

Τεχνική Ζωή

Εισαγωγή

Παναγιώτης Αδαμίδης

Ιούνιος 1999

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
2. Ορισμοί Τεχνητής Ζωής	2
3. Τεχνητή νοημοσύνη – Τεχνητή ζωή	3
4. Εξομοίωση και Προσομοίωση	5
4.1. Προσομοίωση Μονάδων	5
4.2. Προσομοίωση Πληθυσμών	9
4.3. Turing, von Neumann Automata και Κυτταρικά Αυτόματα	10
5. Συνθετική Βιολογία	14
5.1. Συνθετική Ζωή;	14
5.2. Σύνθεση και Προσομοίωση	15
5.3. Ψηφιακή Εξέλιξη	16
5.4. Εξέλιξη και Μέσο Εξέλιξης	17
5.4. Ψηφιακή Εξέλιξη - Εγκαταλείποντας τον έλεγχο	18
5.4.1. Γενετικοί Αλγόριθμοι	19
5.4.2. Γενετικός Προγραμματισμός	19
5.4.3. Αισθητική Επιλογή	20
5.4.4. Εικονικά Πλάσματα	22
5.4.4. Συνεξέλιξη (Coevolution)	24
5.4.5. Φυσική Επιλογή	25
6. Λογισμικό	27
6.1. Το σύστημα Tierra	28
6.1.1. Περιγραφή του ιδεατού υπολογιστή του Tierra	29
6.1.1. Οικολογική Εξέλιξη	30
6.2. Το σύστημα Avida	32
6.2.1. Σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του Avida	33
6.2.2. Τι είναι το Avida	34
6.2.3. Πειράματα με το Avida	35
7. Επίλογος	36
Βιβλιογραφία	36

1. Εισαγωγή

Ο όρος *Τεχνητή Ζωή* (*Artificial Life*) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την έρευνα συστημάτων κατασκευασμένων από τον άνθρωπο και τα οποία διαθέτουν μερικές από τις βασικές ιδιότητες της ζωής. Υπάρχουν αρκετά τέτοια συστήματα (ψηφιακά, δοκιμαστικού σωλήνα και μηχανικά) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πειράματα με στόχο την αποκάλυψη των αρχών και της οργάνωσης των ζώντων οργανισμών στη Γη και αλλού.

Αυτή η προσπάθεια εμπλέκει αρκετούς επιστημονικούς κλάδους όπως βιολογία, χημεία, φυσική, επιστήμη των Η/Υ, και μηχανική. Ενώ ένα μεγάλο μέρος της Τεχνητής Ζωής (TZ) έχει να κάνει με την κατανόηση της ζωής όπως την γνωρίζουμε, δηλαδή την ζωή πάνω στη Γη, ένα σημαντικό μέρος της προσπάθειας αφορά την αναζήτηση των αρχών της ζωής ανεξάρτητα από το περιβάλλον και το μέσο στο οποίο αναπτύσσεται. Έτσι η TZ μελετά την ζωή όπως θα μπορούσε να είναι, διερευνώντας μεθόδους της ζωής βασισμένη σε χημικές ενώσεις του άνθρακα.

Η TZ συχνά περιγράφεται ως η προσπάθεια κατανόησης της συμπεριφοράς υψηλού επιπέδου από κανόνες χαμηλού επιπέδου. Για παράδειγμα, πως οι απλοί κανόνες της φυσικής εξέλιξης του Δαρβίνου οδηγούν σε δομές υψηλού επιπέδου, ή πως οι απλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μυρμηγκιών και του περιβάλλοντός τους οδηγεί στην σύνθετη συμπεριφορά κατά την οποία ακολουθούν κάποιο ίχνος. Η κατανόηση αυτής της σχέσης οδηγεί σε νέες λύσεις σε σύνθετα πραγματικά προβλήματα όπως η αποτροπή ασθενειών, η πρόβλεψη του χρηματιστηρίου και η εξόρυξη δεδομένων στο Internet.

Η δημιουργία ζώντων συστημάτων από μη ζώντα εξαρτήματα είναι φανερά το πιο φιλόδοξο από όλα τα πεδία της TZ. Προς το παρόν αυτό το πεδίο της TZ χωρίζεται σε δύο, ως επί το πλείστον, ανεξάρτητες προσεγγίσεις:

- την δημιουργία ζωής χρησιμοποιώντας τις κλασικές δομικές μονάδες της φύσης (χημικές ενώσεις του άνθρακα) και
- την δημιουργία ζωής χρησιμοποιώντας τις ίδιες αρχές αλλά διαφορετικό μέσο υλοποίησης: τον Η/Υ

Η πρώτη προσέγγιση διερευνά τις δυνατότητες των "RNA κόσμων" μέσω της κατασκευής αυτο-αντιγραφόμενων μορίων, ενώ η δεύτερη εξετάζει τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά διαφορετικών μέσων στην υποστήριξη συμπεριφορών όμοιες με αυτές των ζώντων οργανισμών, μέσω της προσομοίωσης απλών πληθυσμών αυτο-αντιγραφόμενων οντοτήτων. Έτσι και οι δύο προσεγγίσεις (βιοχημική και υπολογιστική) προσπαθούν να ρίξουν φως στο επιτακτικό ερώτημα της απαρχής της ζωής.

Εν τούτοις η TZ δεν σχετίζεται μόνο με την δημιουργία και την προσομοίωση ζώντων συστημάτων, είτε φυσικών είτε τεχνητών, αλλά μια σημαντική προσπάθεια έχει στόχο την κατασκευή προσαρμόσιμων αυτόνομων robot. Αυτή η μέθοδος διαφέρει από την κλασική προσέγγιση της ρομποτικής, στο ότι το robot αντιδρά με το περιβάλλον του και μαθαίνει από

αυτή την αλληλεπίδραση. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση μιας συνολικής αυτόνομης σύνθετης συμπεριφοράς (*αναδιδόμενη συμπεριφορά* - *emergent behavior*) εκ μέρους του robot.

Η TZ επεκτείνει το πεδίο της βιολογίας με την εισαγωγή της μελέτης μορφών ζωής διαφορετικών από αυτές οι οποίες υπάρχουν στο γήινο φυσικό περιβάλλον. Μερικές από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στο χώρο της τεχνητής ζωής αφορούν το χώρο της συνθετικής εξέλιξης. Ένα από τα κύρια ρεύματα σ' αυτό το χώρο είναι τα συστήματα τα οποία εξελίσσονται ελεύθερα στο ψηφιακό μέσο, όπως η εξέλιξη μέσω της φυσικής επιλογής στις μορφές ζωής που βασίζονται στον άνθρακα και δημιουργήθηκαν στη Γη. Ο κύριος στόχος της TZ είναι η πρόκληση της ψηφιακής εξέλιξης να δημιουργήσει πολύπλοκα συστήματα στο ψηφιακό μέσο, συγκρίσιμα σε μέγεθος με την πολυπλοκότητα της οργανικής ζωής.

2. Ορισμοί Τεχνητής Ζωής

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένοι ορισμοί της TZ.

- 'Η μελέτη των ανθρωπίνων όντων που παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των ζωντανών φυσικών συστημάτων'. (Langton, 1989)
- 'Τεχνητή ζωή είναι ο τομέας της επιστήμης που είναι αφιερωμένος στην προσπάθεια για την κατανόηση της ζωής, ο στόχος αυτός μπορεί να γίνει εφικτός, μέσω της απόσπασης των θεμελιωδών δυναμικών αρχών, υπογραμμίζοντας τα φυσικά φαινόμενα, και της αναδημιουργίας αυτών των δυναμικών αρχών σε άλλα φυσικά μέσα, όπως οι υπολογιστές, κάνοντας τα, προσिता σε νέα είδη πειραματικού χειρισμού.
...
Εκτός από την εξεύρεση νέων μεθόδων για τη μελέτη των βιολογικών φαινομένων που έχουν σχέση με τη ζωή πάνω στη Γη, η *ζωή όπως τη γνωρίζουμε*, η Τεχνητή Ζωή μας επιτρέπει να εκτείνουμε τις μελέτες μας σε ένα καινούργιο πεδίο της βιολογικής της πιθανής ζωής, η *ζωή όπως θα μπορούσε να είναι...*' (Langton, 1992)
- 'Μεταξύ όλων των πραγμάτων που είναι η τεχνητή ζωή ή που θα γίνει, είναι κατά πάσα πιθανότητα ασφαλές να πούμε πως το πεδίο αυτό, σα σύνολο, αντιπροσωπεύει την προσπάθεια να εμπλουτίσει κατά πολύ το ρόλο της σύνθεσης στη μελέτη των βιολογικών φαινομένων.' (Langton, 1994)
- 'Η τεχνητή ζωή είναι το τολμηρό επιχείρημα για τη κατανόηση της βιολογίας περισσότερο μέσω της κατασκευής βιολογικών φαινομένων παρά μέσω της διάσπασης των διαφόρων μορφών ζωής στα συστατικά τους. Είναι μια προσέγγιση σύνθεσης και όχι απλοποίησης.' (Ray, 1994)

- ‘Τα μοντέλα της τεχνητής ζωής ... είναι αρκετά ισχυρά ώστε να αιχμαλωτίσουν αρκετή από την πολυπλοκότητα των ζωντανών οργανισμών, ακόμα είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμα, επαναληπτικά και αποτελούν αντικείμενα με ακριβή ελεγχόμενο πειραματισμό σε σχέση με τα αντίστοιχα φυσικά συστήματα.’ (Taylor and Jefferson, 1994)
- ‘Η τεχνητή νοημοσύνη είναι αφιερωμένη σε ένα καινούργιο επιστημονικό κλάδο που ερευνά την επιστημονική, μηχανική, φιλοσοφική και κοινωνική πλευρά της αλματώδους εξέλιξης της τεχνολογικής ικανότητας να συνθέτει από την αρχή, συμπεριφορές σαν εκείνες των ζωντανών οργανισμών με τη βοήθεια των υπολογιστών, των μηχανών ή και άλλων εναλλακτικών μέσων. Με την επέκταση των οριζόντων στην εμπειρική έρευνα, στη βιολογία πέρα από την περιοχή της πρόσφατα ονομαζόμενης *Ζωής όπως τη γνωρίζουμε*, η μελέτη της τεχνητής ζωής μας μεταφέρει στο κόσμο της *Ζωής όπως θα μπορούσε να είναι*. Σχετικά θέματα εκτείνουν την ιεραρχία της βιολογικής οργάνωσης, περικλείουν έρευνες σχετικές με την προέλευση της ζωής, της παραγωγής και της ανάπτυξης, της εξελικτικής και οικολογικής δυναμικής, της συμπεριφοράς των ζώων και των ρομπότ, της οργάνωσης της κοινωνίας καθώς και την εξέλιξη του πολιτισμού. (Bonabeau 1999, Hautop Lund and Asada, 1998)

Θα έλεγε λοιπόν κανείς και σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς πως Τεχνητή Ζωή είναι η μελέτη των τεχνητών συστημάτων τα οποία παρουσιάζουν συμπεριφορά η οποία έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με εκείνα των φυσικών ζωντανών οντοτήτων. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι η αναπαραγωγή (η οποία γίνεται από τους ίδιους τους οργανισμούς), η προσαρμοστικότητα, η εξέλιξη, ο μεταβολισμός και άλλα. Είναι η αναζήτηση της εξήγησης της ίδιας της ζωής χωρίς το περιορισμό σε αναφορές στα συγκεκριμένα παραδείγματα που έχουν αναπτυχθεί στη Γη. Αυτό για να επιτευχθεί χρειάζονται βιολογικά και χημικά πειράματα, προσομοιώσεις σε υπολογιστές και πολύ προσπάθεια σε καθαρά θεωρητικό επίπεδο. Οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη μοριακή δομή καθώς και οι τομείς της κοινωνικής και εξελικτικής ικανότητας είναι και αυτά αντικείμενα μελέτης. Ο απώτερος σκοπός είναι να αποσπαστεί και να κατανοηθεί η λογική ιδιότητα των ζωντανών οργανισμών.

3. Τεχνητή νοημοσύνη – Τεχνητή ζωή

Πως όμως ακόμα και αν φτιάξουμε ‘ζωή’, θα μπορέσουμε να καταλάβουμε πως καταφέραμε με τεχνητά μέσα να δημιουργήσαμε πραγματικά ζωή και όχι απλά να έχουμε καταφέρει να παράγουμε ορισμένα χαρακτηριστικά της;

Ένα αντίστοιχο με το παραπάνω ζητούμενο είναι εκείνο της τεχνητής νοημοσύνης, πως μπορούμε να ξέρουμε αν το σύστημα που κατασκευάσαμε έχει ή όχι (τεχνητή) νοημοσύνη, στο ερώτημα αυτό το τεστ του Alan Turing ήταν εκείνο που έδειχνε τη λύση. Συγκεκριμένα το τεστ είναι ως εξής: Έχουμε έναν άνθρωπο Α που κάθεται μπροστά σε ένα τερματικό. Σε ένα ξεχωριστό χώρο, που δεν έχει οπτική επαφή με τον Α, έχουμε ένα άλλο τερματικό όπου

κάθεται ένας άλλος άνθρωπος ή μια μηχανή (B). Ο Α κάνει ερωτήσεις στο Β μέσω του τερματικού για ένα χρονικό διάστημα και ο Β απαντά σε όλες τις ερωτήσεις του Α. Στο τέλος του τεστ ο Α πρέπει να αποφανθεί αν στις ερωτήσεις του απαντούσε άνθρωπος ή μηχανή. Αν ο Α δεν μπορεί να ξεχωρίσει τη μηχανή από τον άνθρωπο τότε θεωρείται ότι η μηχανή πέρασε με επιτυχία το τεστ, δηλαδή διαθέτει νοημοσύνη. Το ερώτημα εδώ είναι αν υπάρχει κάποιο αντίστοιχο τεστ για τη τεχνητή ζωή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να ειπωθεί πως αν και φαινομενικά υπάρχουν ομοιότητες μεταξύ του αντικειμένου μελέτης της τεχνητής νοημοσύνης και της τεχνητής ζωής, υπάρχουν και πολλές διαφορές. Η τεχνητή ζωή είναι βασισμένη στη βιολογία, τη φυσική και τα μαθηματικά ενώ η τεχνητή νοημοσύνη έχει τη βάση της στην επιστήμη των υπολογιστών, στους μηχανικούς και στους ψυχολόγους. Επίσης η γενική ιδέα των μελετών των αντίστοιχων θεμάτων φαίνεται να προσεγγίζει τα ίδια θέματα από διαφορετική οπτική γωνία, η τεχνητή ζωή από κάτω προς τα πάνω με στόχο τη μελέτη της σύνθεσης ενώ η τεχνητή νοημοσύνη από πάνω προς τα κάτω, με εστίαση στα αποτελέσματα και όχι στην υλοποίηση.

Όμως αν επιστρέψουμε στο ερώτημα για το αν υπάρχει κάποιο αντίστοιχο, με εκείνο του Alan Turing, τεστ για τη τεχνητή ζωή. Στη πρώτη διάσκεψη με θέμα τη τεχνητή ζωή, είχε προταθεί το λεγόμενο 'τεστ της πάπιας'. Αν κάτι είχε την εμφάνιση της πάπιας και έκραζε σαν τη πάπια τότε άνηκε στην **κατηγορία** η οποία είχε τον τίτλο 'πάπια', ήταν δηλαδή μια πάπια. Όσο και αν το τεστ αυτό φαίνεται αντικειμενικό δεν είναι σε τελική ανάλυση τόσο, όσο εκείνο του Alan Turing για τη τεχνητή νοημοσύνη.

Συνήθως σε όλους τους τομείς της επιστήμης, για να αποτελέσει το αντικείμενο που μελετάμε, τμήμα μιας κατηγορίας (π.χ. ένα φως, μία λάμψη στον ουρανό για να ονομαστεί τελικά αστέρι), πρέπει να γίνουν μια σειρά από παρατηρήσεις. Βέβαια αυτό δε σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά μιας κατηγορίας είναι σαφή και ξεκάθαρα. Έτσι, και στο ερώτημα: "τι διαφέρουν τα έμψυχα από τα άψυχα όντα", το σημείο διαμάχης και προβληματισμού δεν είναι ο τελικός διαχωρισμός του τι είναι ζωντανό και τι όχι, αλλά στα χαρακτηριστικά που συνεπάγονται από αυτά τα δύο. Γενικά θα πρέπει τα χαρακτηριστικά μίας κατηγορίας να είναι **καθολικά**, δηλαδή να ισχύουν για όλα τα στοιχεία της κατηγορίας. Ύστερα από τη διευκρίνιση και κατανόηση των χαρακτηριστικών μπορούν να γίνουν προβλέψεις αλλά και να αναπτύσσονται θεωρίες και μοντέλα.

Μία θεωρία έχει σαν αφετηρία της ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, όπου με βάση αυτό, με μία αναλυτική προσέγγιση, γίνονται παρατηρήσεις και διαπιστώνονται και άλλα χαρακτηριστικά. Στο τομέα όμως της μελέτης γύρω από το θέμα της 'ζωής' κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό. Ένας λόγος είναι ότι μπορούμε μεν να χωρίσουμε και να μελετήσουμε σε κομμάτια έναν ζωντανό οργανισμό, αλλά τα μέρη αυτά δεν έχουν της ιδιότητες για περαιτέρω ανάπτυξη και γενίκευση. Έτσι μία αναλυτική προσέγγιση δεν είναι δυνατό να γίνει. Ακόμα, για να αναπτυχθεί μία θεωρία δεν είναι αρκετό να βρεθούν χαρακτηρισμοί που να περιγράφουν όλους τους ζωντανούς οργανισμούς, αλλά θα πρέπει να μπορούν να γίνουν προβλέψεις σύμφωνα με αυτή και ταυτόχρονα να αποκλείονται οι μη ζωντανοί οργανισμοί. Γενικά, και αυτό είναι και ένας λόγος

που κάνει τα πράγματα ποιο δύσκολα, η ‘ζωή’ φαίνεται να είναι μία ιδιότητα από μία συλλογή από χαρακτηριστικά και όχι μία ιδιότητα από τα καθαυτό χαρακτηριστικά.

Ιστορικά, η όλη ιδέα της δημιουργίας ζωής, αγγίζει τα όρια της φαντασίας και δεν ήταν παρά μόνο στις αρχές του 1920, όπου η ιδέα της δημιουργίας ζωντανών οντοτήτων και συνεπώς η γέννηση της ίδιας της ‘ζωής’ από άψυχα υλικά προτάθηκε. Από τότε οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στο να δείξουν πώς τα βασικά συστατικά ζωντανών όντων μπορούν να σχηματιστούν κάτω από συνθήκες προκειμένου να γίνει διαδεδομένο στη Γη αμέσως μετά το σχηματισμό της. Σε πειράματα τα οποία δεν είναι ιδιαίτερα γνωστά ένας συνδυασμός από μεθάνιο, αμμωνία, υδρατμούς και υδρογόνο οδήγησε σε μία λύση όσον αφορά το νερό και προτάθηκε εκφόρτωση του ηλεκτρισμού ή υπεριώδη φωτισμό ή θερμική ενέργεια. Σε όλα τα πειράματα το αμινοξύ σχηματίστηκε πρόθυμα και σε αφθονία.

Ωστόσο τα διαδοχικά βήματα από το αμινοξύ στη προώθηση από ένζυμα μεταβολισμό καθώς και η αντιγραφή του γενετικού κώδικα είναι ακόμα αβέβαια. Η απογοήτευση για τη μέχρι τώρα κατάσταση των πραγμάτων σε συνδυασμό με την περιέργεια που υπάρχει, οδήγησε χάρη στην άνθιση της τεχνολογίας και των υπολογιστών σε μία καινούργια προσέγγιση: τη προσομοίωση, εξομοίωση και συνεπώς στη κατασκευή ζωντανών όντων.

Ενώ στη σύγχρονη περίοδο της τεχνητής ζωής δηλώνεται ως προέλευση η πρώτη διάσκεψη που έγινε με το ίδιο όνομα στο Los Alamos το 1988, υπάρχει μια πολύ μεγαλύτερη ιστορία η οποία αποτελείται κυρίως από θεωρητική δουλειά. Το μικρό κόστος και η ταχύτητα των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και η μεγάλη αποθηκευτική τους ικανότητα αναμφίβολα οδήγησε στην επανεμφάνιση του θέματος.

4. Εξομοίωση και Προσομοίωση

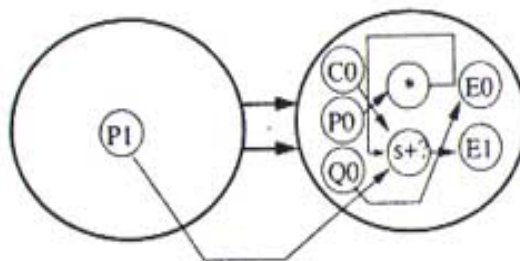
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται περιληπτικά κάποιοι κλάδοι της TZ οι οποίοι ασχολούνται με την εξομοίωση (emulation) ή προσομοίωση (simulation) ζώντων συστημάτων μερικώς ή στο σύνολό τους και δεν έχουν άμεση σχέση με την πραγματική κατασκευή ζωής.

4.1. Προσομοίωση Μονάδων

Κατά την εξομοίωση ενός απλού ζωντανού οργανισμού, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην λειτουργία (ή στις διεργασίες που επηρεάζουν) μία ή και μερικές μόνο μονάδες, ή απλά ένα τμήμα του οργανισμού. Μία τέτοια προσομοίωση μπορεί να παρουσιαστεί με τη βοήθεια της επιστήμης ή της μηχανικής των Η/Υ. Σε κάθε πάντως περίπτωση, η μέθοδος της αναλυτικής προσέγγισης δεν έχει αποτέλεσμα και η γνώση πάνω στις λειτουργίες μιας μονάδας μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη προσπάθεια να φτιαχτεί σε ένα τεχνητό μέσο.

Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η τεχνητή προσέγγιση της **κίνησης** και της **μορφολογίας** κατά την κολύμβηση σε απλές προσομοιώσεις ζώων κατασκευασμένων με τεμάχια, όπως και η εξέλιξη της μορφολογίας και των στρατηγικών ανταγωνισμού (Sims, 1994). Στόχος του Sims δεν είναι η κατανόηση της εμφάνισης μιας συνολικής αυτόνομης σύνθετης συμπεριφοράς αλλά η εξερεύνηση των συνεπειών της συναρμολόγησης ενός αριθμού από απλές αλλά σημαντικές αρχές, όπως απλοί αλγόριθμοι οι οποίοι ελέγχουν την μορφολογία, η εξέλιξη των νευρωνικών δικτύων και των αισθητήρων καθώς και η επιλογή του ισχυρότερου. Πάνω απ' όλα, στόχος δεν είναι η μελέτη μιας προκαθορισμένης συνάρτησης ποιότητας πάνω στην οποία θα προσαρμοστεί ο πληθυσμός (η παραδοσιακή προσέγγιση των Εξελικτικών Αλγόριθμων), αλλά να επιτραπεί στον πληθυσμό να γίνει μέρος του περιβάλλοντος, έτσι ώστε με τα μέλη του να **συνεξελίσσονται** (*coevolving*) και έτσι ώστε η ποιότητα ενός πλάσματος να μπορεί να προσαρμοστεί στο σύστημα ελέγχου του και αντίστροφα.

Στην δουλειά του Sims η επιλογή του ισχυρότερου υλοποιείται μέσω του ανταγωνισμού. Σε ένα παράδειγμα τα πλάσματα προσπαθούν να κερδίσουν τον έλεγχο ενός τεμαχίου το οποίο έχει τοποθετηθεί στο κέντρο του τεχνητού κόσμου.

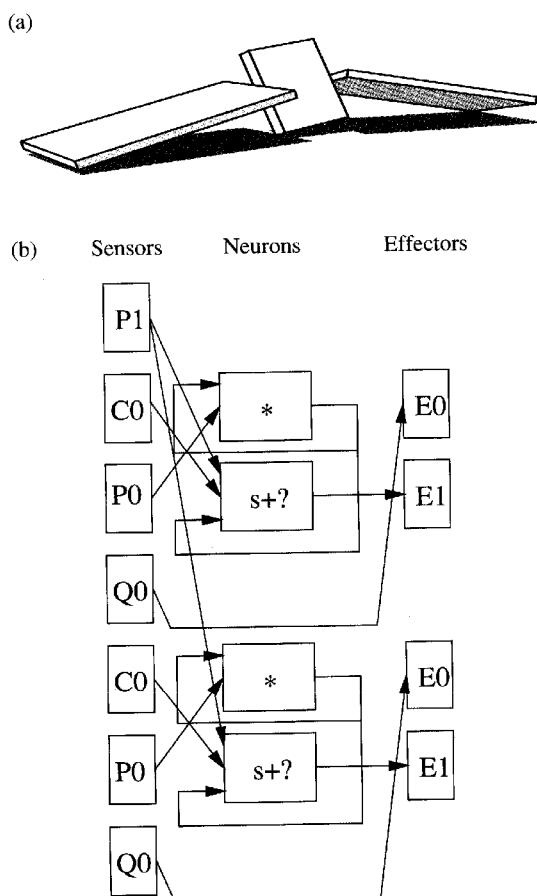


Σχήμα 4.1. Παράδειγμα εξελισσόμενου γονότυπου. Ο εξωτερικός γράφος περιγράφει την μορφολογία του πλάσματος, ενώ ο εσωτερικός περιγράφει το νευρικό σύστημα.

Ο προσομοιωτής ακόμη ελέγχει την αλληλεπίδραση αυτών των πλασμάτων καθώς και τη φυσική του κόσμου στον οποίο βρίσκονται, ενώ η μορφολογία τους και το σύστημα ελέγχου τους εξελίσσονται. Η μορφολογία και το 'μυαλό' τους καθορίζεται από το γονότυπό τους, όπως αυτός φαίνεται στο σχήμα 4.1. Οι τονισμένες γραμμές χαρακτηρίζουν τη μορφολογία (ένα κεντρικό τμήμα το οποίο συνδέεται με δύο επικουρικά τμήματα) ενώ το εσωτερικό περιγράφει το νευρικό τους σύστημα. Ο **φαινότυπος** (*phenotype*) (η πραγματική μορφολογία και ο εγκέφαλος του πλάσματος) που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 4.2. Η εξέλιξη των εικονικών πλασμάτων ξεκινά με τη δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού από υποψήφιους, μέσω της τυχαίας δημιουργίας γονότυπων και εξετάζοντας αρχικά για γενική βιωσιμότητα (όπως για παράδειγμα αν ο διακανονισμός των τεμαχίων τους έχει φυσική υπόσταση και δεν μπαίνει το ένα τεμάχιο στο άλλο). Κατόπιν τα πλάσματα που έχουν απομείνει συνδυάζονται σε ζευγάρια για ανταγωνισμό, και η φυσική τους ικανότητα καθορίζεται από την επιτυχία τους ή όχι στη διεκδίκηση του ελέγχου ενός κύβου.

Ο ανταγωνισμός έχει μια προκατάληψη προς εκείνα τα πλάσματα που έχουν ένα πλεονέκτημα ύψους τα οποία ξεκινούν πιο μακριά από τον κύβο, ώστε να αποτρέπεται η "άκομψη" λύση κατά την οποία απλά με μία κίνηση πέφτουν πάνω στον κύβο. Για κάθε γενιά, τα πιο πετυχημένα όντα αντιγράφονται και παίρνουν τη θέση εκείνων που είχαν λίγη ή μηδενική

ικανότητα/ποιότητα. κατόπιν οι απόγονοι δημιουργούνται με διασταύρωση των προσανατολισμένων γράφων (με ανταλλαγή γονιδίων) όπως στο σχήμα 4.1, όπου καθορίζονται η μορφολογία και ο εγκέφαλος τους, και μεταλλάσσονται με κάποια πιθανότητα.

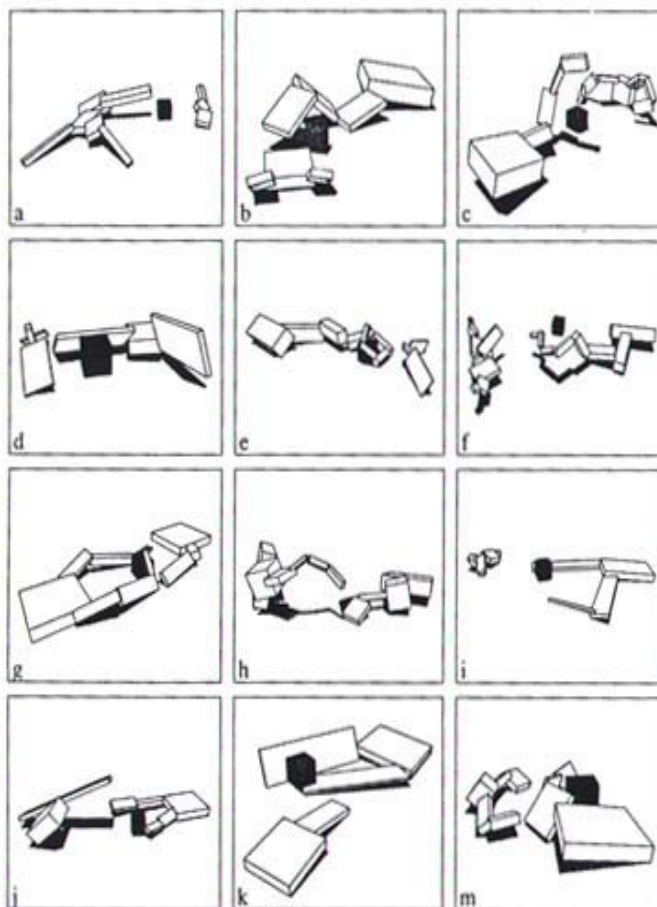


Σχήμα 4.2. (a) Η μορφολογία του φαινοτύπου η οποία δημιουργήθηκε από την εξέλιξη του γονότυπου του σχ. 4.1. (b) Ο εγκέφαλος του φαινοτύπου που δημιουργήθηκε από την εξέλιξη του γονότυπου. Οι έξοδοι ελέγχου του συστήματος (effectors) προκαλούν την μορφολογία που φαίνεται στο (a) να κινηθεί προς τα εμπρός κάνοντας τούμπες.

Το σχήμα 4.3 δείχνει παραδείγματα απλών εξελιγμένων πλασμάτων σε μια τυπική κατάσταση ανταγωνισμού. Οι διαφορές στην προσέγγιση είναι εκπληκτικές και αντικατοπτρίζει τη πολυπλοκότητα της φυσικής διαμόρφωσης η οποία δημιουργείται με την ελευθερία που έχει ο πληθυσμός να διαμορφώνεται μόνος του. Τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά και από επιστημονικής και από οπτικής πλευράς. Στη πραγματικότητα η μελέτη της εξέλιξης της μορφολογίας περιορίζεται στα ευρήματα που είναι διαθέσιμα από τις παλαιοντολογικές καταγραφές.

Ένα άλλο εντυπωσιακό παράδειγμα είναι εκείνο της εξομοίωσης του ψαριού το οποίο βρίσκεται σε ένα προσομοιωμένο υδροδυναμικό περιβάλλον (Σχ. 4.4) (Terzopoulos κ.α. 1994). Στο παράδειγμα αυτό το αντικείμενο μελέτης δεν είναι η αυθαίρετη ανάπτυξη πλασμάτων και η μελέτη των παραγόντων που ευθύνονται για την προσαρμοστικότητα τους, αλλά το ίδιο το

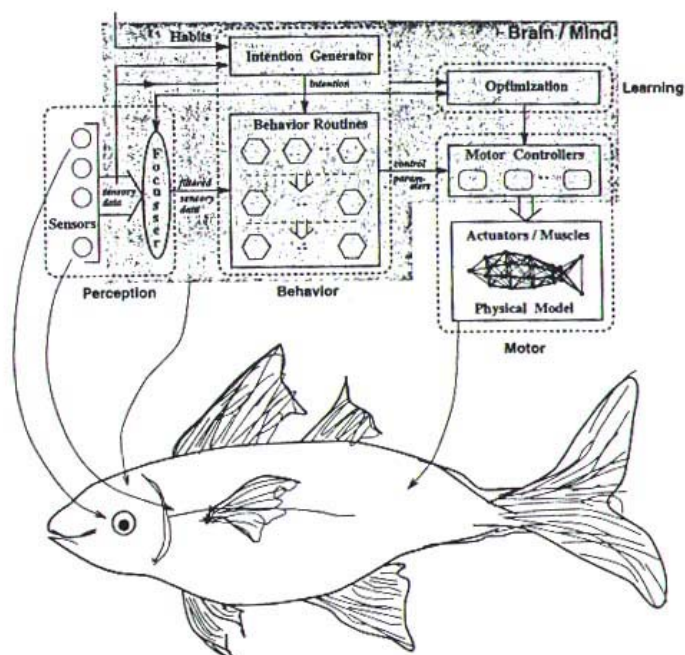
μοντέλο και η κατανόηση του υπάρχοντος ψαριού καθώς και η κατανόηση της συμπεριφοράς τους ως μεμονωμένα πλάσματα και ως ομάδα.



Σχήμα 4.3. Εξελεγκμένα πλάσματα, ανταγωνιζόμενα.

Σαν εναλλακτική λύση στη εκτέλεση πειραμάτων με πραγματικά ψάρια, τα πλάσματα εδώ προσομοιώνονται ολιστικά σαν αυτόνομες μονάδες ευρισκόμενες σε ένα προσομοιωμένο φυσικό κόσμο. Κάθε μονάδα/ψάρι διαθέτει ένα τρισδιάστατο σώμα με εσωτερικό μηχανισμό κίνησης και λειτουργικά πτερύγια, αισθητήρες (συμπεριλαμβανόμενων και των ματιών, με τα οποία αντιλαμβάνεται το περιβάλλον), καθώς και εγκέφαλο με κέντρα κίνησης, αντίληψης, συμπεριφοράς και μάθησης. Για να επιτευχθεί η φυσική οπτική εμφάνιση του ψαριού, χρησιμοποιήθηκε ρεαλιστική αναπαράσταση της επιδερμίδας του ψαριού παρμένη από φωτογραφίες. Σε αυτά τα πλάσματα προγραμματίστηκαν τα πιο σημαντικά συστήματα ελέγχου και ροής πληροφοριών των ψαριών. Τα πλάσματα προσαρμόζονται στο περιβάλλον βρίσκοντας στρατηγικές κίνησης και αποφυγής εμποδίων. Επίσης εμφανίζουν συμπεριφορά κοπαδιού προς αποφυγή των (εξομοιωμένων) αρπακτικών.

Αυτή η χρήση της ‘Τεχνητής Ζωής’ είναι τρομαχτικής σημασίας όταν πειράματα με ζωντανά πλάσματα είναι είτε πολύ δύσκολο να γίνουν, είτε είναι εντελώς ανέφικτα (για πρακτικούς ή ηθικούς λόγους). Ταυτόχρονα μπορούμε να μάθουμε πολλά για τους αλγόριθμους οι οποίοι χρησιμοποιούνται από τα πραγματικά ψάρια, σε σύγκριση με εκείνους που χρησιμοποιούνται στα τεχνητά ψάρια.



Σχήμα 4.4. Έλεγχος και ροή πληροφορίας σε ένα τεχνητό ψάρι

Παράλληλα με την μορφή της υπολογιστικής ανάπτυξης TZ που μόλις περιγράφηκε, γίνεται μία σημαντική προσπάθεια με στόχο την κατασκευή προσαρμοζόμενων αυτόνομων robot. Αυτή η προσέγγιση διαφέρει από την κλασική ρομποτική στο ότι εδώ τα robot αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και μαθαίνουν από αυτό να κινούνται στο χώρο χωρίς να τους δοθεί ακριβής πορεία που θα πρέπει να ακολουθήσουν για να κινηθούν στον χώρο. Με αυτή την έννοια η συμπεριφορά του ρομπότ μπορεί να ονομαστεί *αναδυόμενη* (*emergent*). Μία σημαντική πρόοδος σε αυτό τον τομέα έγινε πρόσφατα από την Barbara Webb (1996) στο Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου. Στην προσπάθειά της να ρίξει φως στον αλγόριθμο που ακολουθούν οι γρύλοι να βρουν το ταίρι τους ως απόκριση στο τραγούδι τους, η ομάδα του Εδιμβούργου κατασκεύασε ένα πλήρη γρύλο robot με αυτιά, νευρώνες οι οποίοι επεξεργάζονται τα σήματα, και μηχανισμούς κίνησης οι οποίοι συνδέουν την έξοδο του εγκεφάλου με τις συσκευές κίνησης (αριστερός και δεξιός τροχός). Με τον αλγόριθμο που τελικά επινόησε η ερευνητική ομάδα μπόρεσαν να ελέγξουν κάποιες από τις συμπεριφορές των γρύλων, ακόμη και να εξομοιώσουν τον τρόπο με τον οποίο οι θηλυκοί γρύλοι κινούνται προς κάποιο συγκεκριμένο άρρενα γρύλο και διαχωρίζουν μεταξύ διαφορετικών τραγουδιών γρύλων.

4.2. Προσομοίωση Πληθυσμών

Οι *αναδυόμενες* (*emergent*), ή *συλλογικές* (*collective*) ιδιότητες ενός συστήματος συχνά δεν είναι εμφανείς από τους μικροσκοπικούς κανόνες οι οποίοι ελέγχουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών ενός πληθυσμού ή συνόλου. Αυτό που διαχωρίζει τα ζώντα συστήματα από τις συλλογές αντικειμένων άψυχης ύλης, από μια καθαρά υπολογιστική θεώρηση, είναι ότι τα σύνολα ζωντανών οργανισμών δεν υπόκεινται, ως επί το πλείστον, σε στατιστική περιγραφή με

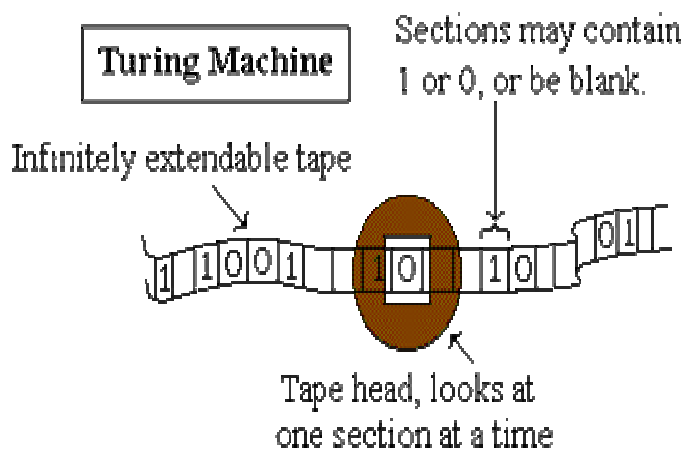
βάση κάποιες μακροσκοπικές παρατηρήσεις. Αν και οι μικροσκοπικοί κανόνες είναι συνήθως απλοί, είναι πολύ πιο σύνθετοι, για παράδειγμα, από τους κανόνες οι οποίοι ελέγχουν την σύγκρουση των μορίων ενός ιδανικού αερίου. Έτσι η μόνη διαθέσιμη μέθοδος είναι η προσομοίωση παράλληλα πολλών παραγόντων για να αναγνωριστεί και να αναλυθεί η αναδυόμενη συμπεριφορά ενός πληθυσμού ή συνόλου. Αυτό δεν είναι πάντα μια απλή διαδικασία. Η αυτο-οργάνωση η οποία υπάρχει σε πολλά ζώντα συστήματα υπαγορεύει ότι τα περισσότερα στοιχεία μιας προσομοίωσης αλληλο-επηρεάζονται και δεν είναι δυνατόν να ενημερώνονται ανεξάρτητα. Επιπλέον η ανάλυση της προσομοίωσης μπορεί να γίνει ακόμη πιο πολύπλοκη από το γεγονός ότι η αναδυόμενη συμπεριφορά μπορεί να επηρεάσει τα μέρη από τα οποία αποτελείται με μη γραμμικό τρόπο. Τα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε εδώ είναι παρόμοια με αυτά της προσομοίωσης μετεωρολογικών φαινομένων.

Μερικά παραδείγματα αποτελούν η μελέτη της συμπεριφοράς των μυρμηγκιών κατά την οποία ακολουθούν κάποιο ίχνος κατά την διαδικασία συλλογής τροφής, και η αναδυόμενη συνολική νοημοσύνη από ένα σμήνος μελισσών κατά την δημιουργία μεγάλων κατασκευών (όπως οι κυψέλες) από μέλη ενός πληθυσμού, κάθε ένα από τα οποία δρα με βάση κάποιους τοπικούς κανόνες μόνο.

4.3. Turing, von Neumann Automata και Κυτταρικά Αυτόματα

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, ιδέες γύρω από τη τεχνητή ζωή υπάρχουν εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Ο **Turing** ήταν ένας από τους πρώτους ανθρώπους που σκέφθηκε τρόπους με τους οποίους θα δημιουργούσε τεχνητή ζωή

Γύρω στο 1936 έφτιαξε μία μηχανή, γνωστή ως μηχανή του Turing, και πίστευε πως κάθε επίπεδο εξυπνάδας μπορεί να αναπαρασταθεί με τις αντίστοιχες καταστάσεις της. Από την ιδέα αυτή ήταν φανερό πως κάθε είδος τεχνητής νοημοσύνης είναι εφικτή. Το μόνο πρόβλημα με τη μηχανή του Turing ήταν ότι έκανε την υπόθεση ότι θα έπρεπε να περάσει απεριόριστος χρόνος για να φανούν τα αποτελέσματα, έτσι εκτός του ότι χρειαζόνταν πάρα πολύ χρόνος ήταν και δύσκολο να σχεδιαστεί μια τέτοιου είδους μηχανή.

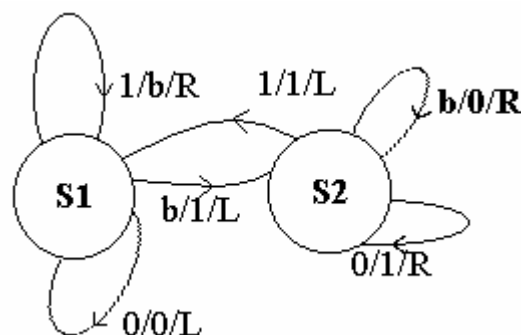


Σχήμα 4.5. Απεικόνιση της μηχανής Turing

Η μηχανή αυτή μπορεί να παρομοιαστεί σαν ένα πολύπλευρο μαγνητόφωνο ταινίας, με μία αυθαίρετο μήκος ταινία. Η ταινία είναι χωρισμένη σε τμήματα όπου το κάθε ένα μπορεί να έχει τη τιμή 0 ή τη τιμή 1 ή μπορεί να είναι και κενό. Επιπλέον υπάρχει και μία κεφαλή η οποία κάθε φορά βλέπει ένα τμήμα.

State	Read	Write	Move	Next State
S1	0	0	L	S1
	blank	1	L	S2
	1	blank	R	S1
S2	0	1	R	S2
	blank	0	R	S2
	1	1	L	S1

(a)



(b)

Σχήμα 4.6. Μηχανή Turing: (a) Πίνακας μετάβασης καταστάσεων (b) Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων

Η κεφαλή μπορεί να βρίσκεται σε τρεις καταστάσεις, μπορεί να γράφει ή και να σβήνει πάνω στη ταινία, και αυτό είναι εφικτό μόνο όταν ο συγκεκριμένος τομέας είναι φανερός στη κεφαλή, μπορεί να αλλάξει την εσωτερική κατάσταση και τέλος μπορεί να μετακινήσει τη ταινία προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά. Οι διάφορες καταστάσεις αλλάζουν σύμφωνα με τους κανόνες, ο κάθε κανόνας καθορίζεται από την αρχική κατάσταση του αυτόματου, την τελική κατάσταση, το στοιχείο που είναι κάτω από τη κεφαλή, τον αριθμό των στοιχείων που θα κινηθούν από την ταινία (ισοδύναμα από τη κεφαλή) και από το στοιχείο που θα γραφθεί από τη μηχανή. Το σύνολο των κανόνων αυτών καθορίζει μοναδικά το αυτόματο.

Τα χαρακτηριστικά και η όλη συμπεριφορά της μηχανής αυτής τη προσδιορίζει σαν μια πεπερασμένης κατάστασης μηχανή (finite state machine - FSM) ή ως πεπερασμένο αυτόματο (finite automaton). Επίσης χωρίζει τις πληροφορίες σε δύο καταστάσεις – έτσι καθορίζεται τόσο η εσωτερική του κατάσταση, όσο όμως και η συμπεριφορά του προς τα έξω. Σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή είναι σε μία ευκρινή κατάσταση και ενδιάμεσα σε αυτή τη χρονική περίοδο και στην επόμενη, το μηχανήμα διαβάζει τα εισερχόμενα στοιχεία από τη ταινία, τα σχετίζει με τους κανόνες που καθορίζουν τη συμπεριφορά του, και αφού επεξεργαστεί τόσο τα εισερχόμενα στοιχεία όσο και την κατάσταση που βρίσκεται εκείνη τη στιγμή καθορίζει τόσο την νέα του συμπεριφορά (π.χ. γραφή / διαγραφή στη ταινία, κίνηση της ταινίας), όσο και με ποια εσωτερική του κατάσταση θα ασχοληθεί στη συνέχεια.

Κάθε μηχανή του μπορεί να περιγραφεί ως 'χάρτης', ο οποίος περιγράφει τις ενέργειες της κάθε κατάστασης, ή ακόμα μπορεί να περιγραφεί σαν ένα διάγραμμα μεταβολών, όπου παριστάνει τις ίδιες πληροφορίες σε μορφή διαγράμματος.

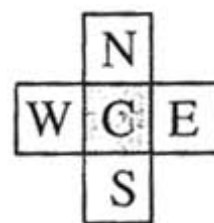
Η δύναμη των μηχανισμών αυτών βρίσκεται στην αποθηκευτική ικανότητα της ταινίας. Η ταινία αυτή κρατά τα δεδομένα που εισέρχονται, αποθηκεύει μερικώς τα δεδομένα από την

εκτέλεση του αλγορίθμου και είναι τελικά το μέσο που χρησιμοποιείται για τη τελική συμπεριφορά. Με τις κατάλληλες πληροφορίες στη ταινία, ο μηχανισμός αυτός μπορεί να εξομοιώσει τη συμπεριφορά ενός άλλου μηχανισμού. Η καλύτερη δυνατή κατάσταση του μηχανισμού αυτού θα ήταν να μπορεί να διαβάσει κάθε σελ με κανόνες από την ταινία ο Turing απέδειξε πως μία τέτοια μηχανή θα ήταν καθολική και επιπλέον θα ήταν και ένας καθολικός υπολογιστής και έτσι θα μπορούσε να προσομοιώσει κάθε μηχανισμό που η συμπεριφορά του θα μπορούσε να περιγραφεί συμβολικά. Ακόμα μια τέτοια μηχανή θα ήταν ικανή όχι μόνο να 'αντιγράψει' τις μαθηματικές συναρτήσεις κάποιας άλλης μηχανής αλλά ακόμα και της ίδιας της φύσης.

Έγινε λοιπόν φανερό πως είναι δυνατή τόσο η δημιουργία τεχνητής νοημοσύνης όσο όμως και, με τη βοήθεια της εξέλιξης των τεχνικών μεθόδων εφαρμοσμένα στα τεστ του Turing, της τεχνητής ζωής

Παρόμοιο όραμα είχε και ο **von Neumann** (1951), ο οποίος επηρεάστηκε από τον Turing, τις ιδέες τους τις άντλησε από τα αυτόματα Ένωθε πως στην αρχή δεν υπήρχε τίποτα το διαφορετικό μεταξύ της ζωής που είναι βασισμένη στον άνθρακα και στα αυτόματα εκτός από τα διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας, έτσι δε βρήκε κανένα λόγο που να τον απομάκρυνε από την ιδέα δημιουργίας τεχνητής ζωής Ένα αρκετά πολύπλοκο πεπερασμένο αυτόματα θα έπρεπε να είναι ικανό να διευθύνει τέτοιες λειτουργίες όπως εκείνες των ζωντανών οργανισμών.

Ο ίδιος επινόησε τα λεγόμενα κυτταρικά αυτόματα (Cellular Automata - CA) με σκοπό να κατασκευάσει ένα καθολικό αυτό-παραγόμενο αυτόματο, κάτι που από μηχανικής πλευράς ήταν ανέφικτο. Η όλη ιδέα ακολουθούσε στενά τα βήματα του για ένα καθολικό μηχανισμό. Συγκεκριμένα κάθε όργανο του αυτό-αναπαραγόμενου μηχανισμού οικοδομείται σαν ένα σχέδιο από κελιά σε διαφορετικές καταστάσεις. Η κατάσταση του κάθε κελιού, που βρίσκονταν σε χρονική περίοδο $t + 1$, καθορίζονταν από τη κατάσταση των γειτονικών κελιών σε χρόνο t , όπου γείτονες θεωρούνται τα τέσσερα διπλανά κελιά που αντιστοιχούν στις τέσσερις κύριες κατευθύνσεις (προς τα πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά). Ο αριθμός των κανόνων για να πραγματοποιηθεί το αυτόματο αυτό, και για το λόγο ότι ο ίδιος ήθελε να είναι καθολικό και να καλύπτει όλες τις καταστάσεις (που σήμαινε προγραμματισμό για το ρολόι, τους κωδικοποιητές τους αποκωδικοποιητές κλπ.), έκανε τον όλο μηχανισμό τόσο περίπλοκο που τελικά δεν κατάφερε ο von Neumann να τον ολοκληρώσει



Γενικά είναι προσομοιώσεις σε υπολογιστές με σκοπό την εξομοίωση του τρόπου με τον οποίο δουλεύουν οι κανόνες της φύσης. Πιθανός θα μπορούσαν οι μηχανισμοί αυτοί να μας ενημερώσουν για το αν η μέθοδος της αναγωγής (απλοποίησης) που κυρίως χρησιμοποιείται είναι ρεαλιστική. Είναι τελικά ενδεχόμενο να φανταζόμαστε τον εκπληκτικό, περίπλοκο και πολλές φορές περίεργα, τυχαία φερόμενο κόσμο μας σαν ένα σελ από απλούς κανόνες; Τα δεν μπορούν να μας δώσουν μια σαφή απάντηση γύρω από το ερώτημα αυτό, αλλά με τη βοήθειά τους μπορούμε να πάρουμε μία ιδέα για το πόσο λογική είναι η σκέψη πως μας η λειτουργία του κόσμου έχει τη βάση της σε απλούς κανόνες.

Το 1982 ο **Stephen Wolfram** ξεκίνησε να δημιουργήσει ένα CA μίας διάστασης, η βασική του πεποίθηση ήταν πως είναι δυνατό η πολυπλοκότητα να δημιουργείται από απλούς

και μόνο κανόνες. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα σε αυτό το επιχείρημα είναι ότι οι μεταβολές μέσα στο χρόνο μπορούν να απεικονισθούν με δυσδιάστατο τρόπο και ότι το κάθε κελί θα έχει μόνο δύο γείτονες. Έτσι υπάρχουν μόνο 256 πιθανές καταστάσεις αν η κατάσταση του κελιού εξαρτάτε μόνο από την κατάσταση του ίδιου και των δύο γειτόνων του στη προηγούμενη γενιά, έτσι είναι δυνατόν να εξεταστούν όλα τα αποτελέσματα από όλα τα σετ των κανόνων.

Η ερώτηση είναι αν ακόμα και αυτό το απλό σύστημα μπορεί να παρουσιάσει πολύπλοκη συμπεριφορά και η απάντηση είναι πως ναι, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που στη ζωή υπάρχουν άλλοι κανόνες που αποφέρουν το χάος και άλλοι τη σταθερότητα. Το ενδιαφέρον πάντως είναι πως και ακόμα κανόνες που επιφέρουν την ενδιάμεση κατάσταση είναι και αυτοί δυνατοί, γενικά το σύστημα αυτό μπορεί να εμφανίσει πολύπλοκη συμπεριφορά.

Μία ιδέα, από τον **Freman Dyson**, για τις χρήσεις των αυτό-αναπαραγωγικών μηχανημάτων ήταν η δημιουργία ενός τεχνητής νοημοσύνης ρομπότ το οποίο θα είχε τη δυνατότητα να πάει σε ένα δορυφόρο του Κρόνου και , μετά μεταλλεύοντας υλικά και παράγοντας μερικά ακόμα ρομπότ σαν το ίδιο (τα οποία θα παράγανε και αυτά με τη σειρά τους ρομπότ όπως ήταν τα ίδια), θα πήγαιναν στον Άρη με κομμάτια από πάγο με σκοπό να τα αφήσουν να λιώσουν. Τελικά η διαδικασία αυτή θα είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ατμόσφαιρας στον Άρη και υπολογίστηκε ότι θα στοίχιζε πάνω από 72 εκατομμύρια δολάρια.

Το πρόγραμμα όμως αυτό τελικά απορρίφθηκε, κυρίως για το λόγο ότι από τη στιγμή που θα ξεκινούσε θα περνούσαν τουλάχιστον 10 000 χρόνια για να υλοποιηθεί. Ένα άλλο μείζον μειονέκτημα και ταυτόχρονα αποτρεπτικός παράγοντας, ήταν ότι οι ίδιοι οι άνθρωποι, και γενικά η ανθρωπότητα, φοβόταν τις συνέπειες που θα είχε η παραγωγή ενός ρομπότ με τη δυνατότητα να αναπαράγεται μόνο του, ιδιαίτερα μάλιστα αν χρησιμοποιούνταν μία μεταλλαγή στον αλγόριθμο τους με την ελπίδα να βελτιωθεί η νοημοσύνη τους.

Δεδομένου ότι θα χρησιμοποιούνταν ένας πολύ καλός αλγόριθμος ο Dyson εκτιμούσε ότι θα έπαιρνε μόνο ένα εκατομμύριο χρόνια προκειμένου, τα ρομπότ αυτά, να αντιληφθούν το επίπεδο της νοημοσύνης των ανθρώπων. Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, το πιο πιθανό ήταν να γίνονταν ‘ανταγωνιστές’ μας και επιπλέον δεν θα υπήρχε δυνατότητα να τερματίσουμε τη λειτουργία τους. Η ιδέα της μετάλλαξης ήταν γενικά ιδιαίτερα αγαπητή στον Dyson για το λόγο ότι θα έκανε τα ρομπότ αυτά ικανά να αντιμετωπίσουν οποιεσδήποτε απροσδόκητες καταστάσεις που μπορούσαν να αναπτυχθούν. Παρόλα αυτά είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι ακόμα και αν δεν γίνονταν καμία μεταλλαγή στον αλγόριθμό τους, θα μπορούσαν ούτως ή άλλως να βελτιώσουν τους εαυτούς τους μέσω των μεταλλαγών που θα γίνονταν από τυχαία λάθη στην κατασκευή τους. Αυτό βέβαια θα έπαιρνε πολύ περισσότερο χρόνο στο να φανούν τα αποτελέσματα στη νοημοσύνη τους.

Παράλληλα γεννήθηκαν και άλλες ιδέες γύρο από το θέμα της τεχνητής ζωής, όπως της δημιουργίας σταθμών στο φεγγάρι όπου θα παράγανε ρομπότ τα οποία θα μπορούσαν να μεταλλευτούν υλικά για καινούργια ρομπότ, να παράγουν μόνα τους νέα ρομπότ, να εκσκάψουν το έδαφος για νέο σταθμό, να πλακοστρώσουν, γενικά να προετοιμάσουν την περιοχή για το νέο αυτό σταθμό, και τελικά να φτιάξουν μόνα τους τον καινούργιο αυτό σταθμό και όλες αυτές οι διαδικασίες να γίνονταν επ’ άπειρο. Αυτός ο νέος ‘Κόσμος’, θα είχε ως αποτέλεσμα την παραγωγή χρήσιμων σταθμών, πάνω στο φεγγάρι, οι οποίοι θα είχαν κατασκευαστεί με το κόστος μόνο του πρώτου!

5. Συνθετική Βιολογία

Η γνώση μας για την ζωή βασίζεται σε ένα μοναδικό παράδειγμα: η ζωή στην Γη. Αυτό περιορίζει την κατανόησή μας για την ζωή και το τι μπορεί να είναι ζωή. Θα διεύρυνε τις γνώσεις μας η δυνατότητα ταξιδιών σε άλλους πλανήτες και παρατήρησης διαφορετικών μορφών ζωής οι οποίες θα μπορούσαν να υπάρχουν εκεί.

Εάν είχαμε την δυνατότητα παρατήρησης της ζωής σε άλλους πλανήτες κατά πάσα πιθανότητα θα ήταν βασισμένη στον άνθρακα και έτσι θα είχε πολλές ομοιότητες με την ζωή στην Γη. Η γνώμες των εξελικτικών βιολόγων στο κατά πόσο όμοιες θα ήταν τέτοιες ανεξάρτητες μορφές ζωής δίστανται και πολύ πιθανά δεν θα μάθουμε ποτέ την αλήθεια.

Οι γνώμες επίσης δίστανται και στο κατά πόσο είναι δυνατόν να υπάρχει ζωή βασισμένη σε άλλο μέσο και όχι στον άνθρακα. Ούτως ή άλλως όμως η δυνατότητα παρατήρησης άλλων μορφών ζωής μη βασισμένων στον άνθρακα θα επέκτεινε τις γνώσεις μας την κατανόηση και τις αντιλήψεις μας για την ζωή ακόμη περισσότερο και από την παρατήρηση ζωής σε άλλους πλανήτες η οποία θα ήταν βασισμένη στον άνθρακα. Ζωή μη βασισμένη στον άνθρακα θα ήταν ακόμη πιο περίεργη και ξένη από την εξω-γήινη ζωή.

Το σχετικά νέο πεδίο της Τεχνητής Ζωής (TZ) διερευνά τις δυνατότητες δημιουργίας ανεξάρτητων μορφών ζωής, ή στοιχείων από διεργασίες ζωής. Η TZ προσπαθεί να κατανοήσει την ζωή μέσω της δημιουργίας της παρά μέσω του διαμελισμού της. Είναι μία συνθετική παρά αναλυτική προσέγγιση.

Η TZ έχει σχέση με την βιολογία παρόμοια με την σχέση που έχει η συνθετική χημεία με την χημεία. Εάν η χημεία είχε περιοριστεί στην μελέτη των χημικών ουσιών οι οποίες υπάρχουν στην φύση, δεν θα είχε επιτύχει ούτε την θεωρητική ισχύ ούτε το πρακτικό όφελος το οποίο σήμερα έχει. Η βιολογία έχει να κερδίσει πολλά από την μελέτη μορφών ζωής οι οποίες δεν υπάρχουν στην Γη.

5.1. Συνθετική Ζωή;

Κατασκευάζοντας νέες μορφές ζωής, η TZ προσφέρει την δυνατότητα παρατήρησης ανεξάρτητων (τουλάχιστον γενετικά αν όχι εννοιολογικά) παραδειγμάτων ζωής χωρίς να αφήσουμε τον πλανήτη. Επιπλέον αυτές οι νέες μορφές ζωής μπορούν να περιλαμβάνουν την ζωή η οποία βασίζεται σε ενώσεις του άνθρακα.

Η αναφορά σε νέες μορφές ζωής μπορεί να θεωρηθεί παράλογη ή τρομακτική γι' αυτό θα πρέπει να διευκρινίσουμε τι εννοούμε. Δυστυχώς αφού δεν υπάρχει κοινός αποδεκτός ορισμός

της ζωής δεν είναι εύκολο να περιγράψουμε τι είναι η δημιουργία ζωής. Γενικά η προσπάθεια ορισμού της ζωής βασίζεται στον έλεγχο μιας λίστας ιδιοτήτων. Το πρόβλημα δημιουργείται λόγω έλλειψης συμφωνίας στο τι θα έπρεπε να περιέχει αυτή η λίστα. Οι ιδιότητες οι οποίες είναι κοινές στις περισσότερες λίστες περιλαμβάνουν τις ικανότητες αντιγραφής, εξέλιξης, μεταβολισμού, απόκρισης σε ερεθίσματα και επισκευής βλαβών/φθορών. Τα περισσότερα παραδείγματα TZ θα αποτύχουν σε κάποια τέτοια δοκιμασία, εκτός αν η λίστα των ιδιοτήτων είναι πολύ μικρή.

Αυτή η προσέγγιση με την λίστα ιδιοτήτων δεν είναι πλήρως ικανοποιητική. Ένα προκλητικό παράδειγμα του γιατί δεν είναι πλήρως ικανοποιητική η χρήση λίστας ιδιοτήτων, θεωρείστε μία μηχανή η οποία θα μπορούσε να πάρει μέρος ως ίσος συνομιλητής σε μία συζήτηση αυτών των θεμάτων. Ακόμη και αν αυτή η μηχανή δεν αυτο-αντιγράφεται, ή δεν εξελίσσεται, ή γενικά δεν εμφανίζει πολλές από τις ιδιότητες που υπάρχουν στις λίστες των κριτηρίων ζωής, θα ήταν δύσκολο να αρνηθούμε ότι είναι ζωντανή με κάποια έννοια.

Τέτοιες σκέψεις οδήγησαν σε ένα εναλλακτικό τρόπο προσέγγισης του προβλήματος. Αυτός ο τρόπος περιλαμβάνει την δημιουργία μίας μεγάλης λίστας ιδιοτήτων οι οποίες είναι γνωστό ότι υπάρχουν *μόνο* σε ζώντα συστήματα. Έτσι η ερώτηση αφορά το αν κάποιο σύστημα TZ επιδεικνύει ένα ικανοποιητικό πλήθος *οποιαδήποτε* ιδιοτήτων της λίστας και όχι όλες τις ιδιότητες της λίστας. Εάν συμβαίνει αυτό τότε έχουμε καταφέρει να συλλάβουμε ένα σημαντικό δείγμα κάποιων ιδιοτήτων της ζωής στο συνθετικό μας σύστημα.

Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας στην TZ έχει αυτή την αντιμετώπιση. Αρχικά ο ερευνητής ενδιαφέρεται γενικά για κάποια πλευρά της ζωής όπως η εξέλιξη, η ευφυΐα, η γλώσσα, η κοινωνική συμπεριφορά, η ανάπτυξη κλπ. Κατόπιν δημιουργεί ένα σύστημα, το οποίο εάν είναι επιτυχές, θα επιδείξει κάποιες ιδιότητες της ζωής στον τομέα ενδιαφερόντων του ερευνητή. Μπορεί όμως το σύστημα να επιδείξει ελάχιστες ή καμία από τις άλλες ιδιότητες της ζωής. Έτσι καταλήγουν να είναι μη προφανή παραδείγματα ζωής. Ίσως δεν είναι ορθό να ρωτήσουμε εάν ένα τέτοιο σύστημα TZ είναι ζωντανό, αφού ούτως ή άλλως, αυτή την ερώτηση δεν μπορούμε να την απαντήσουμε. Θα ήταν καλύτερα να ρωτήσουμε εάν επιδεικνύουν γνήσιες ιδιότητες της ζωής, μία ερώτηση η οποία μπορεί να απαντηθεί ευκολότερα.

Το πεδίο της TZ λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές περιοχές: υλικό (hardware), λογισμικό (software) και βιολογική σύνθεση (wetware). Αν και υπάρχουν ήδη κάποιες συναρπαστικές δουλειές στην συνθετική εξέλιξη με χημικό υπόστρωμα και μερικές νέες εξελίξεις οι οποίες επιτρέπουν την εξέλιξη του υλικού, το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας εστιάζεται στην εξέλιξη με χρήση λογισμικού.

5.2. Σύνθεση και Προσομοίωση

Η ζωή στην Γη είναι το αποτέλεσμα της εξέλιξης μέσω της φυσικής επιλογής η οποία λειτουργεί σε χημικές ενώσεις με βάση τον άνθρακα. Όμως, θεωρητικά, η διαδικασία της

εξέλιξης δεν περιορίζεται να συμβεί μόνο στην Γη, ούτε μόνο σε ενώσεις με βάση τον άνθρακα. Όπως η εξέλιξη μπορεί να συμβεί σε άλλους πλανήτες, έτσι μπορεί να συμβεί και σε άλλο υλικό/μέσο όπως οι ψηφιακοί υπολογιστές. Και όπως η εξέλιξη σε άλλους πλανήτες δεν ακολουθεί το μοντέλο της εξέλιξης στη Γη, έτσι και η εξέλιξη στο ψηφιακό μέσο μπορεί να ακολουθεί το δικό της μοντέλο.

Επειδή η σύνθεση του λογισμικού γίνεται μέσα σε υπολογιστές, υπάρχει διάχυτη παρανόηση για τη φύση αυτής της έρευνας. Γενικά οι βιολόγοι θεωρούν ότι η TZ είναι μοντέλα υπολογιστών ή προσομοιώσεις βιολογικών διαδικασιών, κάτι με το οποίο είναι εξοικειωμένοι. Όμως ο προορισμός της TZ είναι σημαντικά διαφορετικός. Μία προσομοίωση είναι ένα μοντέλο από κάτι στο "πραγματικό" κόσμο. Έτσι, σε μία προσομοίωση, υπάρχουν σύμβολα τα οποία αναπαριστούν άλλα αντικείμενα και υπάρχουν κανόνες οι οποίοι ορίζουν τον τρόπο χειρισμού των συμβόλων. Η ακρίβεια της προσομοίωσης εξαρτάται από την ακρίβεια της αναπαράστασης των αντικειμένων και των διαδικασιών του μοντέλου μέσω των συμβόλων και των κανόνων. Γενικά, οι βιολόγοι ενδιαφέρονται για τα υπολογιστικά μοντέλα μόνο εφόσον αναπαριστούν επακριβώς τις οργανικές βιολογικές διαδικασίες.

Στην πιο ακραία τους μορφή, τα στοιχεία ενός λογισμικού σύνθεσης TZ μελετώνται ως αντικείμενα ανεξάρτητα από άλλους παράγοντες και όχι σαν σύμβολα από κάτι άλλο. Επειδή τα στοιχεία ενός λογισμικού σύνθεσης είναι ψηφιακά (bits και bytes), οι βιολόγοι που είναι συνηθισμένοι να σκέφτονται την ζωή βασισμένη σε χημικές ενώσεις του άνθρακα δεν θα δείξουν κάποιο άμεσο και έμφυτο ενδιαφέρον. Όμως εάν τα δυαδικά ψηφία του υπολογιστή επιτύχουν κάποιες ζωικές διεργασίες τότε υπάγονται και στο χώρο της βιολογίας. Αυτό θα ήταν δυνατό εάν οι διεργασίες ζωής δεν ήταν απαραίτητα συνδεδεμένες με χημικές ενώσεις του άνθρακα. Στην καρδιά της σύνθεσης TZ (είτε με υλικό είτε με λογισμικό) βρίσκεται η αντίληψη ότι η ζωή είναι μια διαδικασία η οποία δεν είναι απαραίτητο να είναι συνδεδεμένη με τις ενώσεις του άνθρακα.

Ο ερευνητής της TZ δεν βλέπει τον H/Y ως εργαλείο μοντελοποίησης της οργανικής ζωής αλλά μάλλον ως ένα περιβάλλον το οποίο μπορεί να κατοικηθεί από ζωή η οποία δεν βασίζεται σε ενώσεις του άνθρακα. Ο στόχος επομένως της TZ είναι να σπείρει το περιβάλλον με μορφές ζωής και να καλλιεργήσει το σύστημα έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει ακόμη πιο πλούσιες μορφές ζωής.

5.3. Ψηφιακή Εξέλιξη

Η ψηφιακή ζωή διευρύνει την αντίληψή μας για την ζωή και είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για κάποιες κατηγορίες βιολογικών μελετών. Η ψηφιακή ζωή έχει κάποιες μοναδικές ιδιότητες που κάνουν ευκολότερη την μελέτη της από την μελέτη της οργανικής ζωής. Αρχικά, επειδή αναπτύσσεται μέσα στον H/Y είναι πολύ πιο εύκολο να συγκεντρώσουμε τα δεδομένα που την αφορούν. Στην πράξη, όταν οι ψηφιακοί οργανισμοί περιορίζονται σε ένα μοναδικό H/Y, είναι δυνατό να συγκεντρώσουμε δεδομένα για οποιαδήποτε πλευρά της ζωής τους χωρίς να

επηρεάζουμε το σύστημα. Αυτό είναι αδύνατο για αληθινούς βιολογικούς οργανισμούς. Για παράδειγμα είναι συνηθισμένο να τοποθετείται σε μια σειρά ολόκληρο το γονιδίωμα ενός ψηφιακού οργανισμού κατά την γέννησή του και αυτή η δειγματοληψία δεν έχει καμία επίπτωση στην εξέλιξη του συστήματος. Επίσης τα ψηφιακά συστήματα είναι εύκολο να τα χειριστούμε όπως επιθυμούμε, πράγμα που δεν είναι δυνατό με την αληθινή ζωή και εάν επιθυμούμε μπορούμε να επαναλάβουμε επακριβώς κάποιο πείραμα έτσι ώστε να κάνουμε κάποιες παρατηρήσεις οι οποίες δεν έγιναν στο αρχικό πείραμα. Επιπροσθέτως, κάποιες διαδικασίες ζωής, όπως η εξέλιξη, μπορούν να προχωρήσουν πολύ πιο γρήγορα στο ψηφιακό σύστημα από ότι στο βιολογικό.

Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών κάνουν την ψηφιακή ζωή μία πολύτιμη προσθήκη στο πεδίο της βιολογίας. Μία περιοχή όπου αυτό είναι ιδιαίτερα αποδοτικό είναι οι εξελικτικές μελέτες. Ένας Η/Υ γεμάτος από ψηφιακούς οργανισμούς μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα μοντέλο για την πειραματική μελέτη της εξέλιξης. Αλλά οι εξελισσόμενοι ψηφιακοί οργανισμοί δεν είναι καλύτερη προσομοίωση της εξέλιξης από ότι η παρακολούθηση της εξέλιξης βακτήρια και ιών σε ένα κατάλληλο χώρο.

Η οργανική εξέλιξη γίνεται τόσο αργά ώστε να κάνει δυνατή την παρατήρηση και τον πειραματισμό μόνο της "**μικρο-εξέλιξης**" (*micro-evolution*), δηλαδή αλλαγές στο μέγεθος και το σχήμα τμημάτων των οργανισμών. Εκτός της μελέτης απολιθωμάτων, δεν ήταν δυνατό να μελετηθεί η "**μακρο-εξέλιξη**" (*macro-evolution*), η απόκτηση ή η αποβολή τμημάτων των οργανισμών και η απαρχή των ειδών και των υψηλότερων ομάδων ταξινόμησης.

Από την άλλη, η εξέλιξη των ψηφιακών συστημάτων γίνεται τόσο γρήγορα, ώστε να υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στην δομή των οργανισμών και εμφάνιση ολόκληρων γενεαλογικών δένδρων σε μια μέρα. Ακόμη και έτσι όμως, τα ψηφιακά συστήματα είναι σχετικά πολύ πιο απλά από την οργανική ζωή και μπορούμε να περιμένουμε ότι ο ρυθμός εξέλιξής τους θα επιβραδυνθεί αναλογικά εάν γίνουν πιο πολύπλοκα.

5.4. Εξέλιξη και Μέσο Εξέλιξης

Η εξέλιξη είναι μία διαδικασία η οποία διερευνά τις δυνατότητες του μέσου στο οποίο διαμορφώνεται. Εξελισσόμενοι ψηφιακοί πληθυσμοί διερευνούν συνεχώς διάφορες παραλλαγές των μορφών τους χωρίς τους περιορισμούς που θέτουν οι προκαταλήψεις. Όταν ως μέσο χρησιμοποιούνται οι ενώσεις του άνθρακα, η εξέλιξη "βλέπει" την φυσική του φυσικού υλικού σύμπαντος: οι νόμοι της χημείας όπως ότι ο άνθρακας σχηματίζει τέσσερις μονούς δεσμούς σε τετραεδρική διαμόρφωση, οι νόμοι της θερμοδυναμικής όπως ότι η εντροπία αυξάνεται αυτόματα, κλπ. Όμως όταν ως μέσο χρησιμοποιείται ο ψηφιακός υπολογιστικός κόσμος, η εξέλιξη "βλέπει" ένα τελείως διαφορετικός σύμπαν με διαφορετικούς νόμους. Δεν υπάρχουν οι νόμοι της θερμοδυναμικής. Δεν υπάρχει κάποιο υλικό στο οποίο να βασιστεί η χημεία. Είναι ένα λογικό σύμπαν πληροφοριών παρά ένα υλικό σύμπαν. Η φυσική του πράγματος αποτελείται από την λογική η οποία έχει υλοποιηθεί στον επεξεργαστή, την

μοναδική μη Ευκλείδεια τοπολογία του χώρου μνήμης, τους κανόνες διάθεσης των πόρων που υπάρχουν στο λειτουργικό σύστημα, τον χρόνο με βάση το ρολόι της Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας (CPU) κλπ.

Η εξέλιξη στο ψηφιακό μέσο δεν έχει σχέση με το υλικό με το οποίο έχει κατασκευαστεί ο Η/Υ. Ο Η/Υ θα μπορούσε να κατασκευαστεί ολοκληρωμένα κυκλώματα, τρανζίστορες, λυχνίες κενού, ή μηχανικούς διακόπτες. όσο το υλικό υλοποιεί την ίδια λογική, το υλικό θα είναι αδιάφορο για την διαδικασία εξέλιξης. Από την ανθρώπινη οπτική γωνία, οι διάφορες τεχνολογίες θα διαφέρουν τουλάχιστον στην ταχύτητά τους, ενώ από την οπτική γωνία της εξέλιξης η μονάδα χρόνου είναι ο κύκλος ρολογιού της CPU. Εάν ο κύκλος ρολογιού είναι 1 ns ή 1 min είναι το ίδιο για τον τρόπο με τον οποίο γίνεται αισθητός μέσα στον Η/Υ. Στην περίπτωση όμως ενός δικτύου Η/Υ, οι σχετικές ταχύτητες των ρολογιών της CPU αποκτούν σημασία.

Οι εξελισσόμενοι ψηφιακοί οργανισμοί καταλαμβάνουν το χώρο της RAM του Η/Υ. Επειδή στις θέσεις της RAM αποδίδουμε συνεχείς αριθμητικές διευθύνσεις, οι άνθρωποι συνήθως σκέφτονται τη μνήμη ως ένα μονοδιάστατο Ευκλείδειο χώρο, αν και δεν είναι έτσι. Μπορούμε να κατανοήσουμε την τοπολογία ενός χώρου εν μέρει εξετάζοντας τις σχέσεις απόστασης μεταξύ σημείων του χώρου. Στο χώρο μνήμης του Η/Υ δεν υπάρχει η έννοια της γραμμικής απόστασης. Το πιο κατάλληλο ανάλογο της απόστασης είναι ο χώρος που χρειάζεται για να μεταφερθεί κάποια πληροφορία μεταξύ σημείων του χώρου. Έτσι ο χρόνος γίνεται το μέτρο της απόστασης στο χώρο της μνήμης του Η/Υ.

Στην μνήμη των περισσότερων Η/Υ (με "επίπεδη" μνήμη), όλα τα ζεύγη σημείων έχουν την ίδια απόσταση, ανεξάρτητα από την πραγματική θέση τους στην μνήμη. Σε ένα Η/Υ με μνήμη χωρισμένη σε τμήματα (segmented), όπως οι επεξεργαστές Intel 80x86, υπάρχουν δύο αποστάσεις μεταξύ των σημείων, οι οποίες εξαρτώνται από τις σχετικές πραγματικές θέσεις των σημείων καθώς και από το πλαίσιο αναφοράς. Αυτό δείχνει ότι ο χώρος δεν είναι Ευκλείδειος.

Εάν θεωρήσουμε την τοπολογία του χώρου μνήμης του παγκόσμιου δικτύου Η/Υ (cyberspace), μπορούμε εύκολα να δούμε ότι είναι πολύ σύνθετος και δυναμικός. Ο χρόνος που χρειάζεται για να μεταφερθούν κάποια δεδομένα από την μνήμη ενός Η/Υ στην μνήμη ενός άλλου Η/Υ, εξαρτάται από την σχετική φυσική απόστασή τους στο δίκτυο και την κατάσταση κυκλοφορίας πληροφοριών του δικτύου κατά τον χρόνο επικοινωνίας. Η επικοινωνία μεταξύ Η/Υ σε τοπικά δίκτυα θα είναι πιο γρήγορη από ότι η επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων Η/Υ, αλλά και οι δύο θα εξαρτώνται από το τρέχον φορτίο του δικτύου.

5.4. Ψηφιακή Εξέλιξη - Εγκαταλείποντας τον έλεγχο

Αν και υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις στον τρόπο ανάπτυξης της σχέσης μας με την συνθετική εξέλιξη, η πιο συνήθης είναι η ελάττωση του ελέγχου πάνω στην εξελικτική

διαδικασία, αφήνοντας έτσι την εξέλιξη να συντελεστεί ελεύθερα με έναν τρόπο ανάλογο με αυτόν που ακολούθησε κατά την δημιουργία της οργανικής ζωής πάνω στη Γη.

5.4.1. Γενετικοί Αλγόριθμοι

Ίσως η πρώτη και η πιο γνωστή προσέγγιση της ψηφιακής εξέλιξης είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) (Holland 1975, Goldberg 1989). Γενικά οι ΓΑ χρησιμοποιούν συμβολοσειρές δυαδικών ψηφίων για να κωδικοποιήσουν την λύση σε κάποιο πρόβλημα της μηχανικής. Μέσω του ανασυνδυασμού και της μετάλλαξης των δυαδικών συμβολοσειρών ενός μεγάλου πληθυσμού λύσεων, υπολογίζοντας την ποιότητα των λύσεων και της κατά προτίμηση αναπαραγωγής των καλύτερων λύσεων, ο ΓΑ μπορεί να αναζητήσει τις βέλτιστες λύσεις.

Κατά την σχεδίαση του ΓΑ προσδιορίζεται ο τρόπος κωδικοποίησης του χώρου λύσεων μέσω των δυαδικών συμβολοσειρών. Συνήθως αυτό σημαίνει την χρήση σταθερού μήκους δυαδικών σειρών χωρισμένα σε τμήματα, κάθε ένα από τα οποία αναπαριστά προκαθορισμένες ποσότητες, όπως για παράδειγμα οι συντελεστές κάποιας εξίσωσης. Έτσι η μορφή της λύσης αποφασίζεται προκαταβολικά και δεν συμμετέχει στην εξελικτική διαδικασία.

Αν και οι ερευνητές του χώρου των ΓΑ χρησιμοποιούν τον όρο "*φυσική επιλογή*" (*natural selection*) για να περιγράψουν την εξελικτική διαδικασία, ο ΓΑ δεν χρησιμοποιεί φυσική επιλογή. Χρησιμοποιεί τεχνητή επιλογή. Ο σχεδιαστής του ΓΑ δημιουργεί κάποια "*συνάρτηση ποιότητας*" (*fitness function*) η οποία καθορίζει ποια από τα μέλη του πληθυσμού των δυαδικών σειρών θα ευνοηθούν έτσι ώστε να αναπαραχθούν πιο συχνά από τα υπόλοιπα τα οποία μπορεί και να εξαφανιστούν σε κάποια γενιά. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι δυαδικές σειρές ενός ΓΑ δεν αυτο-αναπαράγονται. Αντιγράφονται από το σύστημα προσομοίωσης μετά την αξιολόγηση από την συνάρτηση ποιότητας. Μπορεί να αντιγραφούν ακριβώς όπως είναι στην επόμενη γενιά, ή μετά από κάποια "μετάλλαξη" με την μορφή αναστροφής κάποιου (ή κάποιων) δυαδικού ψηφίου ή (συνήθως) με την αντιγραφή μέρους της συμβολοσειράς σε συνδυασμό με ένα συμπληρωματικό από κάποια άλλη ευνοούμενη συμβολοσειρά. Πιο ευέλικτες διατάξεις ΓΑ δεν απαιτούν συμβολοσειρές σταθερού μήκους.

Ο ΓΑ αναπαριστά το ένα άκρο του φάσματος ελέγχου της εξέλιξης: πλήρης έλεγχος. Το λογισμικό των ΓΑ ελέγχει την μορφή της λύσης, την συνάρτηση ποιότητας, την φύση των γενετικών τελεστών και την μέθοδο αναπαραγωγής/αντιγραφής. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλές καινοτομίες και υβριδικά σχήματα ΓΑ τα οποία δεν ακολουθούν πάντα το μοντέλο που περιγράφηκε παραπάνω.

5.4.2. Γενετικός Προγραμματισμός

Σε μια πιο πρόσφατη εξέλιξη η οποία ονομάζεται Γενετικός Προγραμματισμός (ΓΠ), οι λύσεις ορίζονται από δένδρα με την μορφή εκφράσεων Lisp. Οι γενετικοί τελεστές (μετάλλαξη και

ανασυνδυασμός) μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε κόμβο του δένδρου. Στην περίπτωση του ανασυνδυασμού, τυπικά, επιλέγεται τυχαία ένας κόμβος σε δύο διαφορετικά δένδρα και ανταλλάσσονται οι κόμβοι και ολόκληρα τα κλαδιά και τα φύλα κάτω αυτούς τους κόμβους.

Στην περίπτωση της μετάλλαξης:

- Μπορεί να αντικατασταθεί ένας κόμβος κάποιου δένδρου με ένα άλλο τυχαία επιλεγμένο κόμβο:
 - οι δύο κόμβοι **πρέπει** να έχουν τον ίδιο αριθμό κλάδων να κατεβαίνουν από αυτούς, οπότε τα παραπάνω κλαδιά και φύλα παραμένουν αναλλοίωτα
 - οι δύο κόμβοι μπορούν να έχουν διαφορετικό αριθμό κλαδιών, οπότε μπορεί να χρειαστεί η προσθήκη ή η αφαίρεση κλαδιών σε κάποιο ανώτερο επίπεδο.
- Μπορεί να αντικατασταθεί κάποιος κόμβος και όλα τα παραπάνω κλαδιά (mutational branch replacement and addition). Σε αυτή την περίπτωση η αρχή των κλαδιών που αντικαθίστανται και η δομή τους είναι αυθαίρετη και τυχαία.

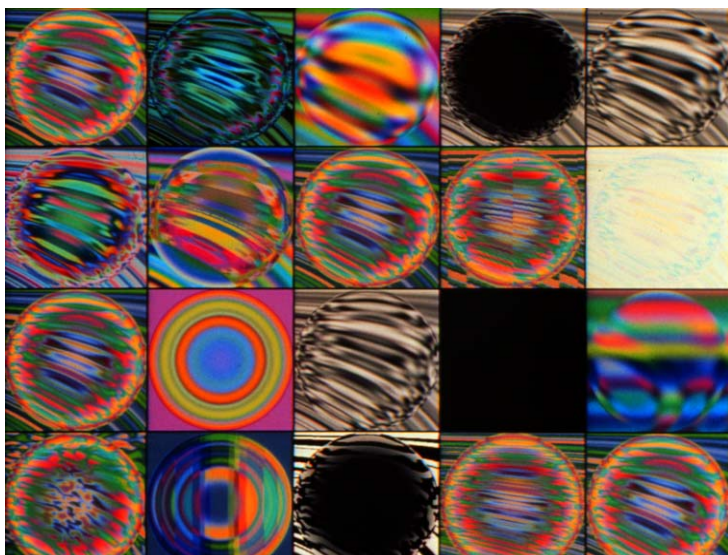
Στον ΓΠ δεν είναι απαραίτητο να προκαθοριστεί η μορφή της λύσης και έτσι μπορεί να εξελιχθεί και αυτή. Αυτό επιτρέπει την διαδικασία της εξέλιξης να γίνει πιο δημιουργική και ευέλικτη. Ο ΓΠ έχει ήδη εφαρμοστεί σε ένα πλήθος προβλημάτων (Koza 1992, Koza 1994, Banzhaf κ.α. 1998)

Μία ιδιότητα της εξέλιξης με τον ΓΠ είναι η τάση των δένδρων να μεγαλώνουν με τον χρόνο μέσω της εξέλιξης. Αυτό μπορεί να ειπωθεί ως εξέλιξη σε ανώτερα επίπεδα πολυπλοκότητας, επιτυγχάνοντας έτσι ένα από τους βασικούς στόχους της έρευνας της συνθετικής εξέλιξης. Είναι όμως επίσης πιθανό ότι η απουσία κάποιου μέτρου εναντίον του μεγάλου μεγέθους μπορεί να οδηγήσει στην ενσωμάτωση κώδικα ο οποίος είναι χωρίς νόημα. Στον ΓΠ αυτός ο κώδικας θα αξιολογηθεί από το σύστημα και έτσι θα σπαταληθεί υπολογιστική ισχύς. Για αυτό το λόγο είναι επιθυμητό να ενσωματωθούν κάποιοι μηχανισμοί οι οποίοι θα αντιδρούν σε αυτή την τάση αύξησης με άχρηστο και χωρίς νόημα κώδικα.

Αν και ο ΓΠ εμφανίζει ένα χώρο λύσεων μη προκαθορισμένης μορφής, εφαρμόζει (όπως και οι ΓΑ) πλήρη έλεγχο στην φύση της συνάρτησης ποιότητα (fitness function) και στην διαδικασία αντιγραφής/αναπαραγωγής.

5.4.3. Αισθητική Επιλογή

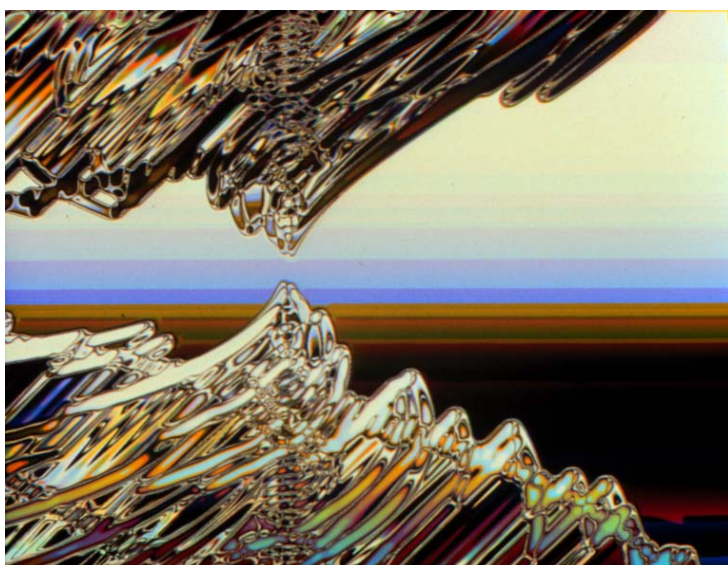
Ο Karl Sims χρησιμοποίησε την μέθοδο ΓΠ σε συνδυασμό με την επιλογή βασισμένη σε αισθητικά κριτήρια για να εξελίξει αφηρημένες εικόνες (1991, 1993). Αυτό αντιπροσωπεύει ένα βήμα προς την κατεύθυνση αποδέσμευσης του καθορισμού της συνάρτησης ποιότητας.



(α) Ένας πίνακας 20 επιλογών οι οποίες είναι αποτέλεσμα μεταλλάξεων και ανασυνδυασμών των προηγούμενων αισθητικών επιλογών. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μία ή δύο από αυτές ως γονείς της επόμενης γενιάς.



(β) Ένα παράδειγμα εικόνας η οποία εξερίχθηκε μέσω αισθητικής επιλογής.



(γ) Ένα ακόμη παράδειγμα εικόνας η οποία εξερίχθηκε μέσω αισθητικής επιλογής.

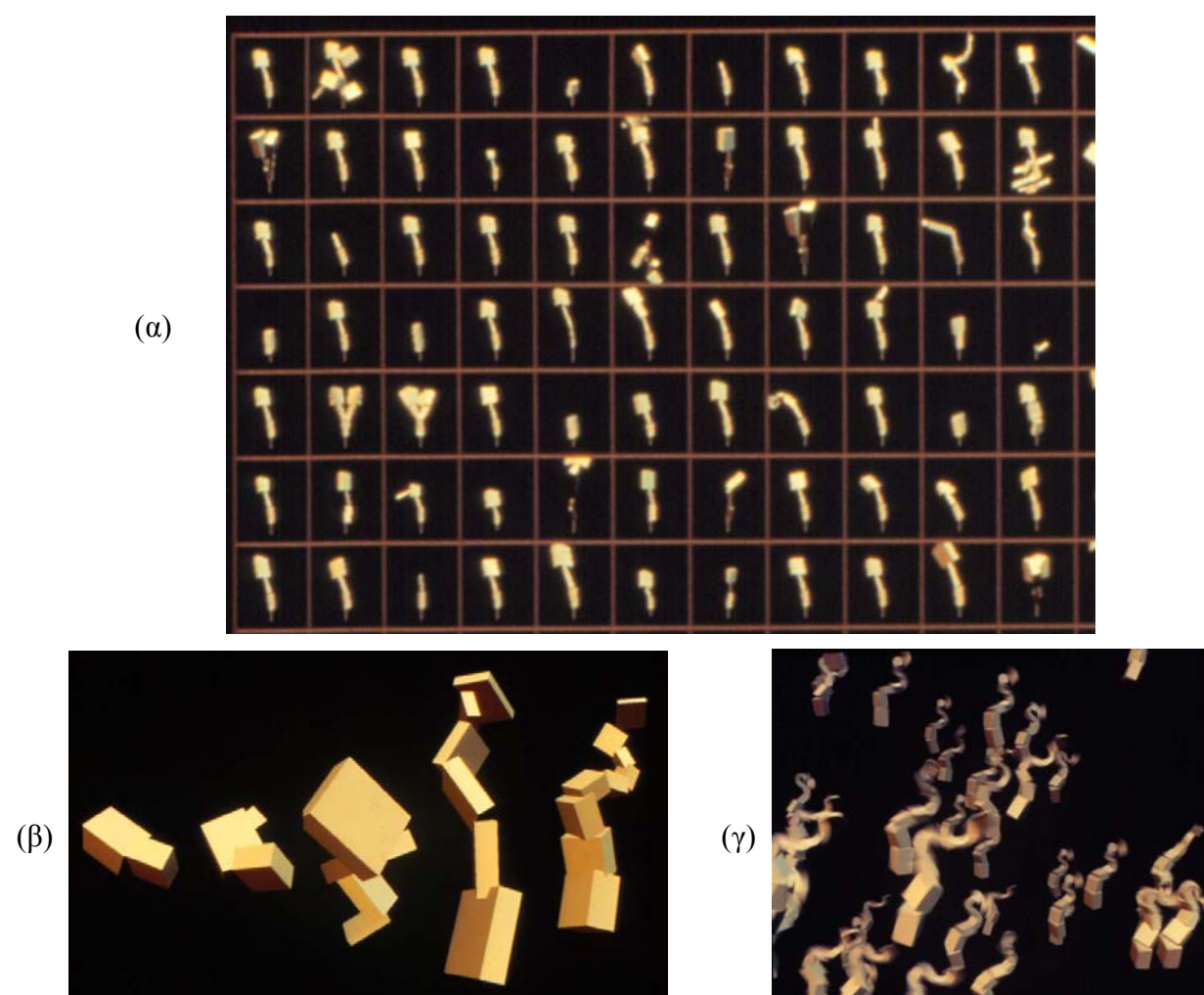
Σχήμα 5.1. Εξέλιξη εικόνων μέσω αισθητικής επιλογής

Παραδοσιακά στους ΓΑ και τον ΓΠ η συνάρτηση ποιότητας κωδικοποιείται μέσα στο υπολογιστικό σύστημα. Στις γενετικά παραγόμενες εικόνες του Sims, η συνάρτηση ποιότητας

παρέχεται από τις αισθητικές επιλογές του χρήστη κατά την δημιουργία των εικόνων. Αυτά τα κριτήρια επιλογής βασίζονται στις ιδιαιτερότητες, την ιδιοτροπία και την εκκεντρικότητα του χρήστη και μπορούν να αλλάζουν σε κάθε γενιά καθώς οι γενετικοί τελεστές δημιουργούν νέους πίνακες εικόνων προς επιλογή. (Σχ. 5.1)

5.4.4. Εικονικά Πλάσματα

Ο Karl Sims (1994) χρησιμοποίησε επίσης ένα άλλο ευέλικτο σύστημα για να καθορίσει την συμπεριφορά και να βρει τις λύσεις στο πρόβλημα ενός "πλάσματος" (creature) το οποίο συναρμολογείται από κουτιά συνδεδεμένα με εύκαμπτους συνδέσμους και "μυϊκή" κινητήρια δύναμη ελεγχόμενη από κυκλώματα.



Σχήμα 5.2. Εξέλιξη πλασμάτων (α) Αρχικά στάδια εξέλιξης πληθυσμού πλασμάτων με στόχο την μεγαλύτερη ταχύτητα κολύμβησης (β) Εξελικτική διαδικασία πλασμάτων επιλεγμένων με στόχο την ταχύτητα κολύμβησης, η οποία τελικά οδήγησε σε σώμα που μοιάζει με ψίδι. (γ) Ένα κοπάδι "νερόφιδων".

Ο Sims ενσωμάτωσε αυτά τα "πλάσματα κουτιά" (block creatures) σε προσομοιώσεις του πραγματικού κόσμου βασισμένες στους νόμους της φυσικής όπως μέσα σε νερό ή πάνω σε μια

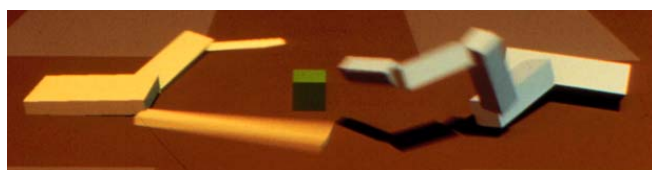
επιφάνεια. Κατόπιν δοκιμάστηκε η ικανότητά τους σε διάφορες εργασίες όπως κολύμβηση, κολύμβηση ακολουθώντας μία πηγή φωτός, μετακίνηση διασχίζοντας μία επιφάνεια, αναπήδηση σε μία επιφάνεια, και ανταγωνισμός με άλλο πλάσμα σε μια προσπάθεια κατοχής ενός κύβου.

Αυτά τα πειράματα δημιούργησαν ένα περίπλοκο και γοητευτικό φάσμα πλασμάτων. Μερικές από αυτές τις μορφές, όπως το "φίδι κολυμβητής" και το "καβούρι περιπατητής", ήταν οικείες. Άλλες μορφές ήταν αποτελεσματικές στην εργασία που τους είχε ανατεθεί, αλλά την πραγματοποιούσαν με πρωτόγνωρες μορφές κίνησης και σχήματος. Αυτός ο παράφορος πολλαπλασιασμός μορφών θυμίζει την ανάλογη έκρηξη ζωικών μορφών κατά την Κάμβριο γεωλογική περίοδο, κατά την οποία έγιναν πολύ περισσότερα πειράματα από αυτά τα οποία μας είναι γνωστά σήμερα.

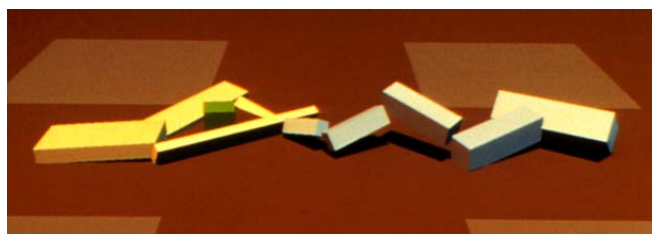
Κατ' ουσία αυτή η δουλειά είναι συγκρίσιμη με ένα ΓΑ ή ΓΠ, αλλά οι γονότυποι βασίζονται σε γράφους παρά σε συμβολοσειρές ή σε δενδρικές δομές. Όπως σε οποιαδήποτε βελτιστοποίηση έτσι και εδώ η συνάρτηση ποιότητας είναι προκαθορισμένη (πχ. μέγιστη ταχύτητα). Όμως στόχος της έρευνας αυτής δεν ήταν να βρεθεί μία βέλτιστη λύση, αλλά μία ποικιλία λύσεων για κάθε συνάρτηση ποιότητας. Η σχεδίαση του συστήματος ήταν τέτοια ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία μιας τεράστιας ποικιλίας λύσεων, πράγμα που τελικά έγινε. Αντί να παρουσιάσει τα αποτελέσματα της έρευνάς του ως μια καμπύλη βελτιστοποίησης της απόδοσης (πχ. μέγιστη ταχύτητα) με τον χρόνο εξέλιξης, ο Sims παρουσίασε τα αποτελέσματα μέσω της μορφής και της συμπεριφοράς μιας ποικιλίας εξελιγμένων πλασμάτων (Σχ. 5.2).



(α) Θέσεις εκκίνησης



(β) Συμπλοκή για την κατοχή του κύβου

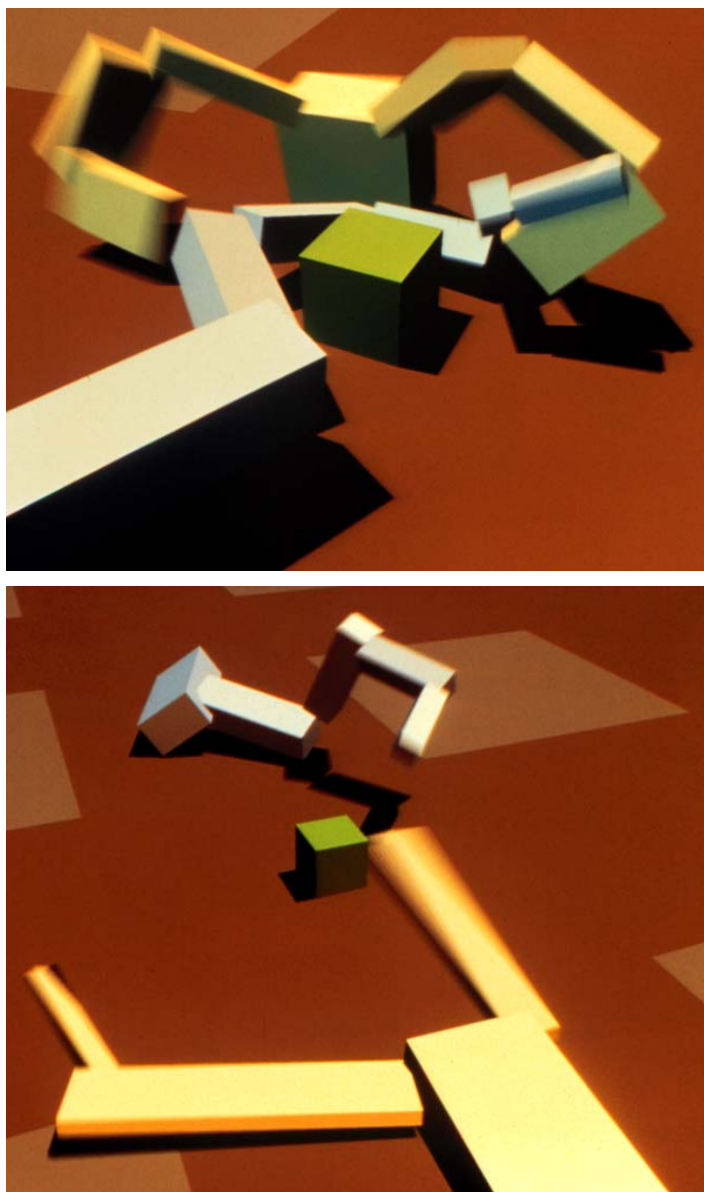


(γ) Τέλος, νίκη του αριστερού κίτρινου πλάσματος

Σχήμα 5.3. Ακολουθία ενεργειών δύο "πλασμάτων κουτιών" ανταγωνιζόμενα για την κατοχή ενός κύβου.

Ένα βήμα προς την αποδέσμευση του προκαθορισμού της συνάρτησης ποιότητας έγινε στο πείραμα όπου στόχος ήταν η κατοχή ενός κύβου. Η κατοχή του κύβου προϋποθέτει τον

ανταγωνισμό μεταξύ δύο παράλληλα εξελισσόμενων (*συνεξελίσμιων* - *co-evolving*) πληθυσμών, με τον έλεγχο να γίνεται σε ζεύγη πλασμάτων. Έτσι η μορφή των ανταγωνιζόμενων πλασμάτων ήταν ένα μέρος του χώρου λύσεων. Σε αυτή την περίπτωση, ένα μεγάλο μέρος της συνάρτησης ποιότητας ήταν εκτός του καθορισμού του συστήματος. Έτσι αυτό το σύστημα επιδεικνύει συμπεριφορά η οποία βασίζεται στην φυσική επιλογή.



Σχήμα 5.4. Δύο "πλάσματα" τα οποία ανταγωνίζονται για την κατοχή ενός κύβου.

5.4.4. Συνεξέλιξη (Coevolution)

Ένα κοινό στοιχείο των παραδοσιακών ΓΑ και ΓΠ είναι ότι η συνάρτηση ποιότητας αξιολογεί κάθε άτομο ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα μέλη του πληθυσμού. Κατά την αξιολόγηση το άτομο έχει σχέση μόνο με την συνάρτηση ποιότητας. Αυτή η διευθέτηση αποκλείει την εξέλιξη

συλλογικών λύσεων στο πρόβλημα, πράγμα το οποίο μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό.

Το παράδειγμα των πλασμάτων του Sims τα οποία ανταγωνίζονται για την κατοχή ενός κύβου, αποτελεί την πρώτη περίπτωση όπου υπάρχει άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών του εξελισσόμενου πληθυσμού. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά ακόμη παραδείγματα τέτοιας αλληλεπίδρασης.

Ο Hillis (1991) χρησιμοποίησε ένα γενετικό αλγόριθμο για να εξελίξει αλγόριθμους ταξινόμησης αριθμητικών καταλόγων (με 16 αριθμούς). Για την αξιολόγηση της ποιότητας αυτών των αλγόριθμων υπολογιζόταν το ποσοστό των καταλόγων που μπορούσαν να ταξινομηθούν σωστά από τον κάθε αλγόριθμο. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αυτή η μέθοδος αξιολόγησης δεν είναι αποτελεσματική επειδή σχετικά γρήγορα η εξέλιξη δημιουργούσε αλγόριθμους ταξινόμησης οι οποίοι μπορούσαν να ταξινομήσουν σωστά τους περισσότερους αριθμητικούς κατάλογους. Έτσι οι περισσότεροι κατάλογοι δεν έδιναν κάποιο μέτρο διαφοροποίησης για τους διάφορους αλγόριθμους. Επίσης υπήρχε μία τάση σύγκλισης σε τοπικά βέλτιστα.

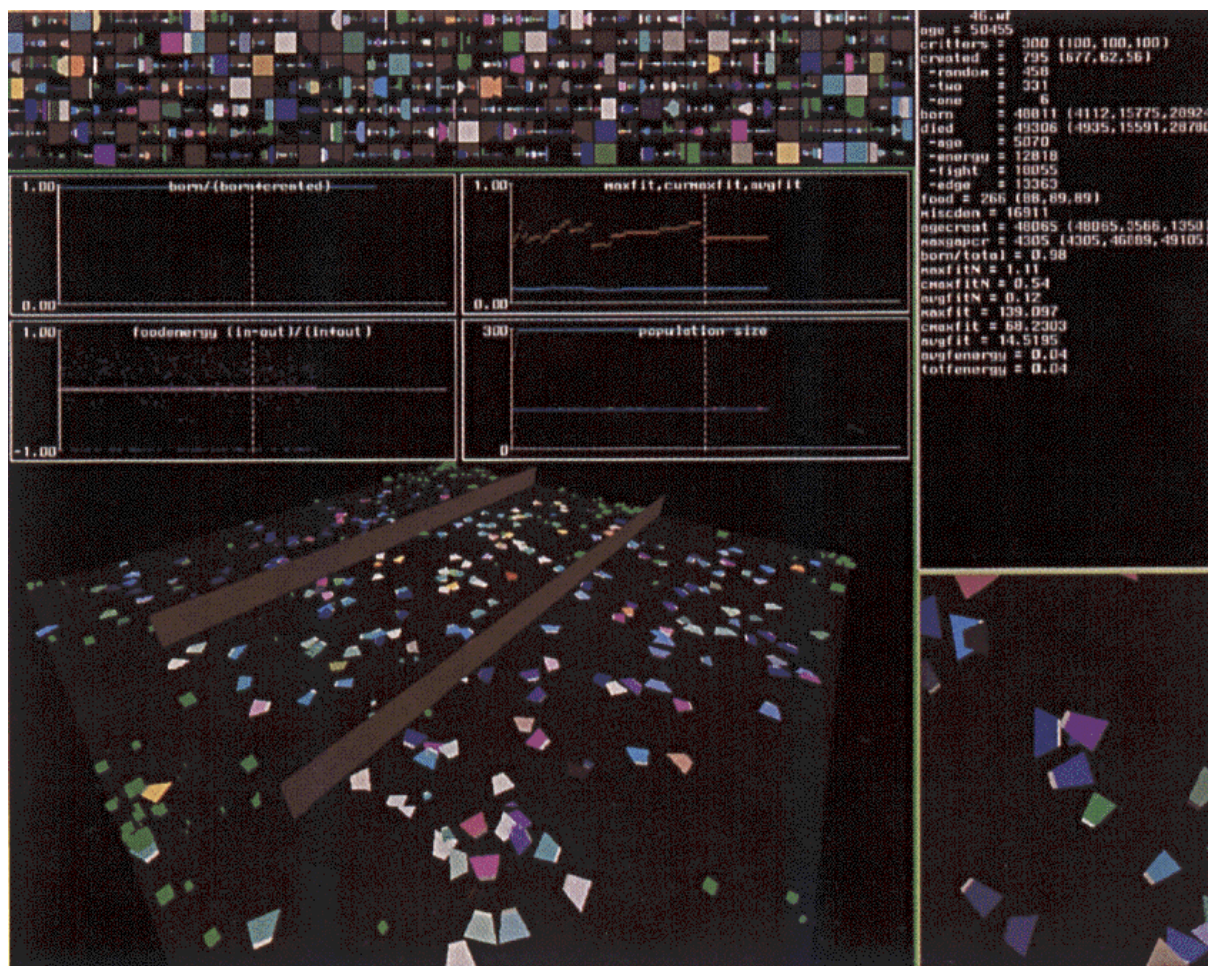
Σε μια προσπάθεια βελτίωσης της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας, επέτρεψε την δημιουργία των καταλόγων των αριθμών από ένα παράλληλα εξελισσόμενο σύνολο γενετικών αλγορίθμων. Η ποιότητα των αριθμητικών καταλόγων ήταν το αντίστροφο της ποιότητας των αλγορίθμων ταξινόμησης: το πλήθος των αλγορίθμων ταξινόμησης οι οποίοι δεν μπορούσαν να ταξινομήσουν σωστά τον κατάλογο. Σε αυτό το σύστημα παράλληλης εξέλιξης (*συνεξέλιξης*) η εξέλιξη των αλγορίθμων ταξινόμησης ήταν πολύ πιο αποτελεσματική (σε σχέση με τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο) και μπορούσε τελικά να δημιουργήσει μικρότερους αλγόριθμους από ότι χωρίς την συνεξέλιξη. Επίσης με την συνεξέλιξη οι αλγόριθμοι ταξινόμησης δεν εμφάνιζαν την τάση σύγκλισης σε τοπικά βέλτιστα.

5.4.5. Φυσική Επιλογή

Ενώ η πλειοψηφία της έρευνας της εξέλιξης στο ψηφιακό μέσο είχε στόχους καθαρά μηχανικής, κάποια έρευνα ήταν απλά μία διερεύνηση της διαδικασίας της εξέλιξης σε ένα ασυνήθιστο και άγνωστο μέσο. Στην τελευταία περίπτωση, οι συνθήκες ελεύθερης εξέλιξης δημιουργούνται μέσω της φυσικής επιλογής των αυτο-αντιγραφόμενων προγραμμάτων H/Y. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας μη καθοδηγούμενης φυλογένεσης (phylogeny) "ψηφιακών οργανισμών" σε μια οικολογική κοινότητα του κυβερνοχώρου.

Ο Yaeger (1994) έστησε ένα σύστημα γενετικών αλγόριθμων με όνομα PolyWorld το οποίο εξελίσσεται ελεύθερα μέσω της φυσικής επιλογής. Ο ΓΑ καθόριζε τα χαρακτηριστικά των "οργανισμών" οι οποίοι υπάρχουν σε μια επίπεδη επιφάνεια η οποία μπορεί να έχει κάποια εμπόδια. Υπάρχει επίσης "τροφή" διάσπαρτη στην επιφάνεια. Οι οργανισμοί έχουν έγχρωμα πολύγωνα σώματα, οπτικά συστήματα και νευρωνικά δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν την

μέθοδο εκπαίδευσης Hebbian για τις συνάψεις. Η έξοδος των νευρωνικών δικτύων καθορίζει πλήρως την συμπεριφορά του οργανισμού. Αυτό γίνεται έχοντας προκαθορισμένους νευρώνες των οποίων το επίπεδο εξόδου καθορίζει την ενεργοποίηση επτά συμπεριφορών: τροφή, ζευγάρωμα, μαχητικότητα, κίνηση, στροφή, εστίαση, φωτισμός. Όλες οι συμπεριφορές, συμπεριλαμβάνοντας την δραστηριότητα του νευρωνικού δικτύου, καταναλώνουν ενέργεια η οποία πρέπει να αναπληρωθεί μέσω της κατανάλωσης τροφής.



Σχήμα 5.5. Λήψη της οθόνης κατά την προσομοίωση του PolyWorld.

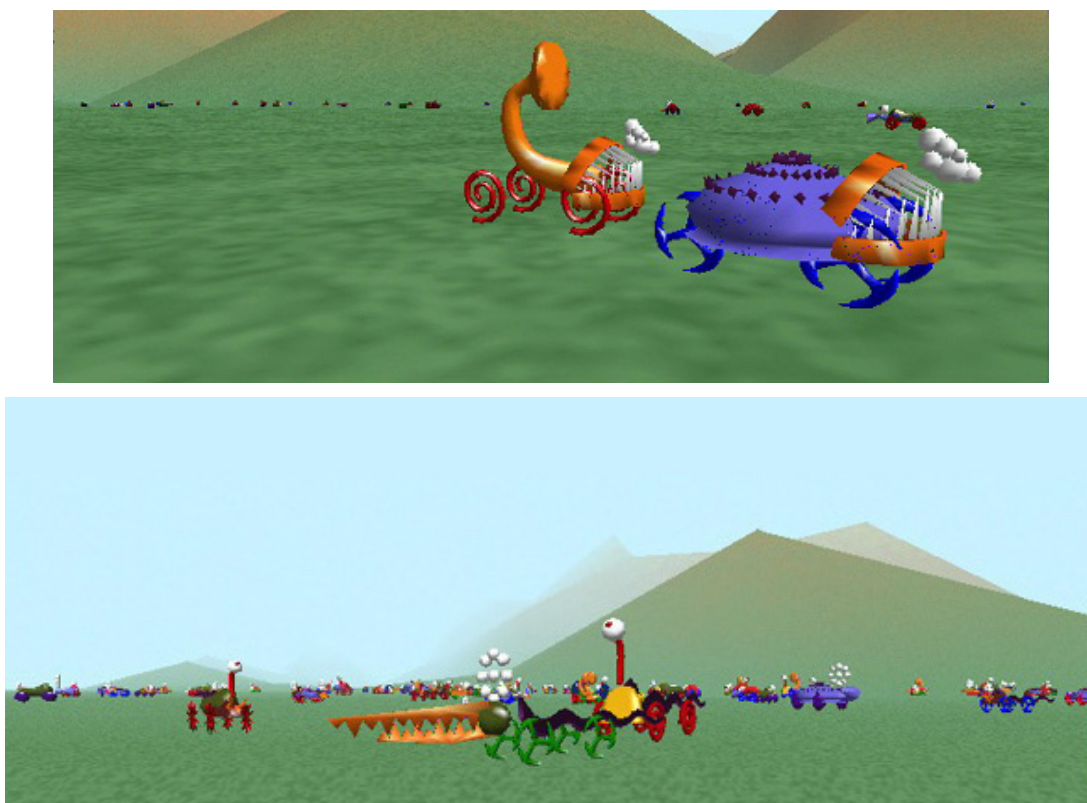
Η δυαδική συμβολοσειρά του ΓΑ ορίζει τα δομικά και μερικά λειτουργικά χαρακτηριστικά των οργανισμών παρέχοντας τιμές για τα εξής χαρακτηριστικά: μέγεθος, δύναμη, μέγιστη ταχύτητα, τιμή πράσινου χρώματος, πιθανότητα μετάλλαξης, διάρκεια ζωής, μέρος της ενέργειας που θα δοθεί στον απόγονο, και έντεκα χαρακτηριστικά του νευρωνικού δικτύου.

Το PolyWorld μπορεί να αρχικοποιηθεί με τυχαία γονοδιώματα. Μερικές φορές αυτά αποτυγχάνουν να αναπαραχθούν επιτυχώς και ο κόσμος χάνεται. Άλλες φορές σχηματίζονται και εγκαθίστανται σταθεροί πληθυσμοί και αναδύεται μία ποικιλία συμπεριφορών και οικολογιών.

6. Λογισμικό

Πολλοί άνθρωποι φαντάζονται το λογισμικό σχετικά με την τεχνητή ζωή ως κάποιο πρόγραμμα που προσομοιώνει τους ανθρώπους, τις κινήσεις και την συμπεριφορά τους. Δυστυχώς κάτι τέτοιο είναι σήμερα πολύ δύσκολο να φτιαχτεί καθώς δεν υπάρχει ακόμα η απαραίτητη υπολογιστική ισχύς. Κάποιοι άλλοι θεωρούν το λογισμικό που αναφέρεται στην τεχνητή ζωή ως ένα μεγάλο και πολύ ενδιαφέρον διασκεδαστικό παιχνίδι.

Για παράδειγμα κάποιοι στην Αγγλία σχεδίασαν ένα περιβάλλοντα τρισδιάστατο χώρο στο διαδίκτυο, με όνομα Technosphere (<http://www.technosphere.org.uk/>), το οποίο κατοικείται από τεχνητές μορφές ζωής οι οποίες δημιουργούνται από τους χρήστες του. Οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν το δικό τους πλάσμα με τα δικά του χαρακτηριστικά και να το αφήσουν να ζήσει σε αυτό τον τεχνητό κόσμο. Το πλάσμα αυτό έχει την δυνατότητα να κινηθεί, να φαι, να επιτεθεί σε άλλο πλάσμα, και να δημιουργήσει απογόνους οι οποίοι εξελίσσονται και προσαρμόζονται στο περιβάλλον (Σχ 6.1).



Σχήμα 6.1. Εικόνες από τον κόσμο του Technosphere

Εκτός της διασκέδασης το λογισμικό γύρω από την τεχνητή ζωή είναι φτιαγμένο για επιστημονικούς κυρίως λόγους και έχει ως σκοπό να μελετηθούν οι συνθήκες της πραγματικής ζωής, να γίνουν πειράματα που δεν μπορούσαν να γίνουν διαφορετικά και να καταλήξουμε στα κατάλληλα συμπεράσματα. Δύο από τα πιο γνωστά και σημαντικότερα προγράμματα του χώρου της ΤΖ είναι το "Tierra" του T. Ray και το "Avida" των T. Brown και C. Ofria.

6.1. Το σύστημα Tierra

Το πρόγραμμα Tierra δημιουργεί έναν ιδεατό υπολογιστή και το λειτουργικό του σύστημα, του οποίου η αρχιτεκτονική έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε ο εκτελέσιμος κώδικας μηχανής να είναι εξελίξιμος. Αυτό σημαίνει ότι ο κώδικας μηχανής μπορεί να μεταλλαχθεί (με την αλλαγή bits με τυχαίο τρόπο) ή να ανασυνδυαστεί (με την αλλαγή τμημάτων κώδικα μεταξύ αλγορίθμων), και το αποτέλεσμα παραμένει λειτουργικό αρκετά ώστε να υπάρχει ο χρόνος για φυσική (ή πιθανώς τεχνητή) επιλογή που να δίνει τη δυνατότητα να βελτιωθεί ο κώδικας με το χρόνο.

001	nopl	021	nopl	041	nopl	061	inc_b
002	nopl	022	inc_a	042	nopl	062	jmp
003	nopl	023	sub_ab	043	nop0	063	nop0
004	nopl	024	nopl	044	nop0	064	nopl
005	zero	025	nopl	045	push_ax	065	nop0
006	orl	026	nop0	046	push_bx	066	nopl
007	shl	027	nopl	047	push_cx	067	if_cz
008	shl	028	mal	048	nopl	068	nopl
009	mov_cd	029	call	049	nop0	069	nop0
010	adrb	030	nop0	050	nopl	070	nopl
011	nop0	031	nop0	051	nop0	071	nopl
012	nop0	032	nopl	052	mov_iab	072	pop_cx
013	nop0	033	nopl	053	dec_c	073	pop_bx
014	nop0	034	divide	054	if_cz	074	pop_ax
015	sub_ac	035	jmp	055	jmp	075	ret
016	mov_ab	036	nop0	056	nop0	076	nopl
017	adrf	037	nop0	057	nopl	077	nopl
018	nop0	038	nopl	058	nop0	078	nopl
019	nop0	039	nop0	059	nop0	079	nop0
020	nop0	040	if_cz	060	inc_a	080	if_cz

Σχήμα 6.2. Παράδειγμα κώδικα του Tierra

Μαζί με το κυρίως λογισμικό παρέχονται αρκετά προγράμματα γραμμένα σε κώδικα Assembly του ιδεατού υπολογιστή. Μερικά από αυτά είναι γραμμένα από ανθρώπους και το μόνο που κάνουν είναι να δημιουργούν αντίγραφα του εαυτού τους στην μνήμη RAM ενός ιδεατού H/Y. Τα άλλα είναι εξελίξεις των από τα προγράμματα προγόνους και περικλείονται για να δείξουν την δύναμη της φυσικής επιλογής. Ένα παράδειγμα τέτοιου κώδικα Assembly αποτελεί το πρόγραμμα πρόγονος του σχήματος 6.2, γραμμένο από τον Tom Ray.

Ο ιδεατός υπολογιστής δεν είναι τίποτα άλλο από μια προσομοίωση ενός H/Y MIMD (πολλαπλών εντολών πολλαπλών δεδομένων) διαμοιραζόμενης μνήμης. Αυτός είναι ένας παράλληλος υπολογιστής στον οποίο κάθε επεξεργαστής είναι ικανός να εκτελέσει μια σειρά εντολών ανεξάρτητα από τους άλλους επεξεργαστές. Ο παραλληλισμός προσομοιώνεται ουσιαστικά από τον διαμοιρασμό κομματιών χρόνου, αλλά υπάρχουν στην πραγματικότητα πολυάριθμοι ιδεατοί επεξεργαστές. Ένας ή περισσότεροι επεξεργαστές θα δημιουργηθούν και θα ανατεθούν σε κάθε πλάσμα (αυτό-αναπαραγόμενο αλγόριθμο) που ζει στην μνήμη του ιδεατού υπολογιστή. Η μνήμη του ιδεατού υπολογιστή είναι και ο πληθυσμός των πλασμάτων.

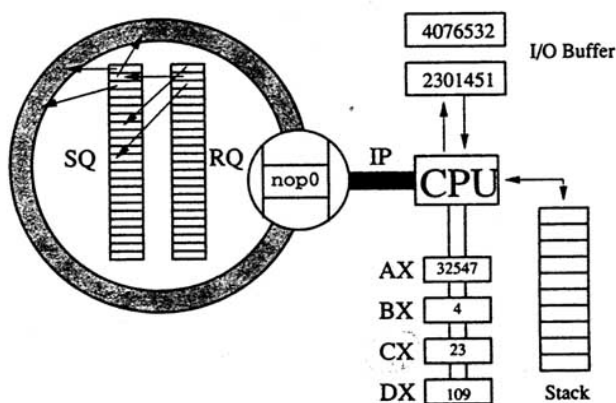
Το λειτουργικό σύστημα του ιδεατού υπολογιστή παρέχει διαχείριση μνήμης και υπηρεσίες χρονομερισμού. Επίσης παρέχει έλεγχο για μια ποικιλία παραγόντων που επηρεάζουν την πορεία της εξέλιξης όπως τρία είδη ρυθμού μετάλλαξης, κατανομή του χρόνου του επεξεργαστή σε κάθε πλάσμα, μέγεθος του πληθυσμού, χωρική κατανομή των πλασμάτων, κτλ.

Επιπροσθέτως, το λειτουργικό σύστημα παρέχει ένα πολύ περίπλοκο σύστημα παρατήρησης που κρατάει τα στοιχεία από τις γεννήσεις και τους θανάτους, διαδοχικά κομμάτια κώδικα από κάθε πλάσμα και διατηρεί μια τράπεζα γονιδίων με τα επιτυχημένα σετ χρωμοσωμάτων. Το λειτουργικό σύστημα παρέχει και ευκολίες για αυτοματισμό της οικολογικής ανάλυσης, δηλαδή για την καταγραφή των ειδών των αλληλεπιδράσεων που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των πλασμάτων.

Πρέπει να επισημανθεί ότι στο σύστημα Tierra έχουν προτιμηθεί η μετατρεψιμότητα και η συναρμολογησιμότητα από την ταχύτητα εκτέλεσης. Αυτό έγινε γιατί η αρχική έκδοση του ιδεατού υπολογιστή ήταν πολύ φτωχά σχεδιασμένη εκτός από τα χαρακτηριστικά που την κάνουν εξελίξιμη. Πιο συγκεκριμένα, το ένα τρίτο των αρχικών εντολών καταλαμβάνεται από εντολές που βάζουν ή βγάζουν στοιχεία από την στοίβα. Υπάρχουν μόνο δυο μετακινήσεις μεταξύ των καταχωρητών. Δεν υπάρχουν κινήσεις μεταξύ των καταχωρητών και της μνήμης RAM. Δεν υπάρχει καθόλου I/O (είσοδος/έξοδος) και δεν υπάρχει κανένας τρόπος να απευθυνθεί κανείς στην διεύθυνση μνήμης ενός τμήματος δεδομένων.

6.1.1. Περιγραφή του ιδεατού υπολογιστή του Tierra

Ο ιδεατός υπολογιστής του Tierra έχει την μορφή του σχήματος 6.3. Το σχέδιο περιέχει έναν δείκτη εντολών, τέσσερις καταχωρητές, μια κυκλική στοίβα που μπορεί να κρατήσει μέχρι δέκα εντολές και έναν αριθμό από σηματοδότες.



Σχήμα 6.3. Ιδεατός υπολογιστής Tierra

Η ζωή και ο θάνατος στον κόσμο του Tierra καθορίζονται από δυο ουρές στις οποίες τοποθετείται κάθε πρόγραμμα ανεξάρτητα από την θέση του στον κυκλικό πυρήνα. Στη γέννηση, κάθε πρόγραμμα εισάγεται στην ουρά του τεμαχιστή (SQ slicer queue) και εκτελείται για ένα σταθερό αριθμό εντολών (το κομμάτι του χρόνου) αν είναι στην κορυφή της ουράς, και τοποθετείται στον πάτο αμέσως μετά. Επίσης κατά την γένεση εισάγεται στον πάτο της ουράς του θεριστή (RQ reaper queue) και κινείται προς τα πάνω στην ουρά καθώς γερνάει, δηλαδή κάθε φορά που τοποθετείται στην κορυφή της ουράς του τεμαχιστή. Αν ένα πρόγραμμα βρεθεί στην κορυφή της ουράς του θεριστή θα εξαλειφθεί μόλις ο άδειος χώρος στον πυρήνα γίνει πολύ λίγος και μια ζήτηση μνήμης από ένα μητρικό πρόγραμμα για να τοποθετήσει τον

απόγονό του δεν μπορεί να εκπληρωθεί. Έτσι γίνεται ο θάνατος στο Tierra, αλλά είναι καλό να περιγραφεί και η διαδικασία γέννησης.

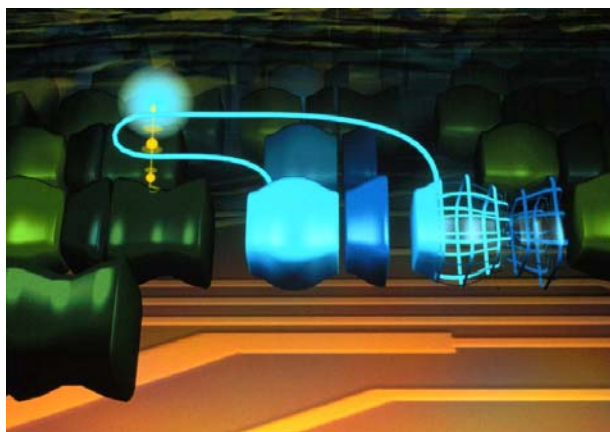
Το σετ εντολών του Tierra περιέχει την εντολή `mal` που επιτρέπει την δέσμευση ενός συγκεκριμένου χώρου της μνήμης. Ο επεξεργαστής θα ελέγξει τον καταχωρητή `cx` και θα δεσμεύσει ένα κομμάτι μνήμης (είτε κοντά στο μητρικό πρόγραμμα είτε σε μια αυθαίρετη θέση) μεγέθους όσο η τιμή του `cx`. Τότε με την βοήθεια της εντολής `copy` το μητρικό πρόγραμμα μπορεί να αντιγράψει εντολές από τον δικό του σετ χρωμοσωμάτων στον ελεύθερο χώρο που μόλις δεσμεύθηκε. Το μέγεθος του χώρου που δεσμεύεται μπορεί να καθοριστεί από το μητρικό πρόγραμμα με το να βρεθεί η διεύθυνση που αρχίζει και τελειώνει το ίδιο και να αφαιρέσει αυτά τα δυο ποσά. Φυσικά η αρχή και το τέλος του προγράμματος είναι σημειωμένα με κάποιο μοτίβο από `nop` εντολές. Εντολές όπως `adrf`, `adrb` ακολουθούμενες από ένα χαρακτηριστικό μοτίβο θα αναζητήσουν προς τα μπροστά ή πίσω το μοτίβο και θα επιστρέψουν την διεύθυνση αν επιτύχουν. Αφού τελειώσει η διαδικασία αντιγραφής, ένα επιτυχημένο πρόγραμμα θα εξέδιδε μια εντολή διαίρεσης, η οποία αφαιρεί το δικαίωμα εγγραφής από το μητρικό πρόγραμμα στη θυγατρική μνήμη, δίδει στο θυγατρικό πρόγραμμα τον δικό του δείκτη εντολών και εισάγει το πλάσμα στις αντίστοιχες ουρές. Με αυτόν τον τρόπο η υπολογιστική γέννηση λαμβάνει χώρα.

Σύμφωνα με αυτές τις αρχές έγραψε ο Ray το πρώτο πρόγραμμα πρόγονο (σχ. 6.2) που αναπαράγεται πιστά και προσεκτικά το τοποθέτησε στον νέο κόσμο που είχε δημιουργήσει για να πάρει θαυμαστά αποτελέσματα.

6.1.1. Οικολογική Εξέλιξη

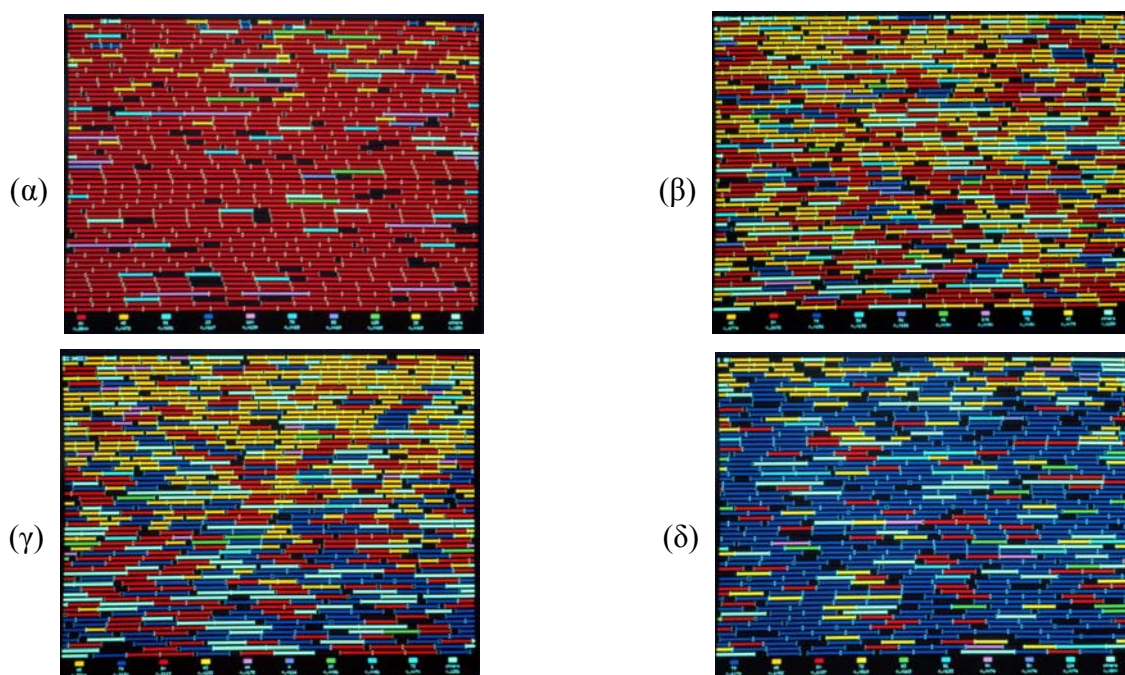
Η προσαρμογή σε κάποιο οικολογικό περιβάλλον προέρχεται από το γεγονός ότι ένα προεξάρχον χαρακτηριστικό του περιβάλλοντος είναι η παρουσία των ψηφιακών οργανισμών. Έτσι οι ψηφιακοί οργανισμοί είναι ικανοί να εξελιχθούν και να αναπτύξουν μηχανισμούς προσαρμογής στην παρουσία άλλων οργανισμών, όπως παρασιτική συμπεριφορά, ανοσία, συνεργασία και εξαπάτηση.

Παράσιτα. Ένας από τους πρώτους μηχανισμούς προσαρμογής που ανακαλύφθηκε ήταν ένας πληροφοριακός παρασιτικός μηχανισμός, κατά τον οποίο ο οργανισμός αποβάλλει σχεδόν το μισό του κώδικα και αντικαθιστά τις λειτουργίες του εκτελώντας τον σχετικό κώδικα γειτονικών του οργανισμών. Αυτοί οι παρασιτικοί οργανισμοί μπορούν να αντιγραφούν δύο φορές πιο γρήγορα από τους ξενιστές οργανισμούς αφού έχουν να αντιγράψουν λιγότερη πληροφορία από την μητέρα στην κόρη (σχ. 6.4). Όμως οι παρασιτικοί οργανισμοί δεν μπορούν να εκτοπίσουν τους ξενιστές οργανισμούς από την μνήμη αφού στηρίζονται σε δικιά τους πληροφορία.



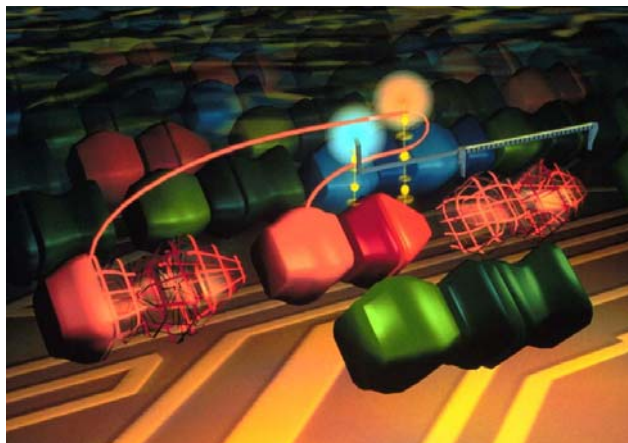
Σχήμα 6.4. Ένα παράσιτο (μπλε αντικείμενο με δύο τμήματα) χρησιμοποιεί την CPU του (μπλε σφαίρα) για να εκτελέσει τον κώδικα του τρίτου γονιδίου ενός γειτονικού οργανισμού (πράσινος) για να αντιγράψει τον εαυτό του, δημιουργώντας ένα παράσιτο παιδί (συρμάτινο αντικείμενο δύο τμημάτων)

Ανοσία. Επιπροσθέτως, επειδή εξελίσσονται και οι οργανισμοί ξενιστές, αναπτύσσουν περιστασιακά μηχανισμούς ανοσίας που τους ελευθερώνουν από τα παράσιτα. Γενικά όμως τα παράσιτα επιστρέφουν μετά από καιρό και έτσι οδηγούμαστε εμφανίζεται εναλλασσόμενο πλεονέκτημα των παρασίτων (καθώς αυτά ξεπερνούν την άμυνα των ξενιστών), ή των ξενιστών (καθώς αυτοί αναπτύσσουν νέες μεθόδους άμυνας).



Σχήμα 6.5. Εξελικτικός αγώνας μεταξύ ξενιστών και παρασίτων σε ένα πρόγραμμα Tierra. (α) Οι ξενιστές (κόκκινοι) είναι πολύ διαδεδομένοι. Τα παράσιτα (κίτρινα) έχουν εμφανιστεί αλλά ακόμη είναι σπάνια. (β) Οι ξενιστές είναι σπάνιοι επειδή τα παράσιτα έχουν γίνει διαδεδομένα. Οι άνοσοι ξενιστές (μπλε) έχουν εμφανιστεί αλλά ακόμη είναι πολύ σπάνιοι. (γ) Αυξάνεται η συχνότητα των άνοσων ξενιστών διαχωρίζοντας τα παράσιτα στο πάνω μέρος της μνήμης. (δ) Οι άνοσοι ξενιστές κυριαρχούν στην μνήμη ενώ μειώνεται η συχνότητα των παρασίτων και των ευάλωτων ξενιστών. Σύντομα τα παράσιτα θα εξαλειφθούν.

Υπερ-παράσιτα. Επειδή ο πληροφοριακός παρασιτισμός εμπλέκει την εκτέλεση κώδικα ο οποίος ανήκει σε άλλο ψηφιακό οργανισμό, δημιουργεί μια ευπάθεια/ευαισθησία η οποία εκμεταλλεύεται από μια νέα τάξη μηχανισμών προσαρμογής. Μερικοί ξενιστές έχουν αναπτύξει ένα τρόπο κατάληψης της CPU από τα παράσιτα τα οποία εκτελούν τον κώδικά τους, ουσιαστικά, παραλληλίζοντας τον εαυτό τους κλέβοντας την CPU από τα παράσιτα. Η παρουσία αυτών των "υπερ-παράσιτων" στο περιβάλλον οδηγεί σε μια γρήγορη εξαφάνιση των παράσιτων



Σχήμα 6.6. Ένα υπερ-παράσιτο (κόκκινο αντικείμενο με τρία τμήματα) κλέβει την CPU από ένα παράσιτο (μπλε σφαίρα). Χρησιμοποιώντας την κλεμμένη CPU, και την δικιά του (κόκκινη σφαίρα) έχει την δυνατότητα παραγωγής δύο απογόνων (συρμάτινα αντικείμενα αριστερά και δεξιά) ταυτόχρονα.

Συνεργασία. Αλγόριθμοι συνεργασίας αναπτύσσονται υπό συνθήκες όταν κάποιος μοναδικός ψηφιακός οργανισμός (όπως τα υπερ-παράσιτα) καταλαμβάνει την μνήμη. Σε αυτούς τους οργανισμούς, ένα άτομο δεν μπορεί να αναπαραχθεί στην απομόνωση, αλλά όταν υπάρχουν δύο άτομα του ίδιου είδους στην μνήμη, είναι ικανά να αντιγραφούν μέσω συνδυασμού των αντιγράφων του αλγόριθμου.

Απατεώνες. Η παραπάνω συνεργασία δημιουργεί νέα τρωτότητα και αυτή η συσσώρευση συνεργασίας μπορεί να εκμεταλλευτεί από οργανισμούς "απατεώνες" οι οποίοι μπαίνουν μεταξύ των συνεργαζόμενων ατόμων και κλέβουν την CPU καθώς περνούν από άτομο σε άτομο.

Εξελισσόμενη οικολογία. Η εξέλιξη των μηχανισμών προσαρμογής είναι μια συνεχής διαδικασία. Φαίνεται ότι οποιοσδήποτε οργανισμός καταλαμβάνει την μνήμη γίνεται στόχος εκμετάλλευσης (ή άμυνας) των υπολοίπων οργανισμών. Όταν ο κυρίαρχος οργανισμός γίνεται τέτοιος στόχος εκμετάλλευσης ή άμυνας, θα χάσει την κυριαρχία έναντι του οργανισμού ο οποίος κατέχει νέους μηχανισμούς προσαρμογής και ο κύκλος συνεχίζεται.

6.2. Το σύστημα Avida

Το πρόγραμμα για τον υπολογιστή Avida είναι ένα αυτόματα προσαρμόσιμο γενετικό σύστημα σχεδιασμένο πρωταρχικώς για χρήση ως μια πλατφόρμα για έρευνα στην Τεχνητή Ζωή. Το σύστημα Avida είναι βασισμένο σε αρχές παρόμοιες με το πρόγραμμα Tierra, για αυτό μπορεί να πει κανείς ότι είναι ένας πληθυσμός από αυτό-αναπαραγόμενα αλφαριθμητικά με μια γενετική βάση Turing υπό τις τυχαίες μεταβολές του Poisson. Ο πληθυσμός προσαρμόζεται στο συνδυασμό ενός εσωτερικού χώρου ποιότητας (αυτό-αναπαραγωγή) και μιας εξωτερικά επιβαλλόμενης (εξωτερικής) συνάρτησης ποιότητας που παρέχεται από τον ερευνητή. Μελετώντας αυτό το σύστημα, κάποιος μπορεί να εξετάσει την εξελικτική προσαρμογή, γενικές ιδιαιτερότητες των ζώντων συστημάτων (όπως η αυτό-οργάνωση) και άλλα θέματα που ανήκουν στη θεωρητική ή εξελικτική βιολογία και στα δυναμικά συστήματα.

Αφού το κυρίαρχο από τα αυτό-προσαρμοζόμενα συστήματα που υπάρχουν είναι το Tierra, και το Avida βασίζεται σε παρόμοιες αρχές, παρουσιάζουμε μερικές διαφορές μεταξύ του Avida και του Tierra. Στο Avida βρίσκουμε τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ένα δυσδιάστατο περιβάλλον με τοπικές αλληλεπιδράσεις μόνο (σε αντίθεση με τις γενικές αλληλεπιδράσεις του Tierra). Αυτό αποτρέπει τις πληροφορίες από το να διαδίδονται με εκθετικό ρυθμό και μας επιτρέπει να μελετήσουμε τα τοπικά φαινόμενα. Η μικρότερη διάδοση της πληροφορίας έχει ως αποτέλεσμα ο πληθυσμός να διατηρεί μια κατάσταση εκτός ισορροπίας (όπου η μάθηση είναι ευνοϊκότερη) για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επιπλέον (σε μελλοντικές εκδόσεις του Avida) οι τοπικές αλληλεπιδράσεις θα επιτρέψουν σχεδόν γραμμικές αυξήσεις στην αποτελεσματικότητα της εκτέλεσης σε παράλληλους υπολογιστές.
- Υπάρχει μια λεπτομερής ευχέρεια στην παραμετροποίηση. Το Avida επιτρέπει τον χρήστη να επιλέξει από μια ποικιλία από μεθόδους επιλογής μερισμού του χρόνου εκτέλεσης (που επιτρέπουν σύγχρονες ή ασύγχρονες εκτελέσεις από τα πλάσματα), σχέδια μεταβολής, μεθόδους για τοποθέτηση των νεογέννητων πλασμάτων και την δυνατότητα να μοντελοποιήσει κανείς άλλα αυτό-προσαρμοζόμενα συστήματα Τεχνητής Ζωής όπως το Tierra (έτσι ώστε να καθοριστούν οι βασικές γραμμές για συγκρίσεις).
- Η δυνατότητα να καθορίσει κανείς χώρους ποιότητας για σκοπούς πέρα από την βελτιστοποίηση του χρόνου κυοφορίας, μαζί με την θεωρητική δυνατότητα για λύσεις εύκολα προσαρμόσιμες (δεδομένου ενός ικανοποιητικού χώρου ποιότητας).
- Επιτρέπει ακριβείς μετρήσεις και την συλλογή στατιστικών πληροφοριών (όπως συνήθως απαιτείται από μια επιστημονική – ερευνητική πλατφόρμα). Το Avida επιτρέπει στον χρήστη να παραμετροποιήσει μια μεγάλη ποικιλία από αρχεία με αποτελέσματα και να μελετήσει σχεδόν κάθε χαρακτηριστικό του πληθυσμού.

6.2.1. *Σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του Avida*

Το σύστημα Avida δημιουργεί ένα τεχνητό περιβάλλον μέσα στον υπολογιστή. Το σύστημα αρχικοποιεί ένα δυσδιάστατο πλέγμα από ιδεατούς επεξεργαστές που εκτελούν μια περιορισμένη έκδοση της Assembly, τα προγράμματα αποθηκεύονται ως σειριακά αλφαριθμητικά εντολών στη μνήμη του συστήματος. Κάθε πρόγραμμα (το οποίο τυπικά

ονομάζεται κύτταρο, οργανισμός, ίνα ή πλάσμα) σχετίζεται με ένα επεξεργαστή ή ένα σημείο του πλέγματος. Συνεπώς, ο μέγιστος πληθυσμός των οργανισμών δίνεται από το μέγεθος του πλέγματος, MXN, και όχι από το μέγεθος του συνολικού σετ χρωμοσωμάτων του πληθυσμού, όπως στο Tierra. Για σκοπούς της έρευνας της Τεχνητής Ζωής, η γλώσσα Assembly που χρησιμοποιείται πρέπει να υποστηρίζει αυτό-αναπαραγωγή.

Το ιδεατό περιβάλλον αρχικά τροφοδοτείται από ένα σχεδιασμένο από τον άνθρωπο πρόγραμμα που αυτό-αναπαράγεται. Αυτό το πρόγραμμα και οι απόγονοι του υπόκεινται σε τυχαίες μεταβολές διαφόρων πιθανών τύπων που αλλάζουν τις εντολές στην μνήμη, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ανεπιθύμητες, ουδέτερες και επιθυμητές μεταβολές μέσα στο πρόγραμμα. Οι μεταβολές κατανέμονται σε μια αυστηρώς Δαρβίνεια έννοια, κάθε μεταβολή που δίνει ως αποτέλεσμα μια αυξημένη δυνατότητα για αναπαραγωγή στο συγκεκριμένο περιβάλλον θεωρείται επιθυμητή. Ενώ είναι ξεκάθαρο ότι η μεγάλη πλειονότητα των μεταβολών θα είναι ανεπιθύμητες – τυπικά καθιστώντας το πλάσμα να αποτυγχάνει να αναπαράγει εντελώς – ή αλλιώς ουδέτερες, αυτές οι λίγες που θα είναι επιθυμητές θα προκαλέσουν τους οργανισμούς να αναπαραχθούν περισσότερο αποτελεσματικά και συνεπώς να ευημερήσουν στο περιβάλλον.

Με τον καιρό, οι οργανισμοί που ταιριάζουν καλύτερα στο περιβάλλον δημιουργούνται, οι οποίοι προέρχονται από το αρχικό πλάσμα. Ότι απομένει είναι ο ορισμός ενός περιβάλλοντος τέτοιου ώστε αποστολές, όχι διαφορετικά χρήσιμες στην αναπαραγωγή, αφομοιώνονται. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μερισμού του χρόνου εκτέλεσης, μια μέθοδος είναι η κατανομή του χρόνου του κάθε πλάσματος που αναλογεί στον επεξεργαστή ανάλογα με την αξία του.

Ενώ το Avida είναι καθαρά μια παραλλαγή ενός γενετικού αλγορίθμου (ΓΑ) (στον οποίο σχεδόν όλα τα εξελικτικά συστήματα με γενετικό κώδικα μπορούν να προσεγγίσουν), η παρουσία μιας υπολογιστικά (Turing) πλήρους βάσης το διαφοροποιεί από τους παραδοσιακούς γενετικούς αλγορίθμους. Επιπροσθέτως, οι επιλογές στο Avida περισσότερο μοιάζουν με φυσικές επιλογές από ότι στους περισσότερους μηχανισμούς γενετικών αλγορίθμων. Αυτό είναι ένα αποτέλεσμα της εξυπακουόμενης (και δυναμικής) εξελικτικής ποιότητας τοπίου που αυτόματα δημιουργείται από το τις αναπαραγόμενες προϋποθέσεις. Αυτή η εξελικτική πίεση κατατάσσει το Avida ως ένα αυτό-προσαρμοζόμενο σύστημα, που αντιτίθεται στους τυπικούς γενετικούς αλγορίθμους στους οποίους, στο οποίο τα πλάσματα δεν έχουν καμιά επίδραση μεταξύ τους. Τελικώς, το Avida είναι ένα εξελικτικό σύστημα που είναι εύκολο να μελετήσει κανείς και που όμως περιέχει την ποιοτική πολυπλοκότητα των ζώντων συστημάτων.

6.2.2. Τι είναι το Avida

Στο πιο υψηλό επίπεδο, το σύστημα Avida αποτελείται από ένα πλέγμα και ένα σετ από αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σημείων του πλέγματος. Το πλέγμα είναι ένα δυσδιάστατο δίκτυο με φυσικές Καρτεσιανές συντεταγμένες που καθορίζουν τα σημεία του πλέγματος και

περιοδικές οριακές συνθήκες στις άκρες, που έχουν ως αποτέλεσμα μια τοροειδής γεωμετρία. Κάθε σημείο του πλέγματος βρίσκεται σε μια ξεχωριστή κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU).

Αυτό οδηγεί σε μια ιδεατή αναπαράσταση μιας πολλαπλών εντολών πολλαπλών δεδομένων (MIMD) παράλληλη μηχανή. Οι επεξεργαστές μπορούν να τρέχουν είτε σύγχρονα είτε ασύγχρονα, πολύ κοντά σε μια πραγματική παράλληλη μηχανή. Η προσέγγιση αυτή εξαρτάται ουσιαστικά από την απλότητα του σετ εντολών. Αν μια εντολή μπορεί να έχει ένα πραγματικά μεγάλο αποτέλεσμα στο γύρω περιβάλλον τότε θα είναι αντίστοιχα δυσκολότερο να προσεγγιστεί ένα παράλληλο σύστημα χρησιμοποιώντας μια ασύγχρονη τεχνική. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές μερισμού του χρόνου με τους οποίους προσδιορίζεται το κομμάτι του χρόνου εκτέλεσης του κάθε πλάσματος σε κάθε επεξεργαστή.

Καθώς αυτή η αναπαράσταση είναι από μόνη της αρκετά γενική για να χρησιμοποιηθεί σε αρκετές προσομοιώσεις, πχ η μελέτη των MIMD υπολογισμών, το Avida έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά για έρευνα στο χώρο της Τεχνητής Ζωής. Για αυτό το λόγο, ονομάζουμε κάθε σημείο του πλέγματος κύτταρο ή οργανισμό και κάθε σχετική λίστα εντολών ως σετ χρωμοσωμάτων του κάθε οργανισμού. Φυσικά, τα ενεργά σημεία του πλέγματος τα λέμε ζωντανά και τα ανενεργά (ή άδεια) πεθαμένα. Το σετ χρωμοσωμάτων του κάθε επεξεργαστή είναι κυκλικό όπως στα περισσότερα βακτήρια ή ιούς. Ως συνέπεια, ο δείκτης εντολών ποτέ δεν αφήνει το κύτταρο εκτός αν εξαναγκαστεί από μια ρητή εντολή (όπως ο παρασιτισμός ή η εντολή jump-p).

Έχει οριστεί μια γλώσσα Assembly απλή και να υποστηρίζει την δυνατότητα της αναπαραγωγής, όπου το πρόγραμμα από ένα επεξεργαστή μπορεί να αντιγράψει τον εαυτό του και να αντικαταστήσει το πρόγραμμα ενός γειτονικού επεξεργαστή με το αντίγραφο του. Κατόπιν τροφοδοτείται το περιβάλλον με ένα απλό πρόγραμμα αυτό-αναπαραγωγής που σύντομα επεκτείνεται διαμέσου του διαθέσιμου δικτύου.

Αυτά τα ενεργά προγράμματα έχουν μια μικρή πιθανότητα κάθε εντολή να συνδυάζεται τυχαία με τις στο αντίγραφο των χρωμοσωμάτων του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε μια Δαρβίνεια διαδικασία επιλογής. Με την χρησιμοποίηση διαφορετικών τεχνικών μερισμού του χρόνου μπορούν να σχηματιστούν χώροι ποιότητας όπου προγράμματα μπορούν να παρουσιάσουν συμπεριφορά πέραν της απλής αυτό-αναπαραγωγής.

6.2.3. Πειράματα με το Avida

Πειράματα με τεχνητά χημικά στοιχεία που υποστηρίζουν την αυτό-αναπαραγωγή επιτρέπουν βαθιά γνώση σε ένα μεγάλο αριθμό βιολογικών προβλημάτων της πραγματικής ζωής. Πρώτα, τα πειράματα πρέπει να σχεδιαστούν ώστε να ξεχωρίζουν τα γενικά χαρακτηριστικά του συστήματος από τα βοηθητικά, έτσι ώστε προσδιοριστεί με ακρίβεια η προβλεπτική ικανότητα του συστήματος με σεβασμό στις αρχές των φυσικών ζώντων συστημάτων. Τότε,

συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες μπορούν να οριστούν ώστε να μπορούν να εξερευνηθούν τα δυναμικά και τα στατιστικά δεδομένα από συγκεκριμένα απλά ζώντα συστήματα. Η ευκαμψία και οι δυνατότητες διαμόρφωσης του προγράμματος Avida επιτρέπουν πειράματα σε περιοχές όπως ταξινομικές σε ισοτοπική αφθονία κατανομές, εξελικτική προσαρμογή, διαφοροποιήσεις σε νέα είδη, και πολλές άλλες. Για παράδειγμα, ένα πείραμα για να αποφασίσουμε το γονότυπο των ισοτοπικών σε αφθονία κατανομών εκτελείται με λεπτομέρεια, χρησιμεύοντας ως μια παρουσίαση του συστήματος Avida. Το αποτέλεσμα αυτού του πειράματος προτείνει ότι οι γονότυποι ισοτοπικών σε αφθονία κατανομών στο Avida είναι ελεύθεροι από κλίμακες με τον περιορισμό του αργού οδηγήματος, δηλαδή μικρές πιθανότητες μεταλλαγής. Πειράματα σε διαφοροποιήσεις σε νέα είδη δείχνουν ότι τα είδη διαμορφώνονται σχετικά γρήγορα δεδομένου τους γεωγραφικούς διαχωρισμούς σε συνδυασμό με τυχαία γενετική εξέλιξη.

7. Επίλογος

Το πεδίο της Τεχνητής Ζωής καλύπτει ένα ευρύ πεδίο θεματικών περιοχών από την μηχανική μέχρι την βιοχημεία, την φυσική, την βιολογία και την επιστήμη των Η/Υ. Στην βάση του εγχειρήματος βρίσκεται η προσπάθεια κατανόησης των γενικών αρχών οι οποίες διέπουν την ζωή και η δημιουργία ζωής σε ένα τεχνητό μέσο έτσι ώστε οι ιδιότητές της να μπορούν να συγκριθούν με την ζωή στην Γη με την οποία είμαστε εξοικειωμένοι, αλλά επίσης και η πεποίθηση ότι η σύγχρονη τεχνολογία μπορεί να μας βοηθήσει να μάθουμε περισσότερο για τον κόσμο που μας περιβάλλει μέσω της προσομοίωσης και της εξομοίωσής του. Η TZ μπορεί να παράγει πειραματικά δεδομένα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαψεύσουν θεωρίες σχετικές με το τι αποτελεί ζωή, ακριβώς όπως μπορεί να γίνει με πραγματικά στοιχεία ύπαρξης εξωγήινης ζωής.

Βιβλιογραφία

- Adami C. (1998). *Introduction to Artificial Life*. New York: Springer-Verlag
- Banzhaf W., Nordin P., Keller R.E., and Francone F.D. (1998) *Genetic Programming: An Introduction: On the Automatic Evolution of Computer Programs and Its Applications* Morgan Kaufmann Publishers.
- Goldberg D. E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Hautop Lund H., Asada M. (Eds.) (1998). *Evolutionary Robotics*, Vol .4, No.4, fall 1998
- Hillis D.W. (1991) Co-evolving parasites improve simulation as an optimization procedure. In C. G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer, & S. Rasmussen (Ed.) *Artificial Life II*, Volume X of *SFI Studies in the Sciences of Complexity*, pages 313-324, Redwood City, CA: Addison-Wesley

- Holland J. H. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, Michigan: The Univ of Michigan Press.
- Koza J. R. (1992) *Genetic Programming: On the Programming of Computers by means of Natural Selection & Genetics*. Cambridge: MIT Press
- Koza J. R. (1994) *Genetic programming II : automatic discovery of reusable programs*. Cambridge, MA: MIT Press
- Langton C. G. (1989). Artificial Life. In C. G. Langton (Ed.) *Artificial Life*, Volume VI of *SFI Studies in the Sciences of Complexity*, pages 1-47, Redwood City, CA: Addison-Wesley
- Langton C. G. (1992). Preface. In C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, and S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II*, Volume X of *SFI Studies in the Sciences of Complexity*, pages xiii-xviii, Redwood City, CA: Addison-Wesley
- Langton C. G. (1994). Editor's introduction. *Artificial Life Journal*, Volume 1, Number 1/2, pages v-viii, Cambridge, MA: MIT Press
- Ray T. S. (1994). An evolutionary approach to synthetic biology: Zen and the art of creating life. *Artificial Life Journal*, Volume 1, Number 1/2, pages 179-209, Cambridge, MA: MIT Press
- Ray T. S. In press. Artificial Life. In: "*From Atoms to Mind*", Gilbert, Walter, and Glauco Tocchini Valentini, [eds.]. Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani. Rome
- Sims K. (1991). Artificial Evolution for Computer Graphics. *Computer Graphics (Siggraph '91 Proceedings)*, Vol. 25, No. 4, pp.319-328
- Sims K. (1993). Interactive Evolution of Equations for Procedural Models. *The Visual Computer*, Vol. 9, No. 8, August 1993, pp.466-476
- Sims K. (1994). Evolving Virtual Creatures. *Computer Graphics (Siggraph '94 Proceedings)*, pp.15-22
- Sims K. (1994). Evolving 3D morphology and behavior by competition. *Artificial Life* 1 (4), Summer 1994, 353-372
- Taylor C. and Jefferson D. (1994). Artificial life as a tool for biological inquiry. *Artificial Life Journal*, Volume 1, Number 1/2, pages 1-13, Cambridge, MA: MIT Press
- Terzopoulos D., Tu X., and Grzeszczuk R. (1994). Artificial Fishes: Autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated world. *Artificial Life* 1, 327
- Webb B. (1996). A cricket robot. *Sci. Am.* 275 (December), 94
- Yaeger L. (1994) Computational Genetics, physiology, metabolism, neural systems, learning, vision, and behaviour or PolyWorld: life in a new context. In C. G. Langton (Ed.) *Artificial Life III*, Volume XVII of *SFI Studies in the Sciences of Complexity*, pages 263-298, Redwood City, CA: Addison-Wesley

Επιστημονικός Υπεύθυνος ΠΕ 2.4.

Επιστημονικό Προσωπικό

Κων/νος Μαργαρίτης
Καθηγητής

Δρ. Παναγιώτης Αδαμίδης

Επιστημονικός Υπεύθυνος Έργου

Κων/νος Τσούρος
Καθηγητής