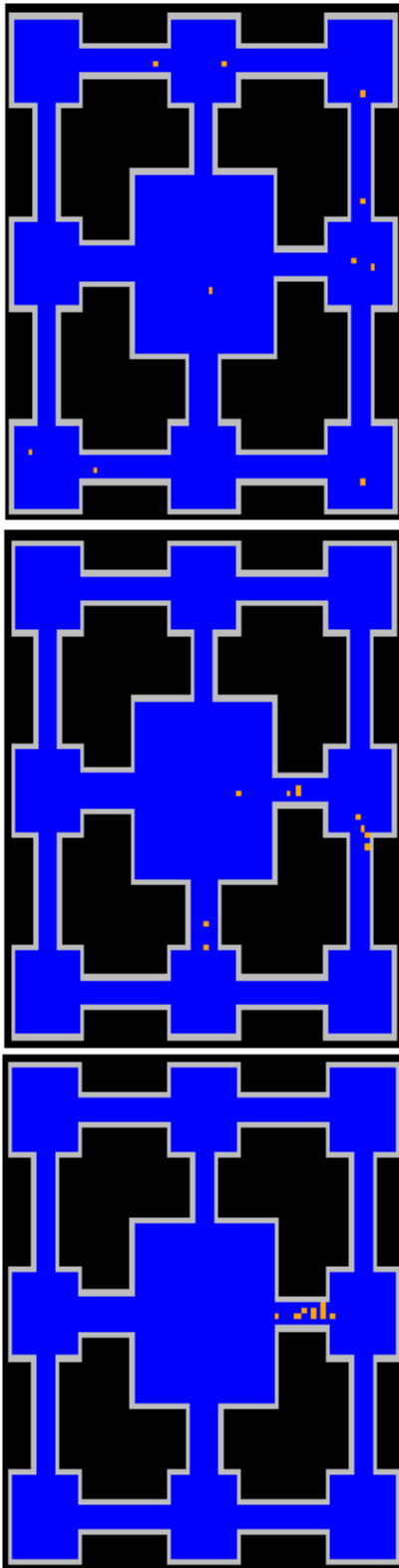
Αν οι επισκέπτες κινούνται για να συναντηθούν με ένα ορισμένο άτομο (π.χ. τον ξεναγό) ακολουθούν το πεδίο:

$$CF = PF_x + \mu CWF$$

Το άτομο αυτό δεν είναι απαραίτητο να είναι σε μία αίθουσα, αλλά μπορεί να κινείται.

Εάν η ομάδα επιθυμεί να συγκεντρωθεί στο πλησιέστερο για όλους σημείο (το βαρύκεντρο) τότε:

$$CF_i = \sum_{x \neq i} PF_x + \mu CWF$$



Παράδειγμα της προσπάθειας των επισκεπτών χάρη στο σύστημα να συγκεντρωθούν στο πλησιέστερο σε όλους σημείο.

4.2 Δυναμικό κοινωνικών πεδίων

Ένα VLSR (Very Large Scale Robotic) ρομποτικό σύστημα ευρείας κλίμακας συνίσταται από εκατοντάδες έως δεκάδες χιλιάδες αυτόνομα ρομπότ. Παρακάτω αναπτύσσεται μια μεθοδολογία [20] για των κατανεμημένο έλεγχο αυτών των αυτόνομων ρομπότ.

Ο κεντρικός έλεγχος, όπου ένας κεντρικός ελεγκτής συγκεντρώνει πληροφορίες για την κατάσταση ολόκληρου του συστήματος (τις καταστάσεις όλων των ρομπότ) και στη συνέχεια προγραμματίζει την κίνηση καθενός από αυτά, έχει υψηλή υπολογιστική και τηλεπικοινωνιακή πολυπλοκότητα άρα αντίστοιχες απαιτήσεις ισχύος, ενώ συνήθως εμφανίζει έλλειψη ευελιξίας και ευρωστίας.

Με τον κατανεμημένο έλεγχο κάθε ρομπότ καθορίζει την κίνηση του παρατηρώντας το περιβάλλον του και εφαρμόζοντας ορισμένους κανόνες. Αυτό πραγματοποιείται τοπικά, το ο σχεδιασμός της κίνησης του ρομπότ δεν βασίζεται στη γνώση όλου του συστήματος, παρά μόνο στις πληροφορίες που είναι προσβάσιμες σε αυτό. Με τη χρήση όμως κατάλληλων κανόνων δύναται το σύστημα να επιδείξει συνολικά την επιθυμητή συμπεριφορά επιτυγχάνοντας τους προκαθορισμένους στόχους του. Παράδειγμα μία ομάδα από ρομπότ επιθυμούμε να σχηματίσει κάποιο γεωμετρικό σχήμα (κύκλο, πολύγωνο). Κάθε ρομπότ τρέχει ένα πανομοιότυπο πρόγραμμα που εκτελείται ασύγχρονα σε καθένα από αυτά. Σύμφωνα με το πρόγραμμα, αν d η απόσταση ενός ρομπότ από το πιο μακρινό γειτονικό του ρομπότ, τότε αν $d > D$, D καθορισμένη σταθερά, το ρομπότ πρέπει να μετακινηθεί προς αυτό το ρομπότ. Ο παραπάνω κανόνας επαρκεί για να επιτευχθεί ο στόχος του παραδείγματος.

Η μέθοδος του δυναμικού τεχνητών πεδίων έχει χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό της κίνησης ενός μεμονωμένου ρομπότ που αποφεύγει τα εμπόδια. Το τεχνητό πεδίο δημιουργείται αν θεωρήσουμε ότι το ρομπότ είναι ένα αρνητικά φορτισμένο αντικείμενο καθώς και τα εμπόδια στο χώρο όπου θα κινηθεί το ρομπότ και θετικά φορτισμένος

είναι το σημείο που επιθυμούμε να τερματίσει την κίνησή του το ρομπότ. Το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται έχει υψηλή τιμή κοντά στα εμπόδια και ελαχιστοποιείται όταν το ρομπότ πλησιάζει τον στόχο του. Η κίνηση του ρομπότ καθορίζεται από την τιμή του δυναμικού, κινούμενο προς που αυτό μειώνεται. Επειδή όμως υπάρχει η πιθανότητα ο ρομπότ να εγκλωβιστεί σε κάποιο τοπικό ελάχιστο, η παραπάνω μέθοδος συνδυάζεται και με άλλες ευριστικές μεθόδους.

Καθ' επέκταση της παραπάνω μεθόδου χρησιμοποιούνται τα τεχνητά πεδία για το συντονισμό της κίνησης πολλών ρομπότ. Στη μεθοδολογία που αναπτύσσεται παρακάτω, η συμπεριφορά των ρομπότ θα καθορίζεται από τεχνητό πεδίο δυνάμεων, δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των ρομπότ ή ομάδων ρομπότ. Οι δυνάμεις αυτές είναι συναρτήσεις της αντιστρόφου των δυνάμεων της απόστασης. Οι δυνάμεις αυτές είτε έλκουν είτε απωθούν τα ρομπότ μεταξύ τους, αντικατοπτρίζοντας τις «κοινωνικές σχέσεις» μεταξύ των ρομπότ, για αυτό και η μέθοδος αποκαλείται πεδία κοινωνικού δυναμικού. Ο έλεγχος της κίνησης είναι αποτέλεσμα των τεχνητών δυνάμεων που ασκούνται στο ρομπότ από άλλα ρομπότ ή στοιχεία του συστήματος, οπότε η κίνηση του ρομπότ ελέγχεται με κατανεμημένο και ασύγχρονο τρόπο.

Στο σύστημα κάθε ρομπότ θεωρείται σαν ένα σημειακό σωματίδιο $1, 2, \dots, n$ σε θέσεις $X_1, X_2, \dots, X_n$ σε ένα ευκλείδειο χώρο σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αν $r_{ij} = \|X_i - X_j\|$ είναι η ευκλείδεια απόσταση των ρομπότ i και j , τότε η δύναμη που ασκείται από το ρομπότ i στο j είναι:

$$F_{i,j}(X_i, X_j) = \left(\sum_{k=1}^L \frac{c_{i,j}^{(k)}}{(r_{ij})^{\sigma_{i,j}^{(k)}}} \right) \left(\frac{X_j - X_i}{r_{ij}} \right)$$

Οι όροι του αθροίσματος που υπερσχύουν στις μικρές αποστάσεις, είναι αυτοί με τη μεγαλύτερη παράμετρο $\sigma_{i,j}^{(k)} \geq 0$, αντίθετα οι όροι με τη μικρότερη παράμετρο $\sigma_{i,j}^{(k)} \geq 0$ υπερσχύουν σε μεγάλες αποστάσεις

$r_{ij} = \|X_i - X_j\|$. Η συνολική δύναμη που ασκείται σε ένα ρομπότ είναι:

$$F_i = \sum_{j \neq i} F_{i,j}(X_i, X_j)$$

Στη περίπτωση που τα ρομπότ ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες ορίζουμε κάποια κοινή συμπεριφορά των ρομπότ της κάθε ομάδας προς τα ρομπότ των άλλων ομάδων. Αν το ρομπότ στη θέση X ανήκει στην ομάδα S και το ρομπότ στη θέση X' στην ομάδα S' με τη μεταξύ τους απόσταση r , τότε η δύναμη είναι:

$$F_{S,S'}(X, X') = \left(\sum_{k=1}^L \frac{c_{S,S'}^{(k)}}{r^{\sigma_{S,S'}^{(k)}}} \right) \left(\frac{X - X'}{r} \right)$$

και αντίστοιχα:

$$F_{i,j}(X_i, X_j) = \sum_{\forall S, S' \text{ s.t. } i \in S \wedge j \in S'} F_{S,S'}(X_i, X_j)$$

και η συνολική δύναμη σε ένα ρομπότ:

$$F_i = \sum_{j \neq i} F_{i,j}(r_{ij})$$

Παράδειγμα μια απλή μορφή της δύναμης που ασκεί ένα ρομπότ σε απόσταση r :

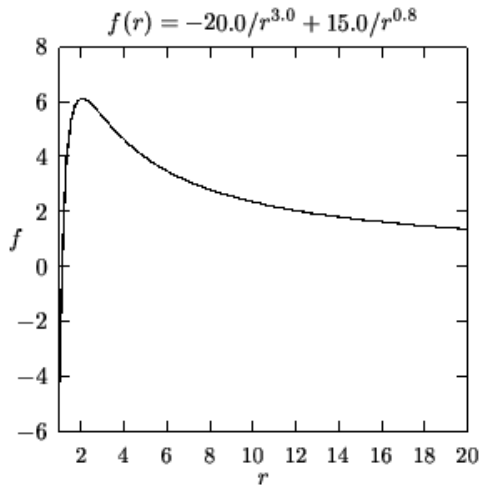
$$f(r) = -\frac{c_1}{r^{\sigma_1}} + \frac{c_2}{r^{\sigma_2}}, c_1 \geq 0, c_2 \geq 0, \sigma_1 \geq 0, \sigma_2 \geq 0$$

Η παραπάνω συνάρτηση αποτελείται από δύο όρους:

- ✓ Τον όρο τη έλξης $\frac{c_2}{r^{\sigma_2}}$ που υπερσχύει όταν τα δύο ρομπότ απομακρύνονται.
- ✓ Τον όρο της άπωσης $-\frac{c_1}{r^{\sigma_1}}$ που υπερσχύει όταν τα δύο ρομπότ πλησιάζουν κοντά

Το σημείο ισορροπία των δύο ρομπότ

επιτυγχάνεται όταν $r = d = \left(\frac{c_1}{c_2} \right)^{\frac{1}{a_1 - a_2}}$.



Ακολουθούν παραδείγματα εφαρμογών της μεθόδου.

4.2.1.1 Ομοιόμορφη κατανομή

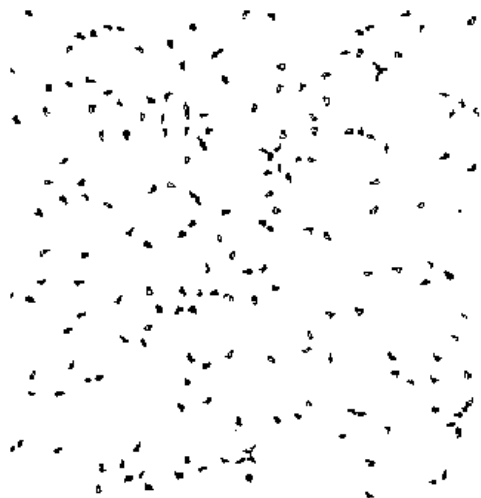
Στόχος: Ομοιόμορφη κατανομή και η δημιουργία ενός κλειστού σχηματισμού των ρομπότ.

Μορφή του πεδίου: Όλα τα ρομπότ εφαρμόζουν τον ίδιο νόμο, της μορφής:

$$f(r) = -\frac{c_1}{r^{\sigma_1}} + \frac{c_2}{r^{\sigma_{21}}}, c_1 \geq 0, c_2 \geq 0, \sigma_1 \geq 0, \sigma_2 \geq 0$$

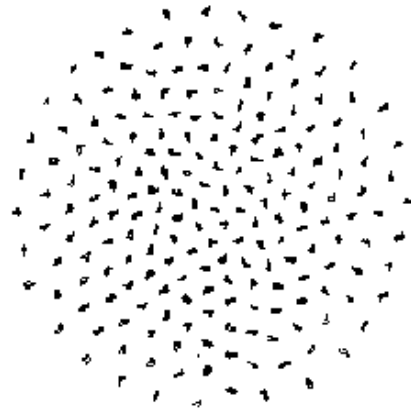
με $c_1=60$, $c_2 \geq 1$, $\sigma_1 \geq 2$, $\sigma_2 \geq 1$, άρα απόσταση ισορροπίας 60.

Προσομοίωση: 200 ρομπότ κατανέμονται τυχαία σε χώρο με διαστάσεις 400x400.



Τα ρομπότ που βρίσκονται περιφερειακά έλκονται προς το κέντρο του σχηματισμού και συγκεντρώνονται στο κέντρο περίπου του χώρου σχηματίζοντας έναν δίσκο ακτίνας 280. Τα ρομπότ εκτελούν μικρές ταλαντώσεις γύρω από τη θέση τους αλλά

στο δίσκο παρατηρούμε ομοιόμορφη κατανομή.



Στόχος: Η μετακίνηση ενός κλειστού σχηματισμού ρομπότ με αποφυγή εμποδίων προς ένα στόχο.

Μορφή του πεδίου: Όλα τα ρομπότ εφαρμόζουν τον ίδιο νόμο, της μορφής:

$$f(r) = -\frac{c_1}{r^{\sigma_1}} + \frac{c_2}{r^{\sigma_{21}}}, c_1 \geq 0, c_2 \geq 0, \sigma_1 \geq 0, \sigma_2 \geq 0$$

με $c_1=60$, $c_2 \geq 1$, $\sigma_1 \geq 2$, $\sigma_2 \geq 1$, άρα απόσταση ισορροπίας 60. Επιπροσθέτως στο στόχο έχει τοποθετηθεί ένα στατικό εικονικό ρομπότ που ασκεί μόνο ελκτικές δυνάμεις στα άλλα ρομπότ. Στα διάφορα εμπόδια έχουν τοποθετηθεί εικονικά στατικά ρομπότ που απωθούν τα ρομπότ όταν αυτά πλησιάζουν κοντά ενώ όταν βρίσκονται μακριά δεν έχουν επίδραση.

4.2.1.2 Φύλαξη χώρου από εισβολείς

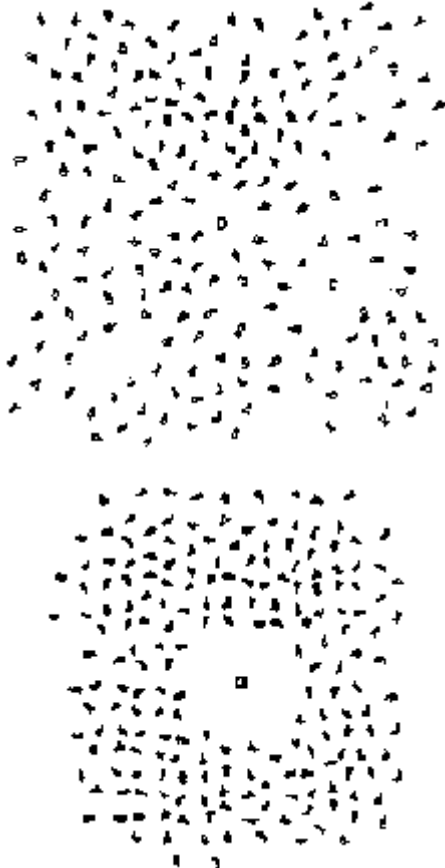
Στόχος: Η φύλαξη ενός χώρου από τα ρομπότ από εισβολείς.

Μορφή του πεδίου: Ο χώρος που απαιτεί φύλαξη οριοθετείται από ένα σύνολο στατικών εικονικών ρομπότ που ασκούν ελκτικές δυνάμεις στα ρομπότ που τα φυλούν και βρίσκονται μακριά καθώς και στους εισβολείς, ενώ απωθούν τα ρομπότ που φυλούν το χώρο όταν πλησιάσουν πολύ κοντά. Ο εισβολέας έλκει αλλά και απωθεί τα ρομπότ που φυλούν το χώρο αλλά ο ίδιος απωθείται από τα ρομπότ φύλακες. Όλα τα ρομπότ φύλακες εφαρμόζουν τον ίδιο νόμο μεταξύ τους, που της μορφής:

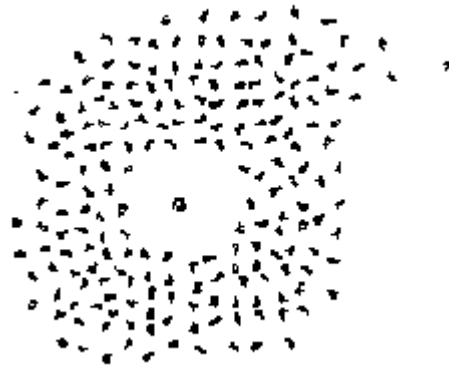
$$f(r) = -\frac{c_1}{r^{\sigma_1}} + \frac{c_2}{r^{\sigma_{21}}}, c_1 \geq 0, c_2 \geq 0, \sigma_1 \geq 0, \sigma_2 \geq 0$$

με $c_1=60$, $c_2 \geq 1$, $\sigma_1 \geq 2$, $\sigma_2 \geq 1$, άρα απόσταση ισορροπίας 60.

Προσομοίωση: Κατά το πρώτο στάδιο χωρίς την ύπαρξη εισβολέων τα ρομπότ φύλακες σχηματίζουν ένα δακτύλιο γύρω από το χώρο που φυλάσσουν και οριοθετείται από ένα ρομπότ και παράλληλα κατανέμονται ομοιόμορφα στο δακτύλιο.



Με τη παρουσία του εισβολέα που έλκεται από το χώρο που φυλάσσουν τα ρομπότ, τα ρομπότ φύλακες πλησιάζουν προς αυτόν. Τα ρομπότ φύλακες τον κυνηγούν αλλά δεν απομακρύνονται από το χώρο που φυλούν. Ο εισβολέας που απωθείται από τους φύλακες αντί να απομακρυνθεί αρχίζει και κινείται περιμετρικά του χώρου προς τα πιο αδύναμα σημεία όπου υπάρχουν λιγότερα ρομπότ φύλακες. Τελικά το σύστημα συγκλίνει σε μια δυναμική συμπεριφορά όπου ο εισβολέας κινείται προς τα πιο αδύναμα σημεία της φύλαξης

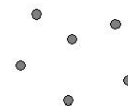
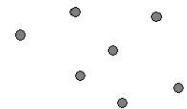


Μια παραλλαγή του παραπάνω περιλαμβάνει πολλά εικονικά ρομπότ που οριοθετούν χώρο φύλαξης σε τυχαίο σχήμα. Εάν αυτά τα ρομπότ κινούνται συγχρονισμένα τότε θα κινούνται συγχρόνως και τα ρομπότ φύλακες συνοδεύοντας την κινούμενη περιοχή φύλαξης.

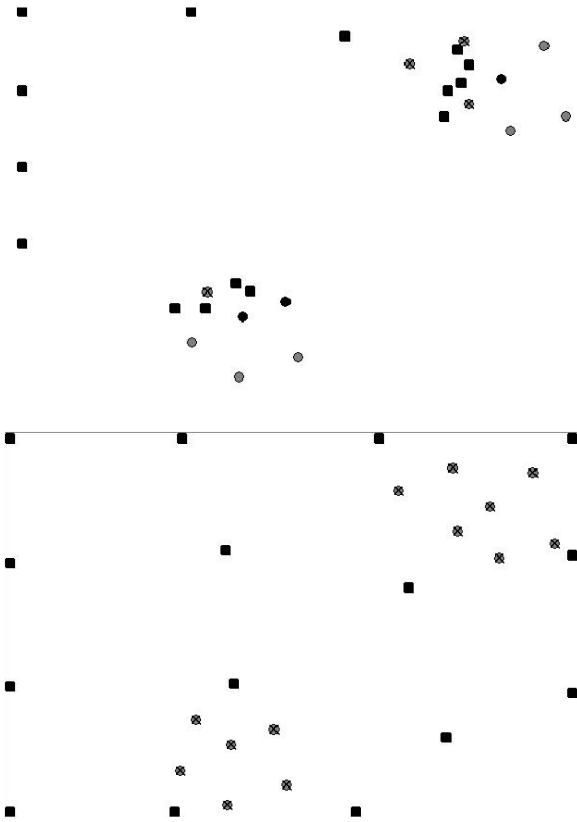
4.2.1.3 Εξουδετέρωση ναρκών

Στόχος: Η εξουδετέρωση ναρκών.

Μορφή του πεδίου: Τα ρομπότ ναρκαλιευτές έλκονται και απωθούνται μεταξύ τους για να κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο. Τα ρομπότ αυτά έλκονται από τις νάρκες όταν πλησιάσουν κοντά σε αυτές. Η έλξη παύει όταν εισέλθουν στην ζώνη απενεργοποίησης. Όταν μια νάρκη απενεργοποιείται απωθεί τα ρομπότ που βρίσκονται έξω από τη ζώνη απενεργοποίησης.



Αρχική κατανομή. Με τετράγωνα παριστάνονται τα ρομπότ, με κύκλους οι νάρκες .



Πλήρης απενεργοποίηση ναρκών.

4.2.2.1 Spring laws

Μια επέκταση, του μοντέλου του δυναμικού κοινωνικών πεδίων, γίνεται με τη χρήση νόμων της μορφής του ελατηρίου (spring laws). Η δύναμη που ασκεί το ρομπότ i στο ρομπότ j είναι ίσες και ελκτικές εάν τα ρομπότ απομακρυνθούν περισσότερο από μια απόσταση d_{ij} και απωστικές όταν έρθουν πιο κοντά. Το μοντέλο αυτό ανάγει το ρομποτικό σύστημα σε ένα μη κατευθυνόμενο γράφο όπου τα ρομπότ είναι οι κόμβοι και οι ακμές του οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των ρομπότ όταν μεταβάλουν την μεταξύ τους απόσταση d_{ij} . Εάν ο γράφος αυτός έχει κάποιες ιδιότητες επιτρέπει τον έλεγχο το ρομπότ να δημιουργούν αυτόματα προκαθορισμένες δομές σχηματισμούς. Όπως οι νόμοι αντίστροφης δύναμης επέτρεπαν τον καθορισμό της κατανομής των ρομπότ.

Έστω G ένας πεπερασμένος με σύνολο κόμβων $|V|=n$ και E το σύνολο των ακμών. Κάθε ακμή θεωρείται ένα ιδανικό ελατήριο. Αν το $L=\{<l_{ij}, k_{ij}>\}$ ορίζουν ένα

ελατήριο μεταξύ των κόμβων i και j για όλα τα $(i,j) \in E$, όπου l_{ij} το φυσικό μήκος του ελατηρίου και $k_{ij} > 0$ η σταθερά Hooke του ελατηρίου. Ένας γράφος για το οποίον ορίζεται το σύνολο L για κάθε κόμβο του αποτελεί ένα γράφο ελατηρίων, και για δύο κόμβους του που απέχουν r_{ij} η δύναμη που τους ασκείται είναι:

$$f_{ij} = k_{ij}|r_{ij} - l_{ij}|.$$

Και η ενέργεια που αποθηκεύεται στο ελατήριο.

$$P_{ij} = \frac{1}{2}k_{ij}(r_{ij} - l_{ij})^2.$$

Μια προβολή (εμφύτευση) του γράφου g και τοποθέτηση των n σε ένα d -διάστατο ευκλείδειο χώρο $\mathbb{R}^d$. Αν $\vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n) \in \mathbb{R}^d$ η ενέργεια του συστήματος θα είναι:

$$E_L(p) = \frac{1}{2} \sum_{ij} k_{ij}(\|p_i - p_j\| - l_{ij})^2.$$

Το ελάχιστο της ενέργεια επιτυγχάνεται όταν $\nabla E = 0$, όλοι οι κόμβοι βρίσκονται στις θέσεις ισορροπίας τους.

$$F_i = \sum_{(i,j) \in E} F_{ij} = \sum_{(i,j) \in E} k_{ij}(r_{ij} - l_{ij}) \frac{p_i - p_j}{r_{ij}} = 0,$$

όπου $r_{ij} = \|p_i - p_j\|$.

Τα ρομπότ μετά από κάποιο μεταβατικό χρονικό διάστημα θα σχηματίσουν μια δομή. Η τοποθέτησή τους στο χώρο θα είναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιείται η αποθηκευμένη ενέργεια στα ελατήρια. Εάν η επιθυμητή δομή των ρομπότ υπολογιστεί έτσι ώστε να αποτελεί μοναδικό ελάχιστο της ενέργειας του συστήματος των ελατηρίων (γράφου ελατηρίων), τότε τα ρομπότ με οποιαδήποτε αρχική κατανομή θα καταλήξουν στην επιθυμητή δομή. Οι γράφοι ελατηρίου που έχουν μοναδικό ελάχιστο ονομάζονται άκαμπτοι.

4.2.2.2 Rigid γράφος (άκαμπτος ακέραιος γράφος)

Ένας γράφος G είναι κ-συνεκτικός εάν δεν υπάρχει υποσύνολο k κόμβων, που αν αφαιρεθούν, να αποσυνδέουν το G . Αν ένας γράφος G είναι $(d+1)$ -συνεκτικός, τότε για

σχεδόν όλες τις σχέσεις ελατηρίου, ο γράφος ελατηρίου G_L είναι άκαμπτος, έχει προβολή στο χώρο $\mathbb{R}^d$ με μοναδικό ελάχιστο ενέργειας. Οπότε η συνεκτικότητα του γράφου αποτελεί μια ακριβής και απλή μέθοδο για την κατασκευή άκαμπτων γράφων ελατηρίου. Αν ένα γράφος είναι 2-συνεκτικός (3-συνεκτικός), τότε όλοι οι γράφοι ελατηρίου είναι άκαμπτοι στο δισδιάστατο (τριδιάστατο) χώρο. Επιλέγοντας ένα υποσύνολο 3 (4) κόμβων του γράφου και κατασκευαστεί μια απεικόνισή τους στο δισδιάστατο (τριδιάστατο) χώρο, τότε έχει δημιουργηθεί μια απεικόνιση στο χώρο με μοναδικό ελάχιστο ενέργειας. Παράδειγμα επιλέγοντας ένα υποσύνολο τριών ρομπότ ως αρχηγούς και θεωρώντας τα υπόλοιπα ως απλά ρομπότ. Καθορίζοντας την απεικόνιση των τριών αυτών ρομπότ, τα υπόλοιπα απλά ρομπότ θα συγκλίνουν στην απεικόνιση μοναδικού ελάχιστου των τριών αρχηγών ρομπότ.

Για την δημιουργία μιας προεπιλεγμένης d -διάστατης δομής από τα ρομπότ και τη διατήρηση της με τη χρήση των νόμων ελατηρίων, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Σχεδιάζεται ένας $(d+1)$ -συνεκτικός γράφος με την κατάλληλη σχέση ελατηρίων. Επιλέγεται ένα υποσύνολο C των κόμβων του γράφου και δημιουργείται η απεικόνισή του (embed) στο d -διάστατο ευκλείδειο χώρο, έτσι ώστε η μοναδική απεικόνιση ελαχίστης ενέργειας του C να είναι η ίδια της επιλεγείσας δομής. Οι κόμβοι που ανήκουν στο C είναι τα ηγετικά ρομπότ, ενώ τα υπόλοιπα θεωρούνται απλά ρομπότ. Ένα απλό ρομπότ i αποθηκεύει ένα πίνακα από $\langle l_{ij}, k_{ij} \rangle$, $(i,j) \in E$, και για τον υπολογισμό της δύναμης που του ασκείται ακολουθεί την παρακάτω σχέση:

$$F_i = \sum_{(i,j) \in E} F_{ij} = \sum_{(i,j) \in E} k_{ij}(r_{ij} - l_{ij}) \frac{p_i - p_j}{r_{ij}}$$

όπου $r_{ij} = \|p_i - p_j\|$ η απόσταση μεταξύ δύο ρομπότ. Αναμένεται τα ρομπότ που θα κινηθούν σύμφωνα με τη δύναμη που τους ασκείται θα συγκλίνουν στην επιλεγείσα δομή, τη δομή του υποσυνόλου C .

Όταν ο κεντρικός ελεγκτής που ελέγχει την συμπεριφορά των ηγετικών ρομπότ, επιλέξει να κινηθούν τότε τα υπόλοιπα ρομπότ, που θα βρεθούν εκτός ισορροπίας, θα κινηθούν ώστε να αποκατασταθεί η δομή που καθορίζουν τα ηγετικά ρομπότ. Η ταχύτητα καθώς και η δομή του συνόλου των ρομπότ ελέγχεται από την ταχύτητα και τη δομή των ηγετικών ρομπότ. Τα απλά ρομπότ διαθέτουν την ευελιξία να παραμορφώσουν την δομή τους, κάτω από την ισχυρή επίδραση των δυνάμεων που προκαλούν τα εμπόδια, για να αποφύγουν τοπικά εμπόδια και στη συνέχεια να επανέλθουν στη σωστή τους θέση.

Για την επιλογή των κανόνων των ελατηρίων, ακολουθείται η παρακάτω μεθοδολογία. Όλα τα ελατήρια έχουν την ίδια σταθερά $k > 0$. Το φυσικό μήκος κάθε ελατηρίου l_{ij} ορίζεται ως η απόσταση r_{ij} των ρομπότ i και j στη επιλεγείσα διάταξή τους στο χώρο. Στο γράφο προσθέτουμε ακμές ώστε να είναι $(d+1)$ -συνεκτικός, δηλαδή κάθε κόμβος πρέπει να έχει $d+2$ ακμές, παράδειγμα στο δισδιάστατο χώρο για διάταξη σε μορφή πλέγματος κάθε ρομπότ συνδέεται με τα τέσσερα γειτονικά του.

4.3 Ευστάθεια multi-agent συστήματος: Μοντέλο κοινωνικού δυναμικού με δυναμική τοπολογία

Παρακάτω αναπτύσσεται μια προσπάθεια μελέτης [26] της ευστάθειας ενός μοντέλου προσανατολισμένης κίνησης κινητών agent σε κοπάδι (flocking), που επιτυγχάνεται χάρη μόνο στις τοπικές αλληλεπιδράσεις χωρίς κάποιον καθολικό ελεγκτή. Οι agent σύμφωνα με το μοντέλο των boids προσπαθούν να κινηθούν σε σχηματισμό διατηρώντας την κατεύθυνση τους παρόμοια με αυτοί των γειτονικών τους agent.

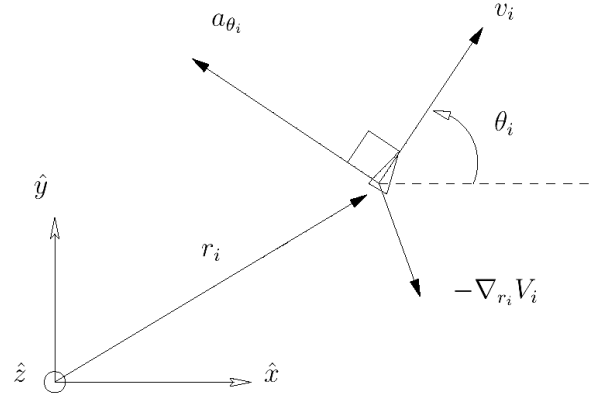
Η περιγραφή του μοντέλου έχει ως εξής. Το σύστημα αποτελείται από N agents που κινούνται σύμφωνα με:

$$\dot{r}_i = v_i$$

$$\dot{v}_i = a_i \quad i = 1, \dots, N$$

όπου $r_i = (x_i, y_i)^T$ η θέση του agent i , $v_i = (\dot{x}_i, \dot{y}_i)^T$ η ταχύτητά του και $a_i = (u_x, u_y)^T$ η είσοδος ελέγχου (επιτάχυνση). Η κατεύθυνση κίνησής του είναι $\theta_i = \arctan(\dot{y}_i, \dot{x}_i)$. Το διάνυσμα της απόστασης μεταξύ δύο agent ορίζεται $r_{ij} = r_i - r_j$.

Η είσοδος ελέγχου αποτελείται από δύο συστατικά στοιχεία $a_i = a_{r_i} + a_{\theta_i}$, το πρώτο στοιχείο καθορίζεται από το διάνυσμα της κλίσεως του δυναμικού του τεχνητού πεδίου V_i , που έχει τέτοια μορφή έτσι ώστε να εμφανίζει ελάχιστο στην επιθυμητή απόσταση μεταξύ των agent, να αυξάνεται απότομα όταν αυτή η απόσταση μειώνεται ή αυξάνεται. Το δεύτερο μέλος του αθροίσματος αποτελεί τη συνιστώσα της εισόδου μέσω της οποίας ελέγχεται η κατεύθυνση του agent, στρέφοντας στην κατεύθυνση που κινούνται και οι γείτονές του. Αυτή η συνιστώσα δεν μεταβάλλει την κινητική ενέργεια του agent και είναι κάθετη στην κατεύθυνση κίνησης.



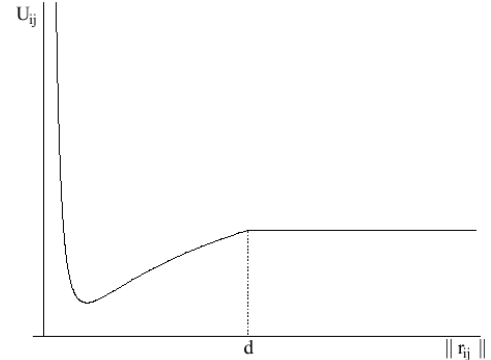
Η γειτονιά ενός agent ορίζεται:

$$\mathcal{N}_i \triangleq \{j \mid \|r_{ij}\| \leq d\} \subseteq \{1, \dots, N\}$$

Ενώ το δυναμικό μεταξύ δύο agent είναι:

$$U_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\|r_{ij}\|^2} + \log \|r_{ij}\|^2, & \|r_{ij}\| < d, \\ V_d, & \|r_{ij}\| \geq d \end{cases}$$

Η μορφή του είναι τέτοια ώστε όσοι agent βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη του d να μην επηρεάζονται από το πεδίο που παράγει ο agent αυτός, αφού η κλίση του πεδίου τότε είναι μηδέν άρα και η τεχνητή δύναμη που τους ασκείται.



Η τιμή του δυναμικού που αντιλαμβάνεται ο agent i είναι:

$$U_i \triangleq (N - |\mathcal{N}_i|)V_d + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} U_{ij}(\|r_{ij}\|)$$

όπου $N_i = |\mathcal{N}_i|$ και ο νόμος ελέγχου κάθε agent είναι:

$$a_i = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla_{r_i} U_{ij} + a_{\theta_i}$$

$$a_i = - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \nabla_{r_i} U_{ij} - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \frac{\theta_i - \theta_j}{\|r_{ij}\|^2} (\hat{z} \times v_i)$$

Η συνάρτηση δυναμικού που περιγράφει την ενέργεια του συστήματος είναι:

$$U_t = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (U_i + v_i^T v_i + \theta_i^2)$$

$$= (N^2 - 2|\mathcal{E}|)V_d + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j \in \mathcal{N}_i} U_{ij} + v_i^T v_i + \theta_i^2 \right)$$

Το παραπάνω σύστημα αποτελούμενο από N agents πρόκειται να συγκλίνει σε μια κοινή κατεύθυνση κίνησης όλων των agents και η μεταξύ τους απόσταση θα σταθεροποιηθεί σε μια κατανομή τους στο χώρο όπου η παραπάνω συνάρτηση δυναμικού του συστήματος συναντά ένα ελάχιστο. Οι αρχικές συνθήκες Ω για την επίτευξή του απαιτούν:

$$\Omega \triangleq \{(r_{ij}, v_i, \theta_i) \mid U_t \leq c, i = 1, \dots, N, j \in \mathcal{N}_i\}$$

$$\{(r_{ij}, v_i, \theta_i) \mid U_t \leq c, i = 1, \dots, N, j \in \mathcal{N}_i\}$$

Η ύπαρξη του φράγματος πηγάζει από την ανάγκη συνεκτικότητας του γράφου που αναπαριστά την τοπολογία των agent. Αφού το μέγιστο μήκος ενός μονοπατιού στο G είναι $N-1$, δηλαδή η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο agent σε μια συνεκτική ομάδα θα είναι $(N-1)d$, το οποίο παρέχει ένα φράγμα για το r_{ij} .

Το παραπάνω μοντέλο κάνοντας χρήση μια μορφή πεδίου πολύ γενική, βασιζόμενο σε τοπικό καταναμεμημένο νόμο ελέγχου επιτυγχάνει την ευσταθή συμπεριφορά στο σχηματισμό κοπαδιού. Η ευσταθής συμπεριφορά διατηρείται ακόμα και όταν το σύνολο των γειτονικών agent, που παρέχουν την πληροφορία ανατροφοδότησης του ελεγκτή ενός συγκεκριμένου agent, μεταβάλλεται τυχαία κατά τη διάρκεια της κίνησης. Η μόνη απαίτηση αποδεικνύεται ότι είναι η διατήρηση της συνεκτικότητας του γράφου, που αντιπροσωπεύει τις σχέσεις γειτνίασης.

Η τοπολογία στο χώρο των agent περιγράφεται μέσω ενός μη κατευθυνόμενου γράφου $G(V, E)$, όπου οι agent αποτελούν τους κόμβους (V το σύνολο των κόμβων) και οι ακμές ενώνουν τους γειτονικούς κόμβους-agent (E το σύνολο των ακμών). Ο

γράφος έχει δυναμική τοπολογία όταν η απόσταση μεταξύ δύο agent γίνει μεγαλύτερη του d η ακμή που ένωνε τους αντίστοιχους κόμβους καταργείται, όταν πλησιάσουν πάλι η ακμή εμφανίζεται στο γράφο. Ο βαθμός κάθε κόμβου ισοδυναμεί με το πλήθος των γειτόνων, για το agent u ισχύει $d(u) = |N_u|$. Ένα μονοπάτι μήκους r μεταξύ δύο κόμβων είναι το πλήθος των ακμών που χρειάζεται να διασχίσουμε για να μεταβούμε από των ένα κόμβο στον άλλο. Εάν για κάθε ζευγάρι κόμβων στο γράφο υπάρχει ένα μονοπάτι, τότε ο γράφος είναι συνεκτικός.

Αν $A(G)$ ο πίνακας γειτνίασης του γράφου, $\Delta(G)$ ο διαγώνιος πίνακας που κάθε στοιχείο της διαγωνίου είναι ο βαθμός του αντίστοιχου κόμβου και $D(G)$ ο πίνακας πρόσπτωσης. Ο συμμετρικός θετικά ημισορισμένος πίνακας:

$$L(G) = \Delta(G) - A(G) = D(G)D(G)^T$$

είναι ο Laplacian πίνακας του γράφου που εμπεριέχει σημαντικές πληροφορίες για την τοπολογία του γράφου. Η πολλαπλότητα της μηδενικής ιδιοτιμής είναι ίση με το πλήθος των συνεκτικών υπογράφων του γράφου και το ιδιοδιάνυσμά της είναι της μορφής $[1 \dots 1]^T$. Σε κάθε ακμή αντιστοιχούμε την

$$\text{τιμή } \frac{1}{\|r_{ij}\|^2}, \text{ για του κόμβους όπου } \|r_{ij}\| < d$$

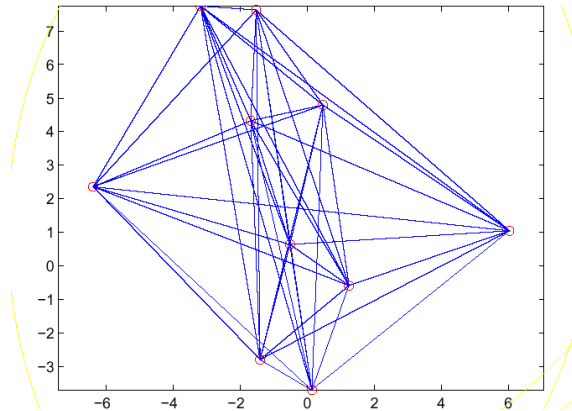
δεν υπάρχει ακμή. W ο πίνακας με τα βάρη των ακμών τότε ο Laplacian πίνακας με βάρη είναι:

$$L_w(G) = D(G)W D(G)^T$$

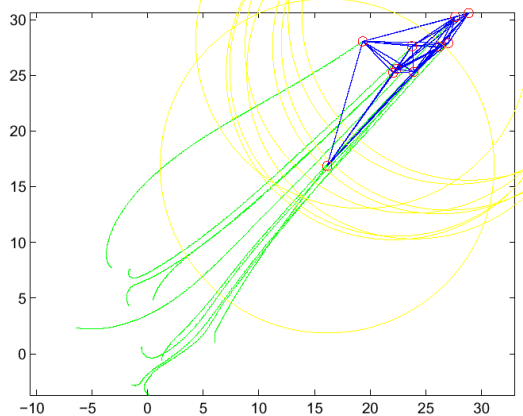
Στην εξομοίωση του παραπάνω μοντέλου η απόσταση $d = 15$ (η ακτίνα της γειτονιάς κάθε agent). Οι agent κατανέμονται αρχικά τυχαία (τόσο ως προς την κατεύθυνση όσο και προς την θέση) σε μια περιφέρεια ακτίνας $R=10$. Τα όρια της γειτονιάς των agent παριστάνονται με κίτρινο χρώμα, με μπλε οι ακμές που συνδέουν τους γειτονικού κόμβους μεταξύ των οποίων υπάρχει αλληλεπίδραση, οι κόκκινοι κύκλοι οι agent και πράσινο χρώμα έχουν οι τροχιές που ακολουθούν.

Ανάλογα με την ακτίνα της γειτονιάς το σύνολο των γειτόνων κάθε agent μπορεί να μην εμπεριέχει όλους τους agent του συστήματος. Ο έλεγχος της κίνησης του agent

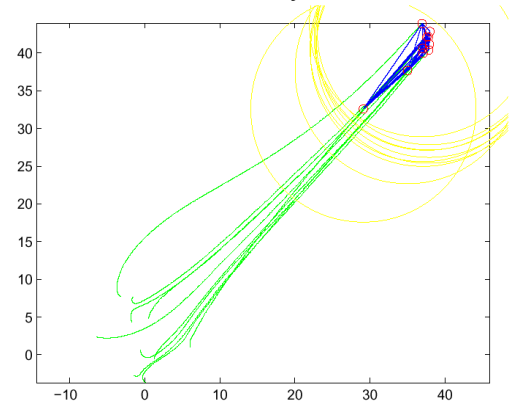
σε αυτή την περίπτωση δεν λαμβάνει υπόψη του όλους τους agent παρά μόνο τους γειτονικούς. Το σύνολο των γειτονικών agent συνεχώς μεταβάλλεται, παρόλα αυτά στα παρακάτω στιγμιότυπα το σύστημα συγκλίνει ελαχιστοποιώντας την ενέργεια του συστήματος. Για την επίτευξη του στόχου είναι αναγκαία ο γράφος να είναι πλήρης αλλά να διατηρεί τη συνεκτικότητά του.



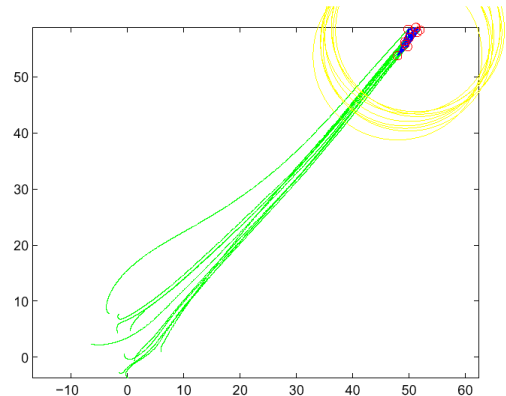
Αρχική κατανομή, πλήρης γράφος.



Ο τελευταίος agent δεν έχει «επαφή» με τρεις άλλους.



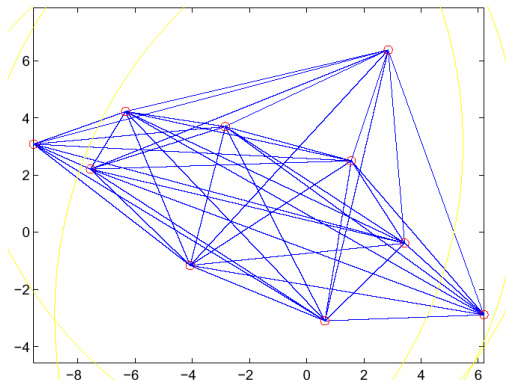
Η σύγκλιση συνεπάγεται και πληρότητα για το γράφο.



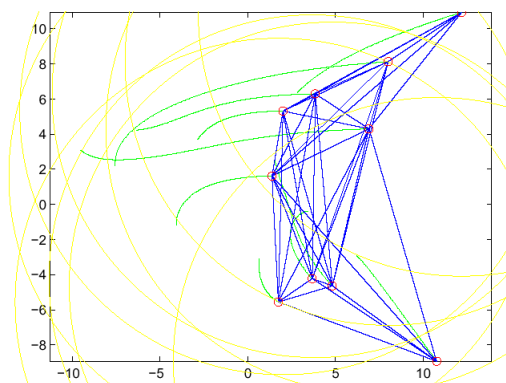
Ευστάθεια στη μόνιμη κατάσταση.

Αρχικά η κατανομή των agent εξασφαλίζει την πληρότητα του γράφου. Στη συνέχεια ο νόμος ελέγχου δεν είναι σε θέση να διατηρήσει την πληρότητα του γράφου αλλά διατηρεί την συνεκτικότητά του. Στην τελική κατάσταση ισορροπίας ανακτά την πληρότητά του.

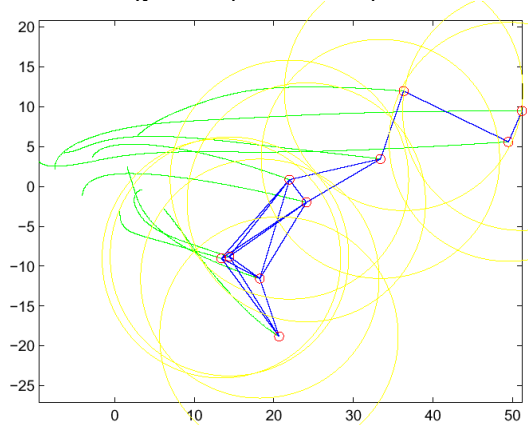
Το γράφος μπορεί κατά την εξέλιξη του συστήματος να χάσει την συνεκτικότητά του, οπότε τα συνεκτικά τμήματα του γράφου συγκλίνουν το καθένα σε μια δικιά του κατεύθυνση, σχηματίζοντας ένα ξεχωριστό κοπάδι. Πιθανή αιτία για αυτή την εξέλιξη η «κακή» αρχική κατανομή, «ανεπαρκής» έλεγχος ή «μικρή» γειτονιά.



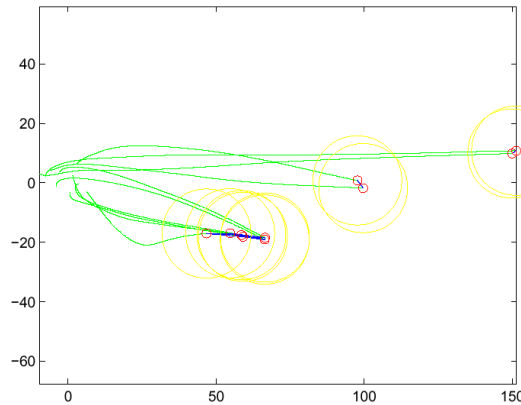
Αρχική κατανομή, γράφος συνεκτικός όχι πλήρης.



Σύγκλιση ως προς την κατεύθυνση κίνησης αλλά αυξάνονται οι αποστάσεις μεταξύ των agent και χάνεται η συνεκτικότητα.



Η «πυκνότητα» του γράφου μειώνεται και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των agents αμβλύνονται.



Η ομάδα διασπάται και κάθε συνιστώσα της σχηματίζει ένα ξεχωριστό κοπάδι.

Στην αρχική κατανομή ο γράφος είναι συνεκτικός αλλά όχι πλήρης. Οι κατευθύνσεις των agent αρχικά συγκλίνουν αλλά λόγω της αρχικής αποστροφής μεταξύ τους, οι αποστάσεις μεταξύ τους αυξάνονται και οι «γειτονιές μικραίνουν», ωστότου ο γράφος διαρρηγνύεται.

4.3.1 Ιδιοτιμές Laplacian-ιδιότητες του γράφου-συμπεριφορά του συστήματος

Σε ένα πανομοιότυπο μοντέλο όπου η ευστάθεια μελετάται μέσω της παρακάτω συνάρτησης Liapunov:

$$V = \frac{1}{2}\theta^T L_c \theta + \frac{1}{2}v^T L_c v$$

όπου θ η κατεύθυνση κίνησης του agent L_c ο Laplacian πίνακας του γράφου, τόσο η ευστάθεια όσο και η ταχύτητα σύγκλισης

του συστήματος καθορίζονται από τις ιδιοτιμές του. Ιδιοτιμές που είναι άμεσα συνδεδεμένες με τα τοπολογικά χαρακτηριστικά και τη συνεκτικότητα του γράφου.

Ο γράφος μεταξύ των agent αναπαριστά την ροή πληροφοριών από τον ένα agent στον άλλον. Η πληροφορία αυτή έχει δύο μορφές την πληροφορία που παράγει ο καθένας τους για να ενημερώνει τους υπόλοιπους και την πληροφορία και τις πληροφορίες που δέχεται από άλλους. Αν θεωρήσουμε αυτή τη μορφή επικοινωνίας τότε η αναπαράσταση πραγματοποιείται μέσω ενός κατευθυνόμενου γράφου.

Αν ο γράφος αυτός είναι ακυκλικός (δεν υπάρχει μονοπάτι που να περνά από τον ίδιο κόμβο δύο φορές), φανερώνει μια αρχιτεκτονική ελέγχου βασισμένη στην συμπεριφορά ενός καθοδηγητή-αρχηγού (ακυκλικοί γράφοι είναι τα δένδρα και κύριο ρόλο στην τοπολογία τους έχει η ρίζα τους). Μια τέτοια αρχιτεκτονική είναι ευαίσθητη στις παρεμβολές αφού κάθε agent ακολουθεί κάποιον ή ακολουθείται από κάποιους, και για να επιτευχθεί απαιτεί από κάθε agent καθολική γνώση του συστήματος.

Στην περίπτωση που υπάρχουν κύκλοι στο γράφο δεν είναι απαραίτητη η καθολική γνώση του συστήματος διότι οι αλληλεπιδράσεις δεν έχουν τοπική εμβέλεια, αλλά μέσω των πλούσιων διασυνδέσεων η πληροφορία ταξιδεύει από κόμβο σε κόμβο. Με αυτό τον έμμεσο τρόπο κάθε agent αποκτά γνώση όλου του συστήματος.

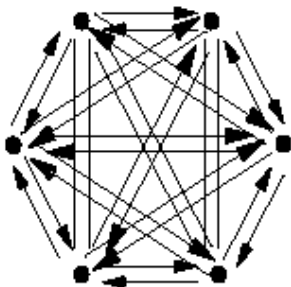
Σημαντικός παράγοντας σε αυτή την συμπεριφορά είναι η ταχύτητα που ταξιδεύει η γνώση. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από τα μήκη των μονοπατιών που συνδέουν τους agent αλλά και την ύπαρξη πολλών εναλλακτικών μονοπατιών μεταξύ δύο κόμβων. Σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον, όπου η τοπολογία του γράφου αλλάζει διαρκώς, και με τους agent να βασίζονται στην πληροφορία που συλλέγουν από τους γειτονικούς τους agent, η γρήγορη απόκριση στις μεταβολές και η ευρωστία είναι βασικά στοιχεία για την ισορροπία του συστήματος.

Η συνεκτικότητα του γράφου και ο βαθμός πληρότητάς του καθορίζουν την δυνατότητά του να προσαρμόζεται γρήγορα στις μεταβολές (η είδηση από τη μία άκρη να μεταδίδεται στην άλλη γρήγορα). Όσες περισσότερες ακμές μειώνεται το μήκος των μονοπατιών και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των agents είναι ισχυρότερες.

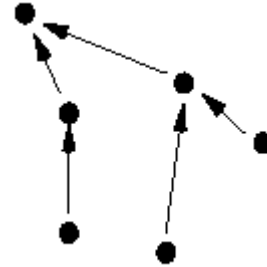
Ο βαθμός πληρότητας του γράφου εξασφαλίζει τη συνεκτικότητά του σε δυσμενή ενδεχόμενα. Η ευρωστία του συστήματος βασίζεται στην ύπαρξη πολλών διαφορετικών καναλιών για την μεταφορά της πληροφορίας, ώστε όταν παύσει ένα αντικαθίσταται από κάποιο άλλο. Η πιθανότητα αφαιρώντας μία ακμή ο γράφος να χωριστεί σε συνεκτικούς υπογράφους είναι καθοριστική για την ευστάθεια του συστήματος. Όταν να σύνολα cut-edges έχουν μεγάλη πληθηκότητα η πιθανότητα αυτή μειώνεται.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά της τοπολογίας του γράφου αποτυπώνονται στο Laplacian πίνακα $L = D - A$ (όπου D ο διαγώνιος πίνακας με το βαθμό κάθε κόμβου και A ο πίνακας γειτνίασης). Ο L διαθέτει τουλάχιστον μία μηδενική ιδιοτιμή. Η πολλαπλότητα της ιδιοτιμής είναι ίση με τον πλήθος των συνεκτικών υπογράφων του γράφου (αν B ο πίνακας πρόσπτωσης του γράφου με n κόμβους που αποτελείται από p συνεκτικούς υπογράφους τότε $\text{rank}(B)=n-p$, και $L=BB^T$). Οι ιδιοτιμές του L βρίσκονται στο μιγαδικό πεδίο στην περιφέρεια κύκλου ακτίνας 1 με κέντρο $1+j0$. Σε έναν μη κατευθυνόμενο γράφο οι ιδιοτιμές είναι πραγματικές.

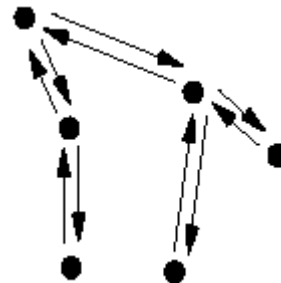
Ένας πλήρης γράφος έχει ιδιοτιμές 0 και $1 + \frac{1}{N-1}$ (πολλαπλότητα $N-1$). Για μεγάλο N η ευστάθεια του συστήματος είναι ισοδύναμη με την ευστάθεια του agent.



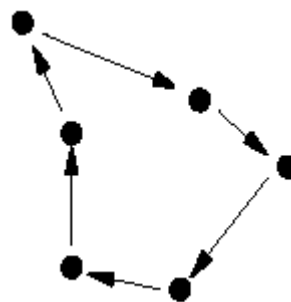
Ένας ακυκλικός (κατευθυνόμενος) γράφος έχει ιδιοτιμή 1 με πολλαπλότητα N . Σε αυτή την περίπτωση στην μελέτη της ευστάθειας ενός agent οι υπόλοιποι εμφανίζονται ως παρεμβολές.



Ένας δένδρο (γράφος μη κατευθυνόμενος) θα έχει μία ιδιοτιμή 2 και τις υπόλοιπες πραγματικές.



Ένας γράφος (κατευθυνόμενος) και αποτελούμενος από ένα κύκλο έχει ιδιοτιμές $e^{j\frac{i-1}{2\pi}}$, $i \in [1, N]$



Όταν έχει μεγάλο βαθμό πληρότητας η συμπεριφορά κάθε agent επηρεάζει λιγότερο την ευστάθεια του συστήματος, αφού όλοι οι agent λαμβάνουν πληροφορίες από πολλούς άλλους και δεν είναι δυνατό ένας από αυτούς να τους επηρεάσει τόσο. Σε ένα περιοδικό γράφο η συμπεριφορά των agent εμπεριέχει περιοδικές διεργασίες που το σύστημα δεν είναι σε θέση να αφομοιώσει. Στην περίπτωση δύο μη συνεκτικών υπογράφων θα υπάρχουν δύο μηδενικές ιδιοτιμές. Εάν ενισχυθεί ελαφρά η συνεκτικότητα του γράφου

προσθέτοντας μία ακμή που ενώνει τους δύο υπογράφους σε ένα ασθενώς συνεκτικό γράφο η μία ιδιοτιμή θα μετακινηθεί ελαφρώς μακριά από το μηδέν. Γενικά η μικρότερη μη μηδενική ιδιοτιμή του Laplacian πίνακα είναι δείκτης της συνεκτικότητας του γράφου.

Η ταχύτητα ροής της πληροφορίας από τον ένα agent στο άλλον και η συσχέτισή της με την τιμή των ιδιοτιμών του γράφου φανερώνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda_1 \geq \frac{1}{DvolG},$$

όπου $\lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_{N-1}$ οι ιδιοτιμές του συνεκτικού γράφου G με διάμετρο D (διάμετρος η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο κόμβων). Όσο μειώνονται οι αποστάσεις των κόμβων μεταξύ τους αυξάνεται η τιμή των ιδιοτιμών που αντιστοιχούν στην αύξηση της ταχύτητας σύγκλισης του συστήματος.

Αν A ο πίνακας γειτνίασης του γράφου G τότε κάθε στοιχείο a_{ij} του πίνακα A^n αντιστοιχεί στο πλήθος των διαφορετικών αλυσίδων (chains) από τον κόμβο i στον j , μήκους n . Ο πίνακας $\Sigma = [A|A^2|\dots|A^n]$ έχει $\text{rank}(\Sigma) = n$ (γράφος $G(V,E)$ $n=|V|$) τότε ο γράφος είναι συνεκτικός υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ οποιοδήποτε δύο κόμβων. Αν το πίνακας $\Sigma^m = [A|A^2|\dots|A^m]$, με $m < n$ τότε έχει $\text{rank}(\Sigma^m) = m$ τότε ο γράφος έχει μικρότερη διάμετρο άρα και ισχυρότερες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των agents. Στα γραμμικά δυναμικά συστήματα $\dot{x} = Ax + Bu$ με μήτρα ελεγχιμότητας $R = [AB|A^2B|\dots|A^nB]$ είναι ελέγξιμο εάν $\text{rank}(R) = n$. Θεωρώντας την περιγραφή των δυναμικών συστημάτων με διαφορικές εξισώσεις ισομορφική ενός γράφου τότε η μήτρα ελεγχιμότητας καταδεικνύει την ύπαρξη μονοπατιών που συνδέουν τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος με τις εισόδους του. Στο μοντέλο multi-agent εισοδοί του συστήματος είναι οι καταστάσεις των ίδιων των agent. Όταν η τάξη του πίνακα ελεγχιμότητας είναι $n-p$ τότε ο γράφος έχει p συνεκτικούς υπογράφους. Οι agent που ανήκουν σε

διαφορετικούς υπογράφους δεν έχουν είσοδο (ανατροφοδότηση) από τις καταστάσεις των agent που βρίσκονται σε άλλους υπογράφους.

5 Συλλογικά ρομπότ Collective Robotics

Ένα πεδίο που προώθησε αλλά και έκανε επιτυχημένα χρήση των ιδεών της swarm intelligence των πολύπλοκων συστημάτων είναι η συλλογική ρομποτική (collective robotics). Πολλά (χιλιάδες) ρομπότ πολύ απλά στη δομή και στη κατασκευή τους αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους ρομπότ, χωρίς εξελιγμένα επικοινωνιακά συστήματα και γνώση περιορισμένη σε όσα συμβαίνουν σε μια μικρή περιοχή γύρω τους. Η συμπεριφορά τους πηγάζει από απλούς κανόνες. Η ενεργοποίηση των κανόνων αυτών πηγάζει από την περιορισμένη πληροφόρηση για τα γειτονικά τους ρομπότ και την αντίληψή τους για το περιβάλλον τους. Σκοπός τους είναι χάρη σε αυτούς τους απλούς κανόνες να συντονιστούν στην επίτευξη του στόχου τους. Η αυτοργάνωση που επιδιώκεται να εμφανιστεί στη συμπεριφορά τους, αντιστοιχεί στην δυνατότητα των ρομπότ να δρουν παράλληλα με «σύμπνοια» προς το στόχο τους, χωρίς η δράση κάποιων ρομπότ να εμποδίζει άλλα, να μην καταστρέφουν μερικά όσα χτίζουν τα υπόλοιπα. Η παράλληλη δράση εξασφαλίζει την αποδοτικότερη λειτουργία και την ευρωστία του συστήματος σε βλάβες και έντονες μεταβολές του περιβάλλοντος.

5.1 Συγκέντρωση αντικειμένων σε στοίβες από μια ομάδα Khepera ρομπότ

Χρησιμοποιούνται τα khepera για να συγκεντρώσουν αντικείμενα διασπαρμένα στο χώρο σε μεγάλες στοίβες. Η μελέτη των κανόνων που υλοποιούν την συμπεριφορά των πραγματοποιείται πάνω στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων [16].

Στην προσομοίωση το περιβάλλον συνίσταται από ένα δισδιάστατο χώρο που διαιρείται σε ένα πλέγμα L κυττάρων, ένα σύνολο N αντικειμένων και n κινούμενων

ρομπότ. Ένα αντικείμενο μπορεί να βρίσκεται είτε σε ένα κύτταρο είτε να μεταφέρεται από ένα ρομπότ. Σκοπός τους είναι οι ρομπότ να συγκεντρώσουν όλα τα αντικείμενα σε ένα μόνο κύτταρο. Στην προκειμένη περίπτωση το περιβάλλον αποτελείται από 40×40 κύτταρα, 50 αντικείμενα και 10 ρομπότ.

Κάθε ρομπότ μπορεί να παίρνει ένα αντικείμενο από ένα κύτταρο και τα το μεταφέρει σε κάποιο άλλο. Η βασική αντίληψη του ρομπότ περιορίζεται στο αναγνωρίζει το πλήθος των αντικειμένων που υπάρχουν στο κύτταρο που βρίσκεται. Για να βελτιώσουμε την συμπεριφορά του, μειώνοντας την περιπλάνηση κάθε ρομπότ αναζητώντας αντικείμενα, σε κάποιο πειράματα εξοπλίζονται με κάμερα, για να κινούνται προς την κατεύθυνση που αντιλαμβάνονται τα κοντινότερα αντικείμενα.

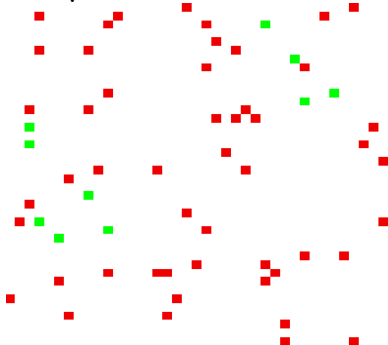


khepera robot

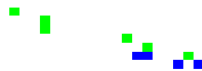
Ο νόμος που ελέγχει το κάθε ρομπότ έχει τρεις εκδοχές:

- ✓ *Πιθανοτική*: Εάν το ρομπότ δεν μεταφέρει κανένα αντικείμενο, τότε εάν βρεθεί σε ένα κύτταρο με NO αντικείμενα, θα πάρει ένα αντικείμενο με πιθανότητα $1/NO^a$, όπου $a \geq 0$ σταθερά. Εάν το ρομπότ μεταφέρει εάν αντικείμενο μόλις βρεθεί σε ένα κύτταρο που έχει και άλλα αντικείμενα θα το αφήσει. Σημειωτέον ότι για $a=1$ μόλις βρίσκει ο ρομπότ ένα αντικείμενο θα το παίρνει.
- ✓ *Μνημονική*: Το ρομπότ θυμάται έναν αριθμό τον NO_{max} , που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο πλήθος αντικειμένων που έχει βρει σε κάποιο κύτταρο, και συχνά ανανεώνει την τιμή του. Όταν συναντήσει ένα κύτταρο με πλήθος αντικειμένων $P \leq NO_{max}$ και δεν μεταφέρει κάποιο, τότε θα πάρει ένα. Θα αφήσει το αντικείμενο

που μεταφέρει όταν συναντήσει ένα κύτταρο με πλήθος αντικειμένων $P > NO_{max}$. Επειδή είναι πιθανόν ο συνδυασμός των δράσεων των ρομπότ να καταστρέψει συγκέντρωση αντικειμένων $P \geq NO_{max}$, οπότε ο ρομπότ να αναζητεί κάποιο κύτταρο με αυτή τη συγκέντρωση αντικειμένων, που δεν υπάρχει πια, μετά από χρόνο T_{max} αφήνει το αντικείμενο όπου να είναι και επανεκτιμά το NO_{max} .



Η αρχική κατάσταση με κόκκινο συμβολίζονται τα αντικείμενα και με πράσινο οι ρομπότ που δεν κουβαλούν κάποιο αντικείμενο.



Στο τέλος του πειράματος, με μπλε είναι οι ρομπότ που κουβαλούν κάποιο αντικείμενο.

Για να εκτιμήσουμε την απόδοση της συμπεριφοράς των ρομπότ στην συγκέντρωση όλων των αντικειμένων σε ένα κύτταρο, σε κάθε πείραμα υπολογίζουμε το M_n πλήθος των επαναλήψεων (χρόνος) που απαιτείται για ολοκληρωθεί η αποστολή από n ρομπότ. Για να συγκρίνουμε τη δυνατότητα των ρομπότ να συνεργάζονται υπολογίζουμε το λόγο $G_n = \frac{M_1}{M_n}$ της

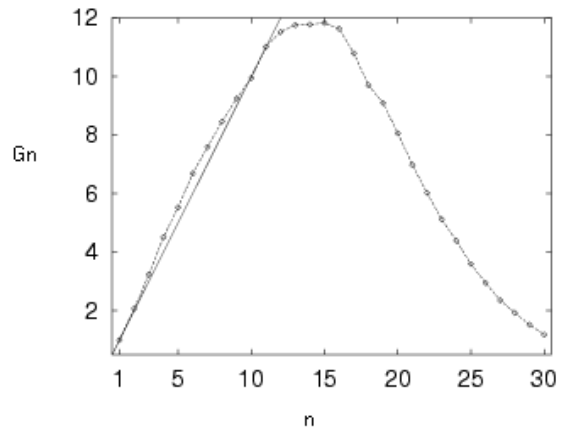
επιτάχυνσης της εργασίας με την προσθήκη επιπλέον ρομπότ (σε κάθε χρονική στιγμή θεωρούμε ότι δρα μόνο ένα ρομπότ). Επειδή η προσέγγιση είναι στοχαστική υπολογίζουμε το μέσο μέγεθος

$$G_n = \left\langle \frac{\langle M_1 \rangle}{\langle M_n \rangle} \right\rangle. \quad \text{Το μέγεθος } \langle M_n \rangle$$

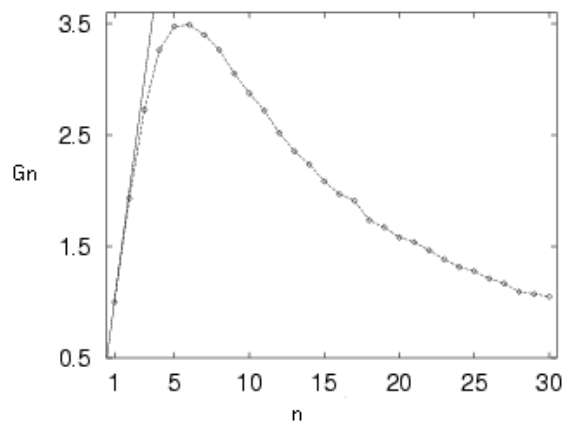
υπολογίζεται για πολλές δοκιμές με την ίδια κατανομή αντικειμένων για τις διαφορετικές διαδρομές που ακολουθούν κάθε φορά οι ρομπότ. Ενώ ο λόγος $\left\langle \frac{\langle M_1 \rangle}{\langle M_n \rangle} \right\rangle$ υπολογίζεται

για διαφορετικές κατανομές αντικειμένων. Η αύξηση $G_{n-1} < G_n$ σηματοδοτεί τη εμφάνιση συνεργασίας μεταξύ των ρομπότ, αφού για το ίδιο έργο χρειάζεται λιγότερη συνολική προσπάθεια.

Λαμβάνοντας τις μετρήσεις για 10000 πειράματα (για 100 διαφορετικές κατανομές 50 αντικειμένων 100 πειράματα) με ρομπότ με βασική αντίληψη ($\alpha=0.3$, $T_{max}=100$).

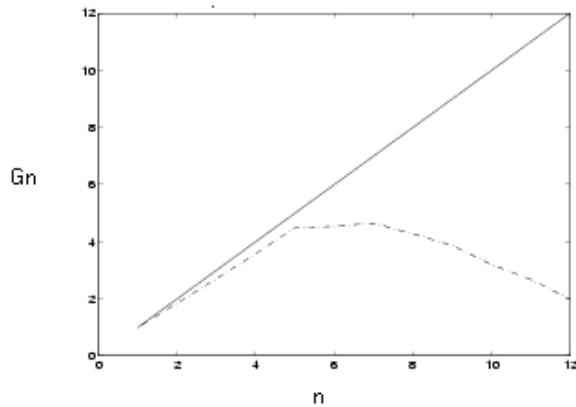


Για τα ρομπότ με πιθανοτική συμπεριφορά μέχρι 9 συνεργάζονται.

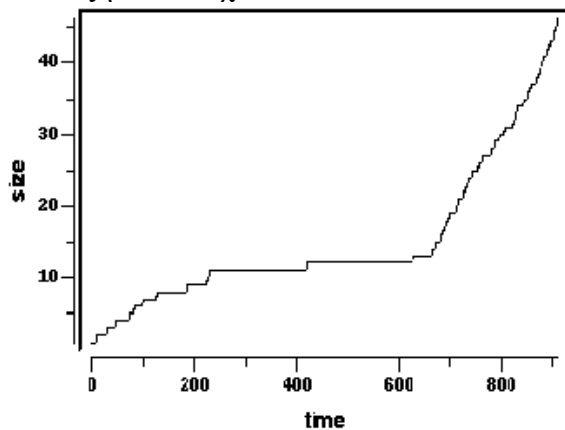


Για του ρομπότ με μνημονική συμπεριφορά μέχρι 6 συνεργάζονται.

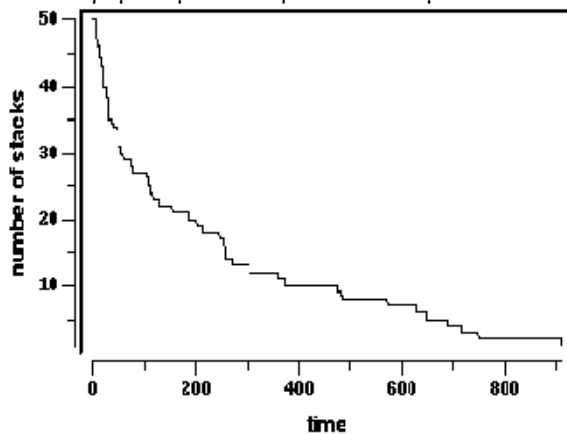
Για του ρομπότ εφοδιασμένους με την κάμερα εκτελούνται 150 πειράματα με διαφορετικές κατανομές 20 αντικειμένων.



Για πληρέστερη μελέτη της συμπεριφοράς των ρομπότ παρακάτω μελετάτε και δυναμική πορεία τους προς την επίτευξη του στόχου



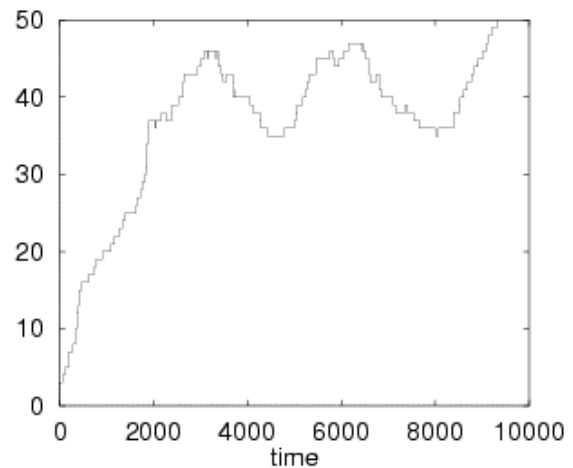
Η εξέλιξη της μεγαλύτερης συγκέντρωσης αντικειμένων σε ένα κύτταρο, από 10 πιθανοτικούς ρομπότ με $\alpha=0.3$ για 50 αντικείμενα.



Και η εξέλιξη του πλήθους των κυττάρων με αντικείμενα.

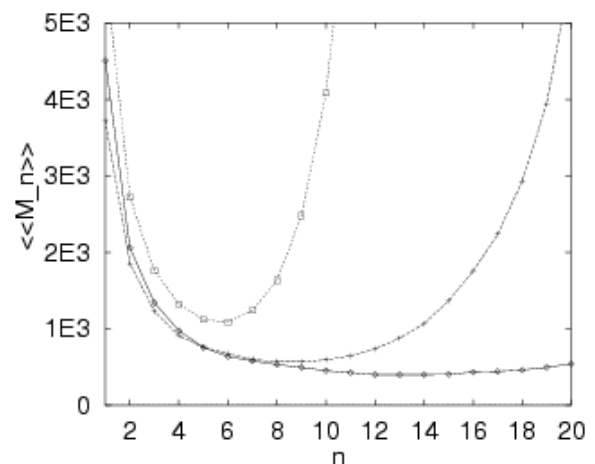
Στο αρχικό στάδιο (time 0-240) ο αριθμός των κυττάρων με αντικείμενα ελαττώνεται γρήγορα, χάρη στη συνεργασία των ρομπότ. Σε αυτό το στάδιο κάθε κύτταρο δεν περιέχει ή περιέχει πολύ λίγα αντικείμενα. Στο επόμενο στάδιο (time 240-

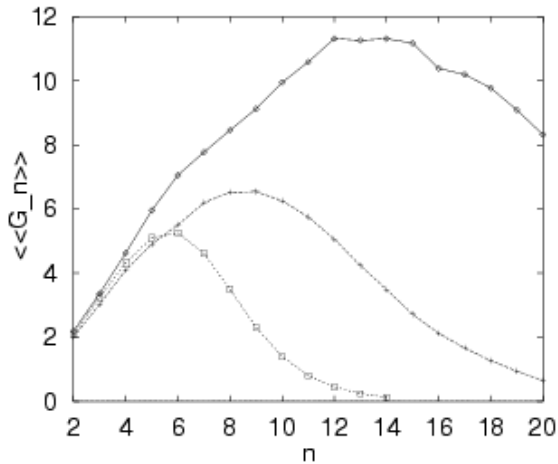
620) οι ρομπότ μεταφέρουν αντικείμενα μεταξύ κυττάρων με μεγάλη συγκέντρωση ανταγωνιζόμενοι ο ένας τη δράση του άλλου. Τελικά στο κύτταρο που παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη συγκέντρωση (που γεννήθηκε τυχαία κατά το στάδιο του ανταγωνισμού) συγκεντρώνονται γρήγορα και τα υπόλοιπα αντικείμενα. Παρατηρούμε ότι οι ρομπότ από το σταθερό περιβάλλον της συνεργασίας περνούν στο ανταγωνισμό μεταξύ τους και επανέρχονται στη σταθερότητα και τη συνεργασία.



Η εξέλιξη της μεγαλύτερης συγκέντρωσης αντικειμένων σε ένα κύτταρο, από 15 μνημονικούς ρομπότ με $T_{max}=100$ για 50 αντικείμενα.

Η συμπεριφορά τους είναι όμοια με αυτή των πιθανοτικών ρομπότ, μόνο που το στάδιο του ανταγωνισμού παρουσιάζει έντονες μεταπτώσεις, συνεπώς και μεγαλύτερη διάρκεια.





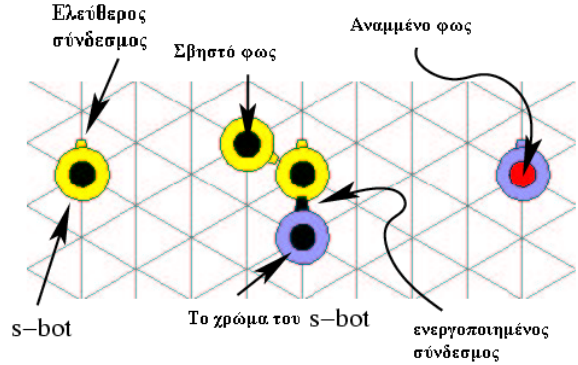
Η συμπεριφορά των ρομπότ ανάλογα με τις τιμές της παραμέτρου α , $\alpha=0.0$ (χειρότερη περίπτωση), $\alpha=0.3$, $\alpha=0.55$ (βέλτιστη συμπεριφορά επιτρέπει την προσθήκη επιπλέον ρομπότ χωρίς να μειώνεται η απόδοσή τους).

5.2 SWARM-BOT

Ένα swarm-bot είναι ένα αυτοσχηματιζόμενο και αυτοργανώμενο σύνθετο σύστημα που αποτελείται από έναν πλήθος μικρότερων συσκευών, των s-bot [17]. Τα s-bot μπορούν να συσσωματώνονται στο swarm-bot και το swarm-bot να διασπάται στα s-bot που το συνθέτουν. Τα s-bot διαθέτουν περιμετρικά με συνδέσμους για να ενώνονται με άλλα και να δημιουργούν μια ενιαία δομή.

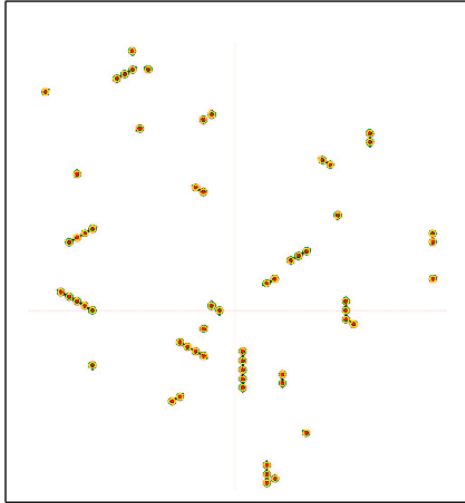
Τα s-bot ανήκουν σε διαφορετικά είδη, που έχουν διαφορετικές συμπεριφορές και ικανότητες. Τα είδη ξεχωρίζουν από το χρώμα του δακτυλίου (πηγές φωτός δεξιά, αριστερά και πίσω) και του φωτός που εκπέμπεται από τη κορυφή του κάθε s-bot περιμετρικά σε μεγάλη απόσταση, η ένταση του οποίου μειώνεται ανάλογα με το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης. Τα s-bot κινούνται σε ένα εξαγωνικό πλέγμα, σύμφωνα με τα ερεθίσματα των έξι αισθητήρων των πηγών φωτός, που κατανέμονται περιμετρικά των s-bot. Επίσης διαθέτουν έξι αισθητήρες μικρής εμβέλειας που αντιλαμβάνονται εμπόδια και άλλα s-bot, που βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτά. Τα s-bot εκτός από το φως που εκπέμπουν (την έντασή του και το χρώμα του), δεν

διαθέτουν κάποια άλλη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους.



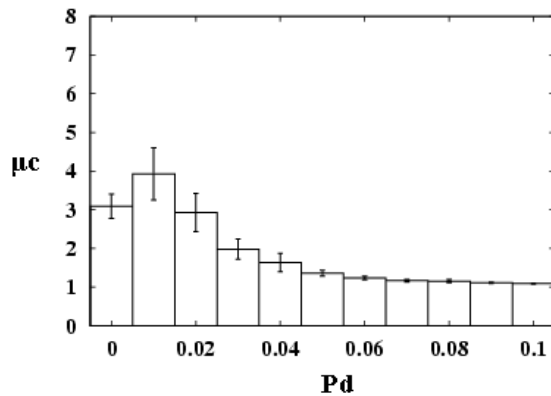
Το παρακάτω σύνολο κανόνων θα χρησιμοποιηθούν από τα s-bot για την επίτευξη μιας συμπεριφοράς σχηματισμού αλυσίδων από διαδοχικά s-bot. Τα s-bot που περιπλανούνται τυχαία στο χώρο, απαιτείται να έλκονται από τα φώτα μεγάλης εμβέλειας, αλλά ισχυρότερη πρέπει να είναι για αυτά είναι η έλξη που προκαλούν τα πίσω φώτα μικρής εμβέλειας του κάθε s-bot. Τα s-bot κινούνται προς την κατεύθυνση που είναι ισχυρότερη η ένταση του φωτός με ανάλογη πιθανότητα. Συντάσσονται πίσω από κάποιο άλλο s-bot σχηματίζοντας μια αλυσίδα ή επιμηκύνοντας τη. Κάθε s-bot μπορεί να αποσχιστεί από την αλυσίδα με πιθανότητα P_d . Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν περιλάμβαναν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις σχετικά με την τιμή της P_d .

- ✓ Η αλυσίδα αποτελείται από συνδεδεμένα μεταξύ τους s-bot, οπότε η πιθανότητα $P_d=0$ για όλα τα s-bot της αλυσίδας εκτός από το τελευταίο που έχει $P_d>0$.
- ✓ Την αλυσίδα αποτελούν ασύνδετα s-bot οπότε η πιθανότητα αποχώρησης είναι για το καθένα $P_d>0$.
- ✓ Η αλυσίδα αποτελείται από συνδεδεμένα μεταξύ τους s-bot, οπότε η πιθανότητα $P_d=0$ για όλα τα s-bot της αλυσίδας εκτός από το τελευταίο που έχει P_d αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της αλυσίδας, δηλαδή αντιστρόφως ανάλογη της έντασης του φωτός που λαμβάνει το τελευταίο s-bot. Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί σε πιο σταθερές μεγάλες αλυσίδες.

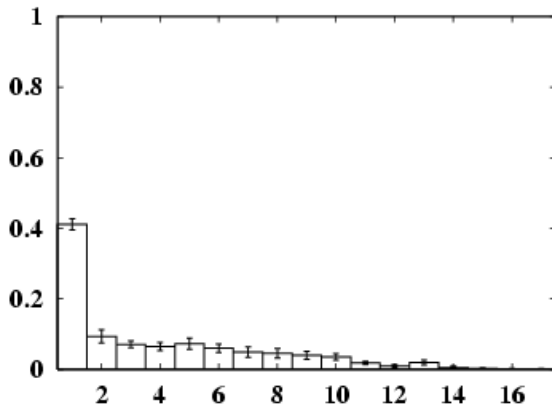


Ενδιάμεσο στάδιο από ένα πείραμα με 60 s-bot σε ένα εξαγωνικό πλέγμα 21x21.

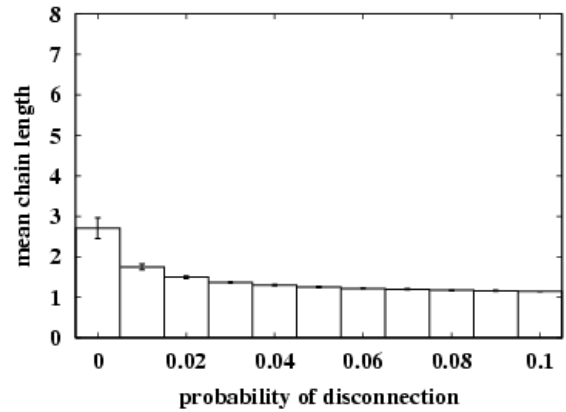
Αν c_i είναι το πλήθος των αλυσίδων μεγέθους i και το μέσο μέγεθος των αλυσίδων είναι $\mu_c = \frac{\sum_i i c_i}{\sum_i c_i}$.



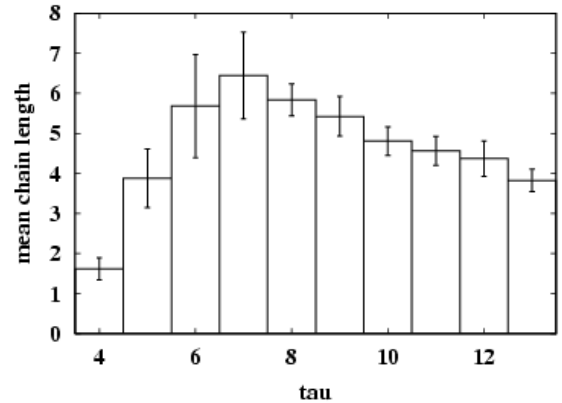
Κατά το πρώτο πείραμα για $P_d=0$ σχηματίζονται στατικές αλυσίδες. Καθώς η πιθανότητα αποσύνδεσης αυξάνει αρχικά αυξάνει και το μήκος των αλυσίδων και στη συνέχεια μειώνεται αργά και για πιθανότητα 1 δεν έχουμε αλυσίδες.



Η συχνότητα εμφάνισης προς το μήκος των αντίστοιχων αλυσίδων, για $P_d=0.01$, όπου το 40% των s-bot παραμένουν ασύνδετα.



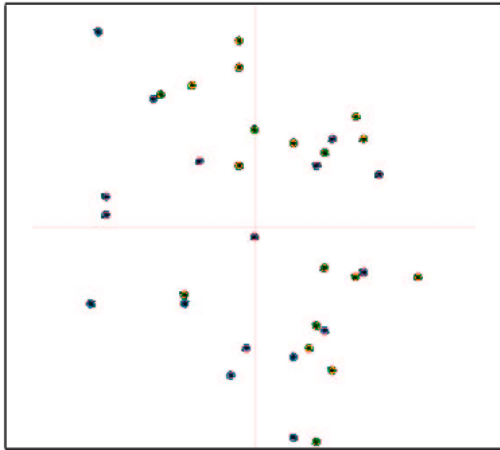
Αφορά το δεύτερο πείραμα, σε αυτήν την περίπτωση ο σχηματισμός αλυσίδων είναι πιο ασταθής.



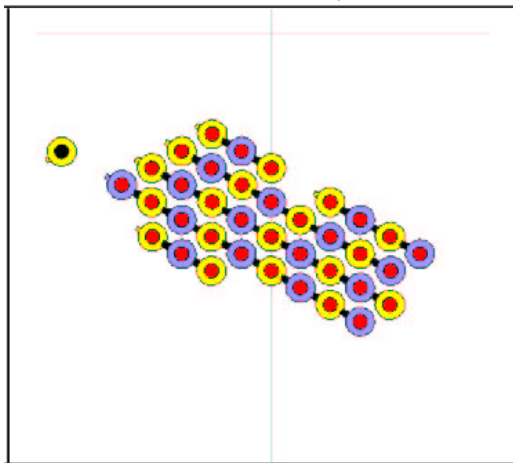
Στο τρίτο πείραμα η πιθανότητα ορίζεται ως το αντίστροφο ανάλογο του φωτός s που δέχεται το κάθε s-bot, $P_d=e^{-ts}$. Παραπάνω παρουσιάζεται το μέσο μήκος των αλυσίδων προς τις διάφορες τιμές του τ .

Ένας άλλος σχηματισμός που επιδιώκεται από τα s-bot, είναι ο σχηματισμός λουρίδων. Οι κανόνες έλεγχου του κάθε s-bot είναι:

1. Σύνδεση με στο πίσω μέρος ενός s-bot διαφορετικού είδους, και η πιθανότητα αποσύνδεσης ορίζεται ανάλογη της έντασης του φωτός που δέχεται από s-bot του ίδιου είδους.
2. Ενεργοποίηση της πηγής φωτός μόλις συνδεθεί το s-bot.
3. Επιλογή με καθορισμένες πιθανότητες μιας από των παρακάτω κινήσεων: (α) κίνηση προς το φως, (β) κίνηση προς άλλο s-bot, (γ) συνταίριασμα με τους γείτονες, (δ) τυχαία κίνηση.



Η αρχική κατανομή 37 s-bot (20 από το ένα είδος και 17 από το άλλο).

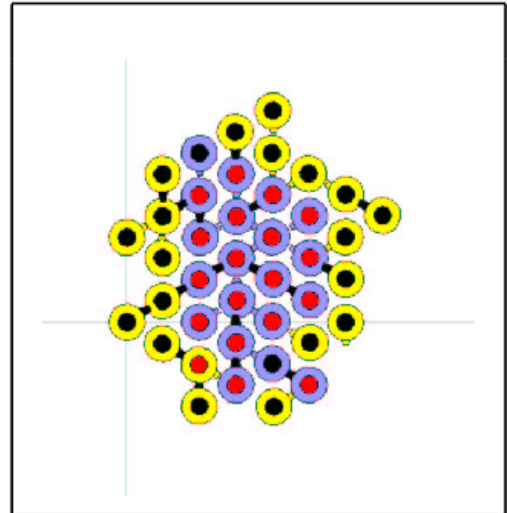


Τελικός σχηματισμός.

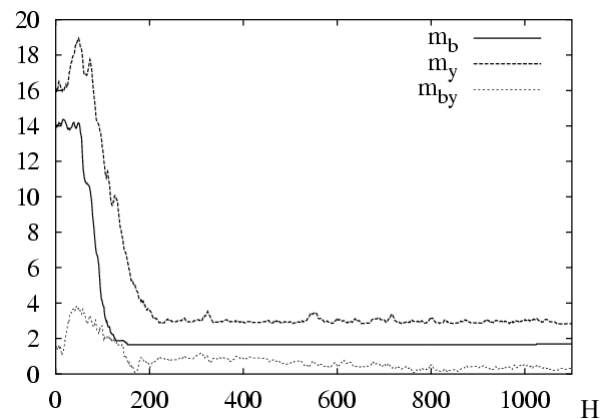
Τέλος επιχειρείται η δημιουργία σχηματισμών, όπου ένα είδος s-bot θα περιβάλλει μια συσσωμάτωση s-bot του άλλου είδους. Τέτοιοι σχηματισμοί παρατηρούνται και αποικίες μερμηγκιών όπου οι στρατιώτες δημιουργούν μια περίμετρο ασφάλειας γύρω από τους εργάτες που μεταφέρουν τροφή. Τα s-bot του ενός είδους αποτελούν τα κεντρικά και τα περιφερειακά, με διαφορετικές συμπεριφορές. Τα κεντρικά s-bot έλκονται προς το φως, επίσης από άλλα κεντρικά s-bot. Τα περιφερικά ρομπότ έλκονται από το φως αλλά απωθούνται από τα άλλα s-bot. Και τα δύο είδη συνδέονται και αποσυνδέονται με πιθανότητα ανάλογη της έντασης του φωτός. Τα περιφερειακά s-bot ενεργοποιούν την πηγή φωτός όταν συνδέονται με άλλα δύο, ενώ τα κεντρικά όταν περιβάλλονται από άλλα s-bot.

Η δημιουργία του σχηματισμού έχει δύο φάσεις. Αρχικά τα κεντρικά s-bot

συγκεντρώνονται και ενώνονται μεταξύ τους ενώ τα περιφερειακά απωθούνται. Δημιουργούνται μικρότερες συγκεντρώσεις κεντρικών s-bot που τελικά δημιουργούν μία ομάδα, η οποία αποτελεί αρκετά ισχυρή πηγή φωτός, για να αντεπεξέλθει την απόθεση των περιφερειακών s-bot και να σχηματίσουν την περίμετρο.



Το πείραμα εκτελείται με 20 s-bot κάθε είδους..



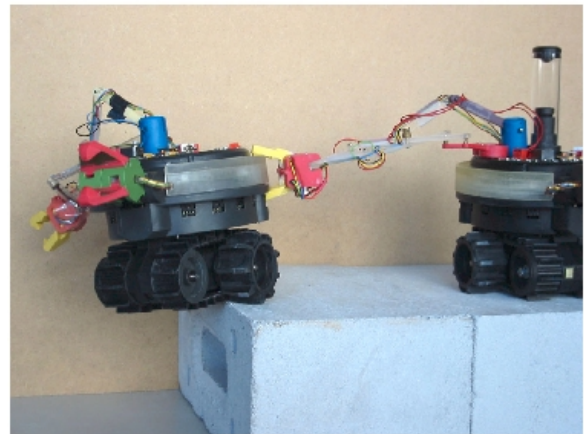
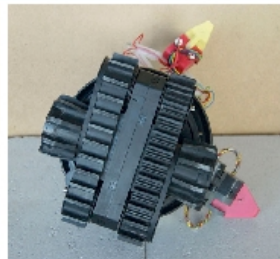
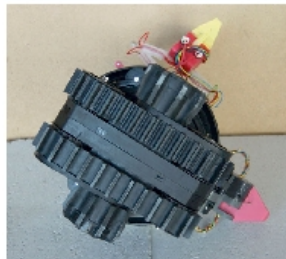
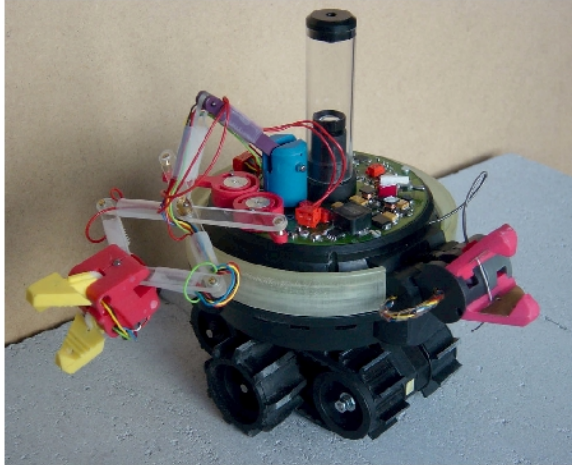
εξέλιξη ως προς το χρόνο των μεγεθών:

m_b η μέση απόσταση των κεντρικών s-bot από το κέντρο μάζας τους.

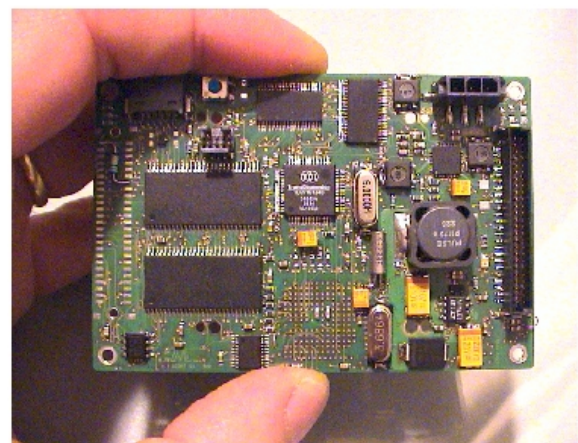
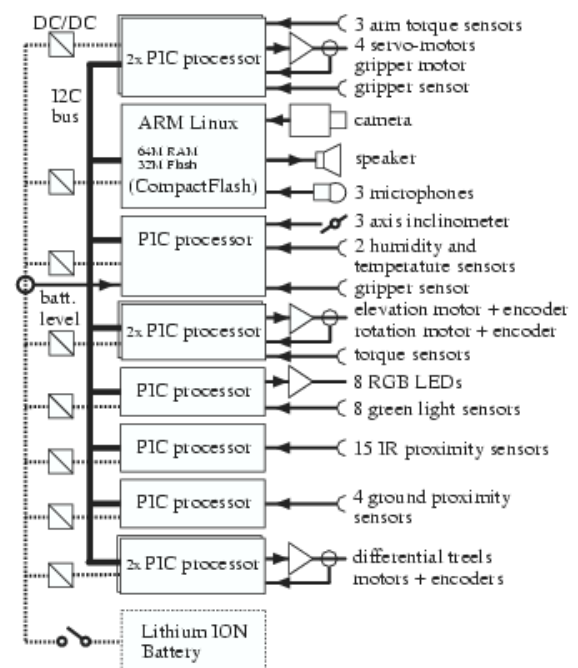
m_y η μέση απόσταση των περιφερειακών s-bot από το κέντρο μάζας των κεντρικών s-bot.

m_{by} η απόσταση μεταξύ των κέντρων μάζας των δύο ειδών s-bot.

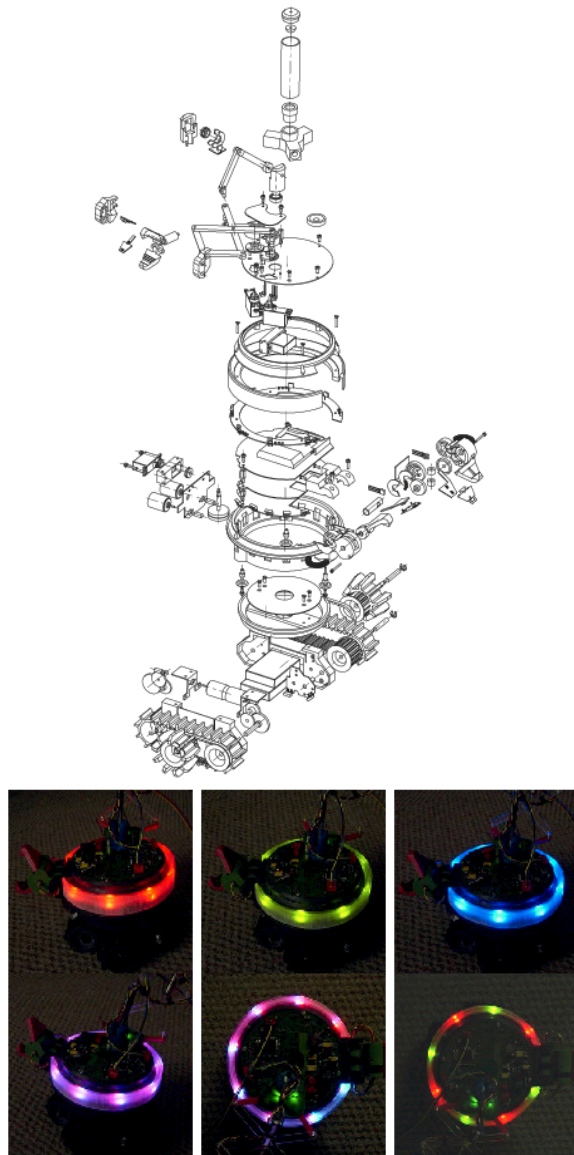
Ακολουθούν εικόνες από την υλοποίηση των s-bot.



Το ηλεκτρονικό σύστημα για τους 50 αισθητήρες και τους 9 κινητήρες.



Το κεντρικό σύστημα ελεγχου που τρέχει LINUX με ARM επεξεργαστή στα 400Mhz, 64MB RAM, USB, RS232.



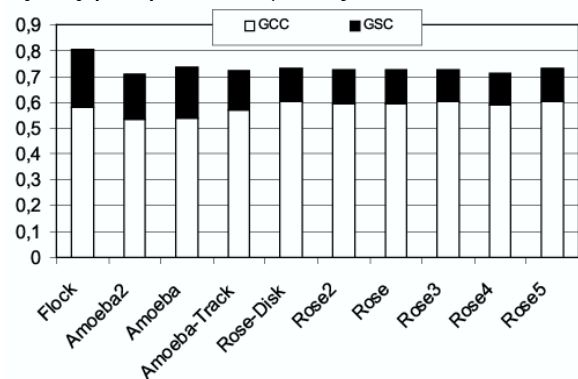
Μερικά παραδείγματα χρωματιστών πηγών φωτός που χρησιμοποιούνται για την υπο-συμβολική επικοινωνία ανάμεσα στα s-bot.

5.3 Εξέλιξη κινουμένων ρομπότ ικανών να επιδείξουν συλλογική συμπεριφορά

Η παρακάτω προσπάθεια [22] αφορά την επίδειξη συλλογικής συμπεριφορά από κινούμενα αυτόνομα ρομπότ, μέσω μιας διαδικασίας τεχνητής εξέλιξης. Διαδικασία που περιλαμβάνει την τυχαία διαφοροποίηση και την επιλεκτική αναπαραγωγή. Η επιλογή γίνεται σύμφωνα με την επίδοση τους στο να επιδεικνύουν συλλογική συμπεριφορά μέσω των

αλληλεπιδράσεων που αναπτύσσονται μεταξύ των ρομπότ. Κατά τη διαδικασία εξέλιξης εμφανίζονται πολλά διαφορετικά είδη αλληλεπιδράσεων και συμπεριφορών. Η επιτυχία τους έγκειται στην ικανότητά τους να συγκεντρώνονται και να κινούνται προς ένα στόχο.

Η εξέλιξη πραγματοποιείται από μία ομάδα εικονικών ρομπότ από 2 έως 7, που αρχικά είναι διασκορπισμένα σε μία ορθογώνια αρένα στην άκρη της οποίας υπάρχει μια ισχυρή πηγή φωτός, που αποτελεί το στόχο τους. Κάθε ρομπότ διαθέτει 8 υπέρυθρους αισθητήρες και 4 μικρόφωνα για να αντιλαμβάνεται τη θέση των άλλων ρομπότ και 4 αισθητήρες για να αντιλαμβάνεται την πηγή φωτός. Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούν τις 16 από τις 17 εισόδους ενός νευρωνικού δικτύου με ένα επιπέδου και δύο εξόδους που ελέγχουν την ταχύτητα των δύο κινητήρων που ελέγχουν το ρομπότ (η 17 είσοδος είναι πάντα 1). Τα 34 βάρη του δικτύου αυτού κωδικοποιούνται με 8 bit το καθένα οπότε ο γονότυπος του κάθε ρομπότ αποτελείται από 272 bits. Παράγονται 100 τυχαίοι γονότυποι και εφαρμόζονται ένας σε 4 ρομπότ (όλα έχουν τον ίδιο γονότυπο). Η προσαρμογή κάθε γονότυπου εκτιμάται με το υπολογισμό δύο μεγεθών. Το GCC που εκφράζει την συνοχή του σχηματισμού των ρομπότ, που εξαρτάται από τη απόσταση του κάθε ρομπότ από το κέντρο βάρους της ομάδας. Και το GSC που εκφράζει την ταχύτητα με την οποία κινείται το βαρύκεντρο της ομάδας προς τον στόχο. Επιλέγονται οι 20 καλύτεροι γονότυποι και παράγονται από τον καθένα τους 5 γονότυποι με 2% αντικατάσταση bit. Η εξέλιξη διαρκεί 100 γενεές.



Η προσαρμογή της καλύτερης ομάδα ρομπότ για κάθε είδους συλλογική συμπεριφορά. Το μαύρο τμήμα της

κάθε στήλης αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά του δείκτη προσαρμογής και του δείκτη ταχύτητας στη διαμόρφωση του δείκτη προσαρμογής.

Οι ομάδες των ρομπότ επιδεικνύουν διαφορετικών ειδών στρατηγικές στον τρόπο που σχηματίζονται και κινούνται συλλογικά. Οι πιο χαρακτηριστικές κατηγορίες είναι:

- ✓ *Κοπάδι (Flock)*: Σχηματίζουν συμπαγή ομάδα και κινούνται κατευθείαν προς το στόχο διατηρώντας τη θέση τους ως προς τα άλλα μέλη και ως προς το στόχο σταθερή.



- ✓ *Αμοιβάδα (Amoeba)*: Κινούνται προς το στόχο μεταβάλλοντας τις μεταξύ τους σχετικές αποστάσεις.



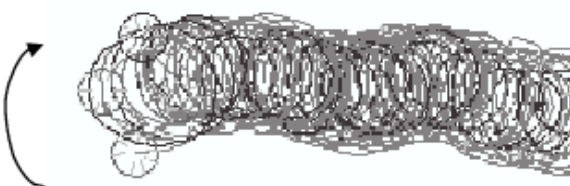
Και μια πιο συμπαγής παραλλαγή.



- ✓ *Ρόδο (Rose)*: Πολύ συμπαγής σχηματισμός όπου τα ρομπότ περιστρέφονται γύρω από τον εαυτό τους και γύρω από το βαρύκεντρό τους.



Και μια συμπαγής παραλλαγή όπου τα ρομπότ περιστρέφονται μόνο γύρω από τον εαυτό τους.

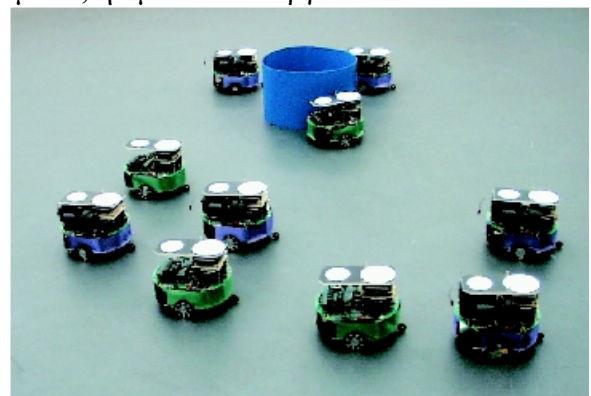


Η συμπεριφορά που επιδεικνύει την

καλύτερη προσαρμογή τόσο στην ταχύτητα με την οποία κινείται ο σχηματισμός αλλά και τη συνοχή της ομάδας, είναι με τη μορφή κοπαδιού.

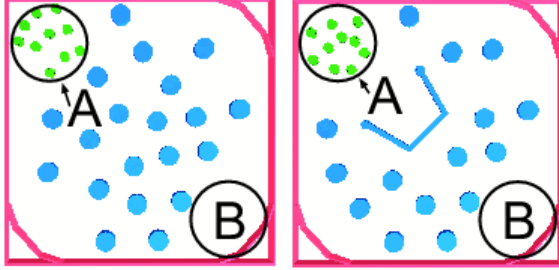
5.4 Σχηματισμός και κίνηση ρομπότ σε κοπάδι

Παρακάτω παρατίθεται μια προσπάθεια [18] για την επίτευξη της δημιουργίας ενός κοπαδιού αυτόνομων κινούμενων robot, ο σχηματισμός και η διατήρηση της συνοχής κατά τη μετακίνηση της ομάδας των robot. Η προσπάθεια αυτή γίνεται σύμφωνα με τις αρχές της Swarm Intelligence, χωρίς την ύπαρξη κάποιου αρχηγού ή κεντρικού ελέγχου. Επιζητείται η εύρωστη αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος από συλλογικά αυτόνομα robot, ελαχιστοποιώντας την πολυπλοκότητα των robot, δίνοντας έμφαση στην παράλληλη και κατανομημένη δράση τους, που επιτυγχάνεται μέσω των αλληλεπιδράσεων των robot. Αυτή η προσέγγιση προικοδοτεί το μοντέλο με το πλεονέκτημα τη δυνατότητας κλιμάκωσης (την εφαρμογή του ίδιου μοντέλου για λίγα ως χιλιάδες robot), την προσαρμοστικότητα (μπορούν στην ομάδα των robot να εισέρχονται ή να αποχωρούν μέλη) και ευρωστία σε κάθε αλλαγή της σύνθεσης της ομάδα, η ομάδα επανοργανώνεται.



Για να μελετήσουμε την συμπεριφορά του μοντέλου δοκιμάζεται η λειτουργία του σε ένα πεδίο όπου τα robot διασπείρονται σε μια περιοχή A και πρέπει να κινηθούν προς μια περιοχή B στην άλλη άκρη, περνώντας ανάμεσα από εμπόδια. Σε όλη αυτή τη διαδρομή πρέπει να κινούνται σαν κοπάδι,

ενώ κάποια από αυτά κατά τη διαδρομή είναι πιθανόν λόγω βλάβης να μην μπορούν να κινηθούν. Θεωρείται ότι πέτυχαν το στόχο τους εάν φθάσουν στην περιοχή B τα μισά από αυτά.



Υπάρχουν δύο είδη εμποδίων (Obs1) στην δεξιά (Obs2) εικόνα υπάρχει ένα τείχος. Τα κυλινδρικά εμπόδια είναι διπλάσια σε μέγεθος από τα robot.

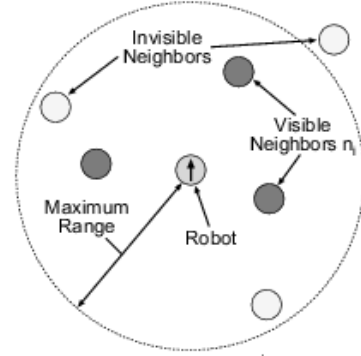
Για να εκτιμήσουμε την απόδοση του μοντέλου συνυπολογίζουμε τον χρόνο τα που χρειάστηκαν, τη μέση απόσταση D που διένυσε το καθένα από τα επιτυχημένα και μέση απόσταση I μεταξύ τους κατά τη διαδρομή, σύμφωνα με τον τύπο.

$$C = \alpha T + \beta D + \gamma I$$

Σύμφωνα με το μοντέλο κάθε robot επιδεικνύει δύο συμπεριφορές:

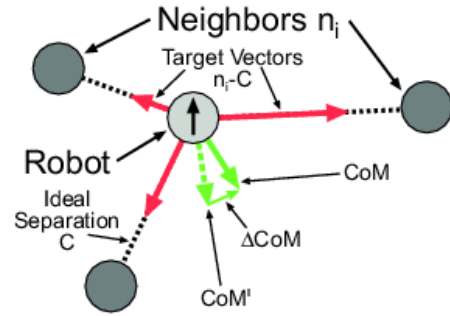
- ✓ Την αποφυγή συγκρούσεων, που ενεργοποιείται όποτε οι αισθητήρες σύγκρουσης ανιχνεύσουν κάποιο εμπόδιο (του περιβάλλοντος ή άλλο robot). Τότε το robot στρίβει απομακρυνόμενο από το εμπόδιο.
- ✓ Το συντονισμό με τα άλλα robot για του κοπαδιού, που ενεργοποιείται όταν το robot δεν προσπαθεί να αποφύγει κάποιο εμπόδιο. Κατά το στάδιο αυτό μεταβάλλει το διάνυσμα της ταχύτητάς τους σύμφωνα με τα άλλα robot στη γειτονιά του.

Την γειτονιά του αποτελούν τα N πλησιέστερα robot που βρίσκονται περιμετρικά του σε απόσταση M. Συλλέγει της πληροφορίες που αφορούν την απόσταση $\|n_i\|$ και τη κατεύθυνση $(-\pi \leq \hat{n}_i \leq \pi)$ για τους m γείτονες $i=1 \dots m \leq N$.



Για δοσμένη επιθυμητή απόσταση C μεταξύ των robot κάθε robot υπολογίζει το κέντρο μάζας της γειτονιάς του CoM σύμφωνα με τη σχέση:

$$CoM = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\|n_i\| - C}{N}, \hat{n}_i \right) + (P, \hat{b})$$



Το P είναι η παράμετρος που καθορίζει την έλξη του robot προς την περιοχή B και b η κατεύθυνση της περιοχής B από το σημείο που βρίσκεται. Για να υπολογίσει τη μεταβολή της διεύθυνσής του χρησιμοποιεί την προηγούμενη τιμή του CoM_{prev} και με τις παρακάτω σχέσεις δίνει την ταχύτητα προς τον αριστερό και δεξιό τροχό αντίστοιχα.

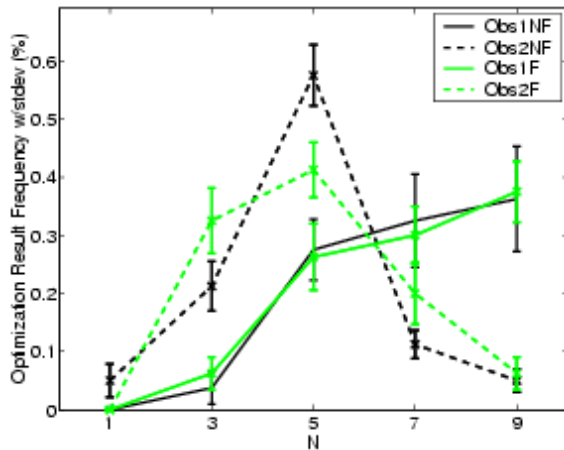
$$CoM' = \left[\left(CoM_{prev} - \frac{\Delta h}{2} \right) - e \right] - \frac{\Delta h}{2}$$

$$\Delta CoM = CoM - CoM'$$

$$U = \frac{M + K_2 \|CoM\| \cos(CoM)}{M}$$

$$LSpeed = (V - K_0(CoM' + K_1 CoM)) * U$$

$RSpeed = (V + K_0(CoM' + K_1 CoM)) * U$
όπου V η παράμετρος που καθορίζει την ταχύτητα κίνησης των robot.



Επεξήγηση του υπομνήματος

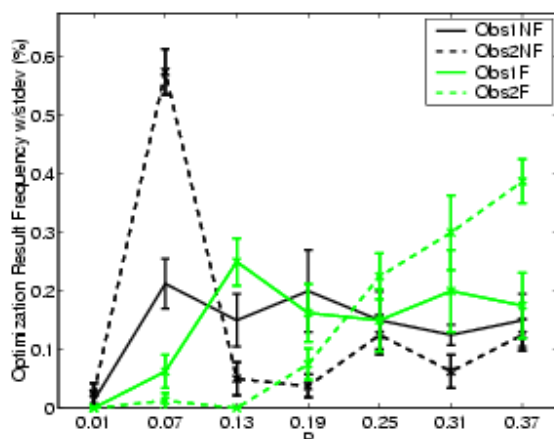
Obs1NF: κυλινδρικά εμπόδια, χωρίς βλάβες robot.

Obs2NF: κυλινδρικά εμπόδια και τείχος, χωρίς βλάβες robot.

Obs1F: κυλινδρικά εμπόδια, με βλάβες robot.

Obs2F: κυλινδρικά εμπόδια και τείχος, με βλάβες robot.

Η επίδραση του μεγέθους N της γειτονιάς στην απόδοση της ομάδας. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του τείχους προτιμότερη είναι μια μικρή γειτονιά, διότι επηρεάζεται λιγότερο και από αυτά που έχουν εγκλωβιστεί στο τείχος. Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι η βλάβη ορισμένων robot επηρεάζει σημαντικά την απόδοση.



Επεξήγηση του υπομνήματος

Obs1NF: κυλινδρικά εμπόδια, χωρίς βλάβες robot.

Obs2NF: κυλινδρικά εμπόδια και τείχος, χωρίς βλάβες robot.

Obs1F: κυλινδρικά εμπόδια, με βλάβες robot.

Obs2F: κυλινδρικά εμπόδια και τείχος, με βλάβες robot.

Η παράμετρος P καθορίζει την προτίμηση του robot να κινηθεί προς την

περιοχή B ή να ακολουθήσει το κοπάδι. Στην περίπτωση του τείχους μικρή τιμή του P επιτρέπει στα robot να κινηθούν σαν μία ομάδα περιμετρικά του τείχους, αντίθετα όταν υπάρχουν βλάβες είναι πιο αποτελεσματικό να κινείται το κάθε robot αυτόνομα προς το στόχο του. Για την περίπτωση των κυλινδρικών εμποδίων δεν φαίνεται να επηρεάζει την συμπεριφορά της ομάδας.

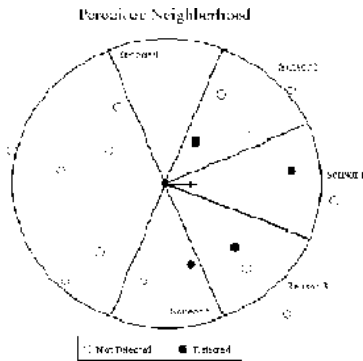
5.4 Κίνηση πλειάδας μικρό-ρομπότ σε σχηματισμό

Σκοπός είναι η παρουσίαση [19] μια ευέλικτης αρχιτεκτονικής για τη μοντελοποίηση χιλιάδων μικρό-ρομπότ συνολικά. Βασικό στοιχείο του μοντέλου αποτελούν το δυναμικό κοινωνικών πεδίων, στο οποίο εισάγεται η έννοια της ουδέτερης ζώνης στην οποία το μικρό-ρομπότ μπορεί να αναπτύξει την «ελεύθερα» τη συμπεριφορά του. Μελετάτε και η συμπεριφορά συστημάτων μικρό-ρομπότ που παρουσιάζουν βλάβες ή έχουν ελαττωματικούς αισθητήρες.

Η προσομοίωση αφορά τις αλληλεπιδράσεις και την συλλογική συμπεριφορά που αναπτύσσεται ανάμεσα σε 1000 και περισσότερα μικρό-ρομπότ στην προσπάθειά τους για το σχηματισμό μιας συντονισμένης ομάδας.

Το πεδίο δράσης τους αποτελείται από ένα διδιάστατο χώρο, που τεμαχίζεται από ένα ορθογώνιο πλέγμα σε διακριτά κελιά. Σε κάθε χρονική στιγμή, βήμα της προσομοίωσης κάθε ρομπότ μπορεί να μετακινηθεί κατά μία θέση, σε μια από τις 8 γειτονικές του.

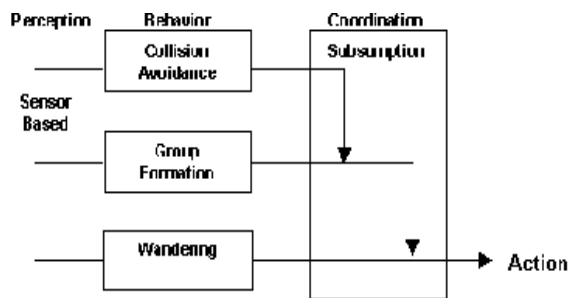
Κάθε ρομπότ διαθέτει δύο είδη αισθητήρων. Ένα για αντιλαμβάνεται τη θέση των γειτονικών του ρομπότ και το δεύτερο για την αναγνώριση των εμποδίων. Κάθε ρομπότ διαθέτει 5 αισθητήρες της πρώτης κατηγορίας, καθένας από τους οποίους καλύπτει μια περιοχή 45 μοιρών, η κάλυψη 360 μοιρών δεν είναι απαραίτητη. Οι αισθητήρες ανιχνεύουν το κοντινότερο γείτονα μέσα στη περιοχή που καλύπτουν.



Με μαύρες κουκίδες συμβολίζονται οι γείτονες που γίνονται αντιληπτοί. Οι αισθητήρες αντιλαμβάνονται μόνο τον εγγύτερο προς αυτούς.

Οι κανόνες που καθορίζουν την συμπεριφορά του ρομπότ είναι τρεις και αφορούν κατά σειρά προτεραιότητας:

- ✓ Την αποφυγή εμποδίων.
- ✓ Τη δημιουργία και τη διατήρηση του σχηματισμού.
- ✓ Την περιπλάνηση, κίνηση του ρομπότ προς κάποια κατεύθυνση.



Η δημιουργία του σχηματισμού αποβλέπει στη στην εγκαθίδρυση μιας καθορισμένης χωρικής σχέσης μεταξύ των γειτονικών ρομπότ. Η διάταξη στο χώρο κάθε ρομπότ καθορίζεται από ένα πεδίο κοινωνικών δυνάμεων που ασκεί το καθένα στα γειτονικά του. Το μέτρο και η κατεύθυνσή της (ελκτική ή απωστική) καθορίζονται από την απόσταση d με βάση τη σχέση:

$$f(d) = \frac{-c_1}{d^{\alpha_1}} + \frac{c_2}{d^{\alpha_2}}$$

$$c_1, c_2 \geq 0, \alpha_1 > \alpha_2 > 0$$

Η δύναμη αυτή απωθεί δύο ρομπότ που πλησιάζουν πολύ κοντά (ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης γίνεται πιο ισχυρός) και έλκει αυτά που είναι πιο απομακρυσμένα μεταξύ τους (δεύτερος

όρος). Για απόσταση $d = \left(\frac{c_1}{c_2} \right)^{\frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2}}$ υπάρχει

ισορροπία. Σε ένα ρομπότ A ασκούνται δυνάμεις από όλα τα γειτονικά $N_1, N_2, \dots, N_k$ του με αποστάσεις $d_1, d_2, \dots, d_k$ οπότε οι συνισταμένη τους είναι:

$$f_A(d_i) = \frac{-c_{1i}}{d_i^{\alpha_{1i}}} + \frac{c_{2i}}{d_i^{\alpha_{2i}}}$$

$$F(A) = \sum_{i=1}^k f_A(d_i)$$

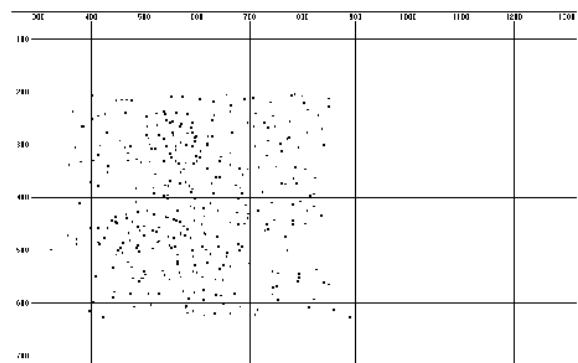
Για να αποφύγουμε τις έντονες ταλαντώσεις αλλά για να δώσουμε τη δυνατότητα στο ρομπότ να μετακινηθεί προς μία κατεύθυνση (ουδέτερη ζώνη) εισάγουμε την έννοια της κρίσιμης δύναμης. Για να ενεργήσει η δύναμη του κοινωνικού πεδίου στο ρομπότ πρέπει η τιμή της να υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή.

Στις παρακάτω προσομοίωσης η μορφή του κοινωνικού πεδίου θα είναι:

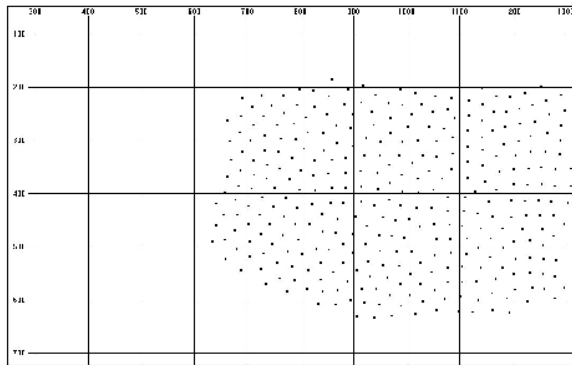
$$f(d) = \frac{-30,000}{d^2} + \frac{1000}{d}$$



και η κρίσιμη δύναμη 5.

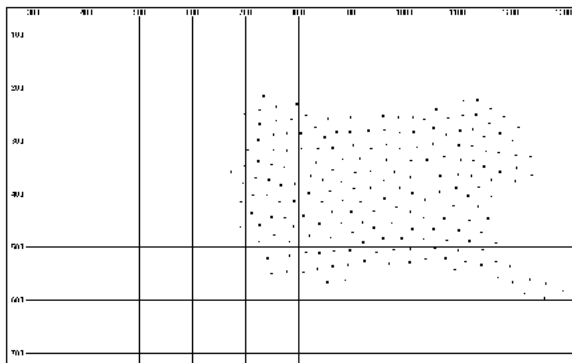


Αρχική κατανομή 350 ρομπότ.



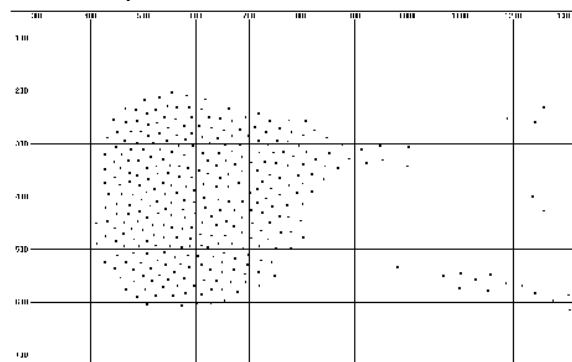
Η εξέλιξη για ρομπότ χωρίς βλάβες και τέλειους αισθητήρες.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι για τέλεια ρομπότ έχουμε πλήρη σάρωση του χώρου και τη διατήρηση ενός σχηματισμού.



Η εξέλιξη για ρομπότ με βλάβες που παύουν να λειτουργούν αλλά τέλειους αισθητήρες.

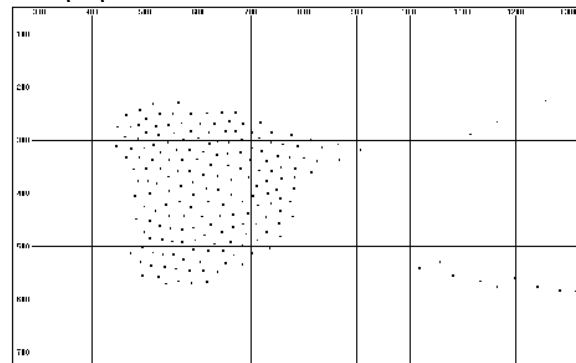
Η εύρωστη συμπεριφορά του μοντέλου εμφανίζεται στην περίπτωση βλάβης κάποιων ρομπότ όπου τα εναπομείναντα προσπαθούν να καλύψουν το κενό τους. Ο σχηματισμός τους είναι αρκετά κανονικός καθώς ικανοποιητική είναι και η απόσταση που διανύουν.



Η εξέλιξη για ρομπότ χωρίς βλάβες αλλά με ελαττωματικούς αισθητήρες.

Στην περίπτωση που έχουμε ελαττωματικούς αισθητήρες παρουσιάζονται

και τα περισσότερα προβλήματα. Το μοντέλο του κοινωνικού πεδίου είναι ευαίσθητο στις πληροφορίες που αφορούν τις θέσεις των γειτονικών ρομπότ. Από τον πίνακα παρακάτω είναι εμφανές ότι τα ρομπότ ταλαντεύονταν γύρω από τη θέση τους, αλλάζοντας συνεχώς θέση αναλόγως εάν ανίχνευαν κάποιο γείτονα τους ή έχαναν την αίσθησή του.



Η εξέλιξη για ρομπότ με βλάβες που παύουν να λειτουργούν και με ελαττωματικούς αισθητήρες.

Η ύπαρξη ρομπότ με βλάβη δεν επιδείνωσε την συμπεριφορά του συστήματος.

Agent Config.	Agent Motion (Average distances in inches)					
	Easterly Motion	X Dist.	X Motion	Y Dist.	Y Motion	Total Dist.
Perfect	392.07	392.07	465.07	11.94	90.25	392.41
Death	364.95	364.95	448.06	25.36	134.52	366.45
Imperfect Sensors	53.22	53.95	367.27	22.83	310.55	60.69
Death & Imp. Sensors	61.51	61.74	366.35	17.67	306.38	70.46

6 Εφαρμογή: Swarm-Fish

Η εφαρμογή που αναπτύσσεται παρακάτω αφορά ένα multi agent σύστημα που δρα σε ένα δισδιάστατο χώρο (αν θεωρήσουμε ότι αυτοί οι agents είναι ρομπότ αποτελεί μια εφαρμογή συλλογικών ρομπότ). Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας προτείνεται ένα μοντέλο για προβλήματα παρόμοια με αυτά που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στις ιδέες που αναπτύχθηκαν στα κεφάλαια 3 και 4, και διαφοροποιείται από τα αυτά του κεφαλαίου 5, εισάγοντας την ανομοιογένεια μεταξύ των agent.

Καθένα από αυτά τα ρομπότ είναι πολύ απλά στην κατασκευή τους με πολύ περιορισμένες επικοινωνιακές δυνατότητες μεταξύ τους. Τα ρομπότ αυτά αποτελούνται από μία κοινή πλατφόρμα (βάση ανάπτυξης), στην οποία προσαρμόζονται άλλες συσκευές ή όργανα που επιτρέπουν στο ρομπότ να εκτελεί συγκεκριμένες εργασίες (εξειδίκευση). Τα ρομπότ δεν είναι σε θέση εκτελέσουν ένα έργο από μόνα τους παρά μόνο με συνεργασία πολλών μαζί. Ανάλογα με την αποστολή της ομάδας των ρομπότ καθορίζεται και η σύνθεσή της. Ο επιπλέον εξοπλισμός πρέπει να φέρει το καθένα (ο εξοπλισμός που φέρει το ρομπότ το διαφοροποιεί από τα άλλα).

Στο σύστημα μας τα αυτόνομα συστήματα που αλληλεπιδρούν, θα τα αποκαλούμε «άτομα» (agents), τα οποία κινούνται μέσα στο «τοπίο», χώρο που ορίζεται από ένα ορθογώνιο πλέγμα. Κάθε στοιχείο του πλέγματος, κύτταρο (cell), αποτελεί το στοιχειώδες (θραύσμα) χώρου στο τοπίο.

6.1.1 Το κύτταρο

Το κύτταρο μπορεί να είναι ελεύθερο ή κατειλημμένο από κάποιο άτομο, και περιγράφεται από δύο ιδιότητες, την ενέργεια (energy) και την επιρροή (shared). Η ενέργεια είναι ένας πραγματικός αριθμός

που διαφοροποιεί τα κύτταρα ως προς την αξία τους για τα άτομα. Η επιρροή είναι ένας φυσικός αριθμός που καταδεικνύει το πλήθος των ατόμων που στην περιοχή δράσης τους ανήκει το κύτταρο αυτό, δείχνει πόσα άτομα μοιράζονται την ενέργεια του κυττάρου. Κάθε άτομο μπορεί να γνωρίζει εάν ένα κύτταρο είναι κατειλημμένο ή όχι και ποια είναι η ενέργεια του που δίνεται από τη σχέση:

Αν (x_a, y_a) η θέση του ατόμου στο τοπίο και (x_c, y_c) η θέση του κυττάρου τότε:

$$E_a(x_c, y_c) = \frac{E_c}{\{|x_c - x_a| + |y_c - y_a|\} \cdot n}$$

όπου

E_a η ενέργεια που «βλέπει» το άτομο στο κύτταρο

E_c η ενέργεια του κυττάρου

n η επιρροή του κυττάρου

6.1.2 Το άτομο

Στο σύστημα που θα μελετήσουμε βασικό χαρακτηριστικό είναι η ανομοιογένεια μεταξύ των ατόμων που συγκροτούν την κοινότητα. Επιπροσθέτως η ανομοιογένεια αυτή που μπορεί να αντιμετωπιστεί και ως εξειδίκευση των ατόμων στο να επιτελούν κάποιο συγκεκριμένο έργο, δεν απαιτείται κάθε άτομο να είναι σε θέση να εκτελεί όλες τις λειτουργίες που χρειάζεται το σύνολο των ατόμων για να εκτελέσει το έργο, αλλά κάποιες από αυτές με τη δυνατότητα να τις μοιράζεται με τα υπόλοιπα άτομα του συνόλου. Οι δυνατότητες-λειτουργίες που μπορεί να εκτελέσει το κάθε άτομο θεωρούνται κοινόχρηστοι πόροι του συνόλου και κάθε άτομο έχει πρόσβαση στους κοινόχρηστους πόρους του συνόλου.

Η κίνηση του ατόμου στο τοπίο καθορίζεται από ένα σύνολο κανόνων, την ενεργοποίηση των οποίων καθορίζει η «γειτονιά» του ατόμου, ο περιβάλλοντας χώρος. Το άτομο μπορεί σε κάθε κύκλο να μετακινείται κατά ένα βήμα στο γειτονικό κύτταρο, αν (x, y) η θέση του ατόμου τότε μπορεί να μετακινηθεί στις θέσεις $(x, y+1)$, $(x+1, y)$, $(x, y-1)$, $(x-1, y)$, αρκεί η θέση να μην είναι κατειλημμένη από άλλο άτομο ή να μην

βρίσκεται εκτός των ορίων του τοπίου ($0 \leq x < x_{\max}$, $0 \leq y < y_{\max}$).

Η διάθεση των δυνατοτήτων–λειτουργιών του ατόμου προς τα άλλα άτομα έχει τοπικιστικό χαρακτήρα, καθορίζεται από την απόσταση μεταξύ του ατόμου που διαθέτει τη δυνατότητα χρήσης της λειτουργίας του και του ατόμου που κάνει χρήση της λειτουργίας αυτής. Αναλυτικότερα, οι λειτουργίες που διαθέτει το άτομο περιγράφονται από ένα διάνυσμα το μέγεθος του οποίου ορίζεται από το πλήθος των διαφορετικών λειτουργιών που διαθέτει το σύνολο των ατόμων. Στην προκειμένη περίπτωση θεωρούμε ότι το σύνολο μπορεί να εκτελεί 3 διαφορετικές λειτουργίες.

$$F = [f_0 \ f_1 \ f_2]^T$$

Η διάθεση των λειτουργιών αυτών στα γειτονικά άτομα, ορίζεται από την παρακάτω σχέση που περιγράφει τι ποσοστό των λειτουργιών μπορεί να κάνει χρήση ένα άτομο ανάλογα με τη θέση του κυττάρου που βρίσκεται. Αν (x_a, y_a) η θέση του ατόμου στο τοπίο και (x_c, y_c) η θέση του κυττάρου τότε:

$$F_c(x_c, y_c, a_i) = \frac{1}{\{|x_c - x_a| + |y_c - y_a|\}} k F_a$$

για $\max\{|x_c - x_a|, |y_c - y_a|\} < R_F$

όπου:

F_a το διάνυσμα των λειτουργιών του ατόμου «δότη».

k συντελεστής διάδοσης που μπορεί σταθερός ή συνάρτηση άλλων μεγεθών, αρχικά θα τον θεωρήσουμε μονάδα.

R_F ορίζει το μέγεθος της περιοχής του «διαδίδει» τη προσφορά του ο «δότης». Η περιοχή αυτή έχει σχήμα τετραγώνου με πλευρά $2R_F$ στο κέντρο του οποίου βρίσκεται το άτομο «δότης».

$F_c(x_c, y_c, a_i)$ το διάνυσμα των λειτουργιών στο κύτταρο στη θέση (x_c, y_c) και οφείλεται στο άτομο a_i .

Ένα άτομο a_j στο κύτταρο (x_c, y_c) μπορεί να χρήση των λειτουργιών που διαθέτουν τα

άλλα άτομα στο κύτταρο αυτό σύμφωνα με την παραπάνω σχέση. Οι συνολικοί πόροι–λειτουργίες που διαθέτει το άτομο αυτό είναι το άθροισμα των δικών του πόρων συν τους πόρους που του διαθέτουν τα γειτονικά άτομα. Το διάνυσμα λειτουργιών του είναι:

$$F_{a_i}(x_c, y_c) = F_{a_i} + \sum_{a_j \in A} F(x_c, y_c, a_j)$$

όπου:

$F_{a_i}(x_c, y_c)$ το διάνυσμα των λειτουργιών που διαθέτει το άτομο όταν βρίσκεται στο κύτταρο (x_c, y_c) .

F_{a_i} το διάνυσμα λειτουργιών του ίδιου ατόμου.

$\sum_{a_i \in A} F(x_c, y_c, a_i)$ η συνεισφορά των

γειτονικών ατόμων. Α είναι το σύνολο των ατόμων, η συνεισφορά των ατόμων που δεν είναι γειτονικά $\max\{|x_c - x_{aj}|, |y_c - y_{aj}|\} < R_F$ είναι μηδενική.

Κάθε άτομο όμως έχει ανάγκη να είναι σε θέση να κάνει χρήση σε κάποιο βαθμών των λειτουργιών του συνόλου, τις λειτουργίες πιθανόν να είναι σε θέση να τις εκτελέσει από μόνο του ή να χρειάζεται να κάνει χρήση των δυνατοτήτων γειτονικών ατόμων. Το διάνυσμα:

$$T = [t_0 \ t_1 \ t_2]^T$$

περιγράφει τις ανάγκες του ατόμου.

Παράλληλα το άτομο έχει ανάγκη από ένα κατάλληλο ζωτικό χώρο για τη δραστηριοποίησή του. Το προσδιορισμό αυτής της θέσης την κάνει το άτομο υπολογίζοντας τα οφέλη που προσφέρει η περιοχή γύρω από αυτή τη θέση, αθροίζοντας την ενέργεια των κυττάρων τη περιοχής αυτής. Η ενεργεία που «βλέπει» το άτομο από κάθε κύτταρο που αναφέραμε παραπάνω

$$E_a(x_c, y_c) = \frac{E_c}{\{|x_c - x_a| + |y_c - y_a|\} \cdot n}$$

και η συνολική ενέργεια που αποκομίζει από την περιοχή είναι

$$E_{a_i} = \sum_{\max\{|x_c - x_a|, |y_c - y_a|\} < R_E} E_a(x_c, y_c)$$

Και εδώ περιοχή αυτή έχει σχήμα τετραγώνου με πλευρά $2R_E$ στο κέντρο του οποίου

βρίσκεται το άτομο. Παράλληλα το άτομο ενημερώνει επιρροή κάθε κυττάρου στην περιοχή του, δηλαδή όταν μετακινείται το άτομο σε κάθε νέο κύτταρο μέσα στη περιοχή του αυξάνεται η επιρροή (n) κατά ένα και τα κύτταρα που ήταν προηγουμένως εντός της περιοχής αλλά πια δεν είναι η επιρροή μειώνεται κατά ένα.

6.1.3 Οι κανόνες

Παραπάνω εκθέσαμε τα στοιχεία που λαμβάνει υπόψη του το άτομο για να αποφασίσει ποια θα είναι η επόμενη κίνηση του, σχηματίζοντας απλούς κανόνες που δεν συγκρούονται αλλά ο ένας απαιτεί την ενεργοποίηση του κάποιου άλλου. Οι κανόνες σχηματίζουν μια στοίβα, αν θεωρήσουμε ότι κάθε κανόνας είναι ένα αντικείμενο μιας στοίβας, τότε το άτομο όσο συναντά στην κορυφή της στοίβας κανόνες που ικανοποιούνται τους αφαιρεί από τη στοίβα. Όταν συναντήσει κάποιον κανόνα που δεν ικανοποιείται τότε δρα το άτομο προσπαθώντας να υπηρετήσει όσο το δυνατόν καλύτερα τον κανόνα αυτόν επιλέγοντας να μετακινηθεί στο αντίστοιχο κύτταρο. Η διαδικασία σταματά σε αυτό το σημείο ακόμα και αν η στοίβα δεν έχει αδειάσει. Η στοίβα έχει πάντα την ίδια μορφή και για όλα τα άτομα.

Free Cells
Field
Energy
Move Left

Το πρώτο στοιχείο της στοίβας είναι ο κανόνας που προσδιορίζει σε ποια από τα γειτονικά κύτταρα μπορεί να μετακινηθεί το άτομο. Μπορεί σε κάθε κύκλο να μετακινείται κατά ένα βήμα στο γειτονικό κύτταρο, αν (x,y) η θέση του ατόμου τότε μπορεί να μετακινηθεί στις θέσεις $(x,y+1)$, $(x+1,y)$, $(x,y-1)$, $(x-1,y)$, αρκεί η θέση να μην είναι κατειλημμένη από άλλο άτομο ή

να μην βρίσκεται εκτός των ορίων του τοπίου ($0 \leq x < x_{\max}$, $0 \leq y < y_{\max}$).

Ακολουθώς πρέπει να εξασφαλίσει στον αναγκαίο βαθμό τις λειτουργίες που του είναι απαραίτητες, οπότε εξετάζει το διάνυσμα λειτουργιών $F_{a_i}(x_c, y_c)$ συγκρίνοντάς το με το διάνυσμα κατωφλίου T . Αρχικά ελέγχει αν $f_i(x_c, y_c) - t_i > 0$ για $i=0,1,2$ δηλαδή αν καλύπτει τις αναγκαίες λειτουργίες άρα ικανοποιείται ο κανόνας. Διαφορετικά προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τη σχέση $\sum_{i=0}^2 f_i(x_c, y_c) - t_i$. Το άτομο επιλέγει το γειτονικό κύτταρο που πληρεί τον πρώτο κανόνα και έχει τη μεγαλύτερη τιμή για τη σχέση $\sum_{i=0}^3 f_i(x_c, y_c) - t_i$.

Ο τρίτος κανόνας προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την ενέργεια που συγκεντρώνει το άτομο από την περιοχή του. Εάν μετακινηθεί σε κάποιο από τα γειτονικά κύτταρα θα πρέπει η θέση του κυττάρου να είναι ευνοϊκότερη για τη συλλογή ενέργειας. Η έννοια της επιρροής κάθε κυττάρου αποσκοπεί στο να εμποδίζει τα άτομα να συγκεντρώνονται σε μια πολύ μικρή περιοχή, ενισχύει την έννοια του χώρου, μια περιοχή έχει συγκεκριμένη ενέργεια κατανομημένη στα κύτταρά της συνεπώς όσο περισσότερα άτομα συγκεντρώνονται σε αυτή την περιοχή τόσο μικρότερο μερίδιο από την ενέργεια της περιοχής θα έχουν.

Αυτοί οι τρεις κανόνες είναι και οι βασικότεροι για την αρχιτεκτονική του συστήματος και για τη δημιουργία σχηματισμών, μπορούν να ακολουθήσουν κανόνες που να περιγράφουν πως το σύνολο των ατόμων μπορεί να εκτελέσει πιο σύνθετες δράσεις. Σε μια από αυτές τις δράσεις ζητούμε από τα άτομα να κινηθούν από αριστερά προς τα δεξιά, για την ενεργοποίηση του κανόνα αυτού απαιτεί το άτομο να έχει συγκεντρώσει ένα ορισμένο ποσό ενέργειας.

Μια άλλη παραλλαγή της παραπάνω αρχιτεκτονικής είναι ο συντελεστής διάδοσης k να ισούται κάθε στιγμή με την ενέργεια που συγκεντρώνει το άτομο, δηλαδή το άτομο που συγκεντρώνει περισσότερη ενέργεια να

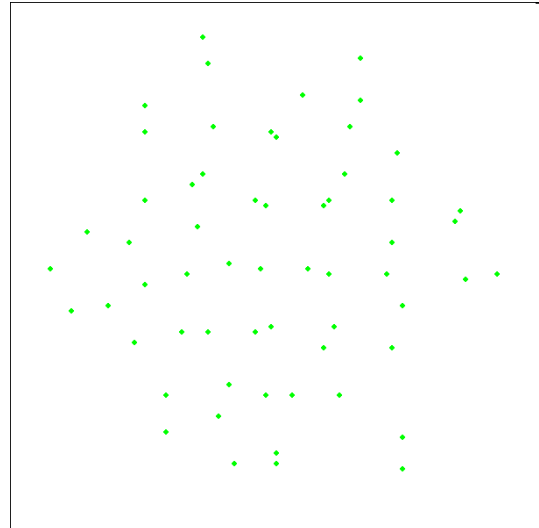
αναβαθμίζεται η ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχει στα γειτονικά του άτομα

6.2 Εξομοίωση

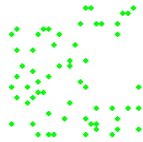
Κατά την εξομοίωση σε κάθε χρονική στιγμή επιλέγεται τυχαία ένα τα άτομα και αποφασίζει την επόμενη κίνησή του.

6.2.1 Ένα είδος

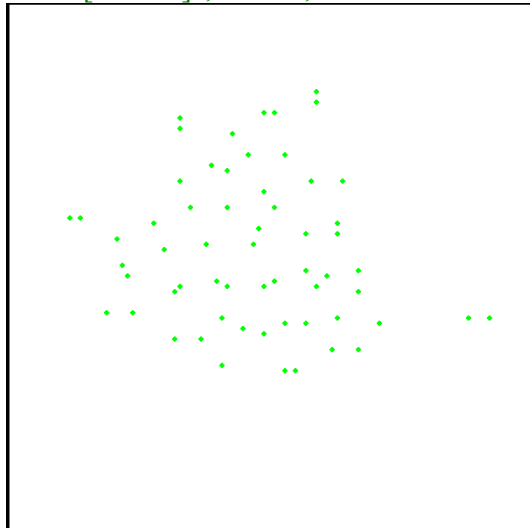
$F=[0 \ 1 \ 0]^T$, $N=60$ (ο πληθυσμός των ατόμων του είδους αυτού) $t=0$



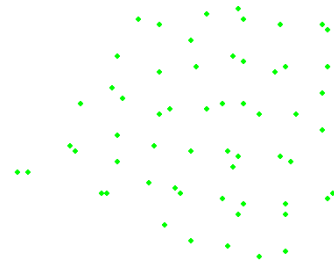
$T=[0 \ 0.6 \ 0]^T$, $R_F=10$, $R_E=4$. $t=8000$



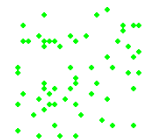
$T=[0 \ 0.4 \ 0]^T$, $R_F=10$, $R_E=4$. $t=5000$



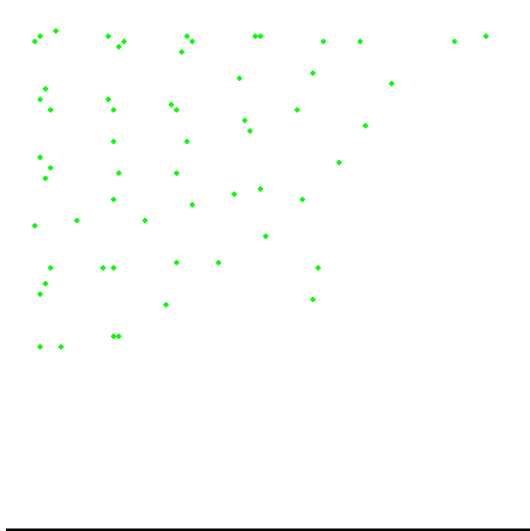
$T=[0 \ 0.4 \ 0]^T$, $R_F=10$, $R_E=6$. $t=8000$



$t=0$



$T=[0 \ 0.4 \ 0]^T$, $R_F=10$, $R_E=6$. $t=8000$



Από τις παραπάνω δοκιμές είναι εμφανής η λειτουργία της προσπάθειας του ατόμου για την εξασφάλιση του πεδίου ως ελκτική δύναμη μεταξύ των ατόμων. Αντίστοιχα η συλλογή ενέργειας λειτουργεί ως απωστική δύναμη. Η ελκτική δύναμη που ασκεί η εξασφάλιση του πεδίου αυξάνεται με την άνοδο του κατωφλίου ικανοποίησης. Από την άλλη όσο αυξάνεται η περιοχή συγκομιδής του ατόμου αυξάνεται η διάθεση του για ατομικότητα και απομακρύνεται από τα γειτονικά του.

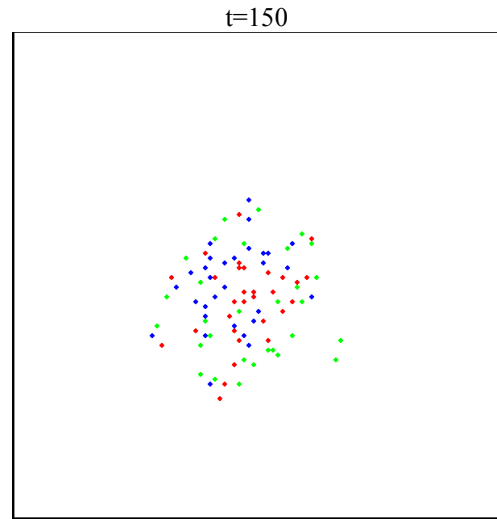
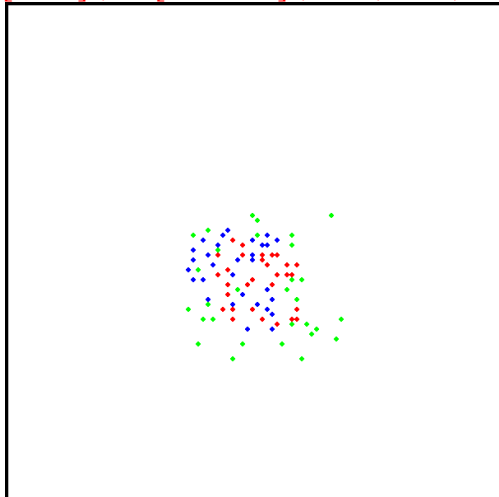
Η χωρική κατανομή των ατόμων είναι δυνατόν να ελεγχθεί μέσω των παραμέτρων της συμπεριφοράς τους.

6.2.2 Τρία είδη ίσοι πληθυσμοί

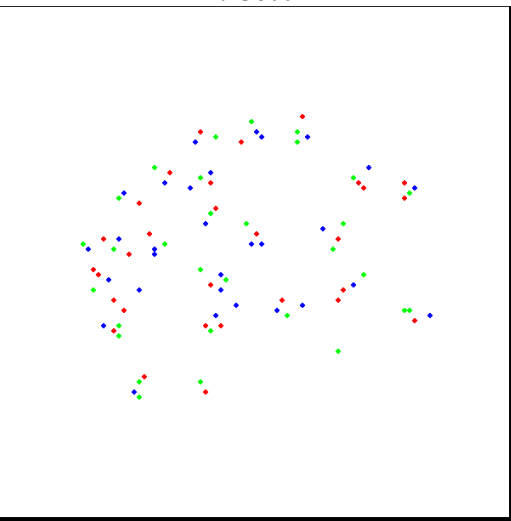
$F=[1 \ 0 \ 0]^T$, $T=[0 \ 0.2 \ 0.2]^T$, $R_F=5, R_E=2$, $N=30$

$F=[0 \ 1 \ 0]^T$, $T=[0.2 \ 0 \ 0.2]^T$, $R_F=5, R_E=2$, $N=30$

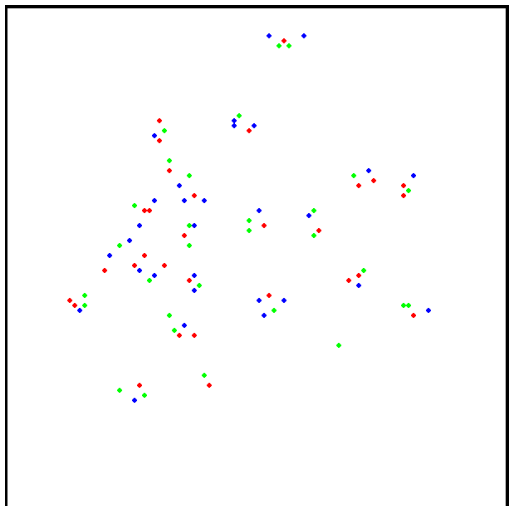
$F=[0 \ 0 \ 1]^T$, $T=[0.2 \ 0.2 \ 0]^T$, $R_F=5, R_E=2$, $N=30$



t=3800



t=3800

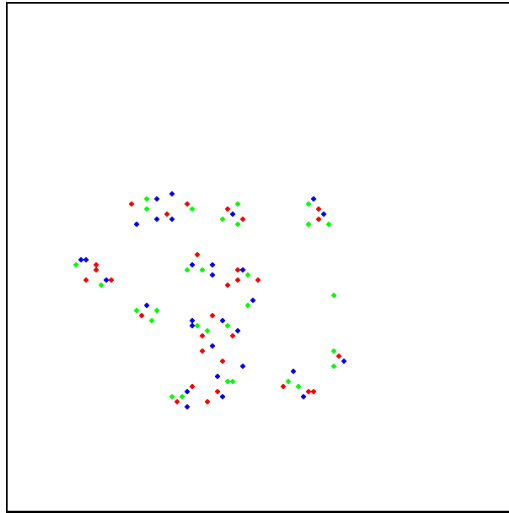


t=70000

$F=[1 \ 0 \ 0]^T$, $T=[0 \ 0.4 \ 0.4]^T$, $R_F=5, R_E=2$, $N=30$

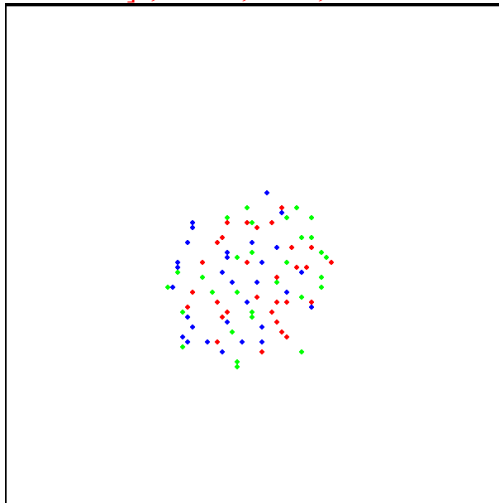
$F=[0 \ 1 \ 0]^T$, $T=[0.4 \ 0 \ 0.4]^T$, $R_F=5, R_E=2$, $N=30$

$F=[0 \ 0 \ 1]^T$, $T=[0.4 \ 0.4 \ 0]^T$, $R_F=5, R_E=2$, $N=30$

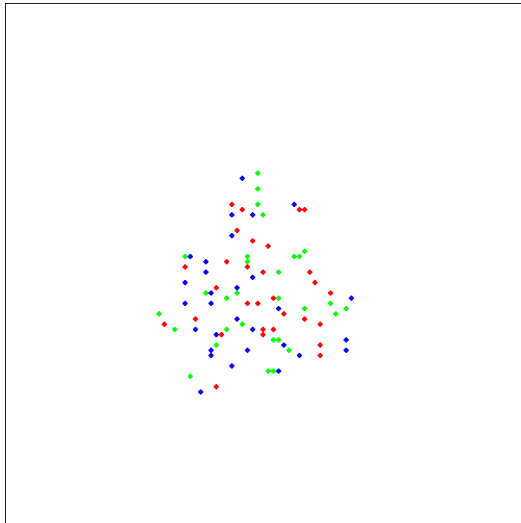


t=25000

$$\begin{aligned} F &= [1 \ 0 \ 0]^T, T = [0 \ 0.2 \\ &0.2]^T, R_F = 10, R_E = 2, N = 30 \\ F &= [0 \ 1 \ 0]^T, T = [0.2 \ 0 \\ &0.2]^T, R_F = 10, R_E = 2, N = 30 \\ F &= [0 \ 0 \ 1]^T, T = [0.2 \ 0.2 \\ &0]^T, R_F = 10, R_E = 2, N = 30 \end{aligned}$$

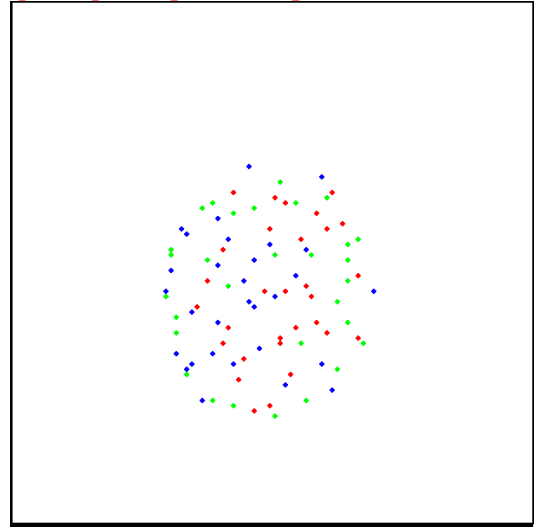


t=7000

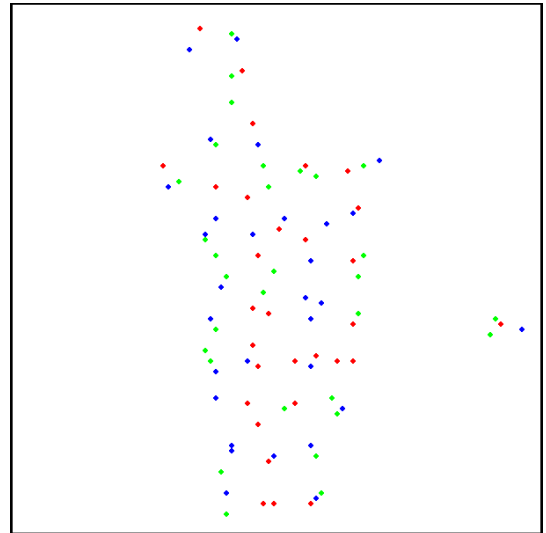


t=28000

$$\begin{aligned} F &= [1 \ 0 \ 0]^T, T = [0 \ 0.2 \ 0.2]^T, R_F = 10, R_E = 4, N = 30 \\ F &= [0 \ 1 \ 0]^T, T = [0.2 \ 0 \ 0.2]^T, R_F = 10, R_E = 4, N = 30 \\ F &= [0 \ 0 \ 1]^T, T = [0.2 \ 0.2 \ 0]^T, R_F = 10, R_E = 4, N = 30 \end{aligned}$$



t=1400



t=22000

Από τις παραπάνω δοκιμές είναι εμφανές και ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό η εμβέλεια του πεδίου που παράγει κάθε άτομο. Η εμβέλεια αυτή καθορίζει τη γειτονιά του τα άλλα άτομα που αλληλεπιδρά. Στην περίπτωση που οι γειτονιές είναι μικρές παρατηρείται οι δημιουργία μικρότερων υποομάδων (clusters) ανεξαρτήτως της ισχύος των ελκτικών δυνάμεων.

Αν θεωρήσουμε ότι τα άτομα αποτελούν τους κόμβους ενός γράφου και οι ακμές συνδέουν τους κόμβους τα γειτονικών ατόμων. Η συνεκτικότητα του γράφου

αυξάνεται όσο διευρύνεται η γειτονιά του ατόμου. Με την κίνησή τους τα άτομα μεταβάλλουν την γειτονιά τους, στο γράφο καταργούνται και δημιουργούνται νέες ακμές. Κατά τη διαδικασία αυτή είναι πιθανό (ιδιαίτερα αν τα άτομα δεν έχουν πολλούς γείτονες) το γράφος να διαχωριστεί σε μη συνεκτικούς υπογράφους (να μην υπάρχει μονοπάτι να συνδέει κάθε άτομο με οποιαδήποτε άλλο). Στο χώρο αυτό θα εμφανιστεί με την δημιουργία υποομάδων.

Όταν αυξάνεται η εμβέλεια του πεδίου κάθε ατόμου, διευρύνεται η γειτονιά του, ενισχύεται η συνεκτικότητα του γράφου, τότε χωρίς την ύπαρξη ισχυρών ελκτικών δυνάμεων και την ύπαρξη ισχυρών απωστικών, τα άτομα καταφέρνουν να δημιουργήσουν μια ενιαία ομάδα.

Τέλος, η ανάγκη των ατόμων για πόρους που δεν διαθέτουν τα αναγκάζει κάθε σε ομάδα που σχηματίζουν οι γειτονίες να αποτελούνται από άτομα όλων των ειδών.

Θεωρώντας ότι το πεδίο αποτελεί ένα χώρο προτύπων (χαρακτηριστικών) και τα άτομα εκπροσωπούν δεδομένα συσχετισμένα μεταξύ τους (με βάση το είδος τους και τις ελκτικές και απωστικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ τους). Στην περίπτωση που τα άτομα δημιουργούν ξεχωριστά cluster ενώ αρχικά όλα αποτελούσαν μια κοινή ομάδα, παρατηρούμε το μετασχηματισμό του χώρου προτύπων χαρακτηριστικών έτσι ώστε τα δεδομένα-άτομα που αρχικά ανήκαν σε μία τάξη (πιθανώς λόγω επικαλύψεων), οι τάξεις να διαχωρίζονται να αποκτούν σαφή όρια. Δηλαδή το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επεξεργασία δεδομένων το clustering συσχετισμένων δεδομένων (διαφορετικών ειδών) και τη διαμόρφωση διακριτών τάξεων.

Η παραπάνω διαδικασία είναι μια παραλλαγή της ανάλυσης σε πρωτεύουσες συνιστώσες ή διακριτική ανάλυση, όπου τα δεδομένα σε έναν πίνακα αντιπροσωπεύουν τα βάρη (αποστάσεις) των ακμών μεταξύ των ατόμων. Η διάσπαση της αρχικής ομάδας σε clusters, δηλαδή στη δημιουργία πολλαπλών συνεκτικών υπογράφων. Η

μεταβολή στην τοπολογία αντικατοπτρίζονται στο πίνακα των δεδομένων με τη μεταβολή του έτσι ώστε να τα ιδιοδιανύσματα με μικρή τιμή (εκεί που «σπάει ο γράφος») να αποκτήσουν μηδενικές ιδιοτιμές. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται και στην ανάλυση των δεδομένων προσπαθώντας να τα αναπαραστήσει χρησιμοποιώντας τα ιδιοδιανύσματα με τις ισχυρότερες ιδιοτιμές.

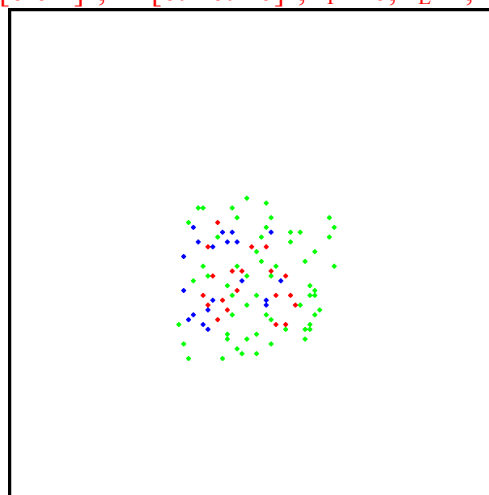
6.2.3 Ανόμοιοι πληθυσμοί τριών ειδών

Παρακάτω οι πληθυσμοί των τριών ειδών διαφέρουν όπως και η συμπεριφορά κάθε είδους. Τα «πράσινα» άτομα που αποτελούν την πλειοψηφία και έχουν μεγαλύτερη περιοχή συγκομιδής εξωθούνται στην περιφέρεια. Στο εξωτερικό του σχηματισμού δεν υπάρχει συνωστισμός ατόμων όπως στο εσωτερικό, όπου και εξασφαλίζουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Τα υπόλοιπα άτομα που αποτελούν τη μειοψηφία και παρέχουν περισσότερους πόρους από αυτούς που απαιτούν και δεν έχουν έντονη ανάγκη για ενέργεια, συγκεντρώνονται στο εσωτερικό όπου οι πόροι τους είναι διαθέσιμοι στη περιφέρεια. Η συγκέντρωση των πόρων στο κέντρο οδηγεί τα «πράσινα» άτομα να σχηματίζουν ένα δακτύλιο.

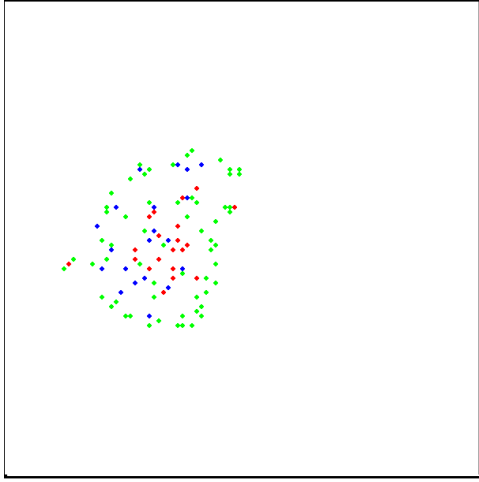
$F=[1 \ 0 \ 0]^T$, $T=[0 \ 0.4 \ 0.2]^T$, $R_F=10$, $R_E=2$, $N=20$

$F=[0 \ 1 \ 0]^T$, $T=[0.2 \ 0 \ 0.2]^T$, $R_F=5$, $R_E=4$, $N=60$

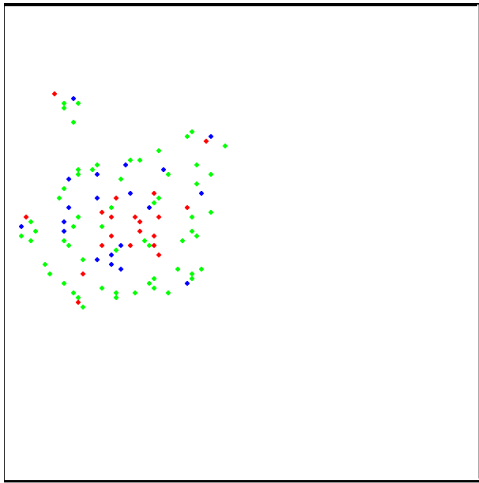
$F=[0 \ 0 \ 1]^T$, $T=[0.2 \ 0.4 \ 0]^T$, $R_F=10$, $R_E=2$, $N=20$



$t=100$

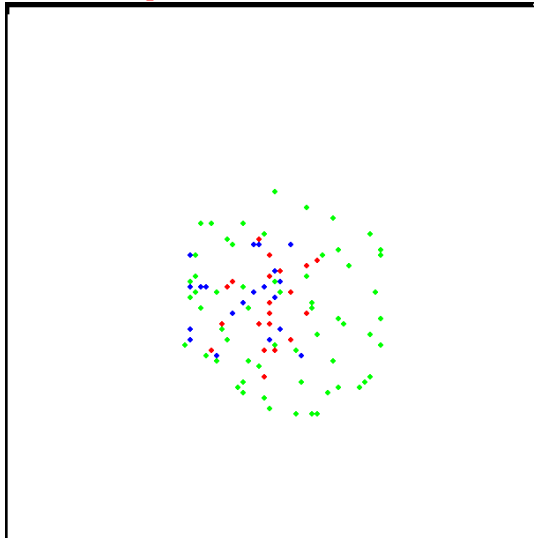


t=7800

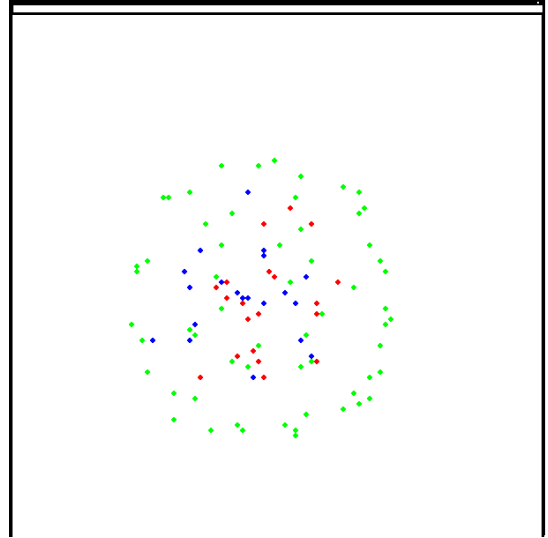


t=3300

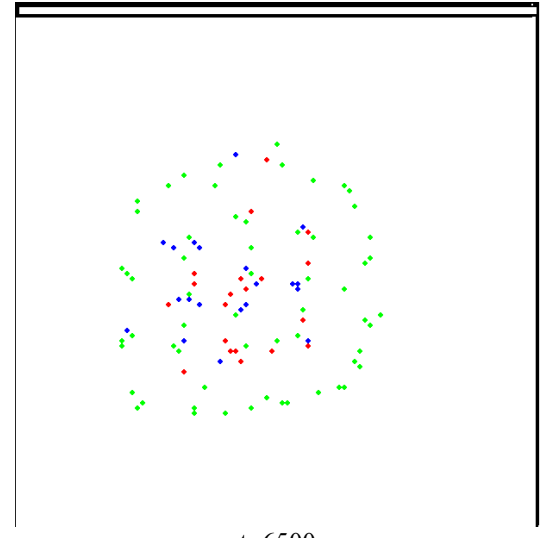
$F=[1 \ 0 \ 0]^T, T=[0 \ 0.2 \ 0.2]^T, R_F=20, R_E=2, N=20$
 $F=[0 \ 1 \ 0]^T, T=[0.2 \ 0 \ 0.2]^T, R_F=5, R_E=6, N=60$
 $F=[0 \ 0 \ 1]^T, T=[0.2 \ 0.2 \ 0]^T, R_F=20, R_E=2, N=20$



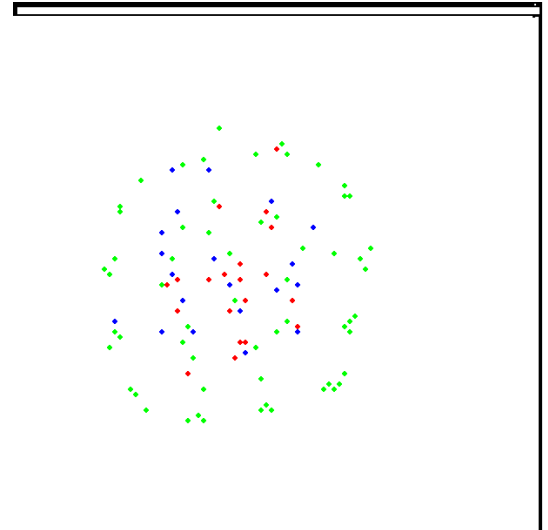
t=500



t=2500

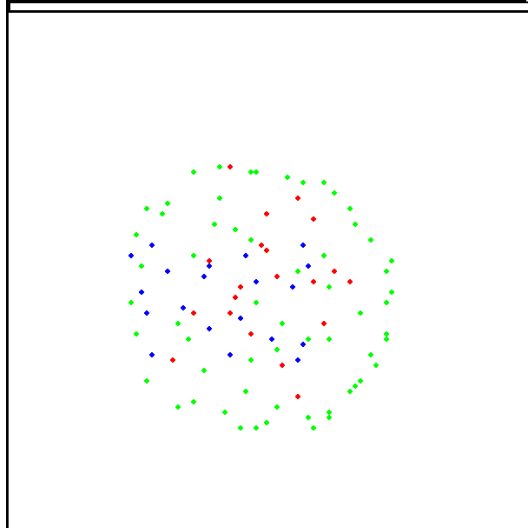


t=6500

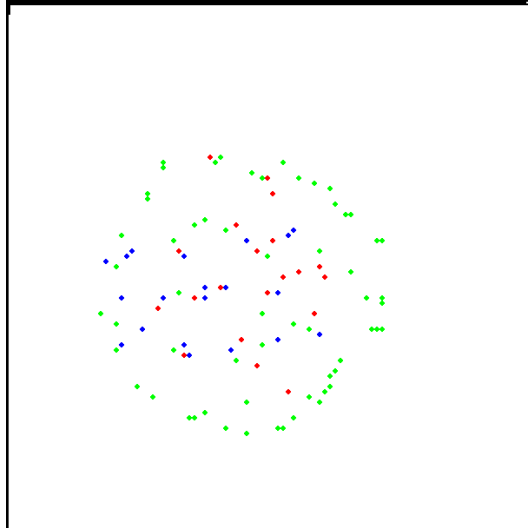


t=11500

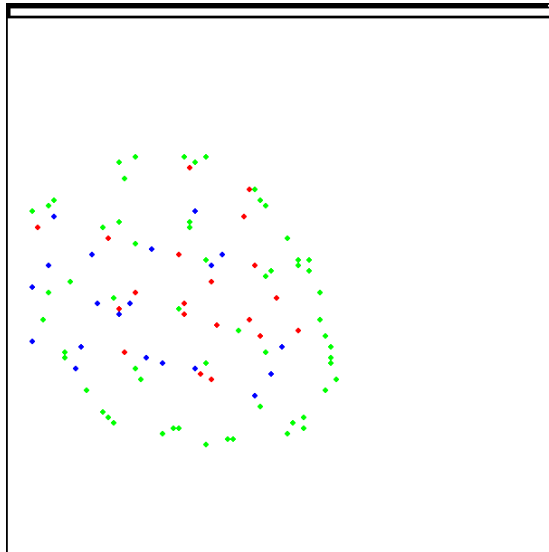
$$\begin{aligned} &F=[1 \ 0 \ 0]^T, T=[0 \ 0.20.2]^T, R_F=20, R_E=4, N=20 \\ &F=[0 \ 1 \ 0]^T, T=[0.2 \ 0 \ 0.2]^T, R_F=5, R_E=6, N=60 \\ &F=[0 \ 0 \ 1]^T, T=[0.2 \ 0.20]^T, R_F=20, R_E=4, N=20 \end{aligned}$$



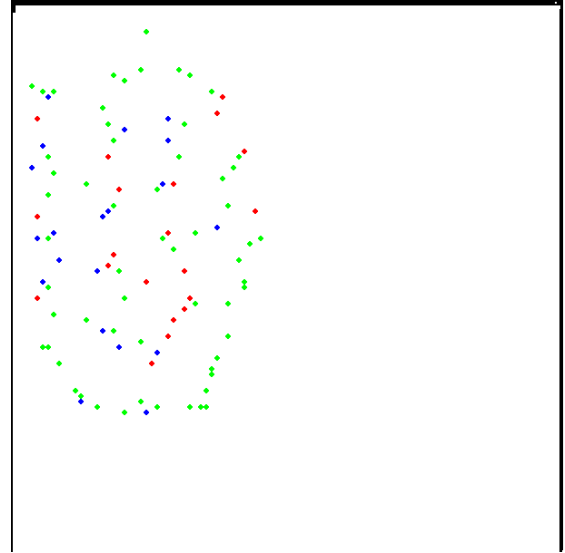
t=1300



t=3700



t=12000



t=2700

6.2.3.1 Μεταβλητός συντελεστής k

Ο συντελεστής k:

$$F_c(x_c, y_c, a_i) = \frac{1}{\{|x_c - x_a| + |y_c - y_a|\}} k F_a$$

ορίζεται ως:

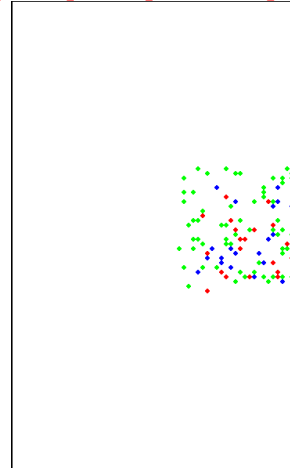
$$k = E_{a_i} = \sum_{\max\{|x_c - x_a|, |y_c - y_a|\} < R_E} E_a(x_c, y_c)$$

η ενέργεια που αποκομίζει το άτομο που βρίσκεται στο κύτταρο (x_a, y_a) αποτελεί το συντελεστή ενίσχυσης του πεδίου που δημιουργεί. Ένα άτομο που συγκεντρώνει υψηλή ενέργεια θεωρείται επιτυχημένο και συνεπώς οι λειτουργίες του είναι πιο αποτελεσματικές, το οποίο εκφράζεται μέσω της ενίσχυσης του πεδίου που δημιουργεί.

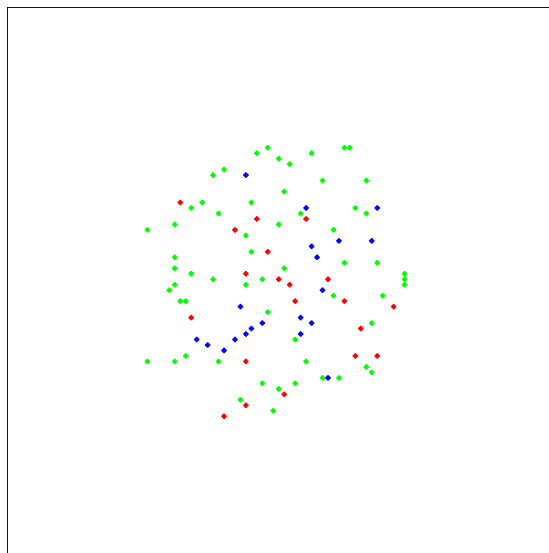
$$F=[1 \ 0 \ 0]^T, T=[0 \ 0.2 \ 0.2]^T, R_F=20, R_E=4, N=20$$

$$F=[0 \ 1 \ 0]^T, T=[0.2 \ 0 \ 0.2]^T, R_F=5, R_E=6, N=60$$

$$F=[0 \ 0 \ 1]^T, T=[0.2 \ 0.2 \ 0]^T, R_F=20, R_E=4, N=20$$



t=0

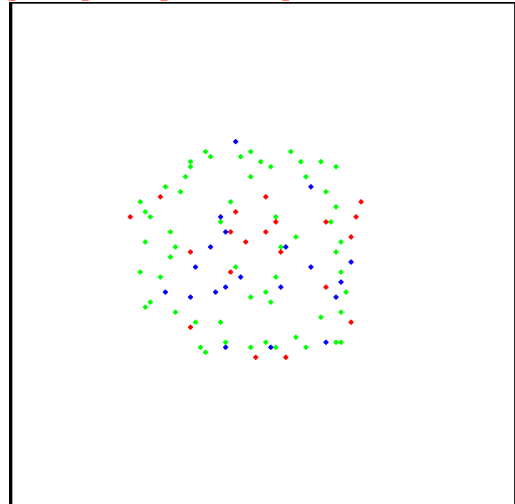


$t=1200$

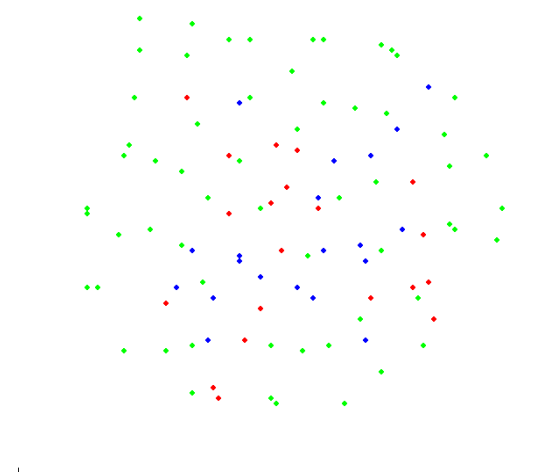
$$F=[1 \ 0 \ 0]^T, T=[0 \ 0.80.8]^T, R_F=20, R_E=4, N=20$$

$$F=[0 \ 1 \ 0]^T, T=[0.8 \ 0 \ 0.8]^T, R_F=5, R_E=6, N=60$$

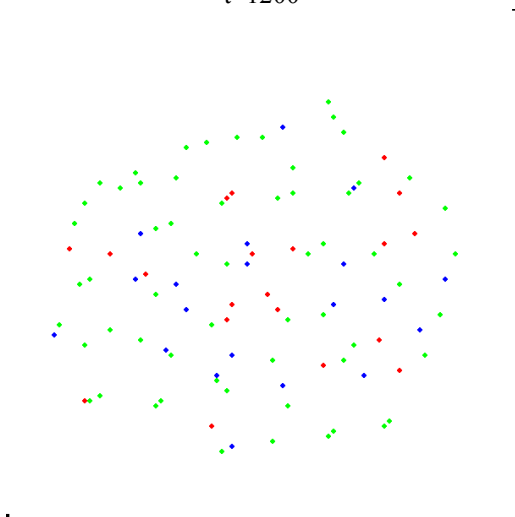
$$F=[0 \ 0 \ 1]^T, T=[0.8 \ 0.8 \ 0]^T, R_F=20, R_E=4, N=20$$



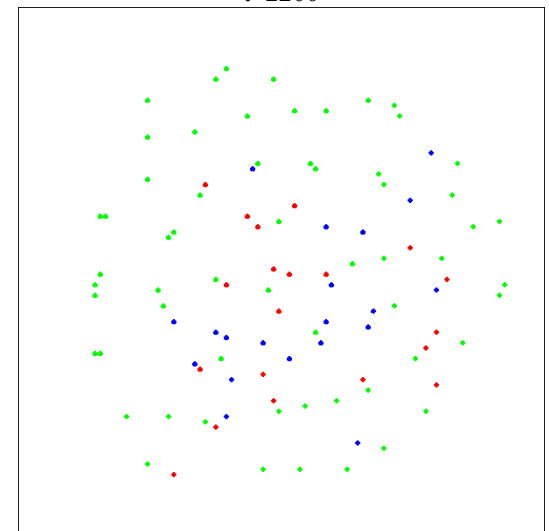
$t=1200$



$t=2200$



$t=12000$



$t=12500$

Η χρήση αυτής της θετικής ανάδρασης δημιουργεί «εξογκώματα», μεταβλητή χωρική κατανομή των ατόμων. Θα είχε χρησιμότητα στην ανάδειξη περιοχών που παρέχουν περισσότερη ενέργεια, διότι να επιτάχυνε την συγκέντρωση των ατόμων σε αυτή την περιοχή.

6.2.3.2 Βλάβες ατόμων

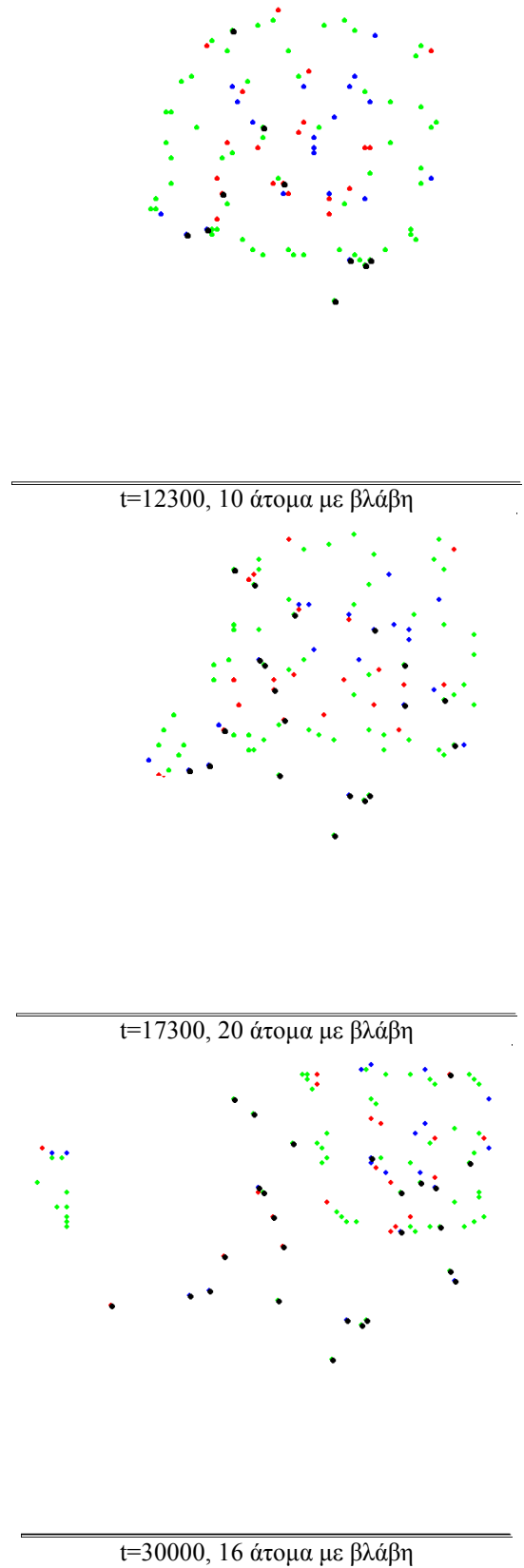
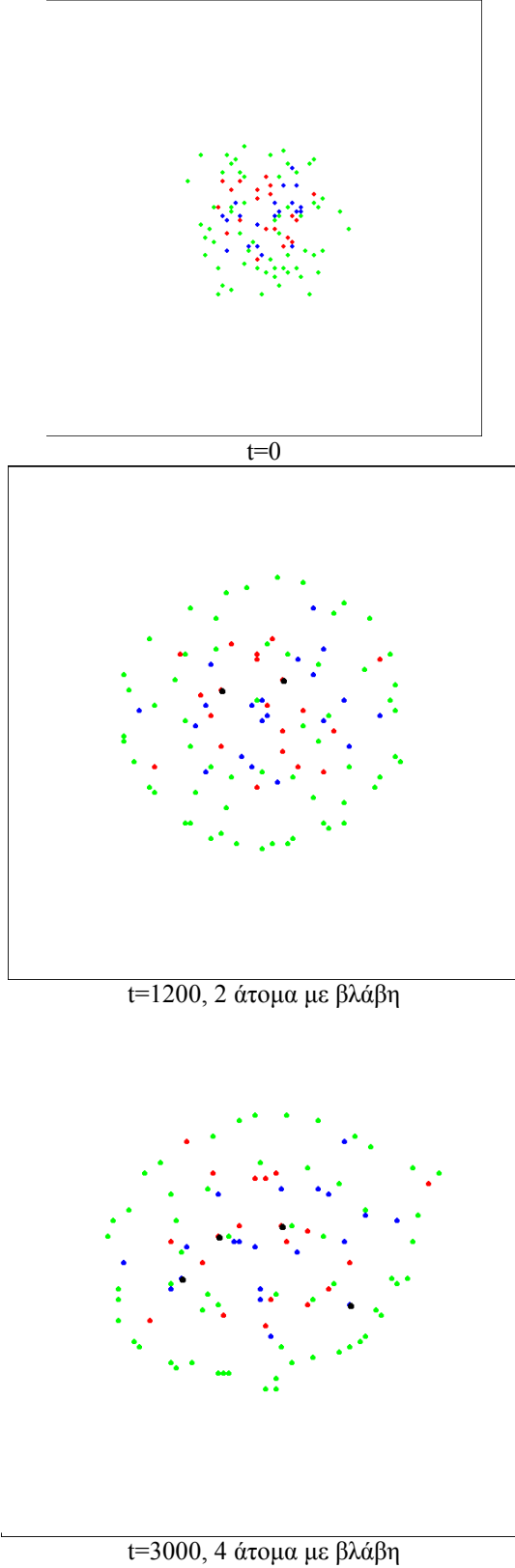
Κάθε χρονική στιγμή η πιθανότητα βλάβης ενός ατόμου και η παύση της λειτουργίας του είναι 0,001 και η πιθανότητα κάποιο άτομο με βλάβη να επανέλθει είναι 0,0001. Όταν ένα άτομο δεν λειτουργεί δεν παράγει πεδίο δεν κινείται αλλά καταλαμβάνει το κύτταρο που βρισκόταν

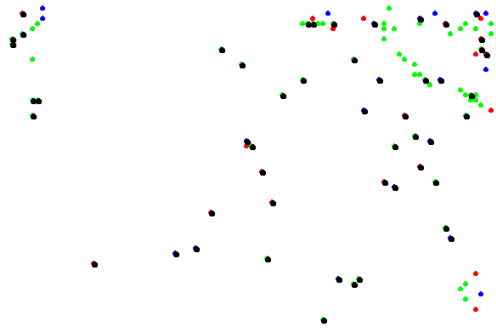
όταν έπαθε τη βλάβη (συμβολίζονται με μαύρο χρώμα).

$F=[1\ 0\ 0]^T$, $T=[0\ 0.20.2]^T$, $R_F=20$, $R_E=4$, $N=20$

$F=[0\ 1\ 0]^T$, $T=[0.2\ 0\ 0.2]^T$, $R_F=5$, $R_E=6$, $N=60$

$F=[0\ 0\ 1]^T$, $T=[0.2\ 0.20]^T$, $R_F=20$, $R_E=4$, $N=20$

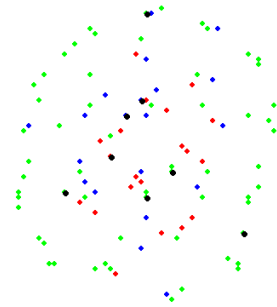




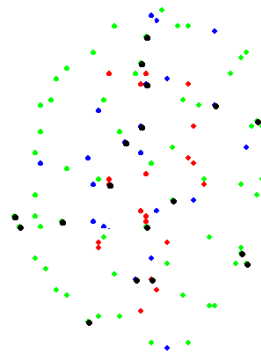
$t=59000$, 51 άτομα με βλάβη

Σε αυτήν την περίπτωση δοκιμάζεται η ευρωστία του μοντέλου στην ύπαρξη αστοχιών. Στην πραγματικότητα είναι βέβαιη η εμφάνιση βλαβών στις συσκευές που υλοποιούν τα άτομα αυτά. Χάρη στον καταναμημένο έλεγχο δεν καταρρέει το όλο σύστημα αλλά προσαρμόζεται στις νέες συνθήκες. Η διαστάσεις του σχηματισμού των ατόμων συρρικνώνονται καθώς άτομα παύουν να λειτουργούν και ο πληθυσμός ελαττώνεται. Το σύστημα καταρρέει όταν η πλειοψηφία του αρχικού πληθυσμού παύση να λειτουργεί οπότε διαλύεται και γράφος τα άτομα απομονώνονται και παύουν να δρουν και αυτά.

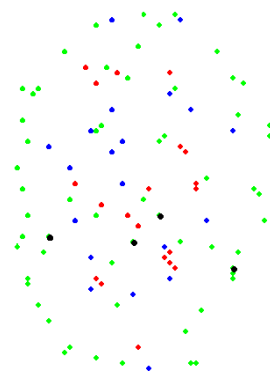
Κάθε χρονική στιγμή η πιθανότητα βλάβης ενός ατόμου και η παύση της λειτουργίας του είναι 0,01 και η πιθανότητα κάποιο άτομο με βλάβη να επανέλθει είναι 0,009. Σε αυτήν περίπτωση αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης βλαβών αλλά και η πιθανότητα αποκατάστασης της βλάβης. Δημιουργείται ένα ισχυρά μεταβαλλόμενο περιβάλλον στο οποί καλείται να προσαρμοστεί ο πληθυσμός των ατόμων.



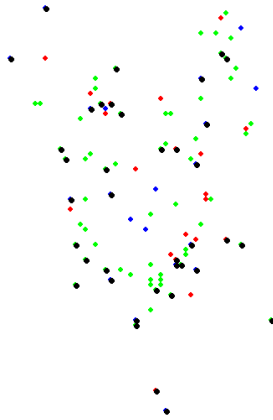
$t=2000$, 7 άτομα με βλάβη



$t=3700$, 20 άτομα με βλάβη



$t=5300$, 6 άτομα με βλάβη



6.2.4.1 Κίνηση προς τα αριστερά

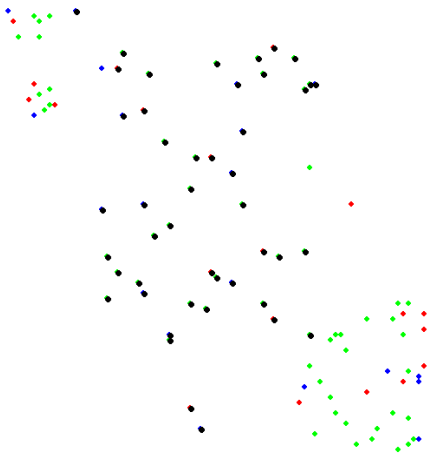
Όταν το άτομο εξασφαλίζει τις ανάγκες του και η ενέργεια που συγκεντρώνει είναι μεγαλύτερη του 3 τότε εάν το αριστερό σε αυτό κύτταρο είναι κενό μετακινείται σε αυτό.

$$F=[1 \ 0 \ 0]^T, T=[0 \ 0.8 \ 0.2]^T, R_F=20, R_E=4, N=20$$

$$F=[0 \ 1 \ 0]^T, T=[0.2 \ 0 \ 0.2]^T, R_F=10, R_E=5, N=60$$

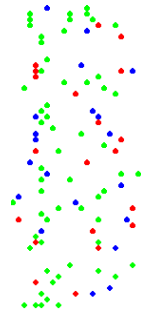
$$F=[0 \ 0 \ 1]^T, T=[0.2 \ 0.8 \ 0]^T, R_F=20, R_E=4, N=20$$

t=26300, 39 άτομα με βλάβη

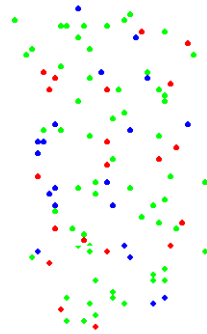


t=44700, 57 άτομα με βλάβη

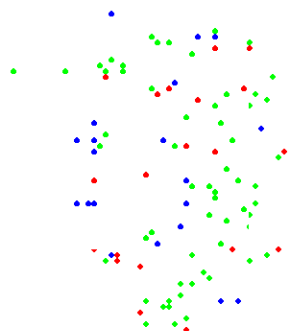
Το σύστημα ανταποκρίνεται επιτυχώς λόγω όμως των ραγδαίων μεταβολών δεν συγκλίνει στην χωρική κατανομή που θα είχε χωρίς την επίδραση των μεταβολών. Η κατανομή του παρουσιάζει ανομοιογένεια, έντονες διαφοροποιήσεις στην συνεκτικότητα του γράφου. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει ένα τυχαίος γράφος που μεταβάλλονται μόνο οι ακμές του αλλά και κόμβοι μαζί με τις αντίστοιχες ακμές.



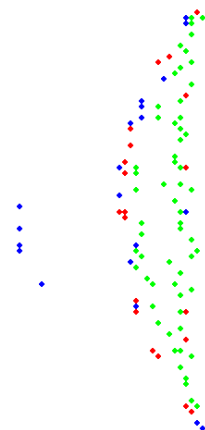
t=0



t=1500

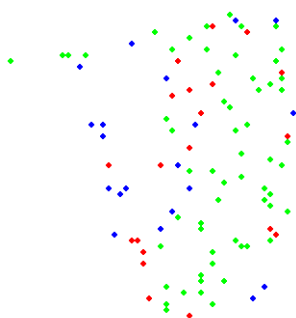


$t=4000$

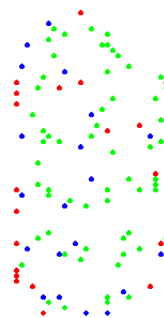


$t=20000$

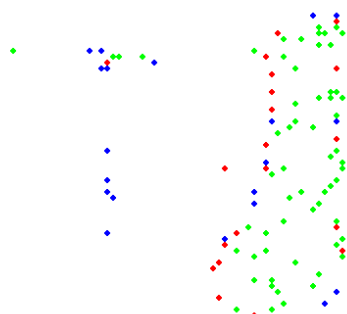
Το άτομο μετακινείται όταν η ενέργεια που συγκεντρώνει είναι μεγαλύτερη του 4.



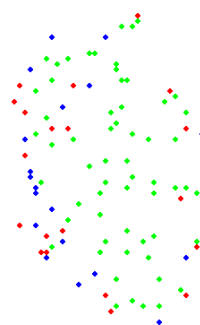
$t=6000$



$t=2300$

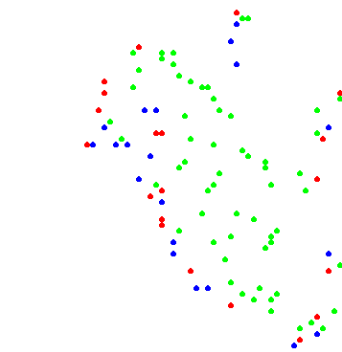


$t=10500$

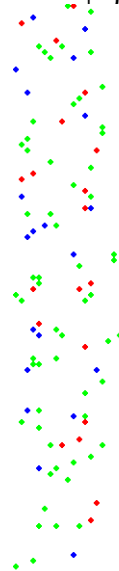


$t=8000$

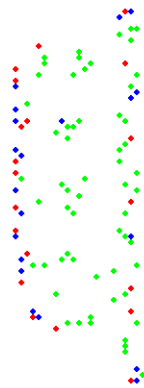
Διαφορετική αρχική κατανομή, επιμήκης.



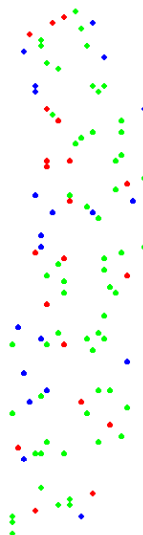
$t=17000$



$t=0$

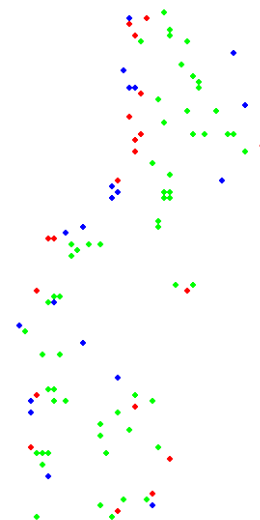


$t=23000$

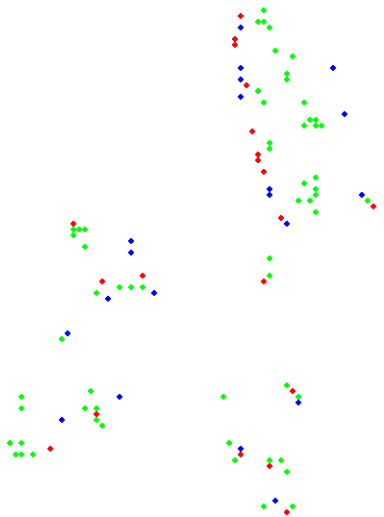


$t=1500$

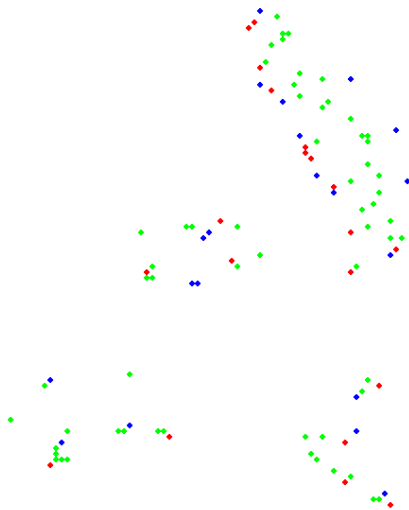
Η αύξηση του κατωφλίου που επιτρέπει στο άτομο την κίνησή του προς τα αριστερά επιτρέπει-επιβάλλει στο άτομο για να συγκεντρώσει την απαιτούμενη ενέργεια να διαταχθεί καλύτερα στο χώρο. Η κίνηση όμως έτσι γίνεται πιο αργή αλλά διατηρείται η ομάδα πιο συμπαγής. Η ταχύτητα κίνησης επηρεάζει το ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται ο γράφος, αν τον αντιμετωπίσουμε ως ένα τυχαίο γράφο (random graph).



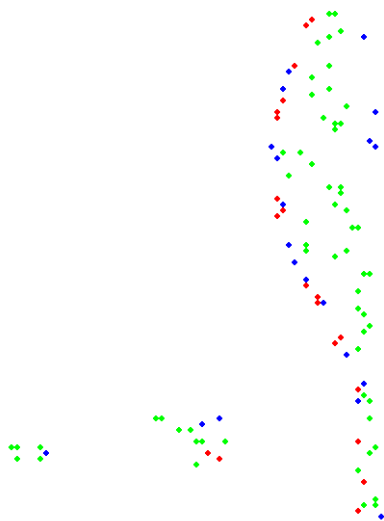
$t=7500$



$t=14500$



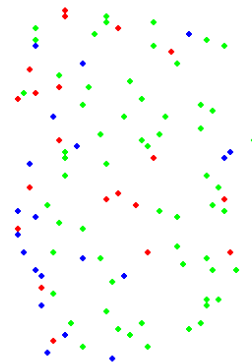
$t=19500$



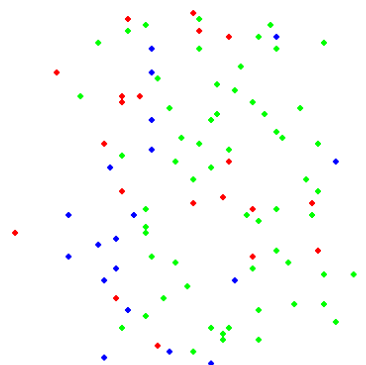
$t=30000$

Με την επιμήκη κατανομή των ατόμων αρχικά, συρρικνώνονται οι γειτονιές των ατόμων. Μειώνεται η συνεκτικότητα του γράφου, ο γράφος μπορεί να είναι αρχικά συνεκτικός αλλά όχι πλήρης. Στη εξέλιξη του το σύστημα λόγω αυτού το γεγονός διασπάται σε μικρότερες ομάδες. Τα άτομα που βρίσκονται στο πάνω τμήμα δεν μπορούν να επηρεάσουν την κίνηση αυτών που βρίσκονται κάτω, και αντίστροφα.

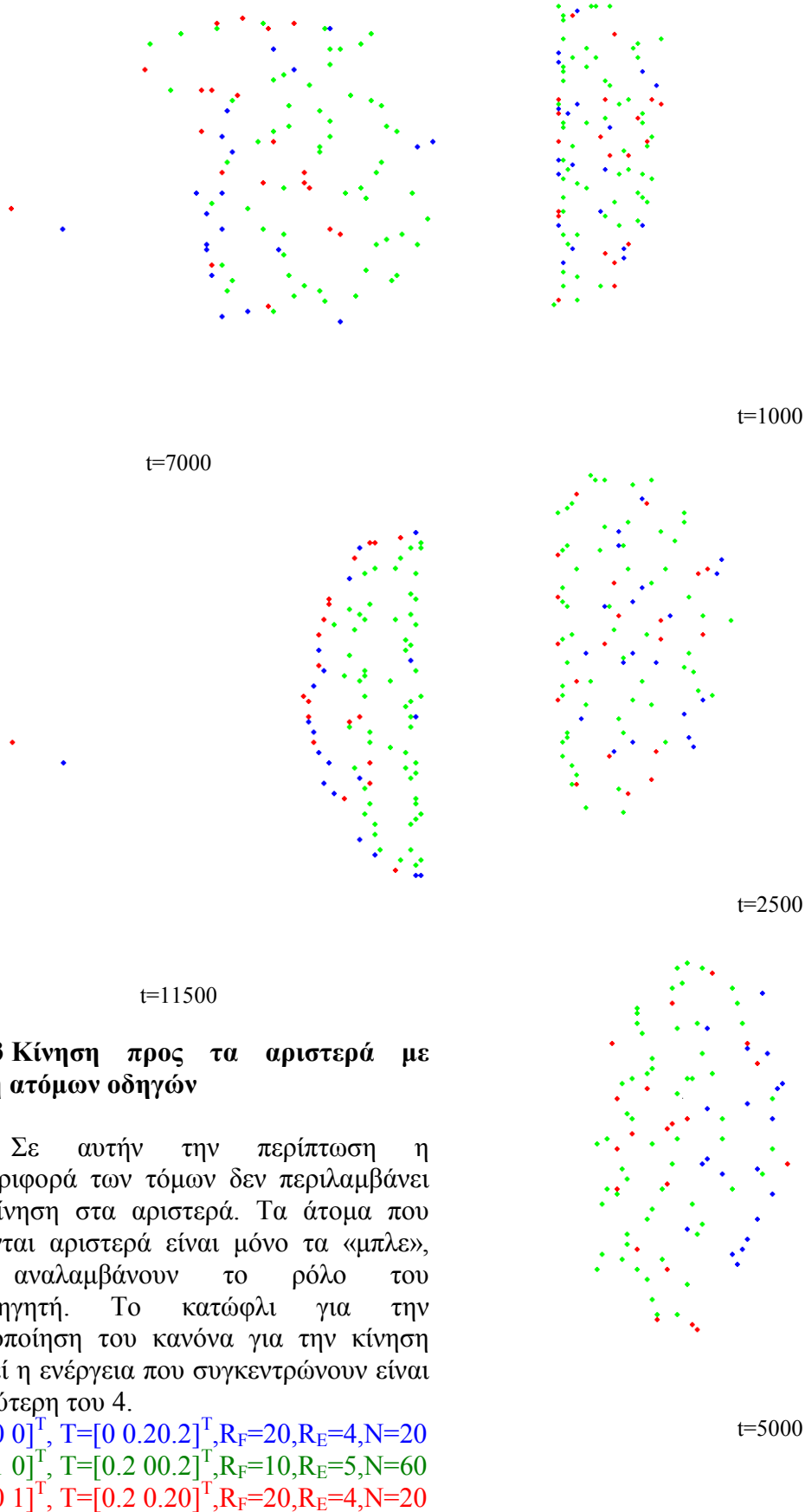
6.2.4.2 Κίνηση με μεταβλητό συντελεστή k .



$t=3000$



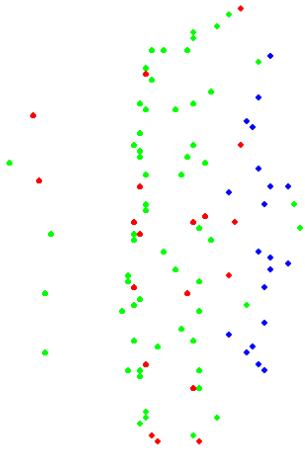
$t=6000$



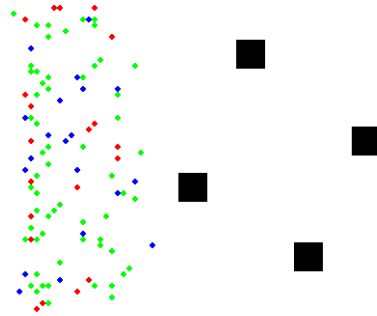
6.2.4.3 Κίνηση προς τα αριστερά με χρήση ατόμων οδηγών

Σε αυτήν την περίπτωση η συμπεριφορά των τόμων δεν περιλαμβάνει την κίνηση στα αριστερά. Τα άτομα που κινούνται αριστερά είναι μόνο τα «μπλε», που αναλαμβάνουν το ρόλο του καθοδηγητή. Το κατώφλι για την ενεργοποίηση του κανόνα για την κίνηση απαιτεί η ενέργεια που συγκεντρώνουν είναι μεγαλύτερη του 4.

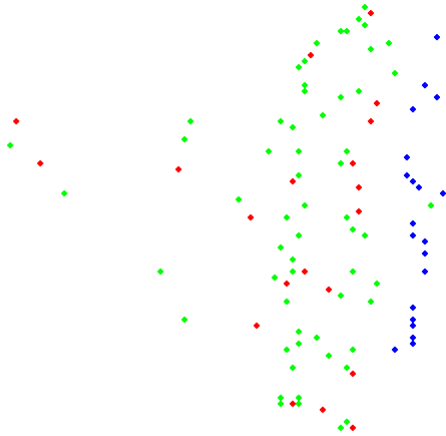
$F=[1 \ 0 \ 0]^T$, $T=[0 \ 0.20.2]^T$, $R_F=20, R_E=4, N=20$
 $F=[0 \ 1 \ 0]^T$, $T=[0.2 \ 00.2]^T$, $R_F=10, R_E=5, N=60$
 $F=[0 \ 0 \ 1]^T$, $T=[0.2 \ 0.20]^T$, $R_F=20, R_E=4, N=20$



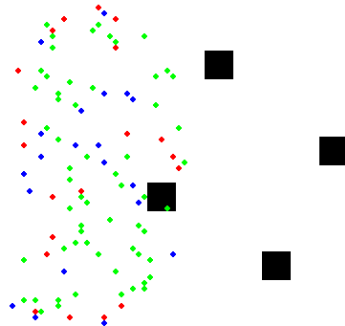
t=5800



t=500



t=1200

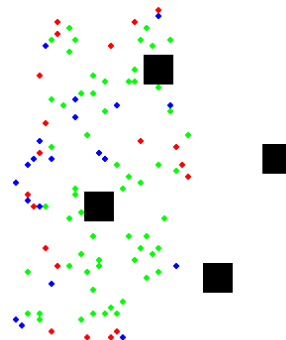


t=1500

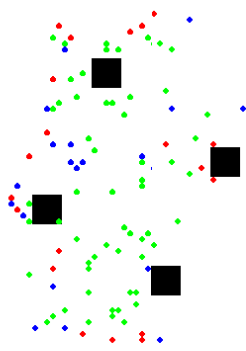
6.2.5.1 Κίνηση ανάμεσα από εμπόδια

Τα άτομα που συγκεντρώνουν ενέργεια μεγαλύτερη του 3 κινούνται αριστερά. Εμπόδια είναι κατειλημμένα κύτταρα με μηδενική ενέργεια.

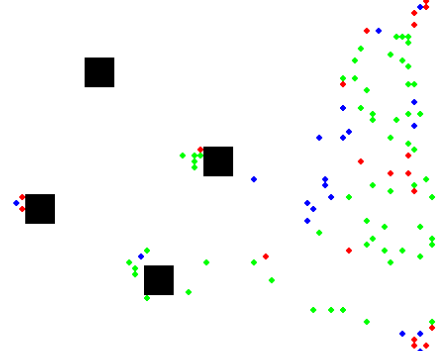
$F=[1 \ 0 \ 0]^T$, $T=[0 \ 0.20.2]^T$, $R_F=20, R_E=4, N=20$
 $F=[0 \ 1 \ 0]^T$, $T=[0.4 \ 00.4]^T$, $R_F=10, R_E=5, N=60$
 $F=[0 \ 0 \ 1]^T$, $T=[0.2 \ 0.20]^T$, $R_F=20, R_E=4, N=20$



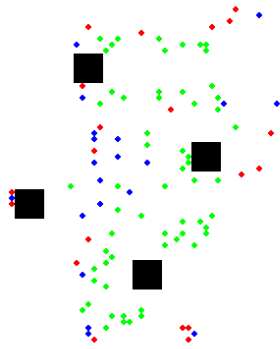
t=3000



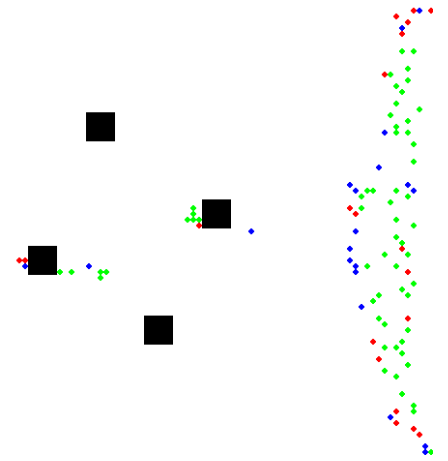
t=5000



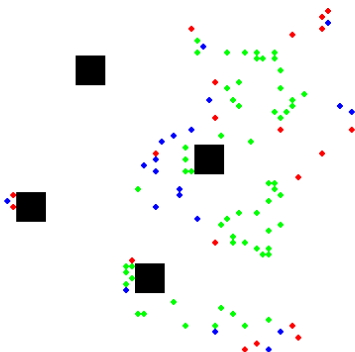
t=11500



t=6000



t=20000



t=8500

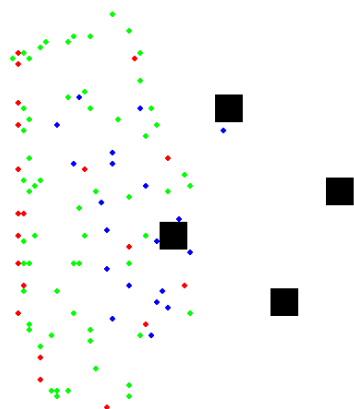
6.2.5.2 Κίνηση ανάμεσα από εμπόδια με την καθοδήγηση ατόμων

Τα άτομα που κινούνται αριστερά είναι τα μπλε όταν η ενέργεια που συγκεντρώνουν είναι μεγαλύτερη του 2. Για να αποφευχθεί η παλινδρόμηση των οδηγών δεν τους επιτρέπεται να κινηθούν προς τα πίσω για να καλύψουν τις ανάγκες τους αλλά πρέπει να περιμένουν να τους φτάσουν τα άλλα άτομα.

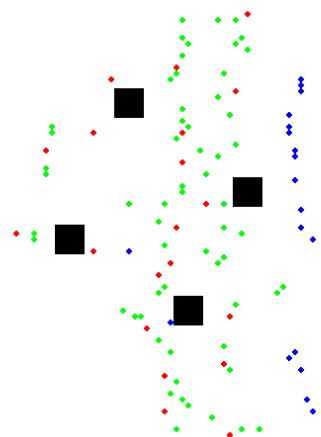
$F=[1 \ 0 \ 0]^T$, $T=[1.5 \ 0.1 \ 0.1]^T$, $R_F=20$, $R_E=6$, $N=20$

$F=[0 \ 1 \ 0]^T$, $T=[1 \ 0 \ 0.2]^T$, $R_F=10$, $R_E=5$, $N=60$

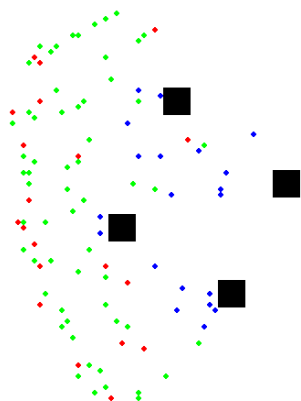
$F=[0 \ 0 \ 1]^T$, $T=[1 \ 0.2 \ 0]^T$, $R_F=20$, $R_E=4$, $N=20$



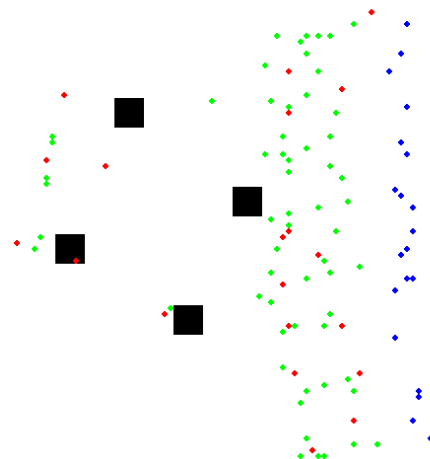
t=2000



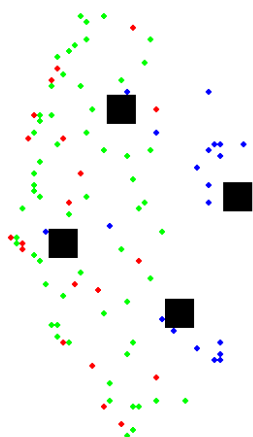
t=9500



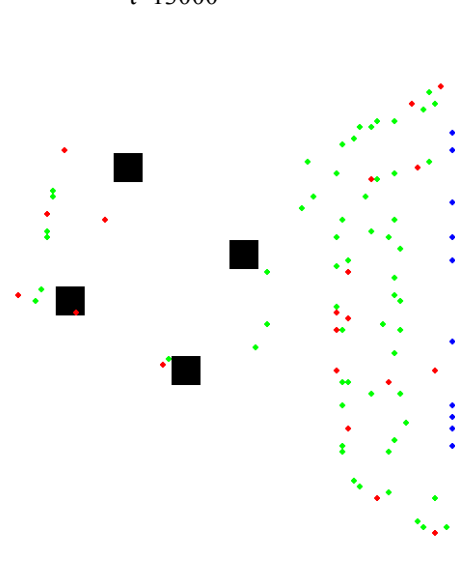
t=4000



t=13000



t=6000

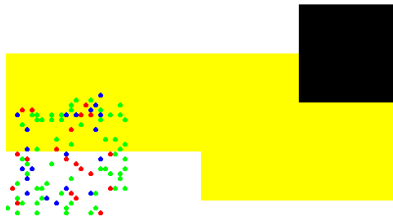


t=18000

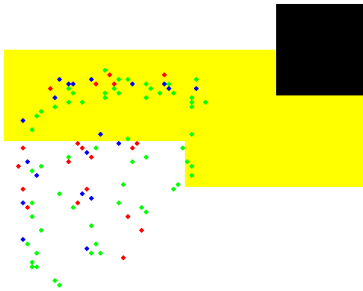
6.2.6 Ακολουθώντας το μονοπάτι

Το μαύρο τετράγωνο αποτελεί εμπόδιο που είναι απροσπέραστο από τα άτομα. Η κίτρινη περιοχή έχει ενέργεια ανά κύτταρο 3, ενώ η υπόλοιπη περιοχή 0.01 (η περιοχή μετά το εμπόδιο και την κίτρινη περιοχή έχει ενέργεια 1 ανά κύτταρο) γεγονός που δεν επιτρέπει στα άτομα που βρίσκονται εκτός της κίτρινης περιοχής να κινηθούν εύκολα αφού πρέπει να συγκεντρώσουν ενέργεια 2 τουλάχιστον.

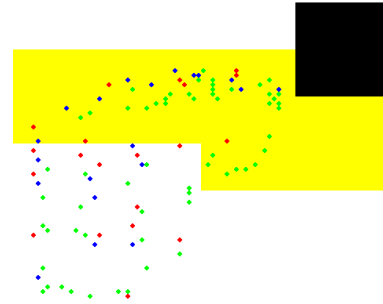
$$\begin{aligned} F &= [1 \ 0 \ 0]^T, T = [0 \ 0.20.2]^T, R_F=20, R_E=4, N=20 \\ F &= [0 \ 1 \ 0]^T, T = [0.2 \ 00.2]^T, R_F=10, R_E=6, N=60 \\ F &= [0 \ 0 \ 1]^T, T = [0.2 \ 0.20]^T, R_F=20, R_E=4, N=20 \end{aligned}$$



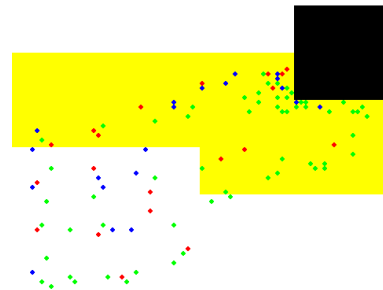
t=0



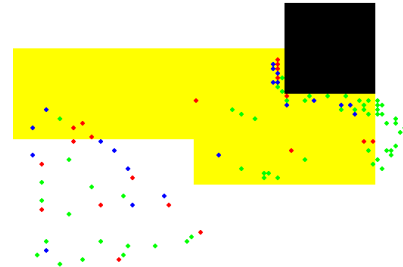
t=2000



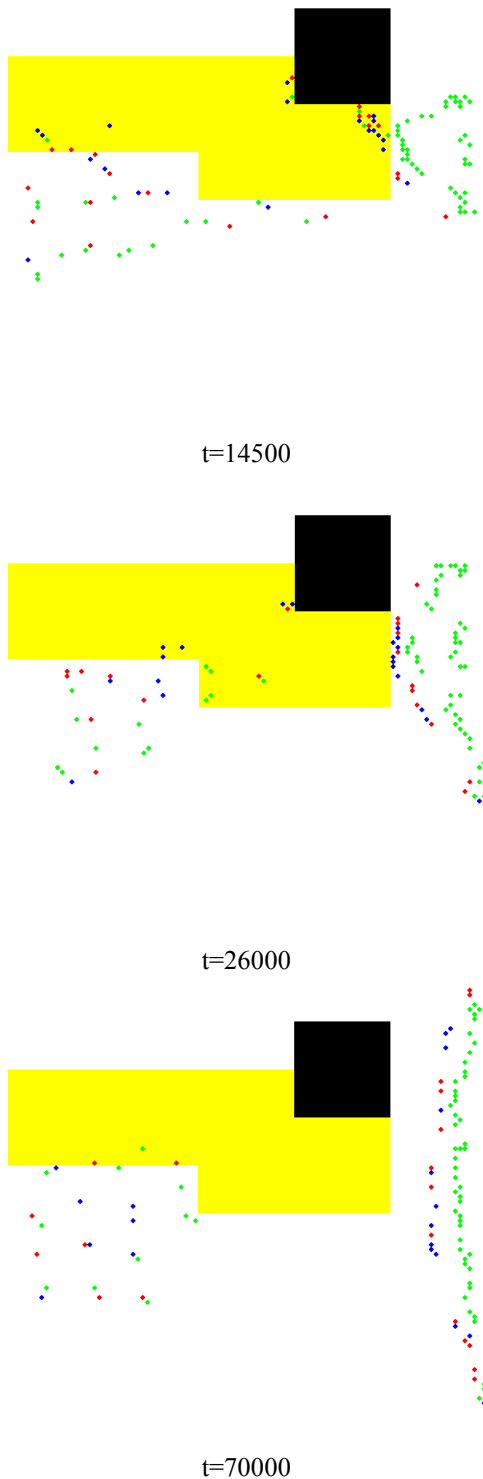
t=3500



t=5500



t=8000



6.3 Συμπεράσματα

Από τα πειράματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι εμφανές, ότι μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά με κατάλληλη επιλογή των κατωφλίων και της γειτονιάς κάθε agent.

Επιτυχία θεωρείται, όλη ομάδα των ρομπότ να κινείται σαν ένα κοπάδι χωρίς να «ξεμένουν» πίσω μέλη της ομάδας.

Όπως είναι γνωστό και παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3 η κινούμενη ομάδα των agent, μπορεί να παρασταθεί από ένα γράφο. Η επιθυμία μας να διατηρηθεί το κοπάδι αντικατοπτρίζεται από τη διατήρηση της συνεκτικότητας του γράφου. Αλγεβρικά, πρέπει η μικρότερη ιδιοτιμή του γράφου να παραμένει μακριά από το μηδέν και κοντά στις υπόλοιπες ιδιοτιμές (= σχεδόν πλήρης γράφος). Οι γράφοι με αυτές τις ιδιότητες χαρακτηρίζονται από τους υψηλούς βαθμούς των κόμβων τους. Με κάθε κόμβο συνδέονται πολλές ακμές, άρα τα ρομπότ να έχουν πολλούς γείτονες.

Στο μοντέλο του swarm-fish τα ρομπότ λόγω της απλότητάς τους, βασίζονται το ένα στο άλλο για τη λειτουργία τους. Διαθέτουν ένα στοιχειώδη μηχανισμό αντίληψης. Το έλλειμμα αυτό αναπληρώνεται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ρομπότ. Όμως σε ένα τόσο αβέβαιο περιβάλλον, με έντονο θόρυβο, για να συγκεντρώσει ένα ρομπότ επαρκή πληροφορία, που θα το οδηγήσει σε σωστές αποφάσεις, πρέπει να διαθέτει μια διευρυμένη γειτονιά. Όσο μικρότερη είναι η γειτονιά, τόσο εκτεθειμένο είναι το ρομπότ στις τυχαίες διακυμάνσεις του περιβάλλοντος.

Στα πειράματα παραπάνω όταν τα ρομπότ βρίσκονταν σε συνθήκες που αύξαναν τις μεταξύ τους αποστάσεις, επιλέγονταν κανόνες που κρατούσαν ένα πιο σφιχτό σχηματισμό. Το τίμημα ήταν η μειωμένη ταχύτητα. Το κοπάδι των ρομπότ έπρεπε να έχει αρκετό χρόνο μετά από κάθε μετακίνηση να επανακαθορίσει τις θέσεις του. Να αποκαταστήσει τις γειτονιές. Μια άλλη αντιμετώπιση θα ήταν η χωρική διεύρυνση των γειτονιών. Αυτή η λύση είναι όμως μακριά από την στρατηγική του μοντέλου, διότι κατευθύνεται μακριά από την ιδέα των τοπικών αλληλεπιδράσεων και απαιτεί περισσότερους πόρους.

7 Εφαρμογή: Swarm-Fish στοχαστικό μοντέλο

Το μοντέλο αυτό αποτελεί μια παραλλαγή του προηγούμενου ντετερμινιστικού μοντέλου, το οποίο βρίσκεται πιο κοντά σε φυσικά παραδείγματα. Την άκαμπτη μορφή των κατωφλίων έχουν πάρει καμπύλες μεταβλητής ενεργοποίησης, ενώ έχει εισαχθεί η έννοια του τυχαίου στην διαδικασία απόφασης ώστε οι agents μα μην εγκλωβίζονται και να ανακαλύπτουν νέες λύσεις. Τα στοιχεία αυτά της συμπεριφοράς των agent εμπνέονται από τον τρόπο που κατευθύνουν τα μερμήγκια την κίνησή τους (το μοντέλο αυτό αναπτύσσεται στην ενότητα 3.3.2). Επίσης η κίνηση πια αποτελεί έμφυτη συμπεριφορά των agent, δεν κινούνται μόνο για να καταλάβουν μία νέα θέση. Αλλάζουν την κατεύθυνση της κίνησής του ανάλογα με τις συνθήκες.

Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται μια πιθανή υλοποίηση του μοντέλου αυτού, την δομή-κατασκευή των ρομπότ.

7.1 Το μοντέλο

Ο χώρος που κινούνται οι agents είναι ένας τόρος που τεμαχίζεται από ένα ορθογώνιο πλέγμα στα στοιχειώδη τεμάχια χώρου, τα κύτταρα (cell). Ένα κύτταρο μπορεί να είναι άδειο ή να υπάρχει σε αυτό ένας agent.

Οι agents ανήκουν σε διαφορετικά είδη. Κάθε είδος παράγει ένα διαφορετικό πεδίο. Όλα τα πεδία ακολουθούν τον ίδιο κανόνα διάδοσης, που είναι φθίνων ως προς την απόσταση. Μπορεί κάποιος agent να ανήκει κατά ένα ποσοστό σε διαφορετικά είδη, τότε θα εκπέμπει πεδία όλων των ειδών που ανήκει. Η ένταση των πεδίων είναι ανάλογη της ποσόστωσης με την οποία ανήκει στο κάθε είδος. Ο agent αντιλαμβάνεται την παρουσία όλων των πεδίων στο κύτταρο που βρίσκεται εκείνη τη

στιγμή, και στα τεσσάρα γειτονικά του κύτταρα. Επιδίωξη καθενός agent είναι να εξασφαλίζει στο κύτταρο που βρίσκεται η τιμή καθενός από τα πεδία να βρίσκεται πάνω από ένα επίπεδο που χρειάζεται (κατώφλι ικανοποίησης αναγκών). Παράλληλα η συνολική τιμή των πεδίων δεν πρέπει να ξεπερνά κάποιο άλλο επίπεδο (κατώφλι συνωστισμού). Ουσιαστικά επιδιώκει να αποκτήσει μια θέση ανάμεσα στους άλλους agents που να πληρεί κάποια κριτήρια. Η τιμή των πεδίων ουσιαστικά υποδηλώνει την πυκνότητα των agents κάθε είδους στην γειτονιά του. Η συνήθης συμπεριφορά είναι να απωθείται από agents του ίδιου είδους και να έλκεται από agents των άλλων ειδών, ταυτοχρόνως προσπαθεί να αποφύγει τον συνωστισμό για να διαθέτει και αυτός ένα ζωτικό χώρο.

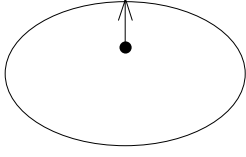
Ένας agent μπορεί να βρίσκεται σε 5 καταστάσεις να κινείται προς μία από τις τέσσερις κατευθύνσεις ή να παραμένει στη θέση που βρίσκεται. Η κατάσταση που θα μεταβεί ο agent καθορίζεται από την κατάσταση που ήταν προηγουμένως και την αντίληψη των πεδίων στο κύτταρο που βρίσκεται και στα γειτονικά σε αυτό. Η πιθανότητα να μεταβεί σε κάποια από αυτές τις καταστάσεις καθορίζεται από την τιμή των πεδίων και την προηγούμενη κατάσταση (ποια κατεύθυνση ακολουθούσε).

Το διάνυσμα που περιγράφει κάθε agent i $\vec{F}_i = (F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{in})^T$ αποτελείται από το ποσοστό που ανήκει σε καθένα από τα n είδη, ισχύει $\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1$. Ο κανόνας διάδοσης των πεδίων για ένα agent στη θέση (x_0, y_0) είναι:

$$\vec{f}_i(x, y) = \frac{p(x - x_0, y - y_0, \vec{d})}{|x - x_0| + |y - y_0|} \vec{F}_i, \forall x, y,$$

όπου $\vec{d} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix}$ το διάνυσμα που περιγράφει την κατάσταση του agent, την κατεύθυνση που κινείται και παίρνει από το σύνολο $\left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \right\}$. Η συνάρτηση

$p(x-x_0, y-y_0, \vec{d})$ καθορίζει τα όρια του πεδίου και το περιγράμματά του. Επιθυμώντας τα όρια του πεδίου να έχουν την μορφή:



όπου το διάνυσμα δείχνει την κατεύθυνσή του agent και το σημείο είναι η θέση του και η συνάρτηση:

$$\begin{aligned} p(x-x_0, y-y_0, \vec{d}) = & \\ u(x_0 + \max(|d_y|D, d_x \frac{D}{3}, -d_x \frac{D}{2}) - x) & \\ u(\max(|d_y|D, d_x \frac{D}{2}, -d_x \frac{D}{3}) - x_0 + x) & \\ u(\max(|d_x|D, d_y \frac{D}{2}, -d_y \frac{D}{3}) - y_0 + y) & \\ u(\max(|d_x|D, d_y \frac{D}{2}, -d_y \frac{D}{3}) - y_0 + y) & \end{aligned}$$

όπου $u(\cdot)$ η βηματική συνάρτηση.

Το συνολικό πεδίο ανά είδος που αντιλαμβάνεται ο agent στο σημείο (x,y) είναι:

$$\vec{f}(x, y) = \sum_{\forall i} f_i(x, y)$$

Αν το διάνυσμα $\vec{T}_i = (t_1, t_2, \dots, t_n)^T$ τις ελάχιστες τιμές πεδίου του κάθε είδους που επιθυμεί ο agent (κατώφλι ικανοποίησης) τότε η τιμή της μη ικανοποίησης δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} g_i(x, y) &= [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1] \\ u(\vec{T}_i - \vec{f}(x, y)) &= [\vec{T}_i - \vec{f}(x, y)] \end{aligned}$$

$$\text{όπου } u \left(\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} u(x_1) \\ \vdots \\ u(x_n) \end{bmatrix}.$$

Αντίστοιχα η συνάρτηση με την οποία εκτιμάται ο συνωστισμός agents γύρω από τη θέση (x,y) είναι:

$$\begin{aligned} h_i(x, y) &= [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1] \\ u(\vec{f}(x, y) - \vec{T}_i) &= [\vec{f}(x, y) - \vec{T}_i] \end{aligned}$$

Δηλαδή η συνολική τιμή όλων των πεδίων, αφού όμως ο agent έχει καλύψει τις ανάγκες τους. Επειδή συνήθως οι agents χρειάζονται την ύπαρξη άλλων ειδών η παραπάνω συνάρτηση έχει αυξημένη τιμή όταν υπάρχουν πιο κοντά agents του ίδιου είδους.

Η πιθανότητα να μεταβεί σε ένα από τα κύτταρα στη θέση $N = \{(x_0, y_0), (x_0+1, y_0), (x_0-1, y_0), (x_0, y_0+1), (x_0, y_0-1)\}$, όταν βρίσκεται στη θέση (x_0, y_0) είναι:

$$P_i(x, y) = \frac{k(x, y)e^r}{\sum_{\forall (x, y) \in N} k(x, y)e^r},$$

όπου

$$r = -ag_i^u(x, y) - bh_i^v(x, y) + \ln c \left(\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix} \right)$$

και $a > b$, $u < v$ και $c \left(\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix} \right)$ η συνάρτηση

που ορίζει την πιθανότητα με την οποία ο agent θα αλλάξει κατεύθυνση από την $\vec{d}_i$

στην $\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix}$. Η συνάρτηση αυτή επικροτεί

την διατήρηση της ίδιας κατεύθυνσης αποτρέπει τις στροφές κυρίως τις αναστροφές και καθώς και τη μετάβαση από ακινησία σε κίνηση και το αντίθετο (λόγω αδράνειας αλλά και προσπάθειας ελάττωσης της κατανάλωσης ενέργειας από τον agent). Μέσω αυτής της συνάρτησης είναι δυνατόν να καθοδηγηθεί ένας agent προς μία κατεύθυνση. Η συνάρτηση $k(x,y)$ έχει τιμή 1 αν το κελί στη θέση αυτή είναι κενό και 0 όταν είναι κατειλημμένο από άλλον agent.

7.2 Εξομοίωση

Κατά την εξομοίωση σε κάθε κύκλο της επιλέγεται τυχαία ένας από τους agents και αποφασίζει για την επόμενη κίνησή του. Η κατεύθυνση-κατάσταση του κάθε agent υποδηλώνεται από το σχήμα του. Όταν σταματά να κινείται είναι ένα κυκλικό σημείο, ενώ όταν κινείται έχει σχήμα έλλειψης με τον μεγάλο άξονά της κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης.

Ο πίνακας με τις πιθανότητες μετάβασης, δηλαδή η συνάρτηση $c(\cdot)$ είναι:

- ✓ Αν $[0\ 0]^T$ η πιθανότητα να κινηθούν προς οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση είναι 0.25.
- ✓ Από οποιαδήποτε κατάσταση η πιθανότητα να κινηθεί στην κατάσταση ακινησίας είναι 0.05.
- ✓ Αν $[0\ y]$ τότε η πιθανότητα να μεταβεί στην $[0\ 0]$ είναι 0.5, στη $[0\ -y]$ 0.05, στη $[-x\ 0]$ και $[x\ 0]$ 0.25 και για να διατηρήσει την ίδια 1.
- ✓ Αντίστοιχα για $[x\ 0]$ η πιθανότητα να μεταβεί στην $[0\ 0]$ είναι 0.5, στη $[-x\ 0]$ 0.05, στη $[0\ -y]$ και $[0\ y]$ 0.25 και για να διατηρήσει την ίδια 1.

Στην περίπτωση που επιθυμείται η κίνηση του agent προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση π.χ. $[0\ x]$ τότε οι πιθανότητες θα διαμορφωθούν είναι:

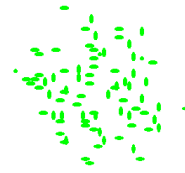
- ✓ Αν βρίσκεται στην κατάσταση $[0\ 0]$ τότε η πιθανότητα να μεταβεί στην $[x\ 0]$ είναι 1.5.
- ✓ Από τη $[-x\ 0]$ 1.05.
- ✓ Από τη $[0\ -y]$ και $[0\ y]$ 1.25.

7.2.1.1 Ένα είδος.

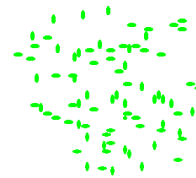
$$F=[0\ 1\ 0], T=[0\ 1.8\ 0], d=10, N=60$$



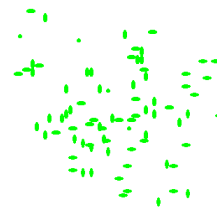
t=80



t=1000



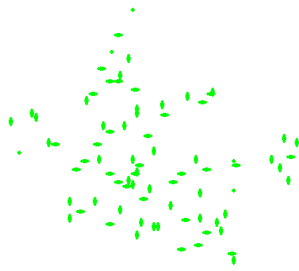
t=2000



t=3000



t=6000



$t=12000$



$t=2000$

7.2.1.2 Ένα είδος με τάση για κίνηση στα αριστερά



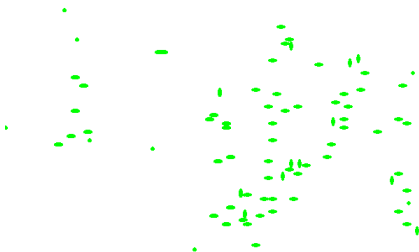
$t=0$



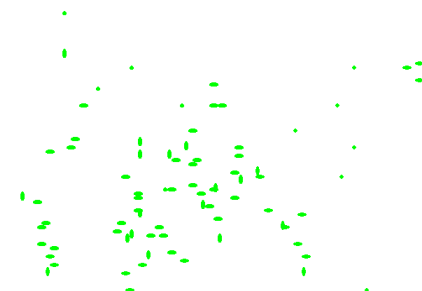
$t=4000$



$t=1000$



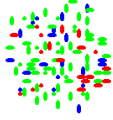
$t=8000$



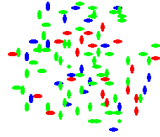
$t=18000$

7.2.2.1 Τρία είδη agent με διαφορετικούς πληθυσμούς

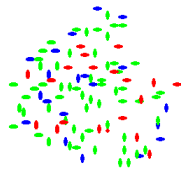
$F=[1 \ 0 \ 0]$, $T=[0 \ 0.1 \ 0.1]$, $d=10$, $N=20$ $F=[0 \ 1 \ 0]$, $T=[0.2 \ 0 \ 0.2]$, $d=5$, $N=60$ $F=[0 \ 0 \ 1]$,
 $T=[0.1 \ 0.1 \ 0]$, $d=10$, $N=20$



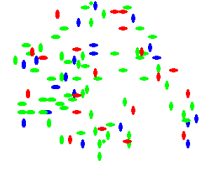
t=150



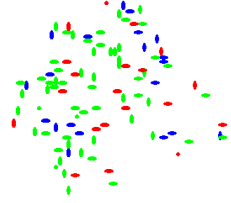
t=1000



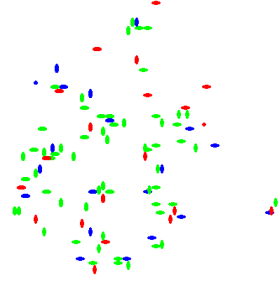
t=2000



t=4000



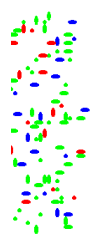
t=8000



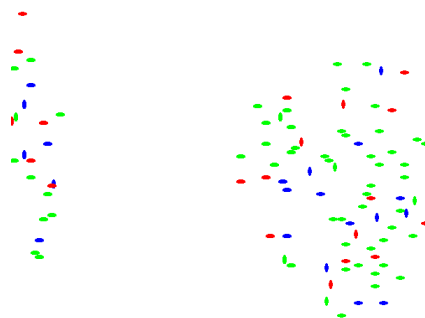
t=16000

7.2.2.2 Τρία είδη agent με διαφορετικούς πληθυσμούς με τάση για κίνηση αριστερά.

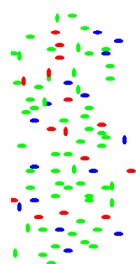
$F=[1 \ 0 \ 0]$, $T=[0 \ 0.1 \ 0.1]$, $d=20$, $N=20$ $F=[0 \ 1 \ 0]$, $T=[0.2 \ 0 \ 0.2]$, $d=10$, $N=60$ $F=[0 \ 0 \ 1]$,
 $T=[0.1 \ 0.1 \ 0]$, $d=20$, $N=20$



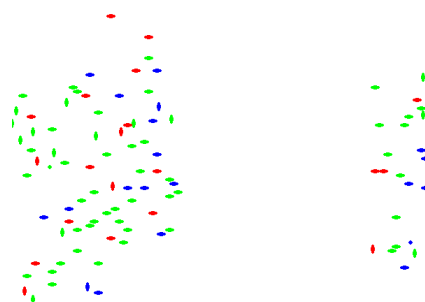
$t=100$



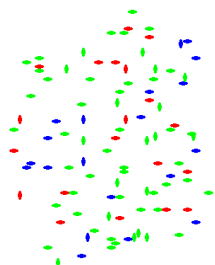
$t=12000$



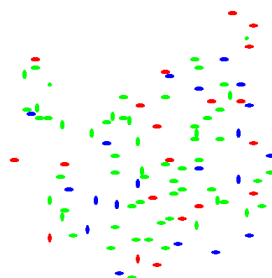
$t=1000$



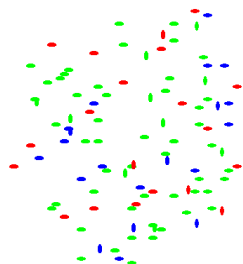
$t=16000$



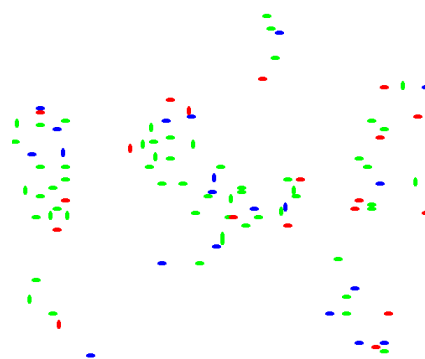
$t=4000$



$t=20000$



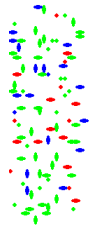
$t=8000$



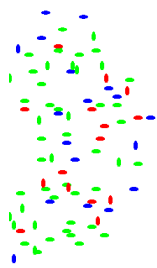
$t=100000$

7.2.2.3 Κίνηση κατευθυνόμενη από το είδος των οδηγών

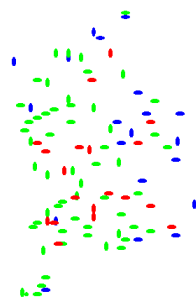
Τρία είδη agent με διαφορετικούς πληθυσμούς. Το μόνο είδος που έχει τάση κίνησης προς τα αριστερά και οδηγεί και τα άλλα προς την ίδια κατεύθυνση, είναι οι μπλε agents.



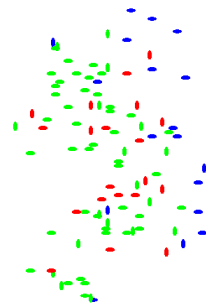
t=100



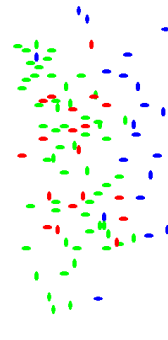
t=2000



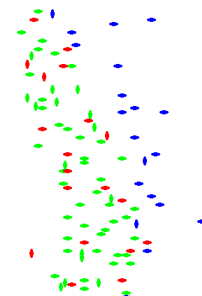
t=4000



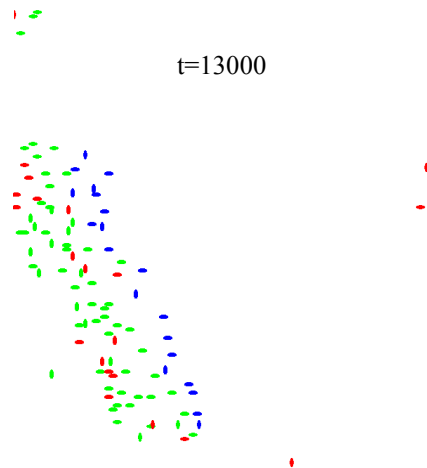
t=6000



t=9000

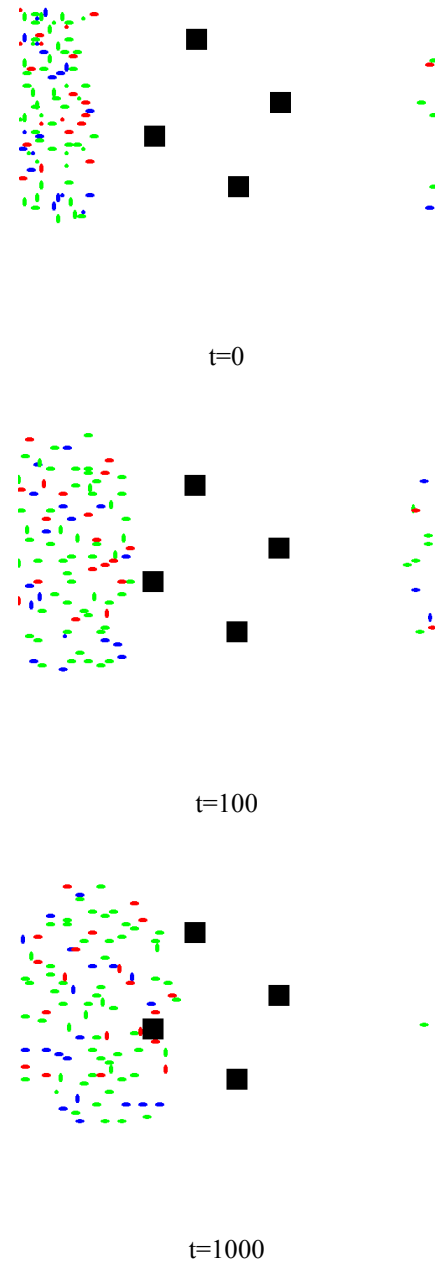
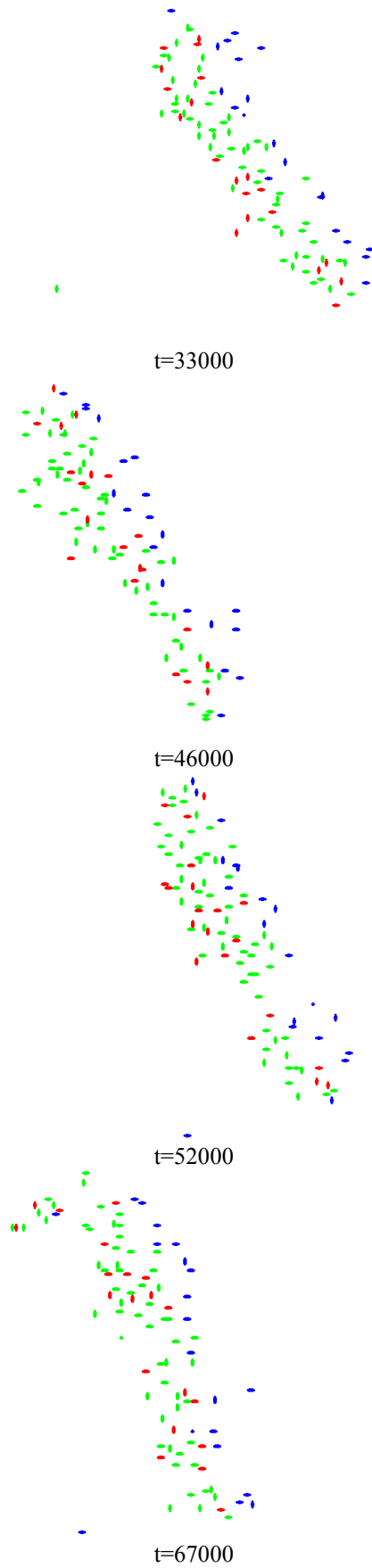


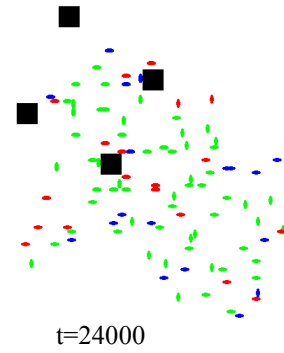
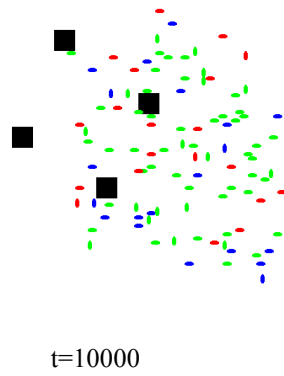
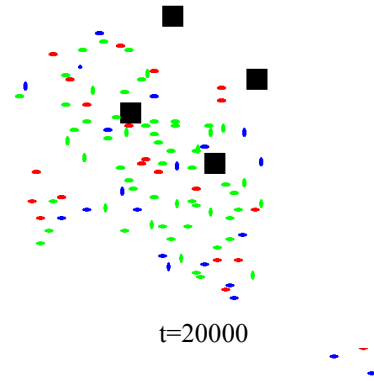
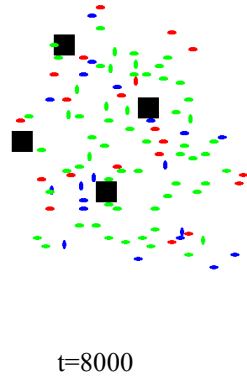
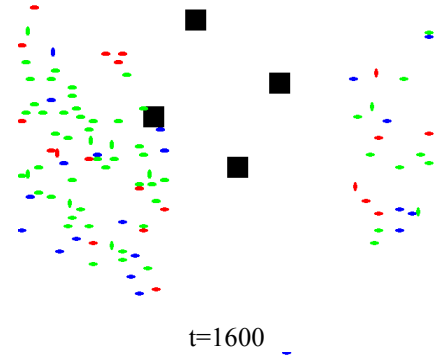
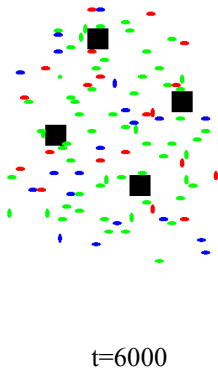
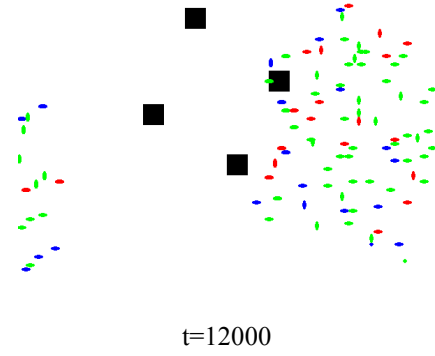
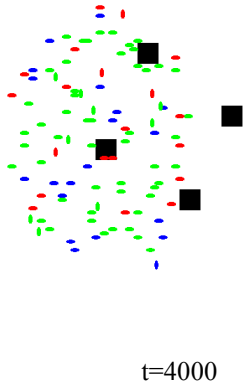
t=13000

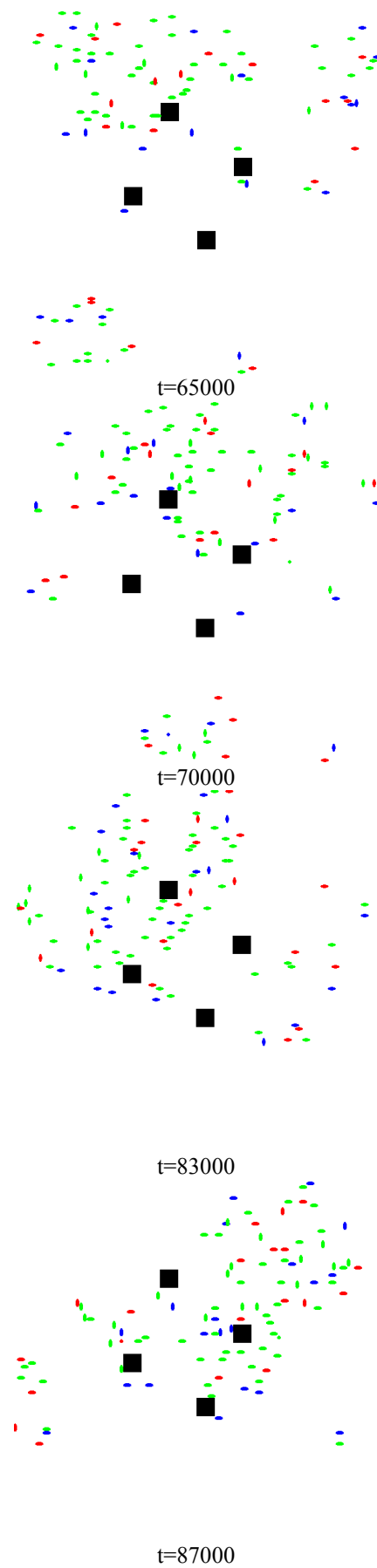
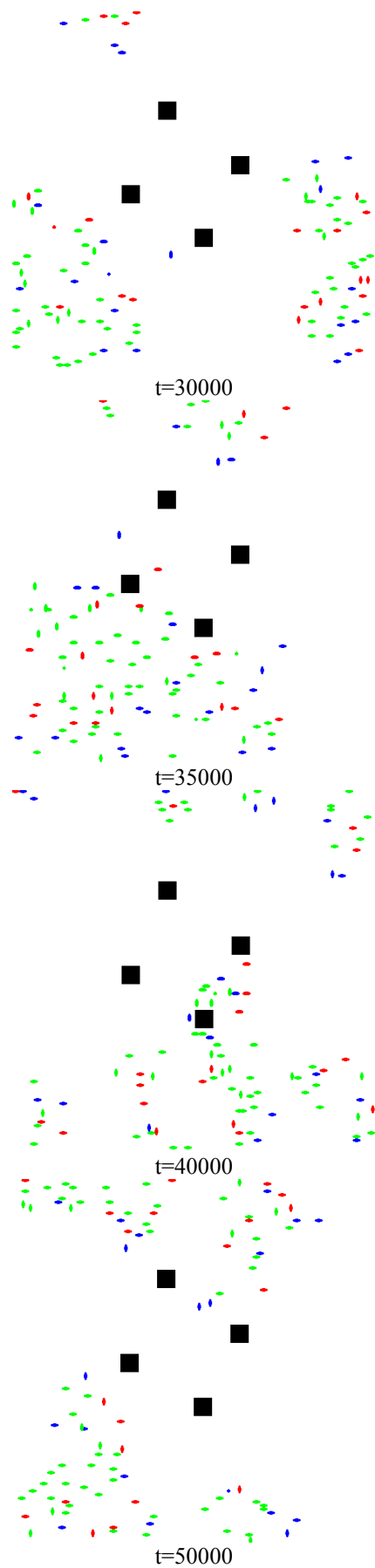


t=24000

7.2.3.1 Τρία είδη agent με διαφορετικούς πληθυσμούς με τάση για κίνηση αριστερά. διαμέσου εμποδίων.







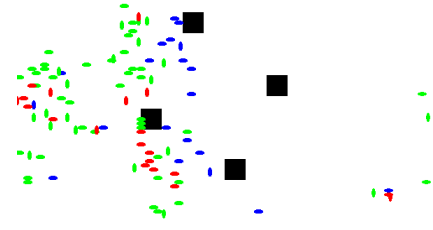
7.2.3.2 Κίνηση κατευθυνόμενη από το είδος των οδηγών διαμέσου εμποδίων

Τρία είδη agent με διαφορετικούς πληθυσμούς. Το μόνο είδος που έχει τάση κίνησης προς τα αριστερά και οδηγεί και τα άλλα προς την ίδια κατεύθυνση, είναι οι μπλε agents. Οι agents κινούνται διαμέσου εμποδίων.

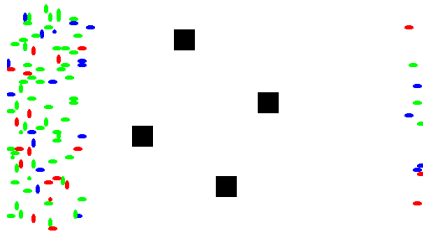
$F=[1 \ 0 \ 0]$, $T=[0 \ 0.1 \ 0.1]$, $d=20$, $N=20$

$F=[0 \ 1 \ 0]$, $T=[0.4 \ 0 \ 0.2]$, $d=10$, $N=60$

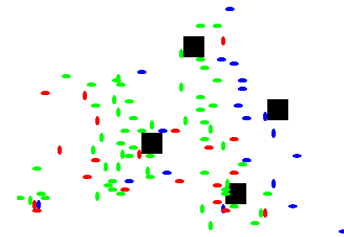
$F=[0 \ 0 \ 1]$, $T=[0.4 \ 0.1 \ 0]$, $d=20$, $N=20$



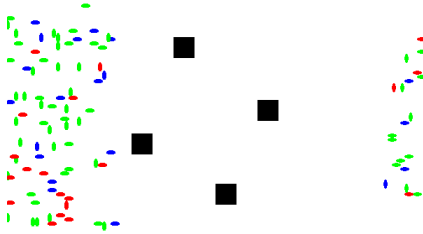
t=5000



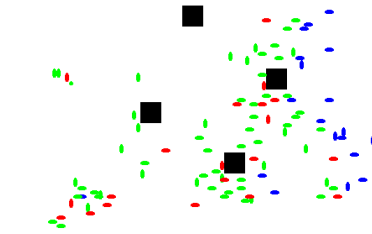
t=200



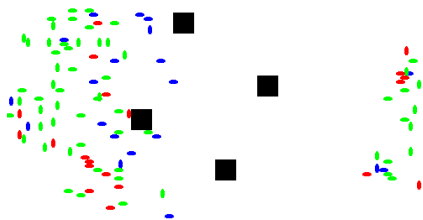
t=8000



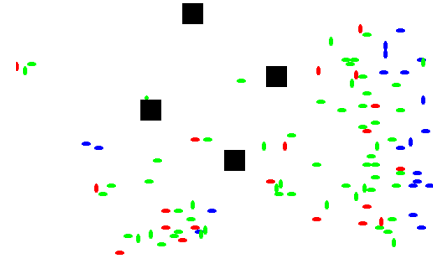
t=1000



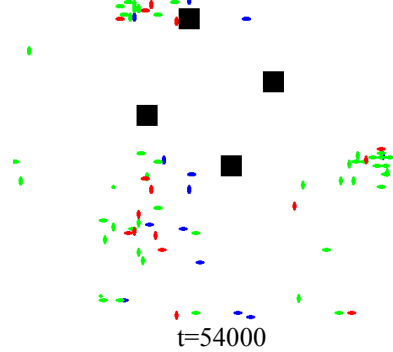
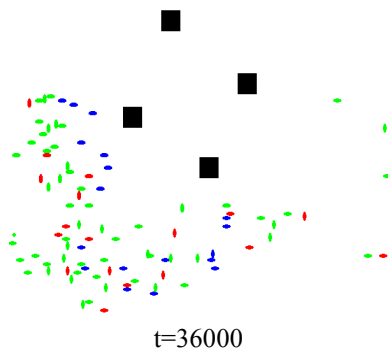
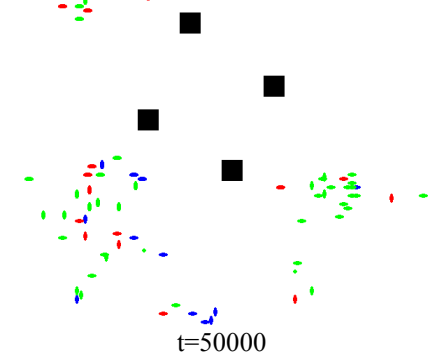
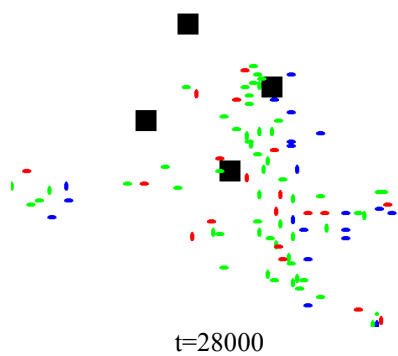
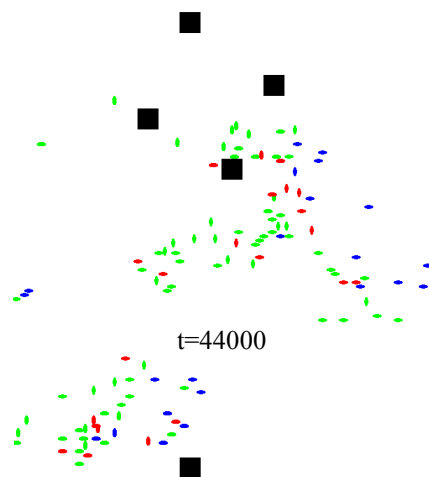
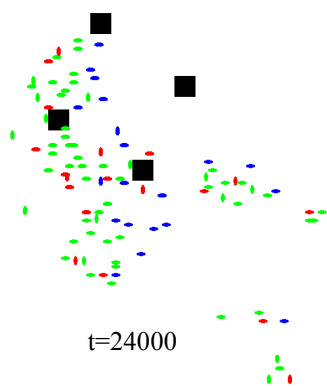
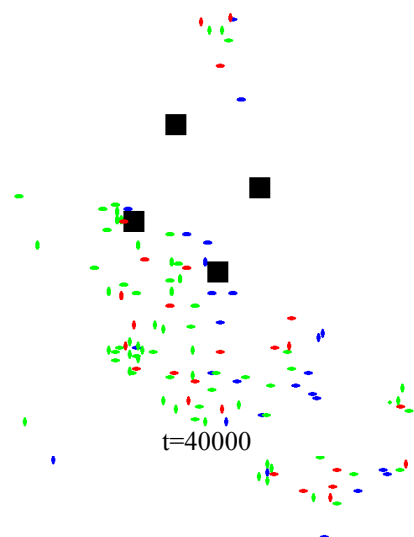
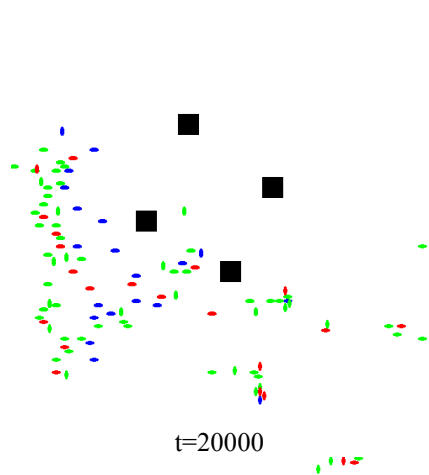
t=12000

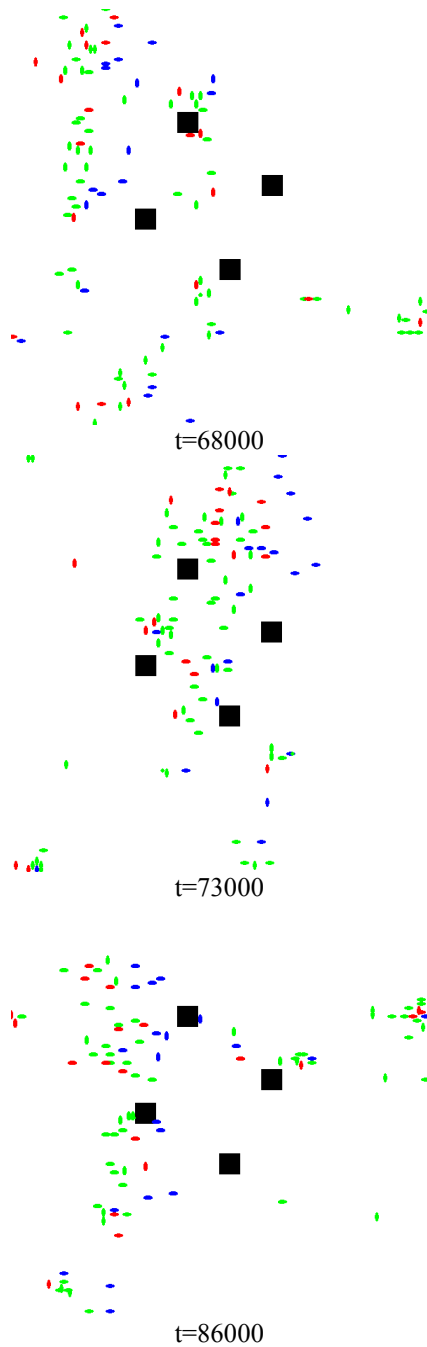


t=3000



t=16000

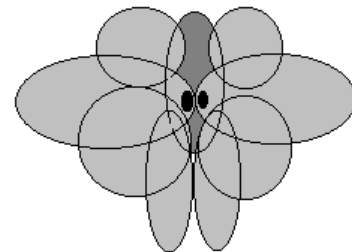




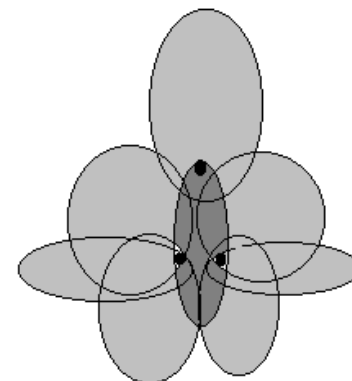
7.3 Η υλοποίηση των ρομπότ Swarm-fish

Τα ρομποτικά ψάρια είναι μικρά πλευστά ρομπότ που διαθέτουν δύο κινητήρες που τα κατευθύνουν (προπέλεις). Υπάρχουν τρία είδη ανάλογα με τον εξοπλισμό που φέρουν. Μια ομάδα από αυτά διαθέτει GPS για τον προσδιορισμό της θέσης και την επιλογή κατεύθυνσης. Η κύρια ομάδα αποτελείται από ρομπότ με αισθητήρες που εκτελούν συγκεκριμένες μετρήσεις. Τέλος μια άλλη ομάδα ρομπότ συλλέγει τα δεδομένα από τα ρομπότ που κάνουν τις μετρήσεις και τις μεταφέρουν μέσω της ασύρματης σύνδεσης που διαθέτουν σε κάποιο κεντρικό σταθμό.

Ο συντονισμός των ρομπότ γίνεται μέσω των ηχητικών σημάτων που παράγουν. Τα σήματα δεν μεταφέρουν κάποια κωδικοποιημένα μηνύματα αλλά είναι διαδοχικοί απλοί παλμοί σε διαφορετικές συχνότητες. Κάθε είδος παράγει διαφορετική συχνότητα παλμών, από ηχεία (πομπούς) που βρίσκονται δεξιά και αριστερά του. Τους ήχους που παράγονται από τα άλλα ρομπότ συλλαμβάνονται από τρία μικρόφωνα.



Με γκρι η περιοχή που κατευθύνονται οι ηχητικοί παλμοί.



Οι περιοχές λήψης των μικρόφωνων

Το ρομπότ αντιλαμβάνεται την ένταση των ήχων (ενέργεια) σε κάθε συχνότητα από το κάθε μικρόφωνο. Αν $e_i(t)$ το σήμα του ήχου που λαμβάνει το i μικρόφωνο, τότε η ένταση του ήχου που αντιλαμβάνεται το ρομπότ στη συχνότητα j είναι:

$$E_{ij}(\tau) = \int_{\tau}^{\tau+T} (e_i(t) * h_j(t))^2 dt,$$

όπου $h_j(t)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς ζωνοπερατού φίλτρου στην περιοχή της συχνότητας j , T είναι το χρονικό παράθυρο που θυμάται το σύστημα τους παλμούς που έλαβε. Αν t_p η διάρκεια κάθε παλμού τότε ισχύει $t_p \ll T$. Η διακριτή μορφή είναι:

$$E_{ij}(t) = \sum_{\tau=t-T}^t (e_i(\tau) * h_j(\tau))^2$$

Θεωρούμε ότι η ένταση των παλμών που λαμβάνει ένα ρομπότ από ένα άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης, και την αντιλαμβάνεται αν το σήμα που φτάνει στο δέκτη έχει ένταση μεγαλύτερη από την ευαισθησία του οργάνου. Τότε το παραπάνω μέγεθος αποτελεί και μια εκτίμηση για το πλήθος των γειτόνων και της απόστασής και της θέσης τους.

Για τη κάθε μία συχνότητα αντιλαμβάνεται την παρουσία ρομπότ ενός είδους. Αθροίζοντας για όλες τις συχνότητες είδη αποκτά εκτίμηση για το συνωστισμό της περιοχής. Η διαφορά του μεγέθους μεταξύ των μικροφώνων περιέχει πληροφορία σχετικά με τη θέση των γειτονικών του ρομπότ (την χωρική κατανομή ως το ρομπότ αυτό των γειτονικών του ρομπότ).

Κάθε ρομπότ κινείται σύμφωνα με τους κανόνες που αναπτύχθηκαν παραπάνω. Οι κανόνες υλοποιούνται από ένα νευρωνικό δίκτυο με 8 εισόδους 2 εξόδους και ένα κρυμμένο επίπεδο (3 μικρόφωνα επί 3 συχνότητες-είδη και 2 κινητήρες-κατάσταση του ρομπότ πιθανότητα να χρειάζεται και ακόμη μία είσοδος μονίμως ενεργοποιημένη). Η μορφή των συναρτήσεων ενεργοποίησης του νευρωνικού δικτύου έχουν παρόμοια μορφή

με τις παραπάνω συναρτήσεις

$$e^{-ag_i^u(x,y) - bh_i^v(x,y) + \ln c \left(\begin{matrix} x-x_0 \\ y-y_0 \end{matrix} \right)}$$

Το διάνυσμα του πεδίου είναι:

$$\vec{E}_0 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 E_{i1}(t) \\ \sum_{i=1}^3 E_{i3}(t) \\ \sum_{i=1}^3 E_{i3}(t) \end{bmatrix},$$

για την παρούσα θέση του ρομπότ,

$$\vec{E}_r = \begin{bmatrix} E_{11}(t) \\ E_{12}(t) \\ E_{13}(t) \end{bmatrix}, \vec{E}_l = \begin{bmatrix} E_{21}(t) \\ E_{22}(t) \\ E_{23}(t) \end{bmatrix}$$

για την δεξιά και την αριστερή αντίστοιχα.

$$\vec{E}_f = \begin{bmatrix} E_{31}(t) \\ E_{31}(t) \\ E_{31}(t) \end{bmatrix}$$

$$\vec{E}_b = \begin{bmatrix} (E_{11}(t) + E_{21}(t)) - E_{31}(t) \\ (E_{12}(t) + E_{22}(t)) - E_{32}(t) \\ (E_{13}(t) + E_{23}(t)) - E_{33}(t) \end{bmatrix}$$

για το εμπρός και πίσω θέση. Τα μικρόφωνα 1 και 2 βρίσκονται δεξιά και αριστερά ενώ το 3 μπροστά.

Το σύστημα επικοινωνίας είναι πολύ απλό λόγω της ύπαρξης πολλών απλών συστημάτων που δεν έχουν πολύ μεγάλη ακρίβεια και ευαισθησία και διαφοροποιούνται από άτομο σε άτομο, οι μετρήσεις εμπεριέχουν πολύ θόρυβο. Όποτε οι αποφάσεις λαμβάνονται σε περιβάλλον αβεβαιότητας για αυτό στην παραπάνω περιγραφεί θεωρήσαμε ότι επιλέγεται με σταθμισμένες πιθανότητες κάποια απόφαση.

Χάρη στην απλότητα του συστήματος και στην έλλειψη της ανάγκης για ακριβής πληροφορίες μπορεί να αντεπεξέλθει σε δυσμενείς συνθήκες και έντονες μεταβολές του περιβάλλοντος.

7.4 Συμπεράσματα

Η κίνηση των agent με αυτό μοντέλο είναι πολύ πιο «γλυκιά» ομαλή, μοιάζει περισσότερο με την συμπεριφορά μιας αγέλης σαρδέλων. Η υλοποίησή του είναι πιο απλή και του προσδίδει μια ιδιαίτερη δυνατότητα προσαρμογής για την επίτευξη του στόχου του.

Στις δοκιμές με τα εμπόδια, παρατηρείται η απροσδόκητη συμπεριφορά των agent να κινούνται προς την κατεύθυνση όπου λιγότεροι agents της ομάδας θα βρεθούν αντιμέτωποι με εμπόδια. Κινούνται προς τα κάτω, αλλά λόγω της μορφής τόρου (της αρένας) επιστρέφουν στην αρχική θέση τους. Η διάταξη των εμποδίων δημιουργεί ένα άνοιγμα που διευκολύνει (επιβάλλει ουσιαστικά) την κίνηση των agent προς τα αριστερά και κάτω.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το ένα είδος να λειτουργεί ως οδηγός για τα άλλα ήδη υπάρχει μια επιδείνωση στην απόδοση αλλά όχι τόσο σημαντική αν συνυπολογιστεί η οικονομία τη χρήση των πόρων. Οι πόροι στην περίπτωση αυτή η είναι η πληροφορία για την κατεύθυνση των agents.

Όταν δεν χρησιμοποιείται το ένα είδος ως οδηγός παρατηρούμε ότι κατά την κίνησή τους προς τα αριστερά η διάταξη τους είναι παρόμοια με αυτή όταν δεν έχουν την τάση κίνησης. Παρόλο που οι αρχικές συνθήκες είναι διαφορετικές. Στη πρώτη περίπτωση οι agent βρίσκονται πυκνά κατανεμημένοι σε ένα τετράγωνο ενώ στη δεύτερη περίπτωση σε μια μακρόστενη λουρίδα. Η θέση τους στο χώρο δεν έχει σημασία λόγω της τοπολογίας του (τόρος).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένα είδος ως οδηγός, οι agents του είδους βρίσκονται επικεφαλής του σχηματισμού (ως αναμενόνταν). Οι υπόλοιποι agents κατανέμονται σε έναν επιμήκη σχηματισμό εγκάρσιο στην κατεύθυνση κίνησης. Καθένας από τους agents προσπαθεί να τοποθετηθεί σε μικρή απόσταση πίσω από τους agents που ηγούνται. Οι agents οδηγοί έλκονται (καθώς έλκουν τους υπόλοιπους

για τους ακολουθήσουν) από όσους ακολουθούν και απωθούνται από αυτούς του είδους τους. Οι δυνάμεις αυτές οδηγούν στο σχηματισμό. Παρατηρείστε ότι η ανάγκη των agents οδηγών για τους άλλους είναι μικρότερη από ότι των άλλων προς αυτούς, η τακτική αυτή επιλέγεται ώστε οι ελκτικές δυνάμεις προς αυτούς να είναι ασθενέστερες και οι απωστικές ισχυρότερες, για να μην λειτουργούν οι υπόλοιποι agents ως «άγκυρα».

Η επίδραση των εμποδίων αλλά και της αρχικής κατανομής των agent ιδίως στις περιπτώσεις που κινούνται προς τα αριστερά είναι έντονες στην εξέλιξη της τοπολογίας του γράφου. Ο γράφος αυτός έχει ως κορυφές τους agents και οι ακμές του ενώνουν τους γειτονικούς agent. Η ακμή που συνδέει δύο agent χάνεται όταν αυτή απομακρυνθούν ιδιαίτερα (όταν ο ένας δεν αντιλαμβάνεται το πεδίο που δημιουργεί ο άλλος). Όταν ελαττώνεται το πλήθος των ακμών του γράφου, δηλαδή αυξάνεται η μέση απόσταση μεταξύ δύο agent της ομάδας, μειώνεται η συνεκτικότητα του γράφου. Τότε ο γράφος «σπάζει» σε υπογράφους και η ομάδα των agents σε μικρότερες υποομάδες. Τα εμπόδια αυξάνουν τις αποστάσεις ανάμεσα στους agent όταν κινούνται ανάμεσά τους, «κόβοντας» ακμές. Και η κίνηση αυξάνει την απόσταση καθιστώντας το σύστημα πιο ευαίσθητο στη διάσπαση. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα στην περίπτωση που το ένα είδος ηγείται άρα είναι απομακρυσμένο από τα άλλα, διευρύνεται η γειτονιά του και να ενισχυθεί η συνεκτικότητα του γράφου.

8 Καταμερισμός υπολογιστικού φορτίου Load balancing

Ένα ακόμη πεδίο εφαρμογής ιδεών εμπνευσμένων από τα κοινωνικά έντομα είναι τα δίκτυα υπολογιστών. Τα δίκτυα υπολογιστών μπορούν να θεωρηθούν πολύπλοκα συστήματα στα οποία μπορούν να εφαρμοστούν κανόνες συμπεριφοράς που να οδηγούν στην αυτοργάνωση. Η αυτοργάνωση μπορεί να εκφραστεί μέσω του καταμερισμού του υπολογιστικού φορτίου που δημιουργείται από τους χρήστες στους υπολογιστές του δικτύου. Στο πεδίο αυτό της εξισορρόπησης φορτίου (για συστήματα πολυεπεξεργαστών με κατανεμημένη μνήμη) έχουν αναπτυχθεί πολλές «κλασσικές» μέθοδοι που περιγράφονται παρακάτω. Στο ακόμη δυναμικότερο πεδίο των P2P συστημάτων (ομότιμων διασυνδεδεμένων υπολογιστών) παρουσιάζεται ακολούθως μια μέθοδος εξισορρόπησης φορτίου εμπνευσμένη από τα μερμήγκια του είδους Messor.

8.1 Τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου για συστήματα πολυεπεξεργασίας με κατανεμημένη μνήμη

Το πρόβλημα της εξισορρόπησης του φορτίου άρχισε να εμφανίζεται όταν τα συστήματα πολυεπεξεργαστών με κατανεμημένη μνήμη γίνονταν δημοφιλή [24]. Οι χρήστες γενικά εκκινούν τα προγράμματα τους στους τοπικού του υπολογιστές. Οι διεργασίες έχουν την δυνατότητα να μεταναστεύσουν σε άλλους υπολογιστές. Η τυχαία άφιξη νεοδημιουργηθέντων διεργασιών μπορεί να προκαλέσει υψηλό φορτίο σε κάποιους υπολογιστές ενώ άλλοι είναι πολύ πιο ελαφριά φορτωμένοι ή εντελώς αδρανείς. Ο στόχος είναι το σύνολο των υπολογιστών να εκτελεί συνεχώς κάποιο έργο, που θα

ελαχιστοποιεί τον χρόνο εκτέλεσης του. Η εξισορρόπηση φορτίου αποσκοπεί στην αύξηση της χρησιμοποίησης το πόρων, τη βελτίωση της απόδοσης των παράλληλων υπολογισμών κατά την εκτέλεση παράλληλων προγραμμάτων και τη μείωση του χρόνου απόκρισης.

Η κύρια λειτουργία της εξισορρόπησης φορτίου έγκειται στην λήψη αποφάσεων που βελτιώνουν τη απόδοση. Η επιλογή του κριτηρίου για την απόδοση του συστήματος εξαρτάται από την εφαρμογή. Παράδειγμα αν πρόκειται για διεργασίες με έντονες εξαρτήσεις μεταξύ τους, ο στόχος είναι να μειωθεί το πλήθος των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων μέσω του δικτύου. Ενώ αν πρόκειται για ανεξάρτητες, να βελτιωθεί ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσής τους.

Οι αλγόριθμοι για την εξισορρόπηση φορτίου καλούνται να καθορίσουν πότε να πρέπει μια νέα διεργασία να εκτελεστεί σε απομακρυσμένο επεξεργαστή και αν ναι σε ποιον. Για τις αποφάσεις του αυτές βασίζονται σε δείκτες για το φορτίο του κάθε επεξεργαστή, που συνήθως είναι το μήκος της ουράς του χρονοδρομολογητή κάθε επεξεργαστή. Η συμπεριφορά του κάθε αλγορίθμου καθορίζεται από την πολιτική που ακολουθεί σε τέσσερα πεδία.

- ✓ Ο τρόπος με τον οποίο συλλέγει και ανανεώνει τα στοιχεία του για το φορτίο των κόμβων.
- ✓ Τη διαδικασία με την οποία επιλέγει από ποιον κόμβο μεταφέρει μια διεργασία σε έναν άλλον επεξεργαστή.
- ✓ Τη μέθοδο που επιλέγει τους κόμβους όπου θα μεταφερθεί το φορτίο που αφαιρέθηκε από κάποιον άλλο επεξεργαστή.
- ✓ Και τέλος η επιλογή της κατάλληλης από διεργασίες του υπερφορτωμένου επεξεργαστή που πρέπει να μεταφέρει.

Με την στατική εξισορρόπηση κατά το χρόνο της μεταγλώττισης του προγράμματος οι διεργασίες κατανέμονται ανάλογα με το χρόνο εκτέλεσής του και της απαιτούμενης επικοινωνίας μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως διαίρεση ενός γράφου (graph partitioning).

Όμως αυτή η μεθοδολογία δεν είναι ικανοποιητική για τα δυναμικά περιβάλλοντα, που κυριαρχούν.

Η δυναμική εξισορρόπηση επιτρέπει την προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, όμως έχει και επιπλέον κόστος αφού απαιτούνται συχνά επαναλαμβανόμενες αποφάσεις δρομολόγησης. Η δυναμικές στρατηγικές χωρίζονται σε αυτές που επιτρέπουν την μετανάστευση μια διεργασίας χωρίς αυτή να έχει τελειώσει και σε αυτές που δεν το επιτρέπουν σε διεργασίες που έχουν ξεκινήσει την εκτέλεσή τους. Επίσης ανάλογα με τον τρόπο που εκτιμούν το φορτίο χωρίζονται στις καθολικές και σε αυτές του πλησιέστερου γείτονα.

Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται σε επαναλαμβανόμενες απόπειρες για βέλτιστη κατανομή του συνολικού φορτίου και εκ τούτου σε κάθε κύκλο η μέθοδος χρειάζεται να αποφασίζει μόνο για την κατεύθυνση της μετανάστευσης των διεργασιών μεταξύ των γειτόνων. Ο αλγόριθμος έχει γνώση του φορτίου κάθε επεξεργαστή αποφασίζει για τον τελικό προορισμό κάθε διεργασίας που μεταναστεύει.

Οι μέθοδοι πλησιέστερου γείτονα είναι δύο τύπων, αυτού όπου τα φορτία επανακατανέμονται ανάλογα με τους πλησιέστερους γείτονές τους ή με τυχαίο τρόπο. Σε αυτή την κατηγορία αλγορίθμων ανήκουν μέθοδος της διάχυσης (heat diffusion), της ανταλλαγής διαστάσεων (dimension exchange) και της κλίσεως (gradient).

Η μέθοδος της διάχυσης εξετάζει όλους τους άμεσους γείτονες, και εξισορροπεί το φορτίο με όλους αυτούς. Μπορεί να διαχύσει μέρος του φορτίου καθώς και να δεχτεί φορτίο από τους γείτονες.

Με τη μέθοδο της ανταλλαγής διαστάσεων, σε κάθε κύκλο κάθε επεξεργαστής εξισορροπεί το φορτίο με έναν μόνο γείτονα, και στον επόμενο κύκλο τον επόμενο γείτονα.

Οι τυχαίοι αλγόριθμοι επιλέγουν τυχαία τον προορισμό των διεργασιών που θα μεταναστεύσουν. Αυτή η μέθοδος είναι

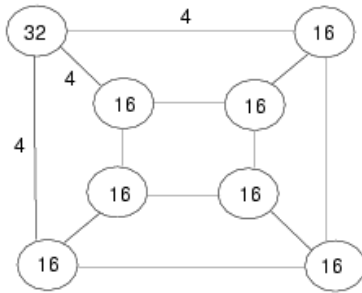
πολύ απλή και μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση της απόδοσης χωρίς να επιτευχθεί εξισορρόπηση φορτίου.

Μια κατηγορία αλγορίθμων αφορά την εξισορρόπηση του φορτίου των Web εξυπηρετών, του προβλήματος της μη ανταπόκρισης του όταν πολλοί χρήστες κάνουν ταυτόχρονα αιτήματα. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται επανακατευθύνοντας τις αιτήσεις σε άλλους εξυπηρετητές με λιγότεροι κίνηση.

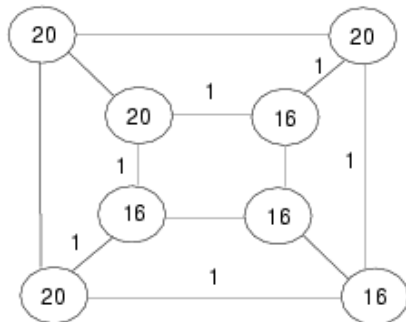
Τέλος οι ευριστικές (heuristics) μέθοδοι που επιδιώκουν μια υποβέλτιστη κατανομή του φορτίου λειτουργώντας κάτω από το πρίσμα της τοπικής γνώσης, μεταξύ των γειτόνων. Μια από τις πιο γνωστές είναι αυτή της προσομοιωμένης ανόπτησης.

8.1.2 Ο αλγόριθμος διάχυσης θερμότητας

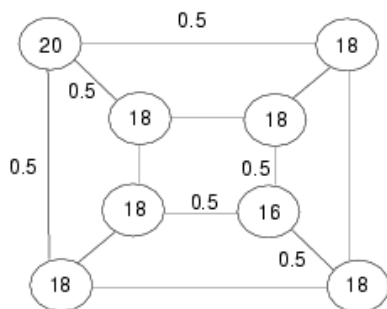
Το πρόβλημα της εξισορρόπησης φορτίου παρουσιάζει αναλογίες με τη διαδικασία διάχυσης της θερμότητας όπου μια αρχική μη ομοιόμορφη κατανομή στο χώρο, προκαλεί την μεταφορά θερμότητας και τελικά επιτυγχάνεται ισορροπία [25]. Πολλοί αλγόριθμοι βασίζονται σε αυτή την αναλογία. Ο Cybenko (1989) υπέθεσε ότι το φορτίο είναι απείρως διαιρέσιμο και πρότεινε το αλγόριθμο διάχυσης όπου κάθε επεξεργαστής ανταλλάσσει φορτίο με τους γείτονές του, το ποσό αυτό είναι ανάλογο της διαφοράς των φορτίων τους. Ο αλγόριθμος αυτός ήταν επαναληπτικός και αποδείχτηκε ότι συγκλίνει σε μια ομοιόμορφη κατανομή. Παρόμοιοι αλγόριθμοι προτάθηκαν ανεξάρτητα και από τον Boillat (1990), συσχετίζοντας το μοντέλο με την εξίσωση Poisson για γράφους. Ο Cybenko (1989) παράλληλα είχα προτείνει τον αλγόριθμο τις ανταλλαγής διαστάσεων (dimension exchange), κατά την οποία οι επεξεργαστές σχηματίζουν ζεύγη (i, j) με φορτίο l_i και l_j ανταλλάσσουν φορτίο έτσι ώστε μετά καθένας τους να έχει φορτίο $\frac{l_i + l_j}{2}$. Αποδείχθηκε ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει σε d βήματα αν ο γράφος θεωρηθεί υπερκύβος διάστασης d .



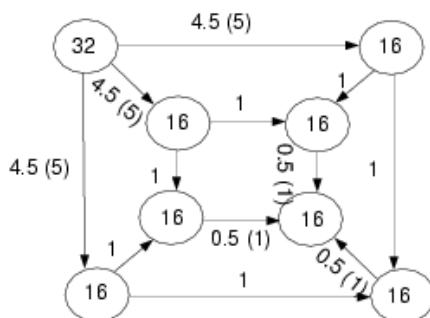
Η αρχική κατανομή του φορτίου στους επεξεργαστές, όπου ένας έχει 32 διπλάσιο από τον άλλους. Στις ακμές σημειώνεται το πλήθος των διεργασιών που μεταναστεύουν.



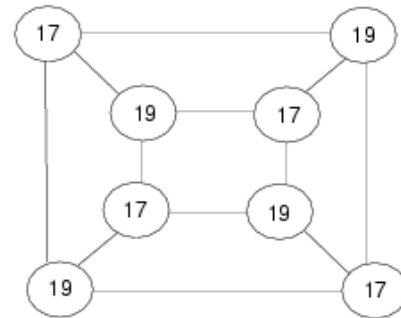
Δεύτερη επανάληψη του αλγορίθμου διάχυσης.



Τρίτη επανάληψη



Τέταρτη επανάληψη



Τελική κατανομή, ισορροπία.

Ένα από τα μειονεκτήματα των αλγορίθμων διάχυσης είναι η αργή σύγκλιση, ιδίως όταν βρίσκονται κοντά στο σημείο ισορροπίας, και η αιτία είναι παρόμοια με αυτής της αργής σύγκλισης του αλγορίθμου Jacobi για γραμμικά συστήματα. Ο ρυθμός σύγκλισης σε ένα γράφο είναι συνδεδεμένος με την τιμή της μικρότερης ιδιοτιμής της Λαπλασιανής, που συσχετίζεται με τις edge cuts του γράφου (τα σύνολα των ακμών που αν αφαιρεθούν μπορούν να διασπάσουν το γράφο σε υπογράφους). Ο Boillat (1990) απέδειξε ότι η χειρότερη περίπτωση είναι αυτή όπου ο γράφος έχει τη μορφή μια γραμμής, τότε το πλήθος των επαναλήψεων που απαιτείται είναι $O(p^2)$ (p το πλήθος των επεξεργαστών).

Ένας σημαντικός παράγοντας που οι αλγόριθμοι αυτοί δεν λαμβάνουν υπόψη τους είναι ότι η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των επεξεργαστών έχει κόστος. Για αυτό σε πολλές εφαρμογές είναι προτιμότερο οι μετανάστευση των διεργασιών να μην πραγματοποιηθεί, ωστόσο ο αλγόριθμος εξισορρόπησης συγκλίνει σε κάποια κατανομή. Οπότε τα αποτελέσματα κατά το τρέξιμο του αλγορίθμου χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό της μεταφοράς των δεδομένων των διεργασιών.

Αν p το πλήθος των επεξεργαστών, $G(V,E)$ ο συνεκτικός γράφος με κορυφές τους επεξεργαστές $|V|=p$. Κάθε κόμβος i έχει

φορτίο l_i και το μέσο φορτίο είναι $\bar{l} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p l_i$.

Το φορτίο που θα μεταφερθεί από τον κόμβο i στο j είναι δ_{ij} και ισχύει $\delta_{ij} = -\delta_{ji}$. Για να επιτευχθεί ισορροπία πρέπει $\sum_{(i,j) \in E} \delta_{ij} = l_i - \bar{l}$,

$i=1,2,\dots,p$. Από την παραπάνω σχέση προκύπτουν $p-1$ εξισώσεις, το πλήθος των ανεξάρτητων εξισώσεων είναι δεν μεγαλύτερο από το πλήθος των κόμβων μείον ένα. Όμως οι μεταβλητές του συστήματος είναι παραπάνω αφού είναι όσες και οι ακμές του γράφου και για κάθε γράφο ισχύει $|E| \geq |V| - 1$, οπότε είναι πιθανό να υπάρχουν άπειρες λύσεις. Από τις λύσεις αυτές επιλέγουμε την λύση που ελαχιστοποιεί τις μετακινήσεις δεδομένων. Το παραπάνω γραμμικό σύστημα με πίνακα A πρόπτωσης που ορίζεται

$$[a_{ij}] = \begin{cases} 1, & \text{αν } i > u \mid e(j) = (i, u) \\ -1, & \text{αν } i < u \mid e(j) = (i, u) \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$
 Αν $\mathbf{l} = (l_1, l_2, \dots, l_p)$ και $\mathbf{e}_1 = (1, 1, \dots, 1)$ τότε $\mathbf{b} = \mathbf{l} - \mathbf{e}_1 \bar{l}$. Το διάνυσμα $\mathbf{x}$ αντιπροσωπεύει τις μετακινήσεις μεταξύ των κόμβων. Οπότε το σύστημα είναι:

$$\min_x \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{x}$$

υποκείμενο στο

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}, \mathbf{A} \mid \mathbf{V} \mid \mathbf{E}.$$

Η βέλτιστη λύση είναι

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}$$

Όπου $\boldsymbol{\lambda}$ το διάνυσμα των Lagrange πολλαπλασιαστών.

$$\mathbf{L}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{b}$$

Όπου $\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{A}^T$, $\mid \mathbf{V} \mid \mathbf{V} \mid$, που αποτελεί το Laplacian πίνακα του γράφου G , που ορίζεται:

$$[L_{ij}] = \begin{cases} -1, & \text{αν } i \neq j, (i, j) \in E \\ \deg(i) \text{ βαθμός,} & \text{αν } i = j \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

Το ποσό του φορτίου που θα μεταφερθεί από των επεξεργαστή i στο j είναι $\lambda_i - \lambda_j$.

Στην περίπτωση που οι συνδέσεις μεταξύ των επεξεργαστών δεν είναι όμοιες κάθε ακμή του γράφου θα έχει και ένα βάρος που περιγράφεται στο διαγώνιο πίνακα βαρών $\mathbf{W}$. Οπότε θα έχουμε:

$$\min_x \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{x}$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}\mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}$$

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{W}\mathbf{A}^T$$

Η αντιμετώπιση του προβλήματος ως πρόβλημα διάχυσης της θερμότητας, που

περιγράφεται για δισδιάστατο χώρο με περιοδικές συνθήκες ως:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

Η με τη μορφή:

$$\frac{u(x, t + \Delta t) - u(x, t)}{\Delta t} = -D \frac{(u(x, t) - u(x - \Delta x, t)) + (u(x, t) - u(x + \Delta x, t))}{(\Delta x)^2}$$

ή

$$u(x, t + \Delta t) = u(x, t) - \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} (u(x, t) - u(x - \Delta x, t)) + (u(x, t) - u(x + \Delta x, t))$$

Την εξίσωση αυτή εφάρμοσε ο Cybenko σε ένα απλό γράφο, που σχημάτιζε ένα δακτύλιο, και απέδειξε ότι είναι ευσταθής και συγκλίνει αν $\frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2}$. Στη γενική της

μορφή η επαναληπτική σχέση εφαρμόζεται στο γράφο με τη σχέση:

$$\mathbf{u} \leftarrow \mathbf{u} - \mathbf{R}\mathbf{u}$$

όπου το $\mathbf{u}$ ορίζεται το διάνυσμα του φορτίου των γράφων και ο πίνακας $\mathbf{R}$ μοιάζει με τον Laplacian πίνακα του γράφου.

Η γενική μορφή της σχέσης της διάδοσης της θερμότητας:

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div} F = 0,$$

όπου η ροή θερμότητας $F = -k\nabla u$.

Η συσσωρευμένη ροή θερμότητας είναι:

$$Q = \int_0^\infty F dt,$$

με $\text{rot} Q = 0$, οπότε υπάρχει δυναμικό, βαθμωτό πεδίο τέτοιο ώστε:

$$Q = \nabla u$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση $c\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div} F = 0$

ως προς το χρόνο έχουμε:

$$\frac{1}{c\rho} \int_0^\infty \text{div} F dt = \frac{1}{c\rho} \text{div} Q = \frac{1}{c\rho} \nabla^2 q = u|_{t=0} - u|_{t=\infty}$$

Η παραπάνω σχέση είναι η συνεχής μορφή της $\mathbf{L}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{b}$. Και η $Q = \nabla u$ της $\mathbf{x} = \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}$.

Ο Laplacian πίνακας είναι θετικά ημι-ορισμένος, έχει μια ιδιοτιμή μηδέν με αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα που έχει μόνο

μονάδες, και αν ο γράφος είναι συνεκτικός οι υπόλοιπες ιδιοτιμές είναι θετικές. Ο αλγόριθμος θα συγκλίνει σε k επαναλήψεις, όπου k το πλήθος των διαφορετικών ιδιοτιμών. Για ένα πλήρως συνδεδεμένο γράφο με p κόμβους υπάρχει μόνο μία θετική ιδιοτιμή με πολλαπλότητα $p-1$.

Τελικά στην υλοποίηση του αλγορίθμου το φορτίο κάθε κόμβου μετά από κάθε επανάληψη θα είναι:

$$l_i \leftarrow l_i - \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} (l_i - l_j),$$

$$\text{όπου } c_{ij} = \frac{1}{\max\{\deg(i), \deg(j)\}}.$$

8.2 Messor: εξισορρόπηση φορτίου μέσω ενός σμήνους αυτόνομων agent

Τα peer-to-peer (P2P), ομότιμα υπολογιστικά συστήματα, είναι κατανεμημένες δομές, χωρίς κεντρικό έλεγχο, βασικό χαρακτηριστικό των οποίων είναι η διάθεση και η από κοινού χρήση των πόρων κάθε κόμβου, μέσω της απευθείας συναλλαγής μεταξύ των κόμβων, χωρίς την μεσολάβηση ενός εξυπηρετητή που αναλαμβάνει να τη διαπεραιώσει. Η ανταλλαγή πόρων περιλαμβάνει, εκτός από τις δημοφιλείς εφαρμογές ανταλλαγής αρχείων, και τη διάθεση χωρητικότητας για αποθήκευση δεδομένων και υπολογιστικής ισχύος. Τα συστήματα αυτά λόγω της αποκεντρωμένης δομής τους την έλλειψη κεντρικού ελέγχου και χάρη στις υψηλές ταχύτητες των σύγχρονων δικτύων, επιδεικνύουν μεγάλη αντοχή σε αστοχίες των επιμέρους συστημάτων που τα αποτελούν. Προσαρμοστικότητα στις αλλαγές του περιβάλλοντος (κίνηση στο δίκτυο αποχώρηση κάποιων μελών). Δυνατότητα κλιμάκωσης με την προσθήκη νέων μελών, όπου ακόμα και δραστηκή μεταβολή των μελών που αποτελούν το σύστημα δεν απαιτεί αλλαγές στη δομή και την αρχιτεκτονική του [23].

Χάρη στα P2P συστήματα πλειάδες απλών υπολογιστών μπορούν να

συνεργαστούν, χωρίς να έχουν γνώση του συνόλου του συστήματος, αλληλεπιδρώντας με τους γειτονικούς υπολογιστές και να διαχειριστούν μεγάλα φορτία δεδομένων (π.χ. Gnutella) και υπολογισμών (π.χ. SETI@home). Παρουσιάζουν γνωρίσματα και συμπεριφορές παρόμοιες με άλλα πολύπλοκα συστήματα, που μπορούν να αυτοργανώνονται.

Το πρόγραμμα Anthill επιδιώκεται να αναπτυχθεί μια πλατφόρμα ανάπτυξης P2P εφαρμογών, που να ενσωματώνει ιδέες και πολιτικές εμπνευσμένες από το χώρο του swarm intelligence. Το Messor αποτελεί μια P2P εφαρμογή για grid computing, που αποσκοπεί στη υποστήριξη εκτέλεσης χρονοβόρων παράλληλων υπολογιστικών εργασιών, οι οποίες που μπορούν να αποσυντεθούν σε ένα μεγάλο σύνολο ανεξάρτητων διεργασιών. Σκοπός του Messor είναι η εξισορρόπηση του φορτίου, που δημιουργείται από την ανάθεση των διεργασιών αυτών στους κόμβους ενός δικτύου grid computing. Η τακτική ακολουθεί είναι αντίθετη με αυτή που ακολουθεί ένα είδος μερμηγκιών, για την συγκέντρωση των πτωμάτων και των άχρηστων αντικειμένων, που είναι διασπαρμένα στο χώρο, σε μεγάλους σωρούς.

Επιδιώκεται η ομοιόμορφη διασπορά των αντικειμένων στο χώρο και η εξάλειψη των σωρών. Αν θεωρήσουμε ότι τα αντικείμενα αποτελούν τις διεργασίες, τα σημεία εναποθέσεις είναι κόμβοι του δικτύου και οι σωροί αντιπροσωπεύουν τους υπερφορτωμένους κόμβους ή τους κόμβους που παράγουν τις διεργασίες. Αναλυτικότερα ένα μερμήγκι που δεν κουβαλά κάποιο αντικείμενο περιφέρεται τυχαία ωσότου συναντήσει ένα και το πάρει. Όταν μεταφέρει ένα αντικείμενο το αφήνει αφού έχει περιπλανηθεί για κάποιο χρονικό διάστημα χωρίς να έχει συναντήσει κάποιο άλλο αντικείμενο.

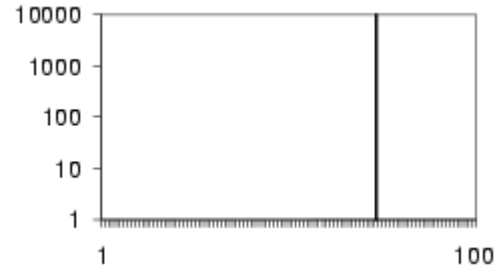
Για το Messor σύστημα κάθε κόμβος αποτελεί μία φωλιά, οι διεργασίες αποτελούν τα αντικείμενα που μεταφέρουν μερμήγκια και το δίκτυο ενώνει μεταξύ τους της φωλιές επιτρέποντας στα μερμήγκια που βρίσκονται σε μια φωλιά να μετακινηθούν σε μία άλλη.

Το κάθε μερμήγκι μπορεί να βρίσκεται σε δύο καταστάσεις SearchMax και SearchMin. Στη SearchMax κατάσταση περιπλανιέται ωσότου να συναντήσει μια υπερφορτωμένη φωλιά (από διεργασίες), τότε καταγράφει το αναγνωριστικό της φωλιάς και μεταβαίνει στην κατάσταση SearchMin. Κατά την κατάσταση SearchMin το μερμήγκι περιφέρεται αναζητώντας μια φωλιά με πολύ μικρό υπολογιστικό φορτίο. Όταν βρεθεί αυτή η φωλιά αιτείται του διαχειριστή εργασιών της φωλιάς να μεταφέρει διεργασίες από την υπερφορτωμένη φωλιά σε αυτήν, και το μερμήγκι μεταβαίνει ξανά στη κατάσταση SearchMax. Η μεταφορά των διεργασιών γίνεται απευθείας μεταξύ των κόμβων-φωλιών, δεν τις μεταφέρει μαζί του το μερμήγκι για να αποφεύγεται η άσκοπη μετακίνηση. Όταν ολοκληρωθεί η διεργασία τα αποτελέσματα στέλνονται στο πατέρα της διεργασίας, το κόμβο που δημιουργήθηκε.

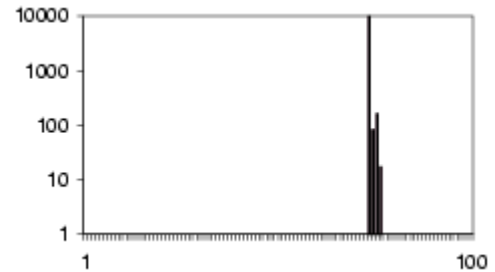
Η εκτίμηση του φορτίου γίνεται με το μήκος της ουράς του δρομολογητή της φωλιάς ή στην περίπτωση που υπάρχει πληροφορία για το πιθανό φορτίο συνυπολογίζεται. Το χαρακτηρισμό μιας φωλιάς ως υπερφορτωμένη ή το αντίθετο, αποφασίζουν τα μερμήγκια με βάση τις τιμές του φορτίου των φωλιών που έχουν προηγουμένως επισκεφθεί. Η κρίση του γίνεται μόνο χάρη στην τοπική αντίληψή τους, χωρίς γνώση όλων των κόμβων.

Το μερμήγκι δεν επιλέγει εντελώς τυχαία την επόμενη φωλιά, αλλά κατά την περιπλάνησή του συλλέγει στοιχεία σχετικά με το φορτίο κάθε φωλιάς κάθε κόμβου που επισκέφθηκε και τα εναποθέτει σε μια δομή στη παρούσα φωλιά (προσομοίωση της λειτουργίας της φερμόνης). Η πληροφορία είναι διαθέσιμη στα επόμενα μερμήγκια που θα επισκεφθούν τη φωλιά. Τα επόμενα μερμήγκια που θα περάσουν από τη φωλιά θα επιλέξουν την επόμενη φωλιά τυχαία ανάμεσα από αυτές, που θεωρούνται περισσότερο φορτωμένες (SearchMax) ή λιγότερο (SearchMin), με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία. Με αυτόν τον τρόπο τα μερμήγκια θα κινηθούν γρηγορότερα προς τις περιοχές που υπάρχει πρόβλημα. Για να

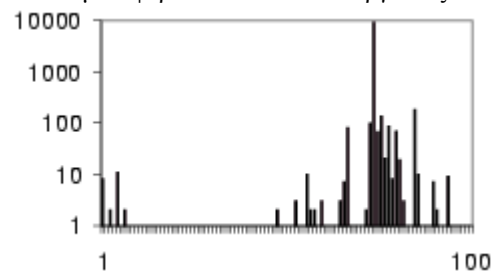
μην μείνει κάποια περιοχή του δικτύου ανεξερεύνητη, κάποια μερμήγκια συχνά (με βάση την πιθανότητα εξερεύνησης) επιλέγουν την επόμενη φωλιά εντελώς τυχαία (από το σύνολο των γνωστών κόμβων).



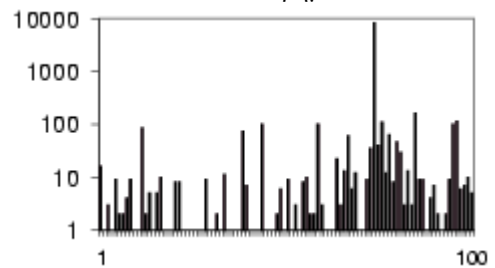
Το δίκτυο αποτελείται από 100 ανενεργές φωλιές (κόμβους). Σε έναν από αυτούς δημιουργούνται 10000 διεργασίες. Στο δίκτυο δρουν 20 μερμήγκια.



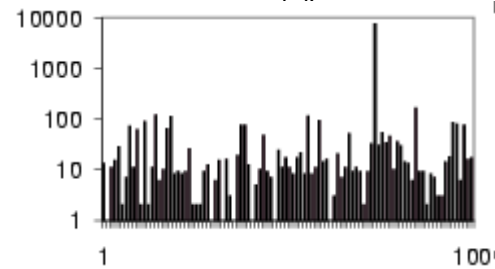
Μετά από 5 βήματα, κάθε κόμβος σε κάθε βήμα μπορεί να μεταφέρει το πολύ 200 διεργασίες.



Μετά από 10 βήματα.



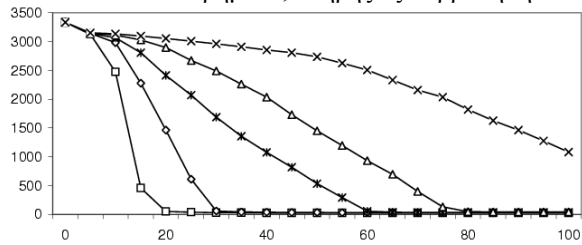
Μετά από 15 βήματα.



Μετά από 20 βήματα.

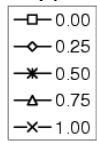


Μετά από 20 βήματα, πλήρης εξισορρόπηση.



Η απόκλιση των μετρούμενων τιμών του φορτίου από τη μέση τιμή του προς τις επαναλήψεις. Η συμπεριφορά του συστήματος μεταβάλλεται ανάλογα του με την τιμή της πιθανότητας εξερεύνησης. Το δίκτυο αποτελείται από 1000 φωλιές τυχαία συνδεδεμένες με βαθμό κάθε κόμβου 6.

Η πιθανότητα εξερεύνησης



9 Εφαρμογή: Swarm-Net

Στους σύγχρονους χώρους εργασίας υπάρχουν πολλοί προσωπικοί υπολογιστές συνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω του τοπικού δικτύου. Τα σύγχρονα δίκτυα εξασφαλίζουν υψηλές ταχύτητες 100Mbps(Fast Ethernet), 1Gbps, παράλληλα με την χρήση switch. Οι υπολογιστές αυτοί καθώς και το δίκτυο μεγάλο ποσοστό του χρόνου παραμένουν ανενεργά δεν χρησιμοποιούνται από κάποια εφαρμογή του χρήστη. Παράλληλα υπάρχουν υπολογιστές όπου οι εφαρμογές που χρησιμοποιεί ο χρήστης τους βαρύνουν ιδιαίτερα, με συνέπεια να αυξάνεται ο χρόνος απόκρισης.

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν πολύ οργανισμοί είναι ότι τα προγράμματα γίνονται όλο και πιο απαιτητικά σε υπολογιστική ισχύ και μνήμη. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την αγορά νέων ισχυρότερων μηχανημάτων για την αντικατάσταση των παλαιότερων. Όμως για οικονομικούς λόγους δεν δυνατή η αντικατάσταση όλων των υπολογιστών άλλα των χρηστών που έχουν της μεγαλύτερες ανάγκες ισχύος, (οι υπόλοιποι χρήστες όταν έχουν ανάγκες, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον ισχυρότερο υπολογιστή του συναδέλφου τους, όταν εκείνος δεν τον χρησιμοποιεί). Μια άλλη αντιμετώπιση οδηγεί στην αγορά ενός εξυπηρετή (server) που τρέχει τις βαριές εφαρμογές που έχουν ανάγκη η χρήστες. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει μεγάλη οικονομική επιβάρυνση, κάθε αλλαγή που γίνεται στο δίκτυο και στις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται πρέπει να ενημερώνονται στον εξυπηρετή από εξειδικευμένο άτομο. Οι υπόλοιποι υπολογιστές παραμένουν ακρισιμποιήτοι, σπαταλούνται πόροι.

Συνήθως οι απλοί χρήστες χρησιμοποιούν ταυτόχρονα πολλά προγράμματα, δηλαδή τα προγράμματα αυτά βρίσκονται φορτωμένα στη μνήμη τρέχουν οι διεργασίες που τα εκτελούν αλλά βρίσκονται το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε κατάσταση αναμονής της εισαγωγής στοιχείων ή εντολών από το χρηστή. Παράδειγμα ο υπολογιστής μιας γραμματεώς

μπορεί να τρέχει εφαρμογές γραφείου (Word, Excel), κάποιο πρόγραμμα εμπορικών εφαρμογών και κάποιο πρόγραμμα αναπαραγωγή μουσικής. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα προγράμματα αυτά δεν έχουν μεγάλες ανάγκες για υπολογιστική ισχύ και μνήμη για να ανταποκριθούν στις ανάγκες του χρήστη. Απαιτούν όμως όσο χρονικό διάστημα είναι ενεργοποιημένες αναμένοντας τον χρήστη, χωρίς ουσιαστικά να τον εξυπηρετούν, μεγάλα ποσά μνήμης και αρκετή υπολογιστική ισχύ. Ο χρήστης δεν κλείνει τις εφαρμογές μόλις αμέσως τελειώσει την εργασία του με αυτή, γιατί αν έχει σκοπό να τη χρησιμοποιήσει σύντομα ο χρόνος εκκίνησης της εφαρμογής είναι μεγάλος, λόγω του μεγέθους των βιβλιοθηκών που χρειάζεται η εφαρμογή. Με αυτό τον τρόπο μεγάλες ποσότητες μνήμης και υπολογιστικής ισχύος εγκλωβίζονται από τις εφαρμογές αυτές μειώνοντας την απόδοση του υπολογιστή.

Σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχουν χρήστες με ιδιαίτερες απαιτήσεις που ξεπερνούν κατά πολύ τις δυνατότητες ενός απλού υπολογιστή. Παράδειγμα ένας φοιτητής σε μια πανεπιστημιακή σχολή που επιθυμεί τρέξει ένα πρόγραμμα με δυνατότητα παραλληλισμού και απαιτήσεις υπέρ-υπολογιστή, μπορεί να χρησιμοποιήσει τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ των λιγότερο απασχολημένων υπολογιστών του δικτύου των. Στο Ε.Μ.Π. υπάρχουν χιλιάδες υπολογιστές συνδεδεμένοι οι οποίοι θα μπορούσαν κυρίως τις νυχτερινές ώρες σαν σύνολο να αποτελέσουν ένα πολύ ισχυρό υπολογιστικό σύστημα κατανεμημένης παράλληλης επεξεργασίας.

Στο αντικείμενο αυτό είχε παρουσιαστεί στο παρελθόν ένα σχέδιο το NOW (Network Of Workstations) και το λειτουργικό GLUnix (Global Layer Unix) από το Berkeley που ήταν όμως κεντρικά ελεγχόμενο. Αργότερα με την ανάπτυξη του διαδικτύου εμφανίστηκαν και άλλα προγράμματα Grid Computing όπως το SETI@home που ήταν και αυτό βασισμένο σε μια κεντρικά ελεγχόμενη δομή. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονη ανάπτυξη

των P2P ομότιμων συστημάτων κυρίως στο πεδίο της ανταλλαγής αρχείων (Napster, Gnutella) αλλά παράλληλα και προγράμματα για την χρήση της υπολογιστικής ισχύος των υπολογιστών που βρίσκονται συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο σε διεργασίες που γεννήθηκαν σε άλλους υπολογιστές (πλατφόρμες PVM, MOSIX, προγράμματα όπως το YACA, POPCORN, PACMAN, Anthill). Χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων ήταν η έντονη μεταβλητότητάς τους, χιλιάδες χρήστες εισέρχονταν και αποχωρούσαν δυναμικά από το σύστημα αντίστοιχα και οι πόροι που διέθεταν.

Τα κατανεμημένα υπολογιστικά συστήματα λόγω της δομής τους, που μεταβάλλεται συνεχώς όπως και το μέγεθος τους και της ανομοιογένειά τους δεν επιτρέπουν την ύπαρξη ενός κεντρικού μηχανισμού ελέγχου, η ύπαρξή του θα δημιουργούσε μεγάλο φορτίο στα δίκτυα αλλά και μεγάλη υπολογιστική ισχύ για να υλοποιηθεί. Οι μηχανισμοί αυτοί πρέπει να έχουν απλή δομή ώστε να μην επιβαρύνουν την λειτουργία των υπολογιστών που μετέχουν στο σύστημα, να προσαρμόζονται εύκολα στις μεταβολές των συνθηκών και να διαθέτουν ευρωστία. Στο χώρο αυτό έχει επικρατήσει ο κατανεμημένος έλεγχος που βασίζεται στην τοπική πληροφορία. Υλοποιείται με multi agent συστήματα, όπου πολλοί, agents γειτονικοί μεταξύ τους αλληλεπιδρούν και συντονίζουν την δράση τους. Κύριος στόχος όλων αυτών των συστημάτων είναι η κατανομή του φορτίου στους υπολογιστές με σεβασμό στα χαρακτηριστικά τους (μνήμη, υπολογιστική ισχύ, ταχύτητα σύνδεσης). Η εξισορρόπηση του φορτίου θα εξασφαλίσει την καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος στον τομέα του χρόνου απόκρισης και χρησιμοποίησης πόρων.

Σχηματίζεται ένα πεδίο όπου γεννιούνται διεργασίες που επιζητούν επεξεργαστές να τους διαθέσουν υπολογιστικό χρόνο. Οι διαφορετικές στρατηγικές κατανομή των διεργασιών υλοποιείται μέσω διαφορετικών αλγορίθμων. Οι κυρίαρχοι αλγόριθμοι στην

εξισορρόπηση του υπολογιστικού φορτίου είναι κατανεμημένοι και βασίζονται στις τοπικές αλληλεπιδράσει-ανταλλαγές φορτίου με τους γείτονες τους. Οι πιο επιτυχημένοι από αυτούς είναι εμπνευσμένοι από φυσικά φαινόμενα όπως η διάχυση θερμότητας. Επίσης επειδή τα κατανεμημένα συστήματα ομότιμων υπολογιστών έχουν πολλά δομικά και δυναμικά χαρακτηριστικά με πολύπλοκα συστήματα όπως οι κοινωνίες των εντόμων η συμπεριφορά των εντόμων αποτελεί πρότυπο για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων, π.χ. Messor-Anthill.

9.1 Το μοντέλο του swarm-net

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας ακολουθεί μια προσπάθεια ανάπτυξης μιας νέας μεθόδου κατανομής διεργασιών σε ένα δίκτυο ομότιμων υπολογιστών, που βασίζεται στις αρχές με τις οποίες γίνεται ο καταμερισμός εργασιών στις κοινωνίες εντόμων (μερμηγκιών, μελισσών). Βασικό στοιχείο στη συμπεριφορά των εντόμων είναι το κατώφλι απόκρισης στη ζήτηση για κάποια εργασία. Η τιμή του κατωφλίου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αλλά και από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Η επιβίωση των εντόμων αυτών εκατομμύρια ετών αποτελεί μια εγγύηση για την αποτελεσματικότητα και την απλότητα των μηχανισμών που χρησιμοποιούν. Μηχανισμούς που επιδιώκεται να προσδώσουν στο σύστημα των υπολογιστών την ίδια προσαρμοστικότητα και ευρωστία στην εκτέλεση του έργου τους., όπως και σε μια αποικία μερμηγκιών.

9.1.1.1 Δημιουργία διεργασιών στο Swarm-net

Στο κατανεμημένο σύστημα επεξεργασίας υπάρχει ένα σύνολο n κοινών εφαρμογών $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες. Κάθε εφαρμογή υλοποιείται από την εκτέλεση πολλών διεργασιών και τη γένεση νέων που υποστηρίζονται από ένα σύνολο βιβλιοθηκών

(π.χ. dll) που αποτελούν και το μεγαλύτερο όγκο σε μνήμη της εφαρμογής. Οπότε για να μεταφερθεί μια διεργασία μιας εφαρμογής σε κάποιον άλλον υπολογιστή πρέπει σε αυτόν να είναι εγκαταστημένες οι βιβλιοθήκες που υποστηρίζουν την εφαρμογή, αφού το μέγεθος της κάθε διεργασίας είναι συνήθως μικρό σε σχέση με το μέγεθος των βιβλιοθηκών που έχουν μεγάλο κόστος μεταφοράς πάνω από το δίκτυο.

Όταν από το λειτουργικό σύστημα δημιουργείται μια διεργασία από το κοινό σύνολο εφαρμογών αυτή δεν εισάγεται στην ουρά του χρονοδρομολογητή, αλλά η δομή που την περιγράφει εκπέμπεται με ένα πακέτο (broadcast) σε όλους τους γειτονικούς του υπολογιστές. Οι γειτονικοί υπολογιστές και γενικά η απόσταση στο δίκτυο ορίζεται με βάση το χρόνο που χρειάζεται ένα πακέτο για να αποσταλεί από τον ένα στο άλλο. Το πόσο μακριά θα φθάσει ένα (broadcast) πακέτο εξαρτάται από τη διάρκεια της ζωής του (τιμή του TTL πεδίου). Όταν φθάσει αυτό το πακέτο σε κάποιον υπολογιστή η δομή της διεργασίας εισάγεται στην ουρά των υποψηφίων διεργασιών, στην ίδια ουρά τοποθετεί και ο υπολογιστής στο οποίο γεννήθηκε η διεργασία.

9.1.1.2 Καταμερισμός διεργασιών στο Swarm-net

Οι υπολογιστές σε τακτά χρονικά διαστήματα εξετάζουν την ουρά υποψηφίων διεργασιών και υπολογίζουν την ζήτηση s_i σε υπολογιστικό χρόνο (εκτίμηση) για την κάθε εφαρμογή i . Στη συνέχεια με πιθανότητα $T(j, s_i, t)$ επιλέγει την διεργασία j της εφαρμογής s_i και την εισάγει στην ουρά του χρονοδρομολογητή, εφόσον είναι διαθέσιμη στον υπολογιστή που την γέννησε, (σε περίπτωση που δεν την έχει πάρει για εκτέλεση κάποιος άλλος υπολογιστής) και μεταφέρει τα δεδομένα της στη μνήμη του.

Η πιθανότητα αυτή καθορίζεται με παρόμοια σχέση με αυτή που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.4.

$$T(j, s_i, t) = \frac{s_i^n(t)}{s_i^n(t) + \theta_i(t)}$$

Ειδικότερα σε αυτήν την περίπτωση $n=2$,

$$T(j, s_i, t) = \frac{s_i^2(t)}{s_i^2(t) + \theta(j, s_i, t)}.$$

Η τιμή του κατωφλιού $\theta(j, s_i, t)$ καθορίζεται από την κατάσταση του υπολογιστή την χρονική στιγμή της επιλογής. Οι παράγοντες που καθορίζουν το κατώφλι είναι:

- ✓ $m(j, s_i, t)$ η ποσότητα της κατειλημμένης μνήμης που θα έχει το υπολογιστής με τα την αποδοχή της διεργασίας j . Η ποσότητά αυτή εξαρτάται κυρίως από το αν στο σύστημα τρέχει εκείνη τη στιγμή η εφαρμογή της διεργασίας, δηλαδή αν είναι φορτωμένες στη μνήμη οι βιβλιοθήκες ή πρέπει να φορτωθούν τότε. Στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει επιβάρυνση του υπολογιστή με κόστος ανάλογο του με το μέγεθος των βιβλιοθηκών. Επίσης ένας υπολογιστής που έχει σχετική πληρότητα στη μνήμη του αποφεύγει να δρομολογεί νέες διεργασίες διότι επιβαρύνει την απόδοσή του. Επιδιώκεται ο κάθε υπολογιστής να λειτουργεί με το μικρότερο ποσό κατειλημμένης μνήμης σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις. Αν $M(t)$ η ελεύθερη μνήμη του υπολογιστή την χρονική στιγμή t και m_j οι απαιτήσεις της διεργασίας και M_{s_i} οι απαιτήσεις των βιβλιοθηκών, τότε:

$$m(j, s_i, t) = \begin{cases} M(t) - m_j, & \text{αν τρέχει η διεργασία } s_i. \\ M(t) - m_j - M_{s_i}, & \text{αν δεν τρέχει η διεργασία } s_i \end{cases}$$

- ✓ $d(j, t)$ το κόστος μεταφοράς της διεργασίας και των δεδομένων της πάνω από το δίκτυο. Το μέγεθος εξαρτάται από τη καθυστέρηση τ και την ταχύτητα c της σύνδεσης των δύο υπολογιστών. Αν u ο υπολογιστής που γεννήθηκε η διεργασία και v αυτός που την εκτελεί, τότε:

$$d(j, t) = \tau(u, v) + m_j / c(u, v).$$

Στην περίπτωση που εκτελεστεί στον ίδιο υπολογιστή που δημιουργήθηκε τότε $d(j,t)=0$. Αποτρέπονται οι μεταναστεύσεις των διεργασιών όταν δεν το απαιτούν οι ανάγκες του συστήματος διότι επιβαρύνουν το δίκτυο και του ίδιους τους υπολογιστές αφού η μεταφορά έχει υπολογιστικό φόρτο. Επίσης αποτρέπονται και οι μεταναστεύσεις όταν υπάρχει έντονη κίνηση στο δίκτυο (μειωμένο διαθέσιμο bandwidth). Στην πραγματικότητα ο χρόνος που απαιτείται για την μεταφορά των δεδομένων υπολογίζεται με βάση τον χρόνο που απαιτήθηκε για την αποστολή του πακέτου που περιέχει την δομή της διεργασίας.

- ✓ $q(t)$ το υπολογιστικό φορτίο (εκτίμηση) των διεργασιών που βρίσκονται στην ουρά του χρονοδρομολογητή του υπολογιστή.

Η σχέση που προσδιορίζει την τιμή του κατωφλίου είναι:

$$\theta(j, s_i, t) = \lambda m^2(j, s_i, t) + \mu d(j, t) + \xi q(t),$$

όπου $\lambda, \mu, \xi > 0$ συντελεστές που καθορίζουν την επίδραση του κάθε παράγοντα αλλά και κανονικοποιούν τις τιμές τους. Ο συντελεστής μ καθορίζεται και από τον χρήστη. Όσο αυξάνει την τιμή του μ ο υπολογιστής γίνεται πιο απρόθυμος να αποδεχθεί διεργασίες από άλλον υπολογιστή.

Χάρη στο μεγάλο μέγεθος που έχουν οι βιβλιοθήκες των εφαρμογών, όταν σε κάποιον υπολογιστή ο χρήστης θέλει να εκκινήσει μια εφαρμογή από το κοινό σύνολο, αν η ταχύτητα του δικτύου είναι υψηλή, τότε πιθανό να τρέξει την εφαρμογή αυτή από κάποιον άλλον υπολογιστή που την έχει ήδη φορτωμένη. Με αυτό τον τρόπο εξοικονομείται μνήμη, δεν φορτώνονται ξανά οι βιβλιοθήκες, και υπολογιστική ισχύς, διότι κάθε εφαρμογή τρέχει μια πλειάδα διεργασιών (π.χ. το ορθογραφικό έλεγχο). Εμφανίζεται εξειδίκευση των υπολογιστών ως προς τις εφαρμογές, κάθε υπολογιστής επιλέγει διεργασίες εφαρμογών που ήδη τρέχει και αποφεύγει τις υπόλοιπες.

Στην περίπτωση όμως που ένας υπολογιστής δεν τρέχει κάποια εφαρμογή με αυξημένη ζήτηση, όταν οι υπολογιστές που

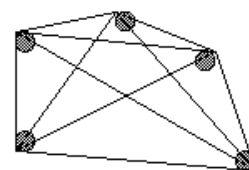
εξειδικεύονται σε αυτήν έχουν λίγη διαθέσιμη μνήμη, τότε και αυτός ο υπολογιστής θα αναγκαστεί να φορτώσει την εφαρμογή για να εξυπηρετήσει τη ζήτηση στο δίκτυο.

Η διεργασία που επιλέγεται βγαίνει από την ουρά των υποψηφίων διεργασιών, οπότε μειώνεται η ζήτηση για την εφαρμογή που αντιστοιχεί διεργασία κατά το ποσό του υπολογιστικού φορτίου της διεργασίας αυτής. Η διεργασία εισάγεται στην ουρά του χρονοδρομολογητή όπου εκτελείται κυκλικά (round robin) κατά ένα κβάντο χρόνου.

Στην προσομοίωση σε κάθε επανάληψη θεωρείται ότι διαρκεί όσο ένα κβάντο κατά το οποίο εκτελούνται τόσες μονάδες υπολογιστικού φορτίου όση και η ισχύς του κάθε επεξεργαστή.

9.1.1.3 Το δίκτυο των ομότιμων υπολογιστών (P2P)

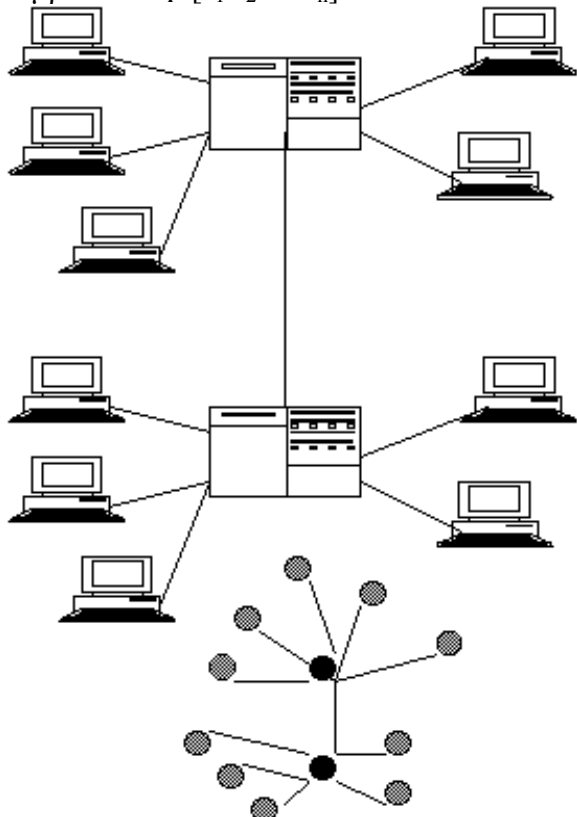
Το δίκτυο των υπολογιστών παριστάνεται από ένα πλήρως συνδεδεμένο γράφο, όπου τα βάρη των ακμών αντιπροσωπεύουν την ταχύτητα της σύνδεσης μεταξύ των κόμβων. Ο γράφος είναι πλήρως συνδεδεμένος, διότι πρόκειται για δίκτυο ομότιμων (P2P) υπολογιστών, χωρίς κάποιον κεντρικό υπολογιστή εξυπηρετή (server) σε κάποιο τοπικό δίκτυο, όπου όποιος υπολογιστής γίνεται μέλος του δικτύου αυτού μπορεί να επικοινωνεί με κάθε άλλο υπολογιστή του δικτύου.



P2P δίκτυο ομότιμων υπολογιστών.

Κάθε κόμβος περιγράφεται ένα διάνυσμα που ορίζεται από το υπολογιστικό

φορτίο κάθε εφαρμογής σύμφωνα με την ουρά των υπονηφίων διεργασιών, για τον i κόμβο είναι $I_i = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n]^T$.



Κεντρικά οργανωμένο και ελεγχόμενο δίκτυο υπολογιστών.

Για την εισαγωγή ενός νέου υπολογιστή στο δίκτυο δεν απαιτείται κάποια ρύθμιση, απλώς όταν δημιουργηθεί μια διεργασία εκπέμπει ένα μήνυμα προς οποιαδήποτε ενδιαφερόμενο (broadcast). Αρχικά ο χρόνος επιβίωσης αυτού μηνύματος (TTL) είναι μικρός, σε περίπτωση που δεν υπάρξει απόκριση αυξάνει το χρόνο TTL ώσπου να λάβει. Παράλληλα η αποχώρηση ενός υπολογιστή από το δίκτυο επιτρέπεται αφού ολοκληρώσει την εκτέλεση των «μεταναστριών» διεργασιών ή την αποστολή τους σε άλλους υπολογιστές. Η ικανότητα του δικτύου να κλιμακώνεται, και να προσαρμόζεται στη δυναμική τοπολογία του δικτύου (εισαγωγή, αποχώρηση υπολογιστών, μεταβολή της ταχύτητας μιας σύνδεσης) επιτρέπει στο σύστημα να επιδεικνύει ευρωστία και προσαρμοστικότητα τον καταμερισμό και την αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

9.1.2.1 Αλγόριθμος διάχυσης θερμότητας (Heat Diffusion)

Στην εξομοίωση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου Swarm-net συγκρίνεται με την συμπεριφορά άλλων αλγορίθμων όπως ο ευρέως διαδεδομένος της διάχυσης θερμότητας.

Όταν δημιουργείται μια διεργασία σε έναν υπολογιστή αυτός συγκεντρώνει στοιχεία για το φορτίο όλων των γειτονικών του υπολογιστών και επιλέγει ο ίδιος τον καταλληλότερο για την πιθανή μετανάστευση της διεργασίας.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται μια παραλλαγή, βασισμένη όμως στις αρχές του βασικού αλγορίθμου. Η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι ο υπερφορτωμένος υπολογιστής δεν επιλέγει αιτιοκρατικά των υπολογιστή με στον οποίο θα μεταφέρει το φορτίο του αλλά με σταθμισμένη πιθανότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι στο θεωρητικό μοντέλο του αλγορίθμου θεωρείται ότι το επιπλέον φορτίο του υπολογιστή μπορεί να διαιρεθεί και να μεταφερθεί σε διαφορετικούς υπολογιστές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μια διεργασία δεν μπορεί να διαιρεθεί, πρέπει να επιλεγεί ένας υπολογιστής.

Η πιθανότητα να μεταναστεύσει μια διεργασία με φορτίο l από τον υπολογιστή u με υπολογιστικό φορτίο στην ουρά δρομολόγησης $q_u(t)$ στον v με $q_v(t)$ και κόστος μετάδοσης $d(l, u, v, t)$ είναι:

$$P(u \rightarrow v, l) = \frac{1}{d(l, u, v, t)} \frac{u(q_u(t) - l - q_v(t))}{\sum_{\forall j} \frac{1}{d(l, u, j, t)} u(q_u(t) - l - q_j(t))},$$

όπου $u(\cdot)$ βηματική συνάρτηση, έτσι ώστε όταν $q_u(t) - l - q_v(t) < 0$ τότε $u(q_u(t) - l - q_v(t)) = 0$, η διεργασία μεταφέρεται σε υπολογιστές με μικρότερο φορτίο, οι οποίοι έχουν την απαραίτητη ελεύθερη μνήμη να φορτώσουν τη διεργασία και τις πιθανόν βιβλιοθήκες που χρειάζεται. Στην περίπτωση που δεν επιλεγεί κάποιος υπολογιστής να μεταναστεύσει η διεργασία εκτελείται από τον τοπικό επεξεργαστή. Ο

παράγοντας του κόστους του δικτύου προσδίδει την έννοια της τοπικότητας που έχει ο αλγόριθμος της διάχυσης, απόσταση που στην περίπτωση αυτή δεν είναι τόσο τοπολογική (μήκος μονοπατιού) αλλά χρονική.

Με τη χρήση αυτής της σταθμισμένης ρουλέτας προσπαθεί να επιτευχθεί έμμεσα η «διαίρεση» των διεργασιών όπως στο θεωρητικό αλγόριθμο της διάχυσης θερμότητας. Στην περίπτωση που επιλεγόταν ο υπολογιστής με το μικρότερο φορτίο θα επρόκειτο για έναν άπληστο αλγόριθμο όπως αυτός που ακολουθεί.

9.1.2.2 Άπληστος αλγόριθμος (Greedy)

Ο αλγόριθμος αυτός όταν δημιουργείται μια διεργασία αφού συγκεντρώσει πληροφορίες για το φορτίο των γειτονικών σε αυτόν υπολογιστές, επιλέγει το υπολογιστή με το μικρότερο φορτίο, και μεταφέρει σε αυτόν την διεργασία. Αν ο υπολογιστής όπου γεννήθηκε η διεργασία είναι έχει το μικρότερο φορτίο, τότε η διεργασία εκτελείται τοπικά. Υπάρχει μια παραλλαγή όπου για την διεργασία μιας εφαρμογής επιλέγει μόνο ανάμεσα στους υπολογιστές που τρέχουν αυτή τη διεργασία. Αυτή η παραλλαγή εξοικονομεί πολλούς πόρους, τόσο από την επιπλέον μνήμη αλλά και τον επιπλέον υπολογιστικό φόρτο για να φορτωθούν. Όμως έχει ένα σοβαρό μειονέκτημα, αν παράδειγμα μια διεργασία δημιουργείται σε έναν υπολογιστή που είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένος ενώ σε άλλοι υπολογιστές είναι ανενεργοί, δεν τρέχουν καμία εφαρμογή τότε το σύνολο των υπολογιστών από το οποίο καλείται να επιλέξει ο πρώτος υπολογιστής δεν περιέχει τους ανενεργούς διότι δεν τρέχουν την εφαρμογή. Η ύπαρξη του τυχαίου στους δύο προηγούμενους αλγορίθμους τους επιτρέπει να ανακαλύψουν νέα μονοπάτια νέους υπολογιστές με διαθέσιμους πόρους έτοιμους να συνεισφέρουν. Δεν εγκλωβίζονται εύκολα σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.

9.1.3 Το επιπλέον φορτίο που δημιουργούν οι αλγόριθμοι αυτοί στο δίκτυο και στους υπολογιστές

Η αλγόριθμος swarm-net απαιτεί την αποστολή μηνυμάτων μόνο όταν δημιουργείται μια διεργασία. Τα μηνύματα αυτά απευθύνονται σε όλους (broadcast) και η διάρκεια της ζωής τους είναι αρχικά μικρή, ώστε να μην ταξιδεύουν μακριά στο δίκτυο (τους πλησιέστερους γείτονες) και να επιβαρύνουν, αυξάνεται ο χρόνος TTL για να αναζητήσουν κάποιους πιο απομακρυσμένους γείτονες περισσότερο πρόθυμους να εξυπηρετήσουν.

Στην περίπτωση το αλγορίθμου διάχυσης θερμότητας απαιτείται σε τακτά χρονικά διαστήματα ο υπολογιστής να υποβάλει ερωτήματα σχετικά με το φορτίο σε όλους τους γειτονικούς υπολογιστές (και εδώ ορίζονται οι γειτονικοί με βάση το χρόνο TTL) και αναμένει απάντηση από αυτούς. Στο δίκτυο δημιουργείται διπλάσια κίνηση (ερώτηση προς όλους και απάντηση από όλους) και παράλληλα όλοι αυτοί υπολογιστές απασχολούνται για να απαντήσουν.

Ο άπληστος αλγόριθμος εκτός από τη την επιβάρυνση που περιγράφεται παραπάνω, επιβαρύνει και τον υπολογιστή που καλείται να κάνει την επιλογή αφού χρειάζεται να πραγματοποιήσει κάθε φορά μια ταξινόμηση.

9.2 Η εξομοίωση

Κατά την εξομοίωση εξετάζουμε την συμπεριφορά κάτω από τις ίδιες συνθήκες τεσσάρων μοντέλων.

1. Το μοντέλων των απλών υπολογιστών που δεν επιτρέπεται η μετανάστευση διεργασιών. Κάθε διεργασία εκτελείται από τον υπολογιστή που δημιουργήθηκε.
2. Το δίκτυο των ομότιμων υπολογιστών, όπου ο καταμερισμός των διεργασιών υλοποιείται με τον αλγόριθμο swarm-net.
3. Ο καταμερισμός υλοποιείται με τον άπληστο αλγόριθμο.
4. Και με τον αλγόριθμο διάχυσης θερμότητας.

Σε κάθε κύκλο της εξομοίωσης δημιουργείται μία διεργασία που καλείται να εκτελεστεί σύμφωνα και με τα τέσσερα παραπάνω μοντέλα.

Το πλήθος του συνόλου κοινών διεργασιών είναι 10. Το ποσό της μνήμης που καταλαμβάνουν οι βιβλιοθήκες τις είναι τυχαία κατανεμημένο στη καθεμία μεταξύ 400 και 1200. Το αντίστοιχο υπολογιστικό φορτίο είναι μεταξύ 300 και 700.

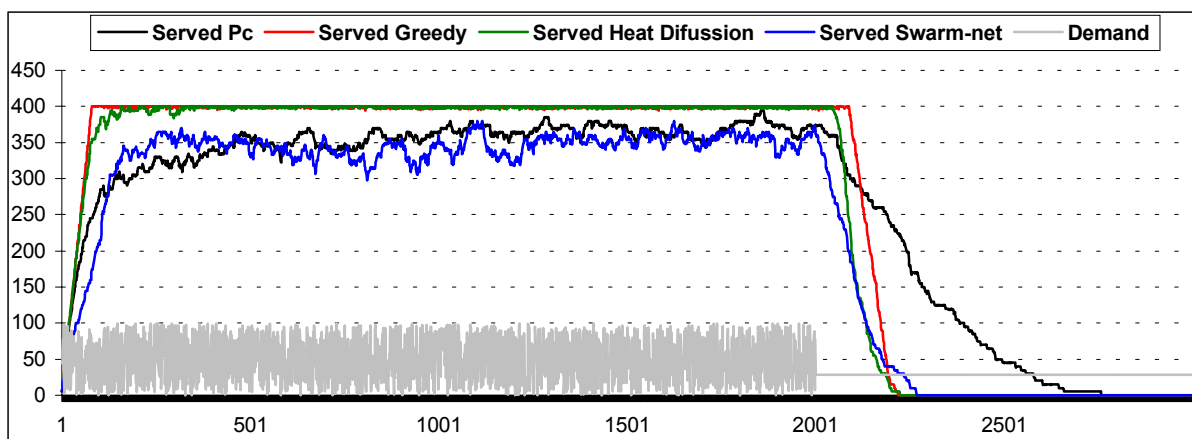
Το υπολογιστικό φορτίο κάθε διεργασίας είναι ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ 0 και 100, ενώ τη μνήμη που απαιτείται κυμαίνεται μεταξύ 0 και 80.

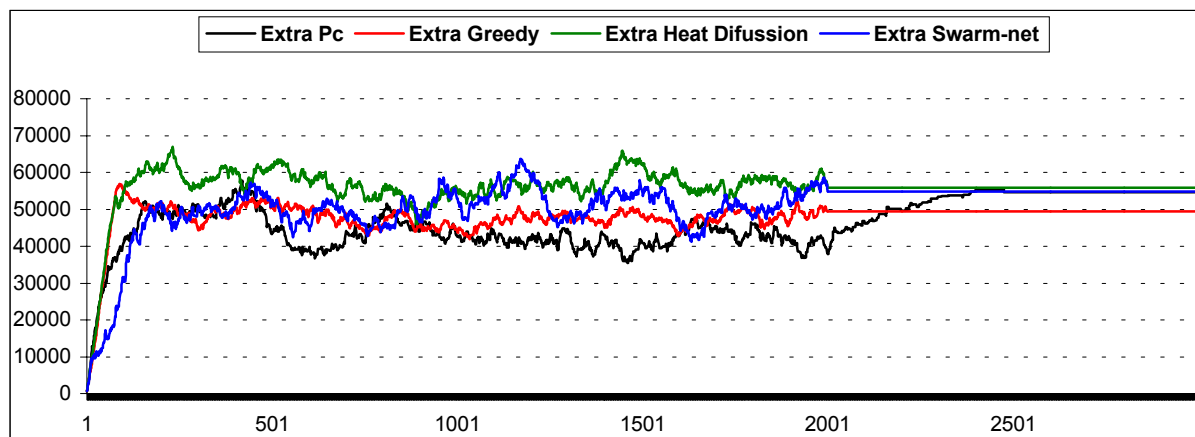
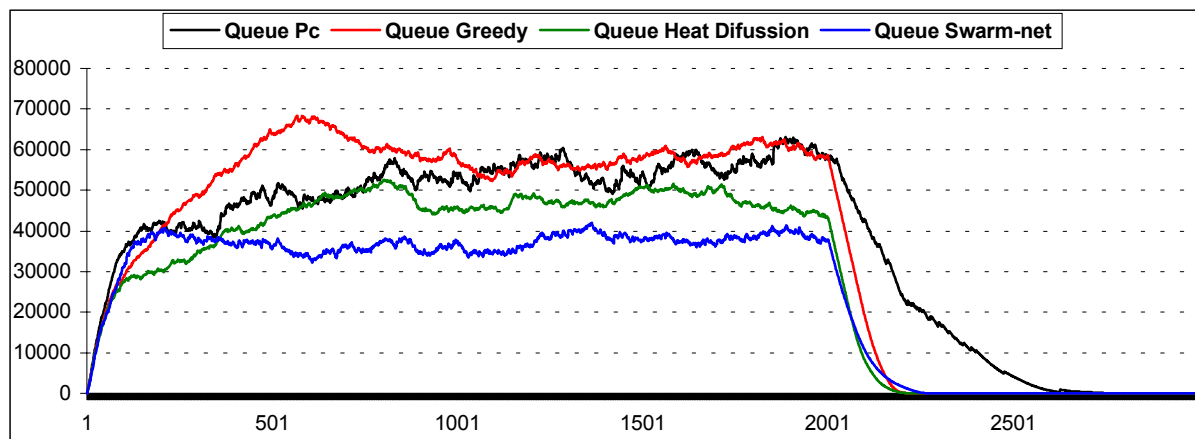
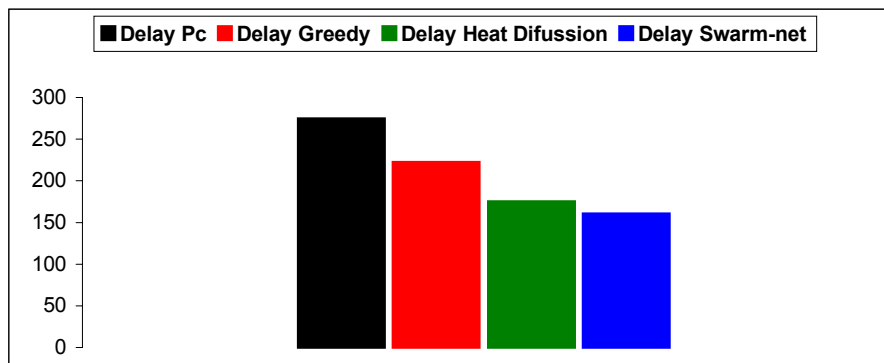
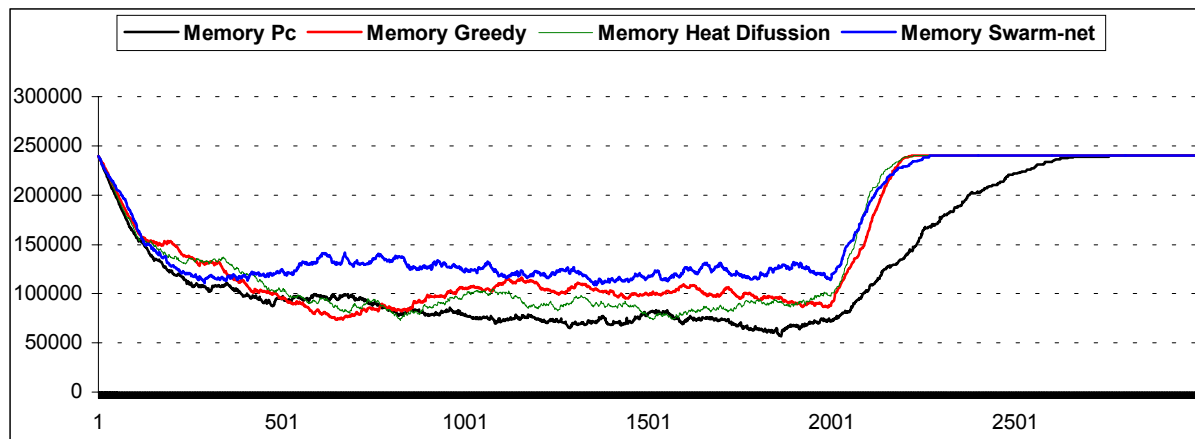
Η εξομοίωση διαρκεί συνολικά 3000 κύκλους, από αυτούς στους 2000 πρώτους δημιουργούνται διεργασίες ενώ στους 1000 τελευταίους όχι., απλώς οι υπολογιστές εκτελούν τις διεργασίες που ήδη έχουν δημιουργηθεί.

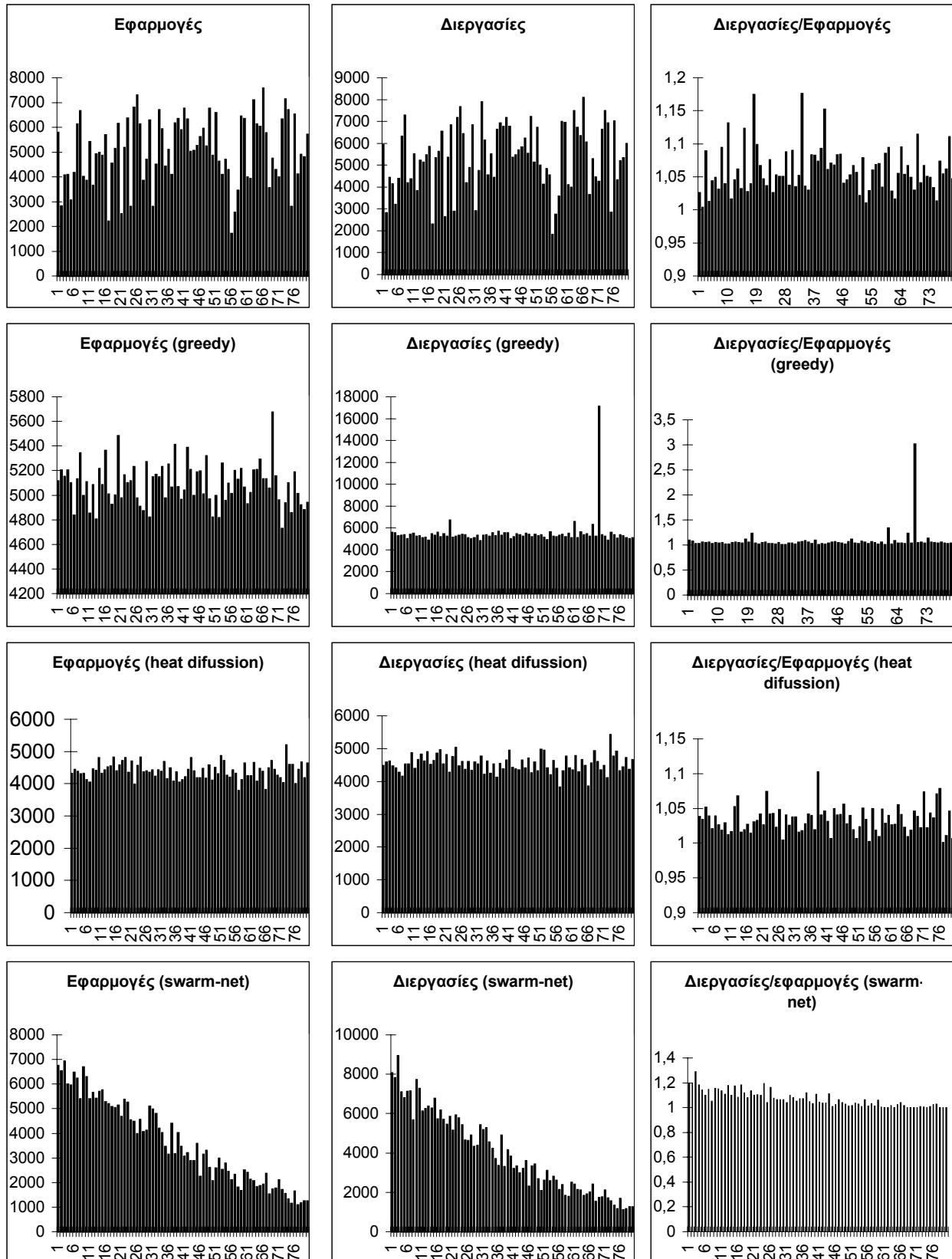
9.2.1 Ομοιόμορφες συνδέσεις και υπολογιστική ισχύς

Το δίκτυο αποτελείται από 80 υπολογιστές, με 2000 μονάδες μνήμης που μπορούν να εκτελούν 5 μονάδες υπολογιστικού φορτίου σε κάθε κύκλο της εξομοίωσης (δεν εκτελούν 5 μονάδες φορτίου από μία διεργασία αλλά 1 μονάδα από τις 5 πρώτες διεργασίες της ουράς). Κάθε σύνδεση μεταξύ των υπολογιστών έχει καθυστέρηση 2 μονάδες και εύρος ζώνης 50 μονάδες.

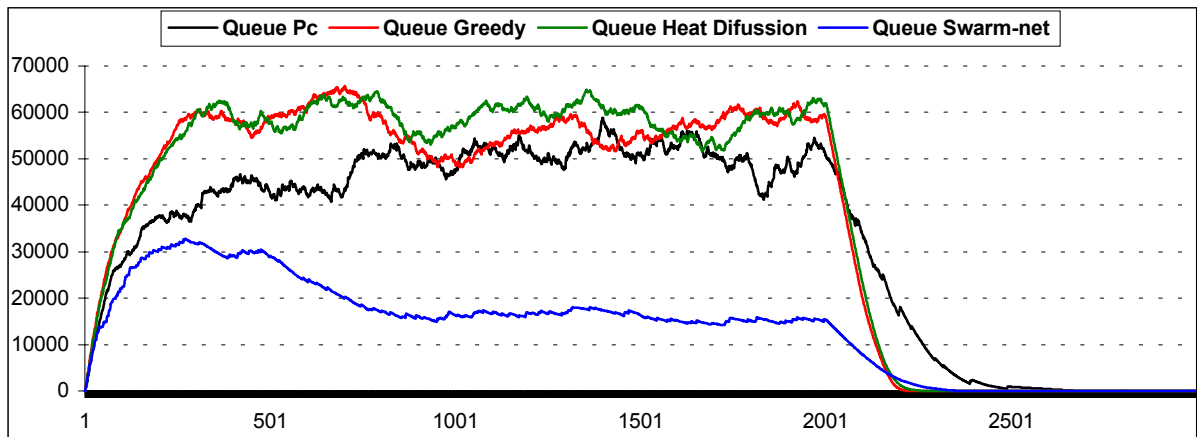
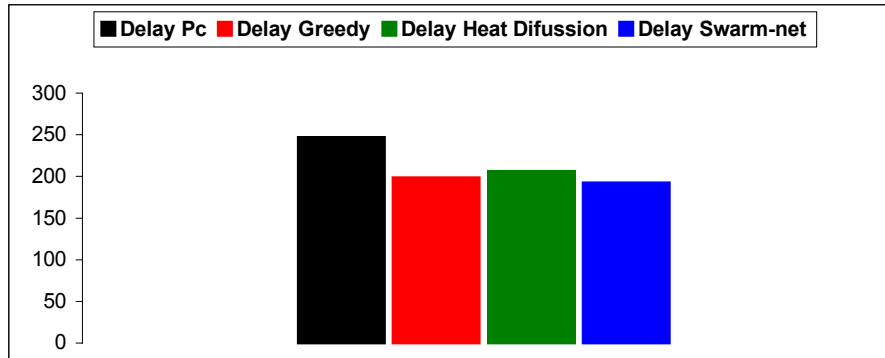
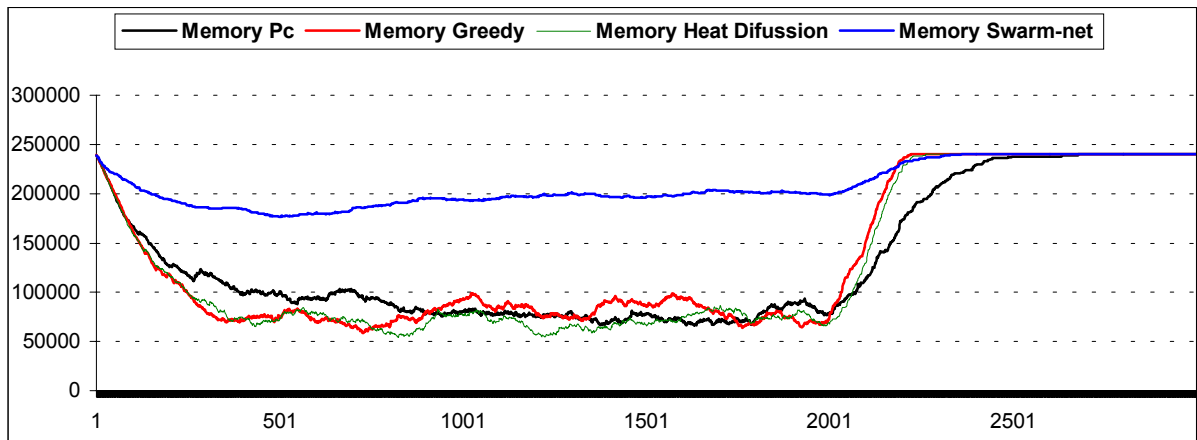
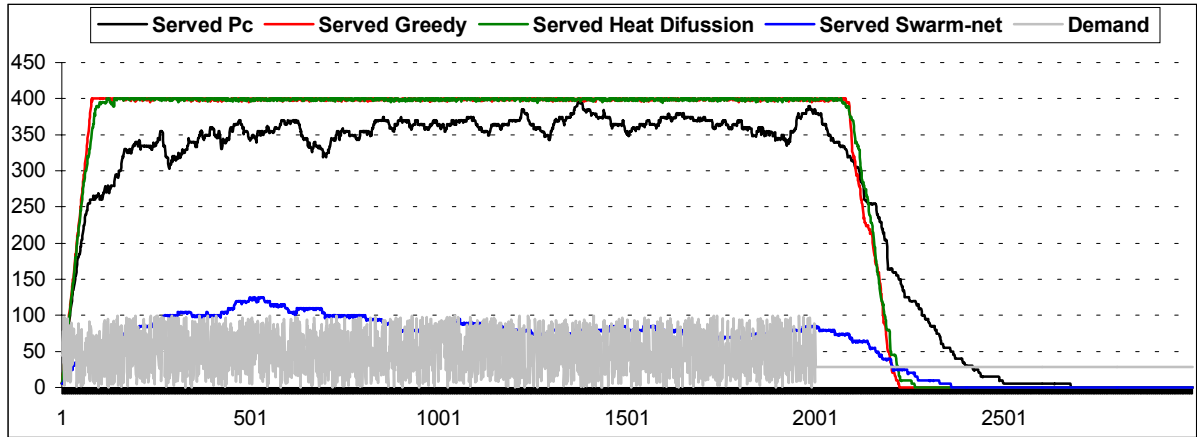
9.2.1.1 Κατώφλι $\theta(j, s_i, t) = 0.05 m^2(j, s_i, t) + 0.05 d^2(j, t) + 0.05 q(t)$

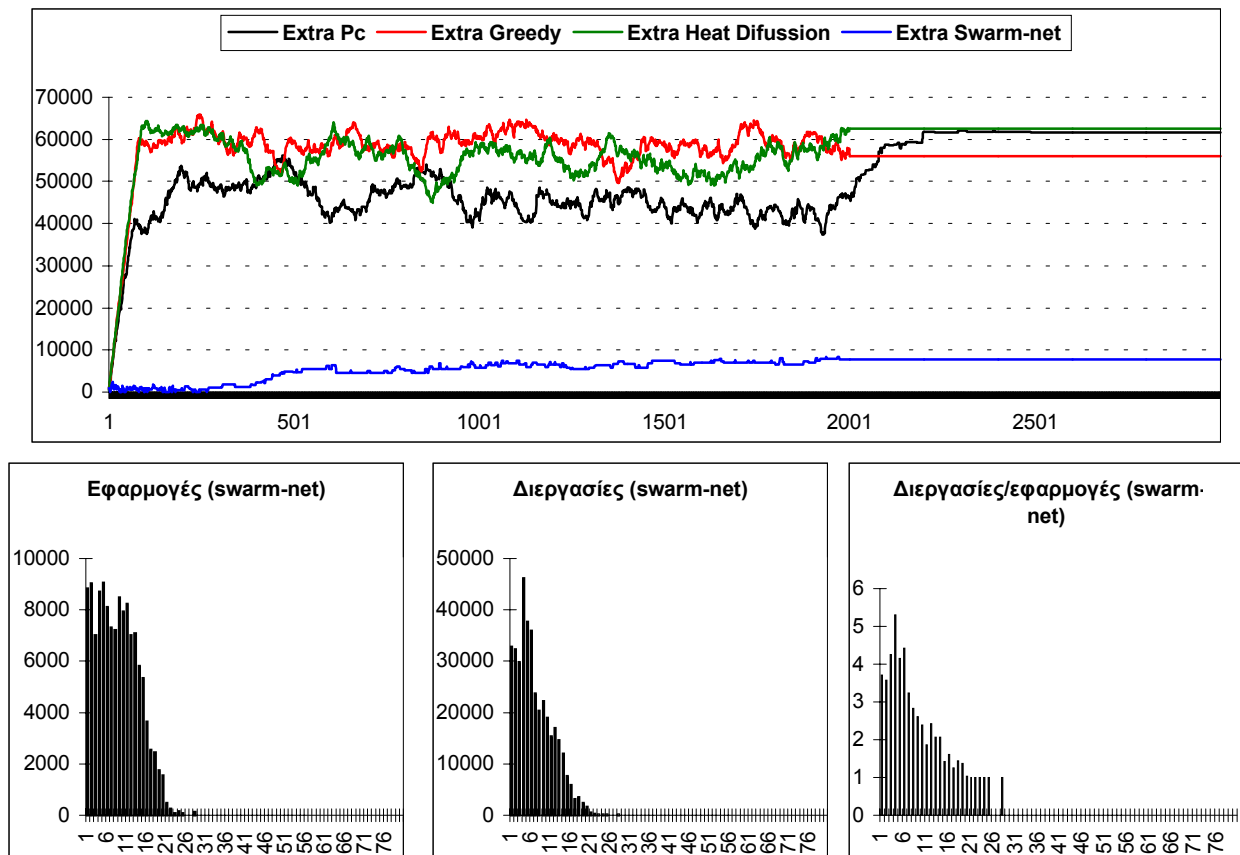






9.2.1.2 Κατώφλι $\theta(j, s_i, t) = 0.000002 m^2(j, s_i, t) + 0.05 d^2(j, t) + 0.00005 q(t)$



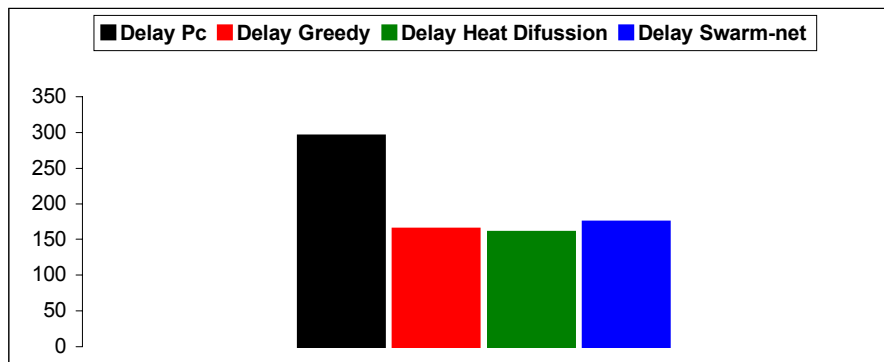
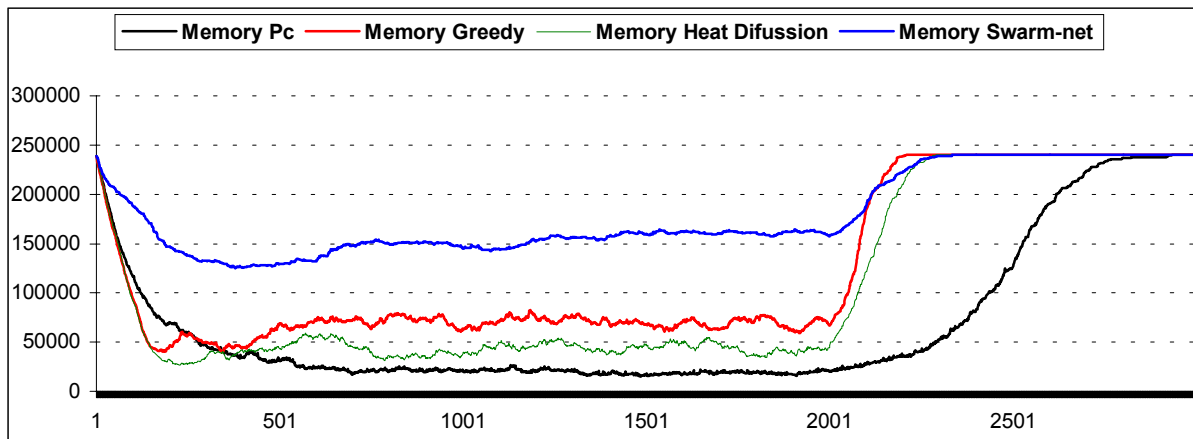
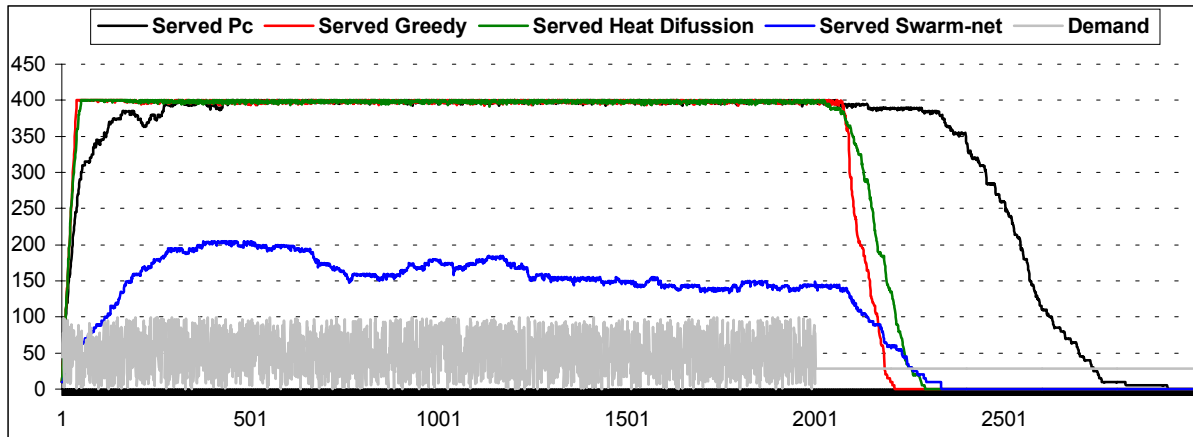


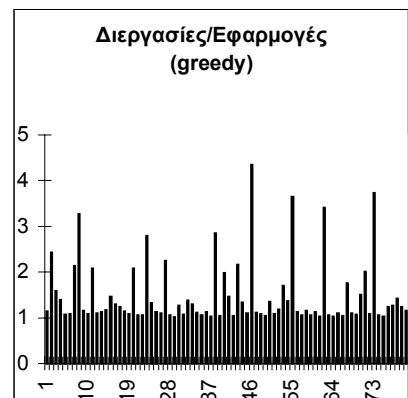
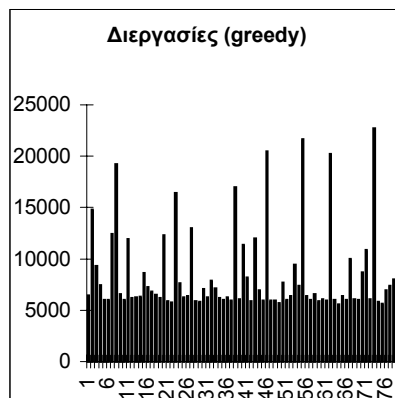
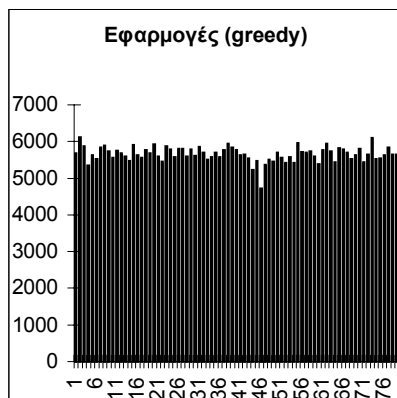
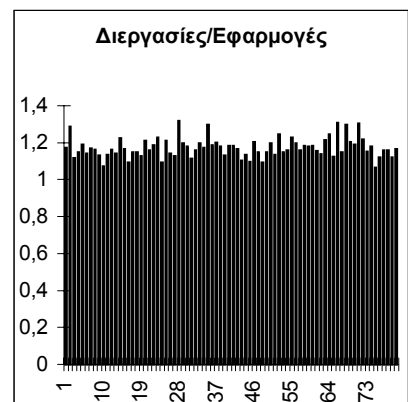
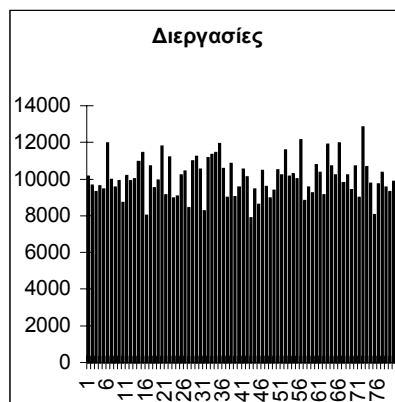
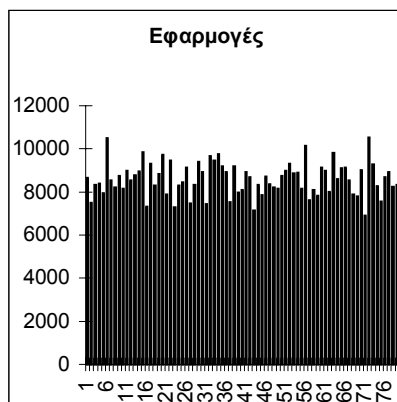
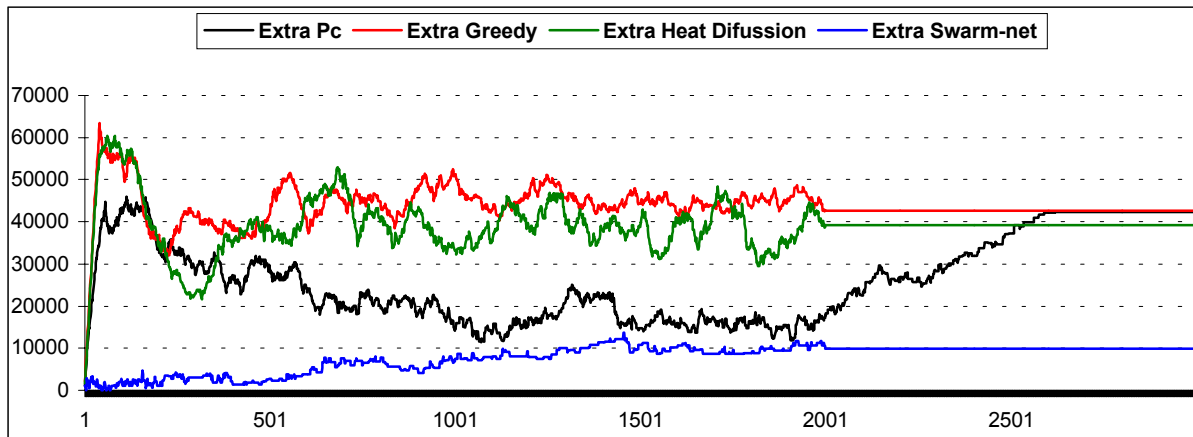
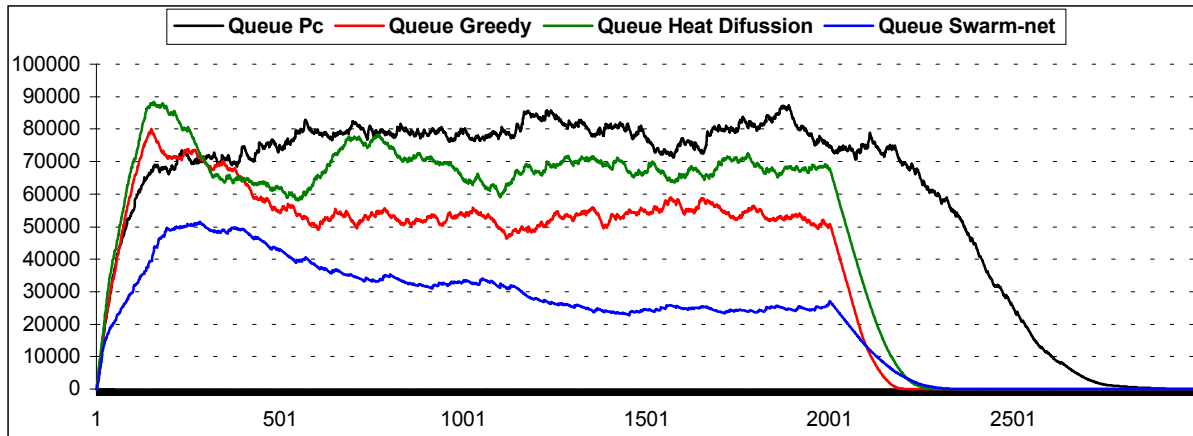
Εμφανέστατα στην περίπτωση που υπάρχει καταμερισμός του φορτίου επιτυγχάνεται καλύτερες επιδόσεις τόσο στην μέση καθυστέρηση αλλά και στη χρήση της μνήμης (όταν οι διεργασίες δεν μπορούν να μεταναστεύσουν υπάρχει η πιθανότητα διεργασίες να απορρίπτονται λόγω έλλειψης μνήμης και ο υπολογιστής να μην αξιοποιεί λόγω μνήμης την υπολογιστική του ισχύ). Ο αλγόριθμος swarm-net εμφανίζει και στις δύο περιπτώσεις καλύτερες επιδόσεις από τους άλλους δύο αλγορίθμους (greedy, heat diffusion) και σε σχέση με την ταχύτητα απόκρισης (καθυστέρηση) αλλά κυρίως στον τομέα της διαχείρισης των πόρων υπολογιστικών και αποθηκευτικών. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι επιδιώκουν την ελαχιστοποίηση του χρόνου εξυπηρέτησης μιας διεργασίας εξισορροπώντας το φορτίο στους επεξεργαστές. Οι επιδόσεις τους είναι παρόμοιες και καταφέρνουν την εξισορρόπηση του φορτίου, κατά την οποία δεν λαμβάνουν υπόψη τους τις εφαρμογές που ήδη τρέχει κάποιο μηχάνημα. Αυτό το βασικό μειονέκτημα τους στερεί την πηγή της αποδοτικότερης συμπεριφοράς του αλγορίθμου swarm-net, την εξειδίκευση.

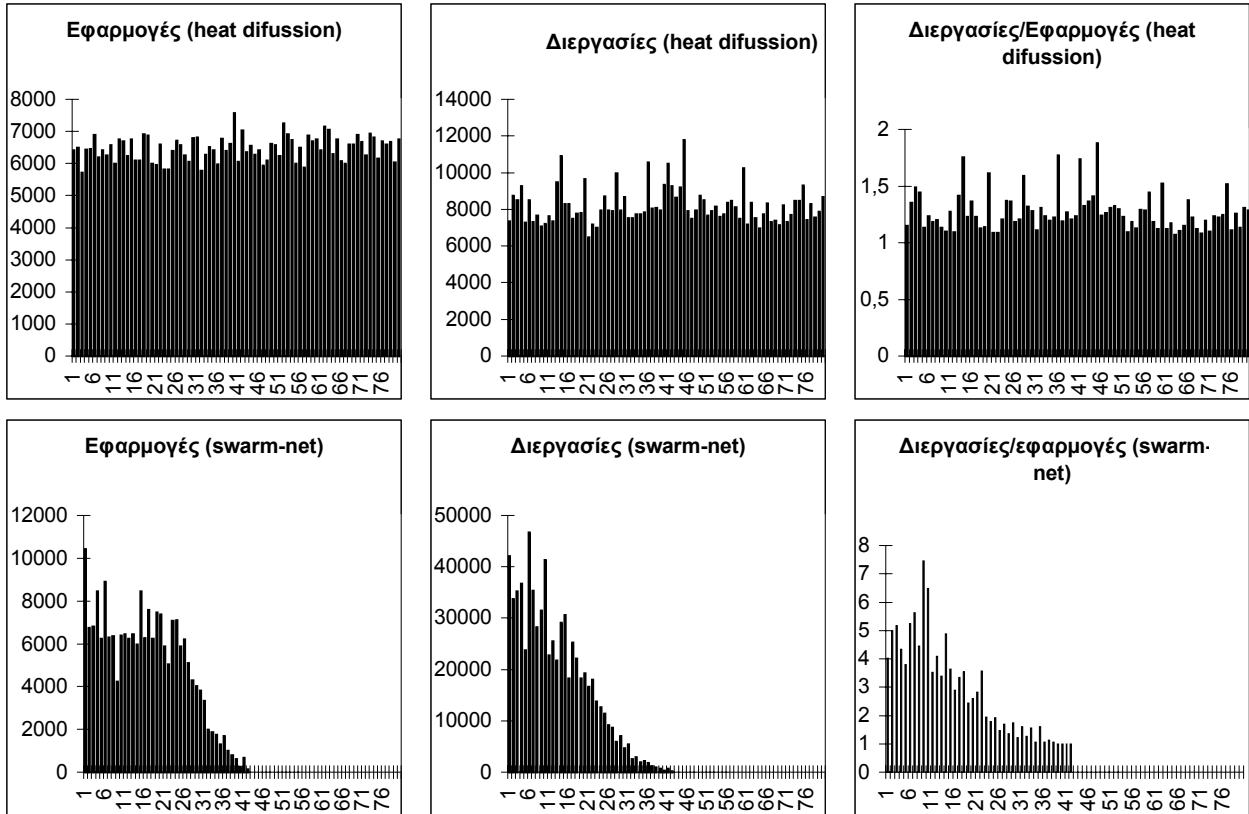
Παρατηρούμε ότι οι διαφορετικές μορφές της σχέσης που προσδιορίζει το κατώφλι απόκρισης, προσδίδουν στον αλγόριθμο διαφορετική συμπεριφορά. Στην πρώτη περίπτωση ο αλγόριθμος παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά ως προς την μέση καθυστέρηση εκτέλεσης μιας διεργασίας (καθυστέρηση ορίζεται ο χρόνος από την στιγμή δημιουργίας μιας διεργασίας μέχρι την ολοκληρωτική εκτέλεσή της και η μέση τιμή της υπολογίζεται από το σύνολο των καθυστερήσεων των διεργασιών δια του πλήθους τους). Στην δεύτερη περίπτωση εμφανίζεται καλύτερη διαχείριση της μνήμης παράλληλα εξοικονομείται μνήμη με τη χρήση των εφαρμογών από περισσότερες διεργασίες, γλιτώνοντας την κατάληψη χώρου από τις ογκώδεις βιβλιοθήκες. Η συμπεριφορά αυτή είναι εμφανής και στην κατανομή των διεργασιών στις δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση το φορτίο το επωμίζονται περισσότεροι υπολογιστές, ενώ στη δεύτερη λιγότεροι αλλά εμφανίζουν εξειδίκευση (εκτελούν την ίδια εργασία με χρήση λιγότερων πόρων μνήμης αλλά και υπολογιστικού χρόνου). Είναι εμφανές ότι στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται περισσότεροι οι επεξεργαστές των υπολογιστών και οι μνήμες τους.

9.2.2 Διπλασιασμός του φορτίου, σε κάθε κύκλο δημιουργούνται δύο διεργασίες.

Κατώφλι $\theta(j, s_i, t) = 0.000002 m^2(j, s_i, t) + 0.05 d^2(j, t) + 0.00005 q(t)$







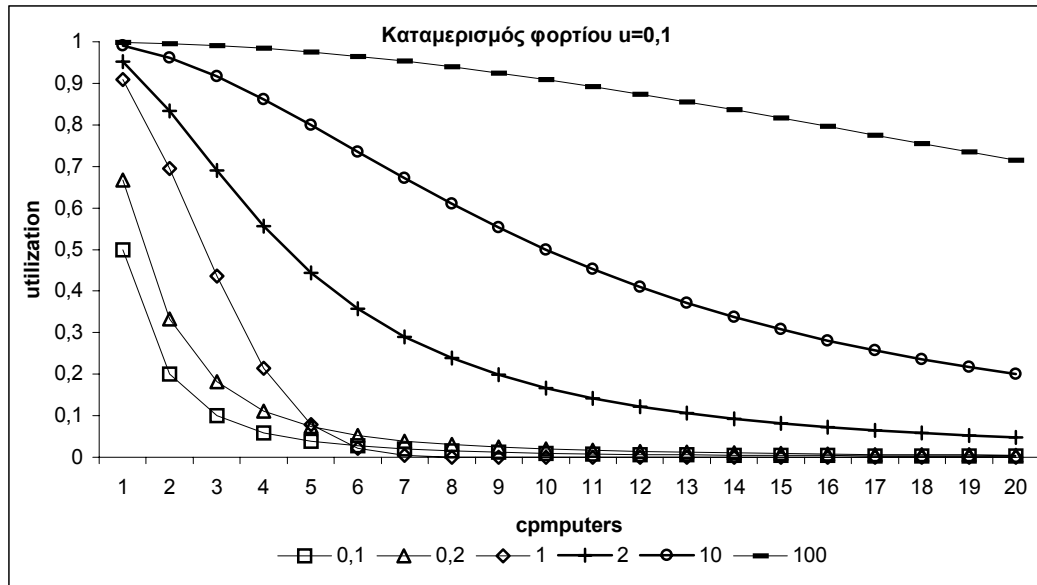
Με το διπλασιασμό του φορτίου η συμπεριφορά όλων των μοντέλων, εκτός του αλγορίθμου swarm-net, επιδεινώνεται σημαντικά, κυρίως στην διαχείριση της μνήμης και όχι τόσο στην καθυστέρηση απόκρισης. Η υπολογιστική ισχύς των υπολογιστών χρησιμοποιείται πλήρως, ενώ ο αλγόριθμος swarm-net διπλασιάζει την τη χρήση τη υπολογιστικής ισχύος του δικτύου σε σχέση με τη προηγούμενη περίπτωση. Η αύξηση της ζήτησης για την εξυπηρέτηση των διεργασιών οδηγεί κα νέους υπολογιστές να εμπλακούν, πέρα από τους εξειδικευμένους. Παρατηρείται αύξηση του πλήθους των υπολογιστών που εξυπηρετούν διεργασίες, όμως ο λόγος της εξειδίκευσης (διεργασίες που εκτέλεσε ο υπολογιστής προς τις εκκινήσεις εφαρμογών-φόρτωμα βιβλιοθηκών) είναι όμοιος με την προηγούμενη περίπτωση.

Αν θεωρήσουμε το απλούστερο μοντέλο όπου υπάρχει μία μόνο εφαρμογή και το φορτίο είναι λ , οι πόροι καταναλώνονται από καθένα από τους n υπολογιστές που είναι ενεργοί (επιβαρύνονται με την εκτέλεση του φορτίου), τότε:

- ✓ $\frac{\lambda}{n}$ το φορτίο που αναλογεί στο κάθε υπολογιστή.
- ✓ un η συνολική πόροι που απαιτούνται.
- ✓ $P(n, \lambda)$, η πιθανότητα n υπολογιστές να ενεργοποιηθούν για την εκτέλεση του φορτίου λ , είναι

$$P(n, \lambda) = \frac{\frac{\lambda}{n}}{\frac{\lambda}{n} + un}$$

Η πιθανότητα $P(n, \lambda)$ να ενεργοποιηθούν n υπολογιστές αντιστοιχεί και στο ποσοστό του χρόνου που το σύστημα που το σύστημα λειτουργεί με n ενεργούς υπολογιστές, και την χρησιμοποίησή τους (utilization). Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζονται οι κατανομές για φορτία $\lambda = \{0.1, 0.2, 1, 2, 10, 100\}$.

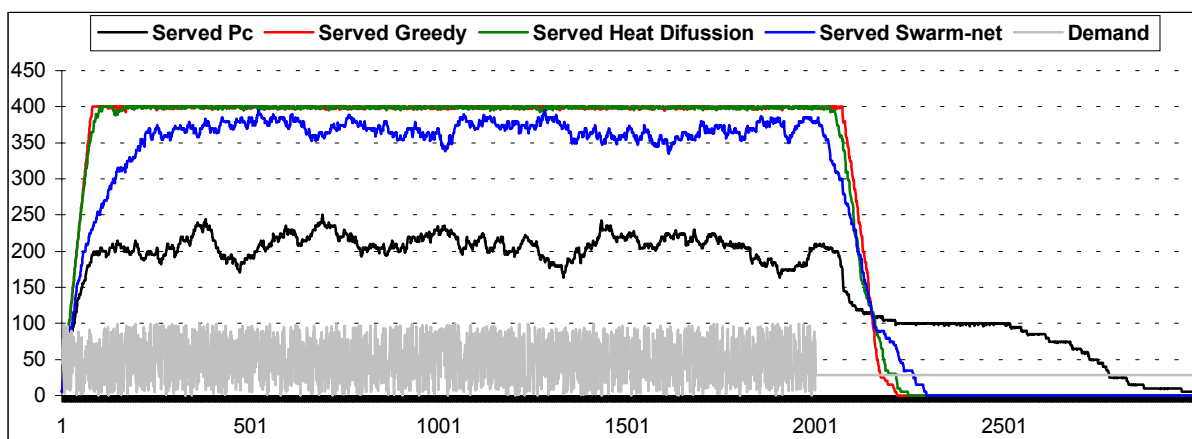


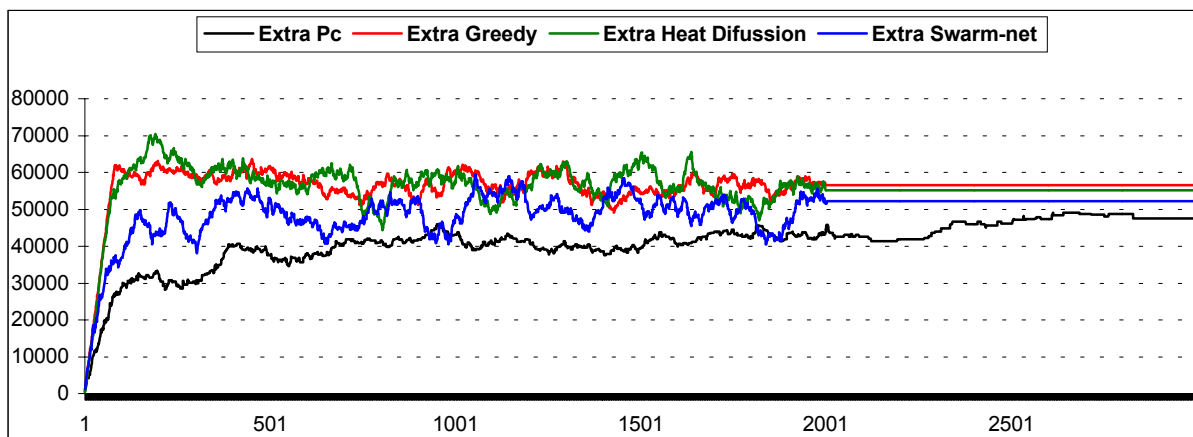
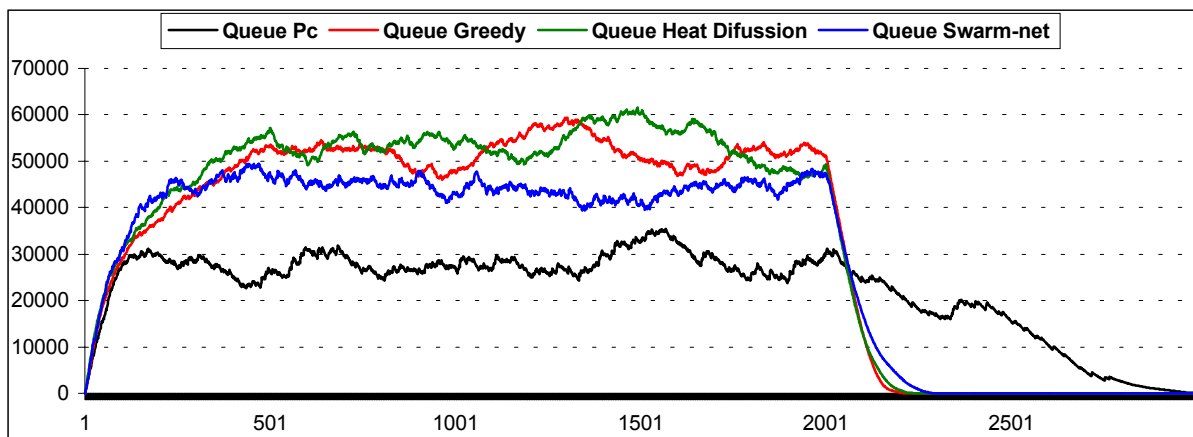
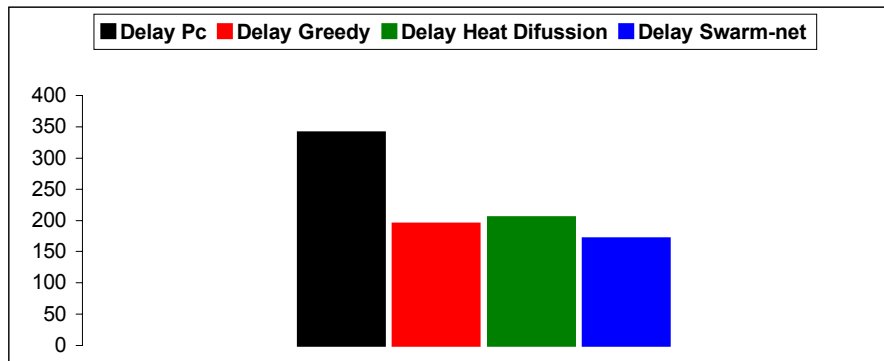
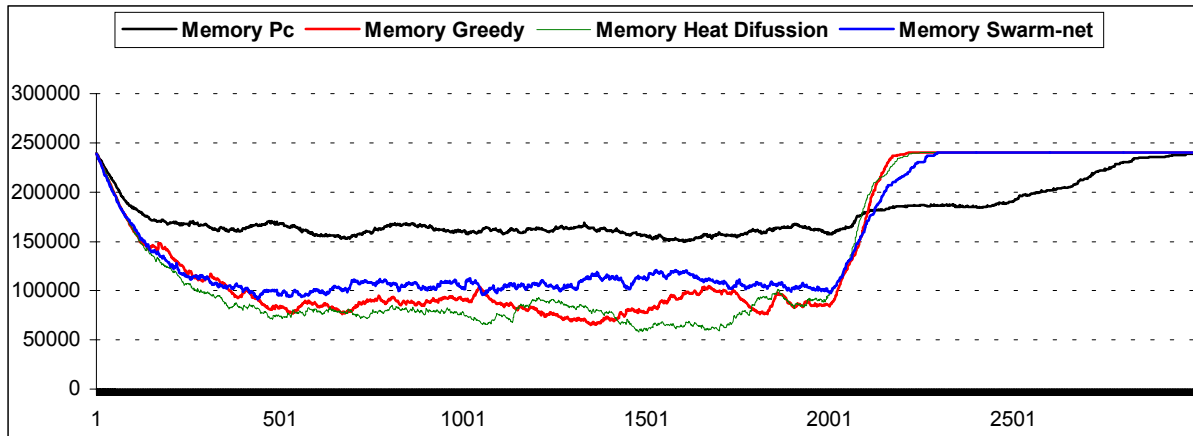
Τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων είναι παρόμοια με αυτά του παραπάνω διαγράμματος, δείχνοντας ότι η συμπεριφορά του συστήματος swarm-net. Είναι εμφανής η δυνατότητα του συστήματος να προσαρμόζεται στο φορτίο εμπλέκοντας στην εξυπηρέτησή του και άλλους υπολογιστές. Το βασικότερο ότι η συμπεριφορά αυτή επιτυγχάνεται με τον πολύ απλό κανόνα παραπάνω.

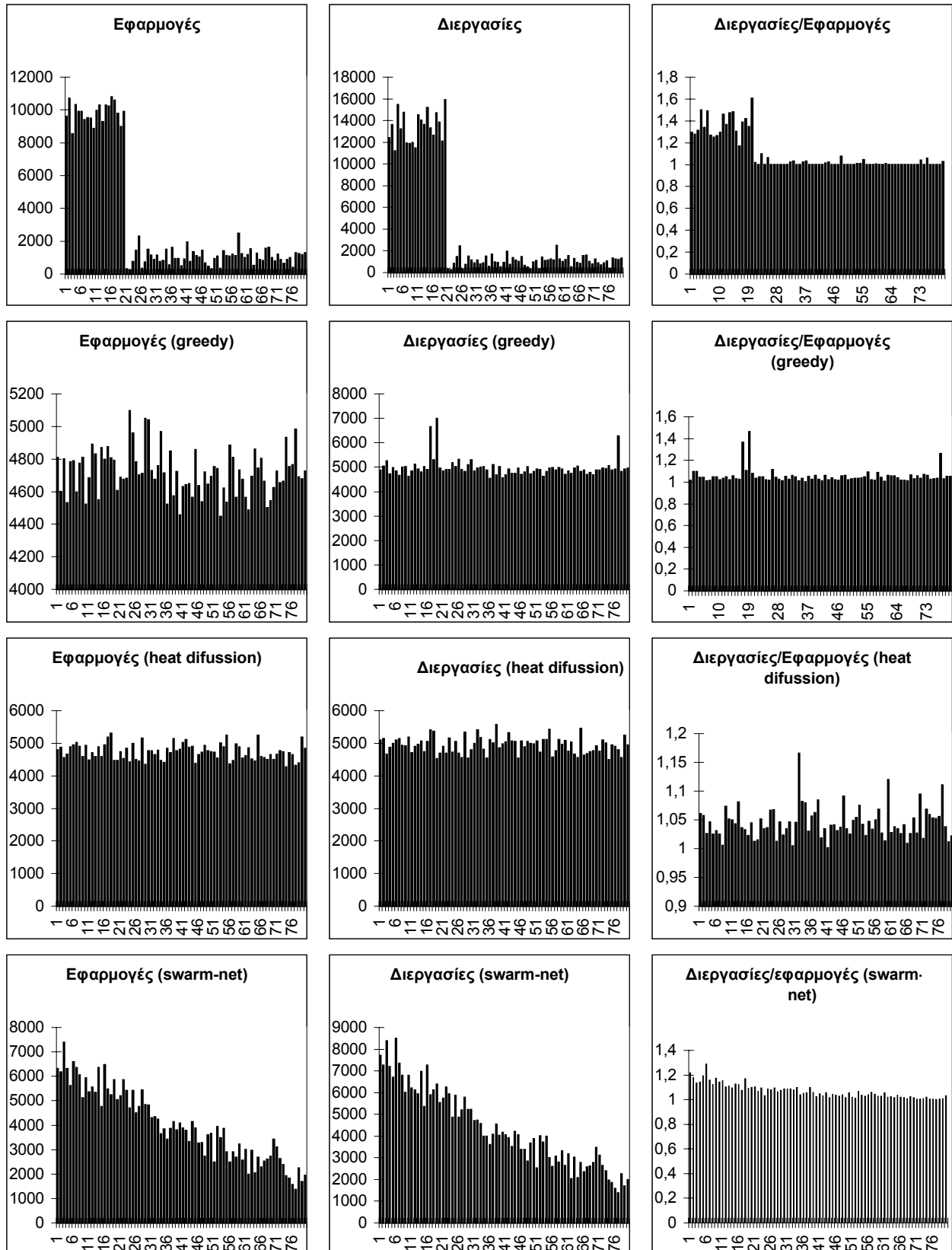
9.2.3 Ανισοκατανομή υπολογιστικού φορτίο στους υπολογιστές

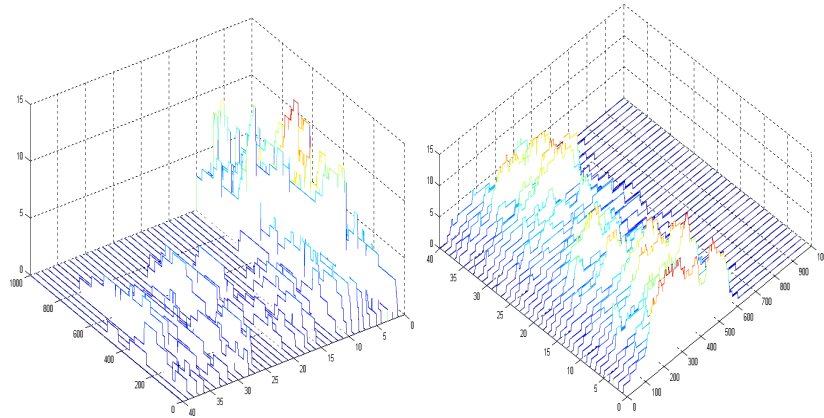
Το φορτίο που δημιουργείται κατανέμεται κατά 70% σε 20 υπολογιστές και το υπόλοιπο 30% στους υπόλοιπους 60 υπολογιστές (δηλαδή το 70% των διεργασιών δημιουργούνται σε 20 συγκεκριμένους υπολογιστές).

Κατώφλι $\theta(j, s_i, t) = 0.02 m^2(j, s_i, t) + 0.05 d^2(j, t) + 0.05 q(t)$

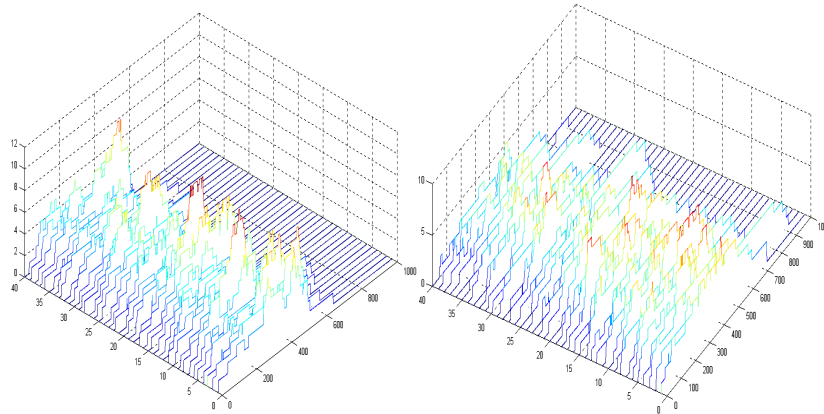








Pc και Greedy



Heat diffusion και Swarm-net

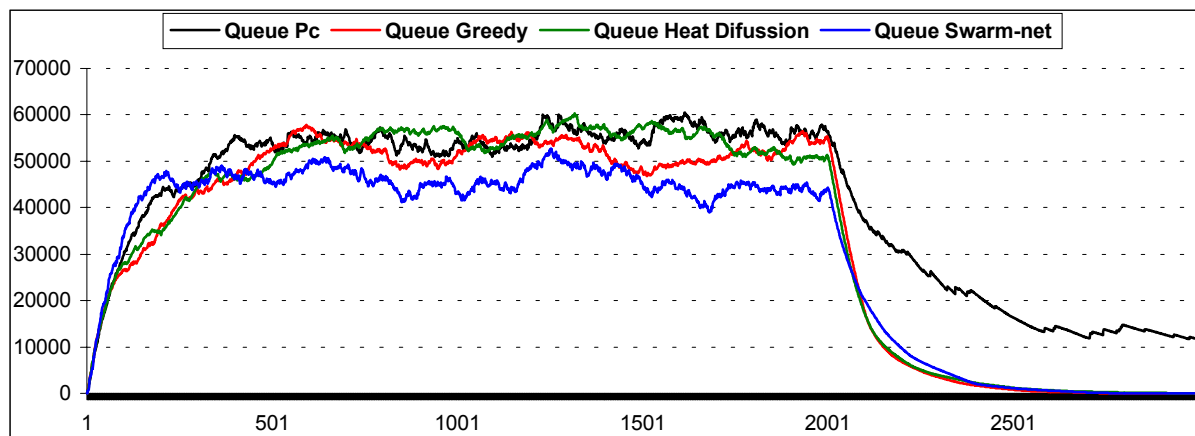
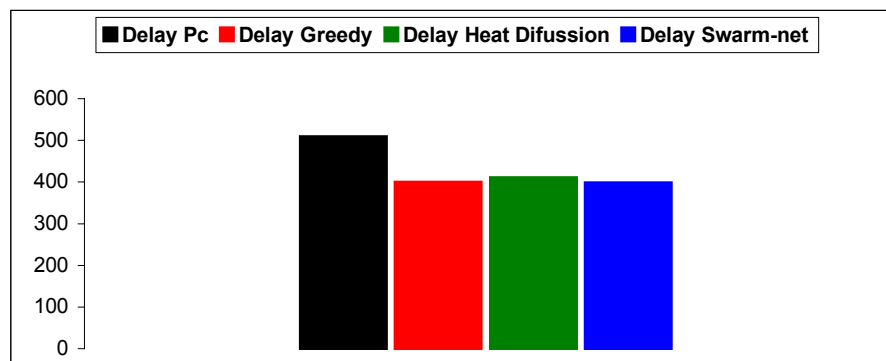
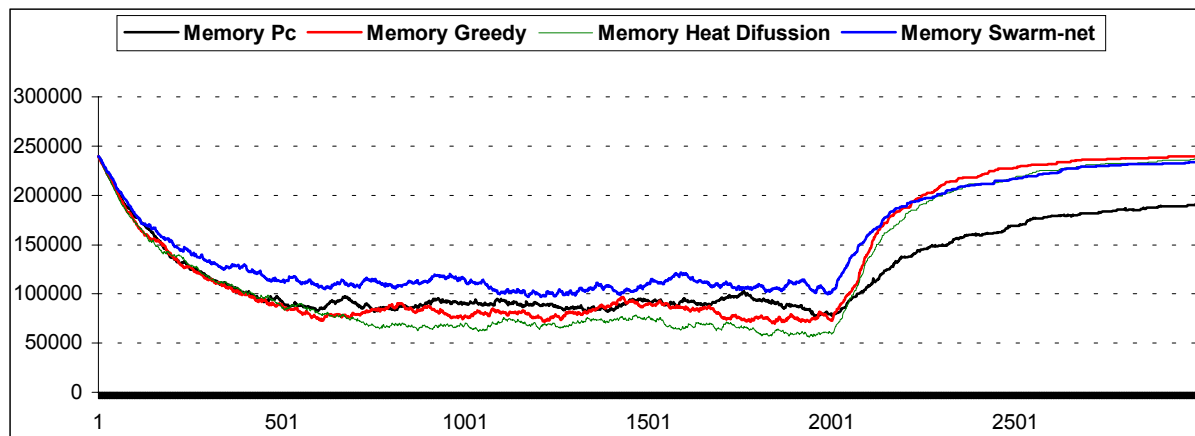
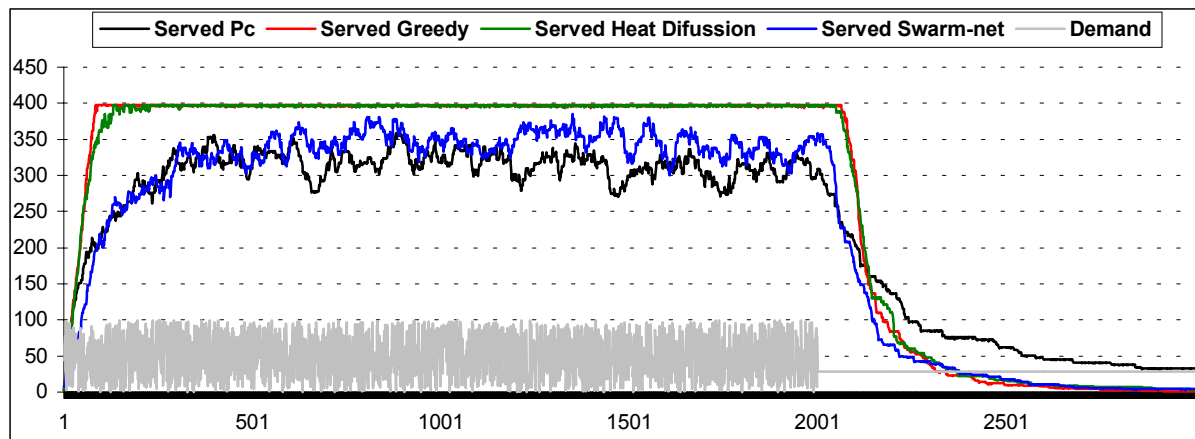
Η χρονική εξέλιξη του πλήθους των διεργασιών που εκτελούνται στον καθένα από τους 40 υπολογιστές.

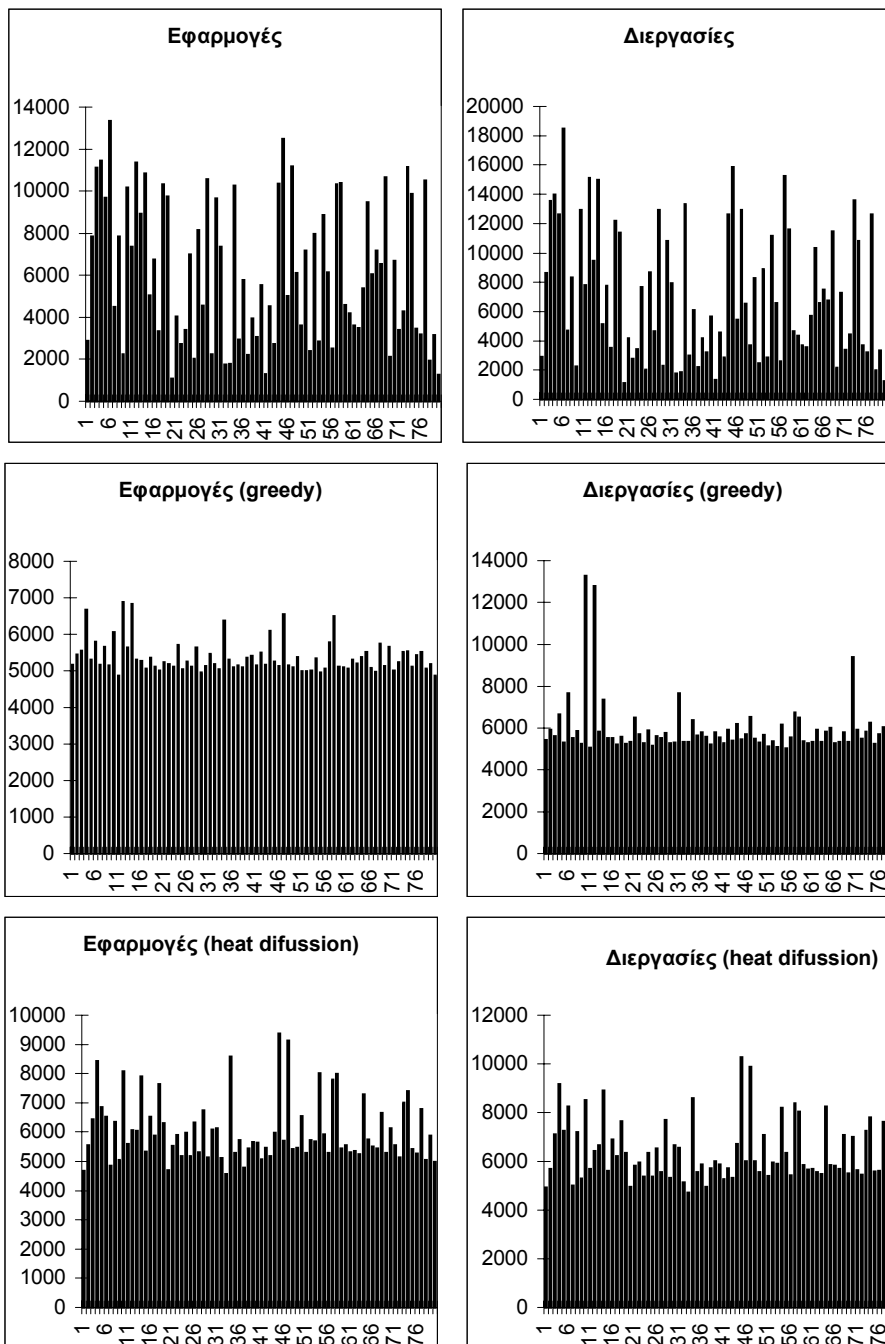
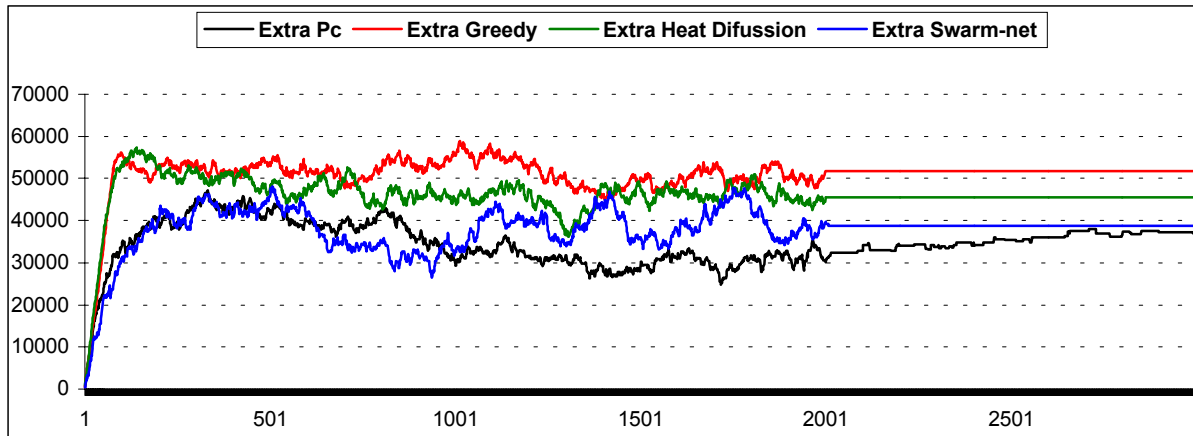
Όταν δεν παράγουν όλοι οι χρήστες την ίδια ποσότητα υπολογιστικού φορτίου, αλλά υπάρχει μια ομάδα (λίγων) που παράγει το μεγαλύτερο ποσοστό. Αν το έργο που παράγει ο καθένας τους είναι μεγαλύτερο από αυτό που μπορεί να εξυπηρετήσει ο υπολογιστής τους αναγκάζονται να το αναβάλουν, ακόμα και αν οι υπόλοιποι υπολογιστές στο δίκτυο έχουν πολύ ελαφρύ φορτίο. Η απόρριψη διεργασιών είναι εμφανής από την μείωση της συνολικά χρησιμοποιούμενης μνήμης και την εκτίναξη του χρόνου εξυπηρέτησης αν και οι περισσότεροι υπολογιστές δεν είναι επιβαρυνμένοι. Οι τρεις αλγόριθμοι καταμερισμού του φορτίου αντιμετωπίζουν το πρόβλημα με καλύτερη αξιοποίηση των πόρων όλου του δικτύου. Παρουσιάζουν συμπεριφορά όπως και στην περίπτωση του ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου, από τα διαγράμματα της κατανομής του φορτίου για τους τρεις αλγόριθμους δεν είναι εμφανές το η μεταβολή των συνθηκών από τη πρώτη περίπτωση, κάτι που γίνεται αμέσως αντιληπτό από το διάγραμμα των υπολογιστών που δεν επιτρέπουν την μετανάστευση των διεργασιών.

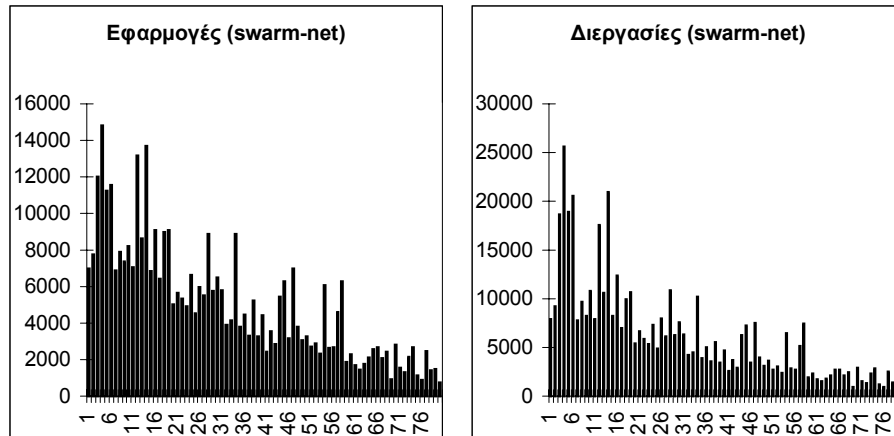
9.2.4 Μη Ομοιόμορφες συνδέσεις και υπολογιστική ισχύς

Το δίκτυο αποτελείται από 80 υπολογιστές, με 2000 μονάδες μνήμης που μπορούν να εκτελούν από 1 έως 10 μονάδες υπολογιστικού φορτίου σε κάθε κύκλο της εξομοίωσης. Κάθε σύνδεση μεταξύ των υπολογιστών έχει καθυστέρηση από 0 έως 30 μονάδες και εύρος ζώνης από 0 έως 300 μονάδες.

Κατώφλι $\theta(j, s_i, t) = 0.05 m^2(j, s_i, t) + 0.05 d^2(j, t) + 0.05 q(t)$







Όταν το περιβάλλον είναι ανομοιογενές, δεν επηρεάζονται οι επιδόσεις των αλγορίθμων. Η ανομοιογένεια αυτή είναι εμφανής στα διαγράμματα κατανομής των διεργασιών, όπου οι αλγόριθμοι, σε απόδειξη της προσαρμοστικότητάς τους, δεν ισοκατανέμουν το φορτίο, αλλά λαμβάνουν υπόψη τους τις δυνατότητες του κάθε υπολογιστή. Η σταθμισμένη κατανομή σε ανομοιογενές περιβάλλον οδηγεί σε μια μη ομοιόμορφη κατανομή των διεργασιών στους υπολογιστές. Πιο έντονο είναι το φαινόμενο στους αλγόριθμους heat diffusion και swarm-net που λαμβάνουν υπόψη τους για τον καταμερισμό των διεργασιών και τις ταχύτητες των συνδέσεων των υπολογιστών. Η επιπλέον ανομοιογένεια εμφανίζεται με πιο έντονες κορυφές σε σχέση με τον greedy αλγόριθμο. Η πολύ έντονη διακύμανση στο διάγραμμα των απλών υπολογιστών οφείλεται στην αδυναμία πολλών εξ' αυτών να αντεπεξέλθουν στο φορτίο τους απορρίπτοντας κάποιες διεργασίες.

9.3 Υλοποίηση εφαρμογής swarm-net

Μια πιθανή πρωταρχική υλοποίηση της εφαρμογής swarm-net μπορεί να βασιστεί στην εφαρμογή telnet.

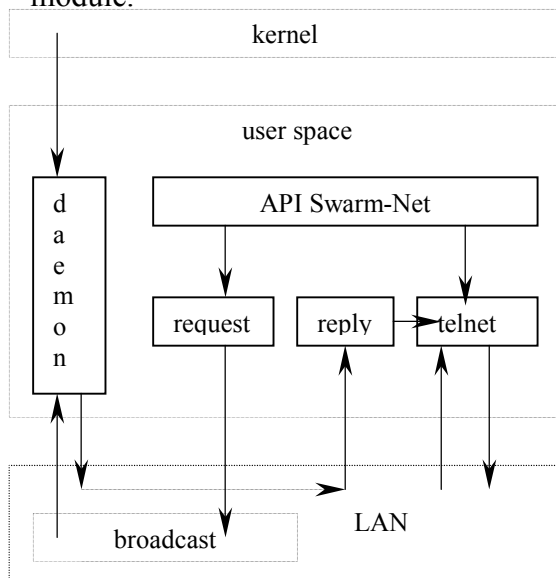
Με την εφαρμογή telnet μπορεί ένας χρήστης να εκτελέσει προγράμματα σε έναν απομακρυσμένο υπολογιστή. Κατά την εφαρμογή αυτή ο υπολογιστής του χρήστη λειτουργεί ως τερματικό του απομακρυσμένου υπολογιστή. Ο χρήστης για να κάνει χρήση της εφαρμογής πρέπει κατά την εκκίνησή της να δηλώσει την διεύθυνση (IP ή DNS) του απομακρυσμένου υπολογιστή στον οποίο επιθυμεί να συνδεθεί. Ακολούθως η εφαρμογή telnet απαιτεί ο χρήστης να διαθέτει λογαριασμό (άδεια πρόσβασης) στον απομακρυσμένο υπολογιστή και να τον επιβεβαιώσει αποστέλλοντας τον κωδικό πρόσβασης. Αν είναι αληθής ο κωδικός πρόσβασης ο χρήστης αποκτά δικαιώματα χρήσης όπως αυτά ορίζονται από τον λογαριασμό του.

Στην εφαρμογή swarm-net ο χρήστης χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του telnet όπου δεν επιλέγει τον υπολογιστή που θα συνδεθεί για την εκτέλεση ενός προγράμματος. Ο χρήστης απλά επιλέγει το την εφαρμογή πρόγραμμα που θέλει να χρησιμοποιήσει και η εφαρμογή swarm-net αναλαμβάνει να βρει τον υπολογιστή (που μπορεί να είναι ο υπολογιστής του ίδιου του χρήστη) από όπου θα εκτελεστεί το πρόγραμμα.

Αναλυτικότερα η εφαρμογή swarm-net υλοποιείται από πέντε module λειτουργικές μονάδες:

1. Το API με τον χρήστη το περιβάλλον διεπαφής με το χρήστη. Στο περιβάλλον αυτό ο χρήστης δηλώνει την εφαρμογή που θέλει να τρέξει. Οι παράμετροι αυτοί (τα ορίσματα της γραμμής εντολών) περνούν στο επόμενο module.
2. Το module request παράγει broadcast μηνύματα αίτησης προς τους γειτονικούς υπολογιστές του δικτύου αλλά και προς τον ίδιο τον υπολογιστή του χρήστη. Το μήνυμα παρέχει πληροφορίες σχετικά με

- την εφαρμογή που θέλει να τρέξει ο χρήστης και την ταυτότητα του χρήστη.
3. Σε καθένα από τους υπολογιστές που τρέχουν το swarm-net υπάρχει ένας daemon που συλλέγει τα broadcast μηνύματα, που παράγει το προηγούμενο module. Όταν λάβει ένα μήνυμα τότε συγκεντρώνει πληροφορίες από το kernel του λειτουργικού σχετικά με τη διαθέσιμη μνήμη το μήκος της ουράς των διεργασιών και τις εφαρμογές που ήδη τρέχουν. Με βάση αυτά τα στοιχεία αποφασίζει σύμφωνα με τον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, αν θα εκτελεστεί η εφαρμογή που ζητά ο απομακρυσμένος χρήστης (στην επιλογή μπορούν να υπάρχουν κριτήρια ασφαλείας κάθε χρήστη να έχει διαφορετικά δικαιώματα που λαμβάνονται υπόψη κατά την απόφαση αυτή). Σε περίπτωση που η απάντηση είναι θετική αποστέλλεται ένα μήνυμα αποδοχής στο χρήστη.
 4. Το module reply αναμένει κάποιο μήνυμα αποδοχής και όταν το λάβει προωθεί την διεύθυνση του αποστολέα του μηνύματος στο επόμενο module. Στην περίπτωση που για μεγάλο χρονικό διάστημα δεν υπάρχει απάντηση στέλνει στο επόμενο module τη διεύθυνση αυτού υπολογιστή.
 5. Το τελευταίο module είναι η εφαρμογή telnet, η οποία αναλαμβάνει να αποκαταστήσει τη σύνδεση (session) για την εκτέλεση του προγράμματος που δήλωσε ο χρήστης στο πρώτο module στη διεύθυνση που δίνει το προηγούμενο module.



9.4 Συμπεράσματα

Στο μοντέλο P2P δικτύου που χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση των αλγορίθμων αποδείχθηκε η επιτυχημένη συμπεριφορά του αλγορίθμου swarm-net έναντι των άλλων. Επέδειξε καλή συμπεριφορά και ως προς το χρόνο απόκρισης αλλά και στη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να επιδεικνύει τέτοια συμπεριφορά παραμένοντας πολύ απλώς στην υλοποίηση του (μια πιθανή εκδοχή παρουσιάζεται στη συνέχεια). Η απλότητα διαφαίνεται και στον απλό μηχανισμό ανταλλαγής μηνυμάτων, στον οποίο βασίζεται. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα κάθε χρήστη να εξειδικεύσει τη συμπεριφορά του. Μπορεί ο χρήστης επιλέγοντας τους κατάλληλους συντελεστές στο κατάφλι να επιλέξει αν επιθυμεί μεγαλύτερη οικονομία στη μνήμη ή μικρότερη καθυστέρηση στη απόκριση. Από όλα τα πειράματα είναι εμφανής η δυνατότητά του να προσαρμόζεται στις μεταβολές και καθώς η δυνατότητα στην κλιμάκωση της λύσης που προσφέρει αυτή η αντιμετώπιση.

Βέβαια στη μελέτη μας παραλείψαμε ένα σοβαρό στοιχείο για αυτά τα συστήματα. Τα θέματα ασφάλειας. Η αντιμετώπιση και αυτών των δύσκολων προβλημάτων ίσως ενθαρρύνει περισσότερους χρήστες να εμπιστευθούν, να διαθέσουν τον υπολογιστικό τους χρόνο. Τότε, όταν αυξάνεται το πλήθος των χρηστών, επιτυγχάνεται και η καλύτερη απόδοση του συστήματος.

10 Σχόλια – Παρατηρήσεις

Αν και τα δύο παραδείγματα εφαρμογών της swarm intelligence που παρουσιάστηκαν, δεν φαίνεται να έχουν κάποια σχέση, σμήνη ρομπότ και κατανεμημένα υπολογιστικά συστήματα. Στην ουσία πρόκειται για δύο παραλλαγές του ίδιου προβλήματος.

Και τα δύο προβλήματα μπορούν να παρασταθούν με έναν γράφο με βάρη στις ακμές του αλλά και στους κόμβους του.

Το σμήνος των ρομπότ είναι ένας γράφος όπου το κάθε ρομπότ είναι ένας κόμβος και συνδέεται με τους κόμβους-ρομπότ που αντιλαμβάνεται το πεδίο τους ή αντιλαμβάνονται το πεδίο του (γειτονικά ρομπότ). Η τιμή του κάθε κόμβου καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του ρομπότ και είναι σταθερή και τα βάρη των ακμών είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ρομπότ που μεταβάλλονται. Οι κινήσεις των ρομπότ έχουν σκοπό να εξισορροπήσουν μεταξύ τους την τιμή μιας συνάρτησης, της τιμής του κόμβου τους και της απόστασης.

Ο γράφος των υπολογιστών έχει για τιμή των κόμβων το φορτίο κατά εφαρμογή το οποίο μεταβάλλεται και τα βάρη των ακμών είναι η ταχύτητα της σύνδεσης μεταξύ τους, που είναι σταθερή. Οι υπολογιστές μετακινούν μεταξύ τους το φορτίο για να εξισορροπήσουν μια συνάρτηση που εξαρτάται από τα βάρη των κόμβων και των ακμών.

Στη μία περίπτωση μεταβάλλονται τα βάρη των ακμών και στην άλλη τα βάρη των κόμβων, και στις δύο περιπτώσεις επιδιώκεται η ισορροπία. Ισορροπία που εκφράζεται από την ικανοποίηση μιας σχέσης μεταξύ των βαρών των κόμβων και των ακμών.

Οι δυο αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν ουσιαστικά αποτελούν παραλλαγές του μοντέλου κατωφλίου απόκρισης, όπου η πιθανότητα να αποκριθούν σε κάποια ανάγκη αυξάνεται ραγδαία όταν ξεπερνιέται το κατώφλι και εκμηδενίζεται στην αντίθετη περίπτωση. Στη μία περίπτωση χρησιμοποιήθηκε για την

υλοποίησή του συνάρτηση με εκθετικά στοιχεία ενώ στην άλλη μια ρητή.

Οι υπολογιστές ενώ αρχικά είναι ίδιοι εξειδικεύονται σύμφωνα με τις ανάγκες της γειτονιά τους, τα ρομπότ είναι εξειδικευμένα και αναζητούν την κατάλληλη γειτονιά.

Στην εκφυλισμένη μορφή των κατωφλίων που είναι τελείως κατακόρυφα αντιστοιχούν στο πρώτο μοντέλο των swarm-fish και στον greedy αλγόριθμο του P2P.

Κοινός τους στόχους είναι να κατανείμουν τα ρομπότ στο χώρο ή της διεργασίες στους υπολογιστές σύμφωνα με μια συνάρτηση αξιοποίησης των πόρων και ευρωστίας σε βλάβες των μελών τους.

Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη «μεταφορά» λύσεων από το ένα πρόβλημα στο άλλο. Η ανάπτυξη κάποιου μοντέλου για το ένα σύστημα μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή του άλλου. Σίγουρα υπάρχουν και άλλα πεδία τα οποία θα μπορούσαν να περιγραφούν ως προσπάθειες εξισορρόπησης σχέσεων που αναπαρίστανται από κάποιο δίκτυο. Το κέρδος είναι ότι δημιουργώντας μια ευρύτερη οικογένεια προβλημάτων με εφαρμογές σε πολλά ετερογενή πεδία. Οπότε η έρευνα στην ευρύτερη οικογένεια μπορεί να οδηγήσει σε αποτελεσματικότερες λύσεις πολύ πιο γρήγορα, από ότι αναζητώντας λύσεις σε καθένα από τα εξειδικευμένα πεδία.

Παράδειγμα της αναγκαιότητας των παραπάνω και σοβαρό έλλειμμα αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η έλλειψη προτεινόμενης μεθοδολογίας για την επιλογή της μορφής των κατωφλίων. Γενικά η αντιμετώπιση προβλημάτων με τη χρήση κατωφλίων χωλαίνει στο προσδιορισμό της συνάρτησης, που υλοποιεί το κατώφλι. Συνήθως ο προσδιορισμός αυτός γίνεται εμπειρικά. Έτσι συνέβη και στις δύο εφαρμογές που προτάθηκαν στην εργασία αυτή.

Η μορφή των κατωφλίων καθορίζει τη δυναμική της τοπολογίας του γράφου που αναπαριστά της σχέσης μεταξύ των ρομπότ ή των υπολογιστών. Όπως παρουσιάστηκε στις ενότητες 2.3, 4.3, 4.3.1 και 8.1.2 η τοπολογία

του γράφου καθορίζει τη συμπεριφορά του συστήματος.

Παρατηρήσαμε ότι τα συστήματα, που αναπαρίστανται από συνεκτικό γράφο με μικρή διάμετρο, μπορούν να ανταποκρίνονται καλύτερα σε έντονα μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Οι μείωση των αποστάσεων μεταξύ των κόμβων και η μεγέθυνση των γειτονιών, επιτρέπουν την ταχύτερη μεταφορά πληροφοριών διαμέσου του δικτύου των agent. Η αύξηση του «bandwidth» του συστήματος συσχετίζεται με την αύξηση του ρυθμού μεταβολών (της συχνότητας μεταβολών). Υπάρχει κάποια σχέση υπάρχει ανάμεσα τους κάτι σαν τη δειγματοληψία στο χωροχρόνο;

Η ύπαρξη κατωφλίων, δηλαδή μη γραμμικών στοιχείων στη συμπεριφορά των agent είναι αυτή που επιτρέπει την ανάδυση τόσο πολύπλοκων συμπεριφορών. Οι μη γραμμικότητες και το ευμετάβλητο, με έντονο θόρυβο περιβάλλον, όπου δρουν τα παραπάνω συστήματα ίσως καθιστά κατάλληλη την στοχαστική περιγραφή. Σε αυτό συνηγορούν δύο στοιχεία. Πολύπλοκα συστήματα μπορούν να θεωρηθούν και τα αντικείμενα που ασχολούνται οι στατιστική φυσική και μηχανική. Πεδία με ισχυρό υπόβαθρο, στα οποία μπορούν να αναχθούν πολλά από τα παραπάνω προβλήματα. Δεύτερον, ένα από τα πεδία που γνωρίζει ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες είναι οι τυχαίοι γράφοι (random graph). Στους τυχαίους γράφους η τοπολογία τους αντικατοπτρίζεται από την κατανομή των ακμών-βαθμών των κόμβων. Αν είναι δυνατή η συσχέτιση της μορφής των κατωφλίων με την κατανομή των ακμών-βαθμό κόμβων στους γράφους, ίσως επιτρέψει την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ευστάθεια του μοντέλου σε έντονες μεταβολές.

Η ανάπτυξη μοντέλων, που θα συνδέουν τη μορφή των κατωφλίων με τη δυναμική της τοπολογίας του γράφου και κατ' επέκταση της συμπεριφοράς του συστήματος, θα αποτελέσουν σημαντικά εργαλεία σχεδίασης. Η κάλυψη αυτού του κενού είναι αναγκαία και πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα για μελλοντικές έρευνες στα πεδία που αναπτύχθηκαν στη μελέτη αυτή.

Όπως και επιβεβαίωση των θεωρητικών μοντέλων με την υλοποίηση των συστημάτων.

Μια πρώιμη περιγραφή των συστημάτων παρουσιάζεται στις ενότητες 7.4 και 9.3. Οι υλοποιήσεις αυτές μπορεί να μην είναι τόσο λειτουργικές, διότι επιδιώχθηκε να είναι όσο το δυνατό απλούστερες και με μικρό κόστος. Μπορούν να αποτελέσουν ένα στάδιο πειραματισμού για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητά τους προτού προχωρήσει η εξέλιξή τους. Δεν ήταν σκοπός μας η παρουσίαση λύσεων σε συγκεκριμένα προβλήματα αλλά η δημιουργία μιας πλατφόρμας, που μπορεί να υποστηρίξει εξελισσόμενη πλειάδα εφαρμογών.

Βιβλιογραφία

Βιβλία

- [1] “Swarm Intelligence from Natural to Artificial Systems” Eric Bonabeau, Marco Dorigo, Guy Teraulaz.
- [2] “Critical Phenomena in Natural Sciences”, D. Sornette.
- [3] “Markov Random Fields and their applications”, Ross Kindermann, J. Laurie Snell.
- [4] “Graph Theory”, Mayeda.
- [5] “Modern Graph Theory”, Bela Bollobas.
- [6] “Applications of Graph Theory Algorithms”, Vinod Chachra, Prabhakar m. Ghare, James M. Moore.
- [7] “Graph Theory and Feynman Integrals”, NoboruNakanishi.

Άρθρα δημοσιευμένα στο διαδίκτυο

- [8] “Swarm Intelligence: a whole new way to think about business”, E. Boabeau, C. Meyer
- [9] “Ασκήσεις προγραμματισμού κυτταρικά αυτόματα”, Ελπίδα Τζαφέστα.
- [10] “Phenomenology of excitation in 2-d cellular automata and swarm systems”, Andrew Adamatzky and Owen Holland
- [11] “Modeling civil violence: An agent-based computational approach”, Joshua M. Epstein
- [12] “Emergent behavior in biological systems”, David G. Green
- [13] “Basins of attraction in network dynamics: A connectional framework for bimolecular networks”, Andrew Wuensche
- [14] “Entropy and Self-Organization in Multi-Agent Systems”, H. Van Dyke Parunak Sven Brueckner
- [15] “How Swarms Build Cognitive Maps”, D. Chialvo M. Millonas
- [16] “Autonomous agents and collective robotics”, F. Chantemargue, M. Courant, B. Hirsbrunner
- [17] “SWARM-BOT: Pattern formation in a swarm of self-assembling mobile robots”, Eron Sahin, Thomas H. Labella, Vito Trianni, Jean-Louis Deneubourg, Philip Rasse, Dario Floreano, Luca Gambardella, Francesco Mondada, Stefano Nofli, Marco Dorigo
- [18] “Self-Organized Flocking with Agent Failure: Off-Line Optimization and Demonstration with Real Robots”, Adam T. Hayes, Parsa Dormiani-Tabatabaei
- [19] “A formation behavior for large-scale micro-robot force deployment”, Donald D. Dudenhoefter, Michael P. Jones
- [20] “Social potential fields: a distributed behavioral control for autonomous robots”, John H. Reif, Hongyan Wang, November 13, 1998
- [21] “Co-Fields: Towards a Unifying Model for Swarm Intelligence”, Letizia Leonardi, Marco Mamei, Franco Zambonelli
- [22] “Evolving mobile robots able to display collective behaviors”, Gianluca Baldassare, Stefano Nofli, Domenico Parisi
- [23] “Messor: load-balancing through a swarm of autonomous agents”, Alberto Montresor, Hein Meling, Ozalp Baboglu
- [24] “Load balancing techniques for distributed memory multiprocessor”, M.A.L. Kalyani, Richard Wait, D.N. Ranasinghe
- [25] “An optimal dynamic load balancing algorithm”, Y. F. Hu, R. J. Blake
- [26] “Stable Flocking of Mobile Agents, Part II: Dynamic Topology” Herbert G. Tanner, Ali Jadbabaie and George J. Pappas

- [27] “Flocks of Autonomous Mobile Agents” Herbert G.Tanner, Ali Jadbabaie and George J.Pappas
- [28] “Graph Laplacians and Stabilization of Vehicle Formations” J. Alexander Fax Richard M. Murray
- [29] Esther M. Arkin, Michael A. Bender, Sandor P. Fekete, Joseph S. B. Mitchell, Martin Skutella , “The Freeze-Tag Problem: How to Wake Up a Swarm of Robots”
- [30] Ozalp Babaoglu, Hein Meling, Alberto Montresor , “Anthill: A Framework for the Development of Agent-Based Peer-to-Peer Systems”
- [31] Stefan Bornholdt, Thimo Rohlf, “Topological Evolution of Dynamical Networks: Global Criticality from Local Dynamics”
- [32] Zack Butler, Keith Kotay, Daniela Rus, Kohji Tomitay, “Cellular Automata for Decentralized Control of Self-Reconfigurable Robots”
- [33] Siu-Cheung Chau “An Improved Direct Dimension Exchange Method for Load Balancing in k-ary n-cube Multi-computers”
- [34] Bastien Chopard, Alexandre Dupuis, Pascal Luthi, “A cellular automata model for urban traffic and its application to the city of Geneva”
- [35] Fan R. K. Chung, “Lectures on Spectral Graph Theory”
- [36] Leah Edelstein-Keshet, “Mathematical models of swarming and social aggregation”
- [37] John T. Feddema, Chris Lewis, and David A. Schoenwald, “Decentralized Control of Cooperative Robotic Vehicles: Theory and Application”
- [38] “Stability Analysis of Social Foraging Swarms: Combined Effects of Attractant/Repellent Profiles”, Veysel Gazi, Kevin M. Passino
- [39] Veysel Gazi, Kevin M. Passino, “Stability Analysis of Social Foraging Swarms”
- [40] Veysel Gazi, Kevin M. Passino, “Stability of a One-Dimensional Discrete-Time Asynchronous Swarm”
- [41] Brian P. Gerkey, Maja J Mataric, “Multi-Robot Task Allocation: Analyzing the Complexity and Optimality of Key Architectures”
- [42] Douglas P. Ghormley, David Petrou, Steven H. Rodrigues, Amin M. Vahdat, and Thomas E. Anderson, “GLUnix: a Global Layer Unix for a Network of Workstations”
- [43] Siome Goldenstein, Menelaos Karavelas, Dimitris Metaxas, Leonidas Guibas, “Scalable Dynamical Systems for Multi-Agent Steering and Simulation”
- [44] A. Hayes, A. Martinoli, R. Goodman, “Swarm robotic odor localization”
- [45] Rainer Hegselmann, Andreas Flache (1998), “Understanding Complex Social Dynamics: A Plea For Cellular Automata Based Modelling”
- [46] A. Heirich, “A scalable diffusion algorithm for dynamic mapping and load balancing on networks of arbitrary topology”,
- [47] Hans-Ulrich Heiss, Michael Schmitz, “Decentralized Dynamic Load Balancing: The Particles Approach”
- [48] A. Jadbabaie, J. Lin, A. S. Morse, “Coordination of Groups of Mobile Autonomous Agents Using Nearest Neighbour Rules”
- [49] I. Kassabalidis ,M.A.El-Sharkawi , R.J.Marks II , P. Arabshahi, A.A.Gray, “Swarm Intelligence for Routing in Communication Networks”
- [50] Stefan Kleijckers, Floris Wiesman, Nico Roos, “A Mobile Multi-Agent System for Distributed Computing”
- [51] Kristina Lerman, Aram Galstyan, “A General Methodology for Mathematical Analysis of Multi-Agent Systems”
- [52] Yang Liu, Kevin M. Passino, Marios M. Polycarpou, “Stability Analysis of M -Dimensional Asynchronous Swarms With a Fixed Communication Topology”
- [53] E.Luque, A.Ripoll, A. Cortes, T. Margalef, “A Distributed Diffusion Method for Dynamic Load Balancing on Parallel Computers”

-
- [54] Nihar R. Mahapatra, Shantanu Dutt, “Random Seeking: A General Efficient and Informed Randomised Scheme for Dynamic Load Balancing”
 - [55] A. Martinoli, K. Easton, “Modelling swarm robotic systems”
 - [56] A. Martinoli, F. Montana, “Probabilistic modelling of a bio-inspired collective experiment with real robots”
 - [57] Mitchell A. Potter, Lisa A. Meeden and Alan C. Schultz, “Heterogeneity in the Coevolved Behaviours of Mobile Robots: The Emergence of Specialists”
 - [58] M. E. J. Newman, “Random graphs as models of networks”
 - [59] M. E. J. Newman, D. J. Watts, S. H. Strogatz, “Random graph models of social networks”
 - [60] Noam Nisan, Shmuelik London, Ori Regev, Noam Camiel, “Globally Distributed Computation over the Internet - The POPCORN Project”
 - [61] Petter Ogren, Magnus Egerstedt, Xiaoming Hu, “A Control Lyapunov Function Approach to Multi-agent Coordination”
 - [62] Reza Olfati-Saber, Richard M. Murray, “Distributed cooperative control of multiple vehicle formations using structural potential functions”
 - [63] Chikoo Oosawa, Michael A. Savageau, “Statistical Properties of Randomly Constructed Boolean Networks that Resemble the Transcription Factor Network of *Escherichia coli*”
 - [64] Calvin J. Ribbens, Dennis Kafura, Amit Karnik, Markus Lorch, “The Virginia Tech Computational Grid: A Research Agenda”
 - [65] Francesco Russo, “JXTAnthill”
 - [66] Yuzuru Sato, James P. Crutchfield, “Coupled Replicator Equations for the Dynamics of Learning in Multiagent Systems”
 - [67] Shin-Ichi SEKI, Tamotsu SATO, “The effect of a typhoon on the flocking and foraging behavior of tits”
 - [68] Mark Andrew Smith, “Cellular Automata Methods in Mathematical Physics”
 - [69] Armano Srblijinovic, Drazen Penzar, Petra Rodik, Krno Kardov (2003), “An Agent-Based Model of Ethnic Mobilisation”
 - [70] Herbert G. Tanner, George J. Pappas, Vijay Kumar, “Leader-to-Formation Stability”
 - [71] Herbert G. Tanner, Ali Jadbabaie, George J. Pappas, “Coordination of Multiple Autonomous Vehicles”
 - [72] Herbert Tanner, Vijay Kumar, George Pappas, “Stability Properties of Interconnected Vehicles”
 - [73] Y. Uny Cao, Alex S. Fukunaga, Andrew B. Kahng, “Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions”
 - [74] Sergi Valverde, Ricard V. Sole, “Self-organized Critical Traffic in Parallel Computer Networks”
 - [75] Gerard Weisbuch, Guillaume Deuant, Frederic Amblard, Jean Pierre Nadal, “Interacting Agents and Continuous Opinions Dynamics”
 - [76] Walter Willinger, Ramesh Govindan, Sugih Jamin, Vern Paxson, Scott Shenker, “Scaling phenomena in the Internet: Critically examining criticality”
 - [77] H. Peyton Young, “The Diffusion of Innovations in Social Networks”
 - [78] Sherin M. Youssef, Mohamed A. Ismail, Soheir A. Bassiouny, “Integration of Mobile Agents and Swarm Intelligence for Efficient brokering purposes in the future multi-operator network marketplace”
 - [79] Nahum Zaera, Dave Cliff, Janet Bruton, “(Not) Evolving collective behaviours in synthetic fish”
 - [80] Mohammed Javeed Zaki, Wei Li, Srinivasan Parthasarathy, “Customized Dynamic Load Balancing for a Network of Workstations”

Παράρτημα