

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΚΑΛΩΝ ΤΕΧΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΤΗ ΜΟΥΣΙΚΗ:  
ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΥΣΙΚΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Β.-Α. ΚΑΜΠΟΥΡΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΕΜ 723

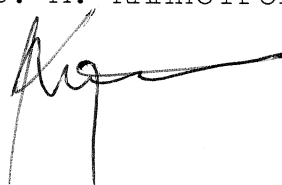
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2002-2003

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΚΑΛΩΝ ΤΕΧΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΣΤΗ ΜΟΥΣΙΚΗ:  
ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΥΣΙΚΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Β.-Α. ΚΑΜΠΟΥΡΟΠΟΥΛΟΣ



ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΕΜ 723

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2002-2003

## Περιεχόμενα

<b>Περιεχόμενα</b>	1
<b>Εισαγωγή</b>	3
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> – Κυψελοειδή αυτόματα</b>	5
1.1 Αυτόματα	6
1.2 Κυψελοειδή αυτόματα	7
1.2.1 Ορισμός	7
1.2.2 Ιστορική αναδρομή	9
1.2.3 Περιγραφή - Χαρακτηριστικά	11
1.2.4 Παραδείγματα κυψελοειδών αυτόματων	18
1.2.4.1 Μονοδιάστατα (γραμμικά) κυψελοειδή αυτόματα (one-dimensional (linear) cellular automata)	18
1.2.4.2 Δισδιάστατα κυψελοειδή αυτόματα (two-dimensional cellular automata)	21
1.2.4.3 Τρισδιάστατα κυψελοειδή αυτόματα (three-dimensional cellular automata)	25
1.2.5 Συμπεριφορά των κυψελοειδών αυτόματων	25
1.2.6 Εφαρμογές των κυψελοειδών αυτόματων εκτός μουσικής και παραδείγματα μοντέλων κυψελοειδών αυτόματων	26
1.2.6.1 Παραδείγματα μοντέλων κυψελοειδών αυτόματων	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> – Εφαρμογές κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική</b>	29
2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή αλγοριθμικής και computer μουσικής (algorithmic - computer music)	30
2.2 Κυψελοειδή αυτόματα και μουσική - εισαγωγή	36
2.3 Τρόποι/Μέθοδοι εφαρμογής των κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική	37
2.3.1 Χρήση των κυψελοειδών αυτόματων στην παραγωγή παρτιτούρας	38
2.3.2 Χρήση των κυψελοειδών αυτόματων στον καθορισμό του ηχητικού φάσματος	41
2.3.3 Τεχνική ανακυκλούμενου κυματοπίνακα - Πίνακας ανάγνωσης κυψελοειδών αυτόματων	42
2.3.4 Κυψελοειδή αυτόματα, γενετικοί αλγόριθμοι και μουσική	44

2.4	Παρουσίαση λογισμικών	45
2.4.1	Camus και Camus 3D	45
2.4.2	Virtual Waves 2.1	58
2.4.3	Chaosynth	62
2.4.4	LASy	67
	Επίλογος	69
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> – Κριτική - Σχολιασμός - Συμπεράσματα</b>	71
3.1	Σχολιασμός λογισμικών	72
3.2	Συμπεράσματα - προτάσεις	76
	<b>Παράρτημα</b>	80
Π.1	Ο Κανόνας Ισοτιμίας	80
Π.2	Παρτιτούρες	82
Π.3	Διαδικτυακοί δεσμοί (links)	87
Π.4	Περιεχόμενα CD-ROM	90
Π.5	Γλωσσάρι	91
	<b>Βιβλιογραφία</b>	96



## Εισαγωγή

**Η** σύνθεση της μουσικής και των ήχων, γενικότερα, αποτελεί έναν από τους τρόπους καλλιτεχνικής και αισθητικής έκφρασης του ανθρώπου. Κατά τη διάρκεια ολόκληρης της ιστορίας της ανθρωπότητας πολλά μουσικά έργα δημιουργήθηκαν, λίγα όμως είναι αυτά που έχουν μείνει στην ιστορία ως αξιωμακρόνευτα, αποτελώντας υποδείγματα για τους νεότερους συνθέτες. Μέσα σ' αυτήν την ομάδα, υπάρχουν ορισμένα τα οποία ξεχωρίζουν τόσο για το μουσικοαισθητικό τους αποτέλεσμα όσο και για τη μέθοδο που ακολουθήθηκε για τη σύνθεσή τους. Δεν ήταν λίγες οι φορές που συνθέτες όλων των εποχών επιστράτευσαν μαθηματικές και αλγοριθμικές διαδικασίες για την εφαρμογή των ιδεών τους σε μουσικοπαραγωγικούς σκοπούς. Τις τελευταίες δεκαετίες, μάλιστα, έχει δημιουργηθεί και η τάση "δανεισμού" εννοιών και αρχών από διάφορους επιστημονικούς τομείς, όπως η βιολογία, η φυσική και οι κοινωνικές επιστήμες.

Το σύστημα των κυψελοειδών αυτόματων, το οποίο, αρχικά, εφαρμόστηκε σε μελέτες και έρευνες σχετιζόμενες με βιολογικά φαινόμενα που παρατηρούνταν στη φύση, είναι ένα παράδειγμα τέτοιων διαδικασιών που έχουν χρησιμοποιηθεί στη

μουσική σύνθεση. Στην εργασία αυτή επιχειρείται μία εξέταση των εφαρμογών του συστήματος των κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική, παρέχοντας, συγχρόνως, και τα απαραίτητα ανάλογα παραδείγματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αλλά περιεκτική αναφορά στο σύστημα των κυψελοειδών αυτόματων, παρέχοντας στον αναγνώστη ένα γενικό πλάνο του τρόπου λειτουργίας του. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση ορισμένων τεχνικών οι οποίες επιτρέπουν την εφαρμογή των κυψελοειδών αυτόματων στη σύνθεση μουσικής και ήχου. Επίσης, παρουσιάζονται και κάποια λογισμικά, ως παραδείγματα αυτών των εφαρμογών. Τέλος, στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, επιχειρείται μία κριτική των μεθόδων εφαρμογής των κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική, κυρίως όσον αφορά τα συγκεκριμένα λογισμικά. Ο σχολιασμός αυτός επεκτείνεται και στο ευρύτερο πλαίσιο της εμπλοκής διεργασιών, όπως είναι τα κυψελοειδή αυτόματα, στη διαδικασία της μουσικής σύνθεσης.

Η μελέτη αυτή αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία στο πλαίσιο των προπτυχιακών μου σπουδών στο Τμήμα Μουσικών Σπουδών της Σχολής Καλών Τεχνών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και έγινε υπό την επίβλεψη του λέκτορα κ. Α.Β. Καμπουρόπουλου, τον οποίο ευχαριστώ θερμότατα.

Εμμανουήλ Α. Γεώργιος  
Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 2003

# 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο

---

## Κυψελοειδή Αυτόματα

**Σ**το κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μία προσέγγιση του συστήματος των κυψελοειδών αυτόματων. Αρχικά, γίνεται μία αναφορά στα αυτόματα γενικά, δίνοντας κάποιους ορισμούς και παραθέτοντας ορισμένα γενικά χαρακτηριστικά τους. Οι επόμενες ενότητες αφορούν αποκλειστικά τα κυψελοειδή αυτόματα. Εξετάζονται τα βασικά συστατικά ενός κυψελοειδούς αυτόματου, δίνονται οι απαραίτητοι ορισμοί και παρουσιάζονται ορισμένες από τις κυριότερες ιδιότητες των κυψελοειδών αυτόματων. Τέλος, γίνεται μία παρουσίαση των συνηθέστερων τύπων κυψελοειδών αυτόματων, η οποία συνοδεύεται και από ανάλογα παραδείγματα, και, στη συνέχεια, αναφέρονται ενδεικτικά συγκεκριμένα μοντέλα

κυψελοειδών αυτόματων που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για διάφορους εξωμουσικούς σκοπούς, έτσι ώστε, τελικά, να δημιουργηθεί στον αναγνώστη μία αρκετά ολοκληρωμένη εικόνα του συστήματος των κυψελοειδών αυτόματων, του τρόπου λειτουργίας του και των εφαρμογών που είναι δυνατό να έχει.

## **1.1      Αυτόματα**

Τα αυτόματα (automata) - ορισμένες φορές αποκαλούνται και "μηχανές καταστάσεων" ("states machines") (Τσουκαλάς 1995) - είναι μηχανές σχεδιασμένες να προσομοιώνουν τη λειτουργία αντικειμένων ή ζωντανών οργανισμών, μετατρέποντας πληροφορίες από μία μορφή σε άλλη. Έχουν την "ικανότητα" να αντιδρούν σε εξωτερικά - περιβαλλοντικά ερεθίσματα και να "λαμβάνουν" λογικές αποφάσεις, βασισμένα σε ένα συγκεκριμένο και προκαθορισμένο σύνολο κριτηρίων και οδηγιών που έχει θεσπίσει ο κατασκευαστής τους εξαρχής. Από τη στιγμή της εκκίνησής τους και μετά, τα αυτόματα λειτουργούν αυτόνομα (Sippl 1985, σελ. 30).

Η λειτουργία τους έγκειται στην συλλογή εντολών και δεδομένων από το άμεσο περιβάλλον τους και στην επεξεργασία αυτών, μέσω της εφαρμογής κανόνων, με σκοπό την επίτευξη ενός επιθυμητού και συγκεκριμένου αποτελέσματος. Αυτή η διαδικασία εξελίσσεται με βάση κάποιες συγκεκριμένες καταστάσεις, στις οποίες μπορεί να βρίσκεται το αυτόματο, καθεμία από τις οποίες καθορίζει την επόμενη της. Ένα τυπικό παράδειγμα αυτόματου είναι το εκκρεμές ρολόι, κατά το οποίο οι θέσεις (δηλαδή οι καταστάσεις) που παίρνουν τα εσωτερικά εξαρτήματα του ρολογιού, είναι καθορισμένες και εξαρτώνται από την κίνηση του εκκρεμούς. Αυτές οι καταστάσεις "μεταφράζονται", τελικά στις συγκεκριμένες θέσεις των δεικτών του ρολογιού. Εφόσον δεν υπάρχει κάποιο ερέθισμα από το περιβάλλον το εκκρεμές (αυτόματο) θα συνεχίσει να εκτελεί αυτή τη συγκεκριμένη λειτουργία επ' άπειρον (Rockman και Nelson 2002).

Κατά παρόμοιο τρόπο, πολλές υπολογιστικές διαδικασίες μπορούν να εκφραστούν μέσω αυτόματων. Αυτός ο φορμαλισμός (formalism) βρίσκει συχνά εφαρμογή στα μαθηματικά και στην επιστήμη των υπολογιστών. Το γεγονός ότι είναι πολύ εύκολο να τεθούν σε εφαρμογή, απαιτώντας σχετικά στοιχειώδεις γνώσεις και πολύ μικρή υπολογιστική ισχύ, τα καθιστά κατάλληλα μέσα για την προτυποποίηση

διάφορων σύνθετων καταστάσεων και προβλημάτων που χαρακτηρίζονται από μη γραμμικότητα και αβεβαιότητα.

Η μελέτη των αυτόματων έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον, κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες. Μάλιστα, οι ιδιαιτερότητές τους, οι οποίες προαναφέρθηκαν, έχουν ως αποτέλεσμα την προσαρμογή και την άμεση σύνδεσή τους με την προσπάθεια δημιουργίας τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence) (Najim και Roznyak 1994, σελ. 4).

Σύμφωνα με τον Roads (1996), υπάρχουν διάφοροι τύποι αυτόματων, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται και τα κυψελοειδή αυτόματα (cellular automata), οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν σε ντετερμινιστικά και μη-ντετερμινιστικά αυτόματα. "Τα ντετερμινιστικά αυτόματα είναι αυτά στα οποία, εάν ξέρουμε εκ των προτέρων την αρχική τους κατάσταση και τις εντολές εισόδου, μπορούμε να προβλέψουμε το αποτέλεσμά τους με αρκετή βεβαιότητα. Αντιθέτως, στα μη-ντετερμινιστικά αυτόματα, κάποιος παράγοντας τους καθορίζεται από μία διαδικασία βασισμένη στην εφαρμογή εντελώς τυχαίων κατανομών ή τιμών με κάποια συγκεκριμένη πιθανοτική κατανομή" (σελ. 860). Αυτό σημαίνει ότι το τελικό αποτέλεσμα του αυτόματου και η κατάσταση στην οποία θα βρεθεί τελικά, δεν μπορεί να προβλεφθεί εξ αρχής.

Τα κυψελοειδή αυτόματα, λόγω των πολλών και διαφορετικών, μεταξύ τους, εφαρμογών που μπορεί να έχουν, μπορούν να είναι είτε ντετερμινιστικά είτε μη-ντετερμινιστικά, ανάλογα με την περίπτωση που χρησιμοποιούνται. Όπως γίνεται κατανοητό και στα ακόλουθα κεφάλαια αυτής της εργασίας, το τελικό αποτέλεσμα του κυψελοειδούς αυτόματου εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τους κανόνες μετάβασης (βλ. 2° κεφ.) που εφαρμόζονται κατά το στάδιο της επεξεργασίας των αρχικών εντολών, αλλά και από τις ίδιες τις αρχικές εντολές.

## **1.2 Κυψελοειδή Αυτόματα**

### **1.2.1 Ορισμός**

Οι Gaylord και Nishidate (1996, εισαγωγικό σημείωμα) χαρακτηρίζουν τα κυψελοειδή αυτόματα (cellular automata) ως "υπολογιστικά μοντέλα στα οποία ο

χρόνος και ο χώρος είναι διακριτοί, παίρνοντας τιμές από ένα πεπερασμένο σύνολο, και προορίζονται για την αναπαράσταση συστημάτων αποτελούμενων από πολλά, όμοια συνήθως, αντικείμενα, τα οποία υφίστανται αλληλεπίδραση. Φυσικά συστήματα που περιέχουν πολλά διακριτά στοιχεία με τοπική αλληλεπίδραση είναι δυνατόν να προτυποποιηθούν μέσω της χρήσης κυψελοειδών αυτόματων. Η μοντελοποίηση αυτή αφορά συστήματα τα οποία έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν την κατάσταση τους συναρτήσει του χρόνου (Miranda 2001a, σελ. 119-121).

Σύμφωνα, πάλι, με τους Gaylord και Nishidate (1996, σελ. 1-2), τα κυψελοειδή αυτόματα μπορούν να οριστούν με τους εξής δύο τρόπους:

#### Επιστημονικός ορισμός (Scientific definition) ενός κυψελοειδούς αυτόματου

Οι επιστήμονες ορίζουν γενικά ένα κυψελοειδές αυτόματο ως ένα διακριτό δυναμικό σύστημα (discrete dynamical system), στο οποίο ο χώρος, ο χρόνος και οι καταστάσεις του συστήματος είναι όλα διακριτά και έχουν τις εξής ιδιότητες:

- Η αναπαράσταση του χώρου γίνεται σε ένα κανονικό πλέγμα (regular lattice) μίας, δύο ή τριών διαστάσεων.
- Κάθε τόπος (site), ή κυψέλη (cell), στο πλέγμα μπορεί να βρίσκεται μόνο σε μία κατάσταση που ανήκει σε ένα σύνολο πεπερασμένου αριθμού καταστάσεων. Οι καταστάσεις αυτές αναπαριστώνται από ακέραιες αριθμητικές τιμές.
- Το σύστημα του κυψελοειδούς αυτόματου εξελίσσεται με διαδοχικά χρονικά βήματα. Οι τιμές όλων των κυψελών του πλέγματος ενημερώνονται ταυτόχρονα σε κάθε χρονικό βήμα.

Σημείωση: Ενώ οι τιμές όλων των κυψελών ενημερώνονται σε κάθε χρονικό βήμα, η τιμή κάποιας κυψέλης είναι δυνατό να μην αλλάξει με την παρέλευση ενός χρονικού βήματος.

- Οι τιμές των κυψελών του πλέγματος ενημερώνονται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο κανόνων το οποίο λαμβάνει υπόψη του την τιμή της θεωρούμενης κυψέλης και τις τιμές των γειτονικών κυψελών της.

#### Υπολογιστικός ορισμός (Computational definition) ενός κυψελοειδούς αυτόματου

Από τη στιγμή που το μοντέλο των κυψελοειδών αυτόματων αποτελεί έναν αλγόριθμο και εφαρμόζεται ως ένα πρόγραμμα υπολογιστή, είναι καλό να δοθεί και ένας υπολογιστικός ορισμός του κυψελοειδούς αυτόματου.

Το κυψελοειδές αυτόματο είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστή στο οποίο εκτελούνται κατάλληλα οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

- Δημιουργείται ένας πίνακας ειδικών συνόλων τιμών (ακέραιοι αριθμοί, πραγματικοί αριθμοί, σύμβολα ή λίστες συγκεκριμένων αριθμών).

- Καθορίζεται μία συνάρτηση, ή ένα σύνολο συναρτήσεων, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αλλαγή της τιμής ενός στοιχείου του πίνακα, με βάση την τιμή του θεωρούμενου στοιχείου και των γειτονικών του.
- Η συνάρτηση εφαρμόζεται συνεχώς στον πίνακα, αλλάζοντας κάθε φορά τις τιμές όλων των στοιχείων του πίνακα ταυτόχρονα.

Με λίγα λόγια θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το κυψελοειδές αυτόματο είναι ένα διακριτό δυναμικό σύστημα το οποίο εξελίσσεται σύμφωνα με την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή ενός ή περισσότερων απλών κανόνων. Όπως συμβαίνει σε κάθε δυναμικό σύστημα, όλες οι επόμενες καταστάσεις του συστήματος αλλάζουν τιμή συναρτήσει των τρεχουσών τιμών τους (Wuensche και Lesser 1992, σελ. 5). Τα δυναμικά συστήματα συχνά περιγράφονται μέσω πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων. Όμως, η εξαιρετικά απλή, ως προς τη σύλληψη, φιλοσοφία και λειτουργία των κυψελοειδών αυτόματων είχε ως αποτέλεσμα την προσαρμογή και την εφαρμογή τους στην περιγραφή δυναμικών συστημάτων. Οι Margolus, Vichniac και Toffoli έχουν αποδείξει ότι τα κυψελοειδή αυτόματα αποτελούν μία καλή εναλλακτική μέθοδο των διαφορικών εξισώσεων στην κατεύθυνση αυτή (Rietman 1993, σελ. 167). Πράγματι, όπως αναφέρουν οι Wuensche και Lesser (1992, σελ. 5) "τα κυψελοειδή αυτόματα είναι ένας λογικός κόσμος ... με τους δικούς τοπικούς φυσικούς κανόνες. Ένας τέτοιος κόσμος, παρόλο που είναι κατασκευασμένος με απλές μαθηματικές αρχές, φαίνεται να είναι ικανός να προτυποποιήσει σύνθετα εξελισσόμενες συμπεριφορές".

Τα βιβλία των Gaylord και Nishidate (1996), Wuensche και Lesser (1992) και Chopard και Droz (1998) αποτελούν εξαιρετικές πηγές αναφοράς στα συστήματα των κυψελοειδών αυτόματων, εξετάζοντας λεπτομερώς την ιστορία, τα χαρακτηριστικά, τις ιδιότητές τους καθώς και τον τρόπο λειτουργίας τους.

### **1.2.2 Ιστορική Αναδρομή**

Σ' αυτήν την ενότητα επιχειρείται μία πολύ σύντομη ιστορική αναδρομή στο σύστημα των κυψελοειδών αυτόματων, με την παράθεση ορισμένων από τα κυριότερα σημεία-σταθμούς της ιστορίας τους. Αξιόλογες αναφορές στην ιστορία

των κυψελοειδών αυτόματων παρουσιάζονται από τους Chopard και Droz (1998) και Hoke (1996).

Παρόλο που τα κυψελοειδή αυτόματα χρησιμοποιήθηκαν πολλές φορές, συχνά με διαφορετική ονομασία, η αρχική σύλληψη - επινόηση των μοντέλων αυτών έγινε στα τέλη της δεκαετίας του '40 από τον μαθηματικό J. von Neumann με σκοπό τη μελέτη της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ο von Neumann ήθελε να φτιάξει μια μηχανή αντίστοιχη του εγκεφάλου, η οποία, εφόσον θα ήταν τόσο σύνθετη, θα μπορούσε όχι μόνο να λύσει πολύπλοκα προβλήματα, αλλά και να έχει την ιδιότητα του αυτοελέγχου και της αυτοδιόρθωσης. Μάλιστα αυτό το αυτόματο θα μπορούσε να αυτοαναπαραχθεί ακολουθώντας κάποιες συγκεκριμένες οδηγίες. Βέβαια, ο von Neumann δεν ανέμενε, ίσως, να υλοποιηθεί με κάποιον τρόπο η σκέψη του, τουλάχιστον στη διάρκεια της ζωής του. Ωστόσο, ήθελε να φτάσει στο σημείο να δημιουργήσει μία σειρά κανόνων σύμφωνα με τους οποίους ένας υπολογιστής θα μπορούσε να προγραμματιστεί έτσι, ώστε να μπορέσει να παράγει ένα ακριβές αντίγραφο του εαυτού του. Ακολουθώντας τις συμβουλές του μαθηματικού Stanislaw Ulam, ο von Neumann στράφηκε στη δημιουργία ενός τελείως διακριτού κόσμου αποτελούμενου από κυψέλες (cells).

Σε ένα τέτοιο σύστημα κάθε κυψέλη χαρακτηρίζεται από μία εσωτερική κατάσταση, η οποία, ουσιαστικά, υποδηλώνει έναν πεπερασμένο αριθμό ελάχιστων πληροφοριών. Η εξέλιξη του συστήματος αυτού γίνεται πάντα σε διακριτό χρόνο μέσω των κυψελών του, οι οποίες αλλάζουν κατάσταση σύμφωνα με έναν κοινό κανόνα μετάβασης (transition rule), ο οποίος υπολογίζει την καινούρια τιμή της κάθε κυψέλης λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα τιμή της θεωρούμενης κυψέλης και των γειτονικών της κυψελών. Η δραστηριότητα, λοιπόν, όλων των κυψελών είναι ταυτόχρονη, όπως άλλωστε συμβαίνει σε κάθε βιολογικό σύστημα. Αυτά τα πλήρως διακριτά δυναμικά συστήματα που επινοήθηκαν από τον von Neumann αναφέρονται ως κυψελοειδή αυτόματα (cellular automata).

Το πρώτο αυτοαναπαράγομενο κυψελοειδές αυτόματο κατασκευάστηκε από τον von Neumann. Αποτελούνταν από ένα δισδιάστατο τετραγωνικό πλέγμα στο οποίο ήταν τοποθετημένες οι διάφορες κυψέλες, κάθε μία από τις οποίες θα μπορούσε να βρίσκεται σε μία από 29 διαφορετικές πιθανές καταστάσεις. Ο κανόνας μετάβασης λάμβανε υπόψη του την τρέχουσα κατάσταση της κυψέλης, στην οποία θα εφαρμοζόταν, συν την κατάσταση των τεσσάρων κοντινότερων κυψελών (πάνω, κάτω, δεξιά, αριστερά). Παρόλο που το συνολικό σύστημα του von Neumann ήταν



εξαιρετικά πολύπλοκο, όσον αφορά το αποτέλεσμα, βασιζόταν σε έναν πολύ απλό θεμελιώδη σχεδιασμό. Τελικά ο von Neumann κατάφερε να φτάσει στο στόχο του, φτιάχνοντας ένα διακριτό περιβάλλον κυψελών και εμφυτεύοντας σ' αυτές την ιδιότητα της παραγωγής νέων, ξεχωριστών και, συγχρόνως, όμοιων ατόμων.

Μετά τον von Neumann, κι άλλοι επιστήμονες προσπάθησαν να συνεχίσουν την έρευνα πάνω στα κυψελοειδή αυτόματα. Συγκεκριμένα ο E.F. Codd το 1968 και, πολύ αργότερα, ο C.G. Langton το 1984 και ο J. Bui το 1989 πρότειναν απλούστερους κανόνες κυψελοειδών αυτόματων που οδηγούσαν στο επιθυμητό αποτέλεσμα (την αυτοαναπαραγωγή) χρησιμοποιώντας μόνο 8 καταστάσεις για τις κυψέλες. Σήμερα παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον στην έρευνα πάνω στον τομέα των κυψελοειδών αυτόματων και, γενικότερα, στον τομέα της δημιουργίας τεχνητής ζωής (artificial life). Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η καλύτερη και βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των ζωντανών οργανισμών με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα κυψελοειδή αυτόματα ήταν μία από τις πρώτες προσπάθειες που έγιναν προς αυτή την κατεύθυνση και εξακολουθούν να αποτελούν μία από τις κυριότερες μεθόδους έρευνας.

Στη συνέχεια, γίνεται μία παρουσίαση και ανάλυση των χαρακτηριστικών και όλων των επιμέρους παραγόντων που συναποτελούν ένα κυψελοειδές αυτόματο και ευθύνονται για την συνολική λειτουργία και συμπεριφορά του συστήματος.

### **1.2.3 Περιγραφή - Χαρακτηριστικά**

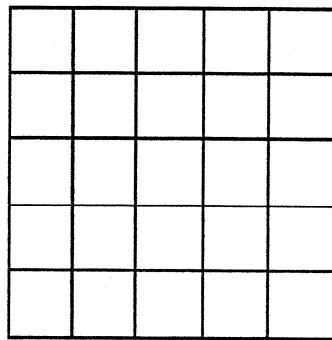
#### **ΚΥΨΕΛΗ**

Το βασικό στοιχείο ενός κυψελοειδούς αυτόματου είναι η κυψέλη (cell). Η κυψέλη είναι ένα είδος στοιχειώδους μνήμης που μπορεί να αποθηκεύει καταστάσεις. Στην πιο απλή περίπτωση, η κάθε κυψέλη μπορεί να πάρει μία τιμή  $p$  από ένα σύνολο ακέραιων αριθμών:  $0, 1, 2, \dots, p-1$ . Στη συνηθέστερη περίπτωση, οι κυψέλες μπορούν να βρίσκονται σε δύο μόνο καταστάσεις  $0$  και  $1$  (δυαδικό περιβάλλον). Στις περιπτώσεις που έχουμε προσομοίωση κάποιου συστήματος κυψελοειδούς αυτόματου στον υπολογιστή, η αναπαράσταση των καταστάσεων  $0$  και  $1$  των κυψελών στην οθόνη γίνεται με τη χρήση μαύρων και άσπρων τετραγώνων. Αυτή η

γραφική αναπαράσταση της εξέλιξης του συστήματος με χρώματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην παρατήρηση και κατανόηση της συνολικής συμπεριφοράς του μοντέλου (Miranda 2001a, σελ. 121, Schatten 2002).

### ΠΛΕΓΜΑ

Οι κυψέλες αυτές βρίσκονται διατεταγμένες σε ένα δίκτυο στο χώρο - ένα πλέγμα (lattice). Η πιο απλή μορφή πλέγματος είναι το μονοδιάστατο, που σημαίνει ότι όλες οι κυψέλες είναι διατεταγμένες πάνω σε μία ευθεία. Τα συνηθέστερα κυψελοειδή αυτόματα είναι μίας ή δύο διαστάσεων. Ένα απλό τετραγωνικό ορθογώνιο (δισδιάστατο) πλέγμα φαίνεται στο σχήμα 1.1:



Σχήμα 1.1: Ένα απλό ορθογώνιο τετραγωνικό (δισδιάστατο) πλέγμα

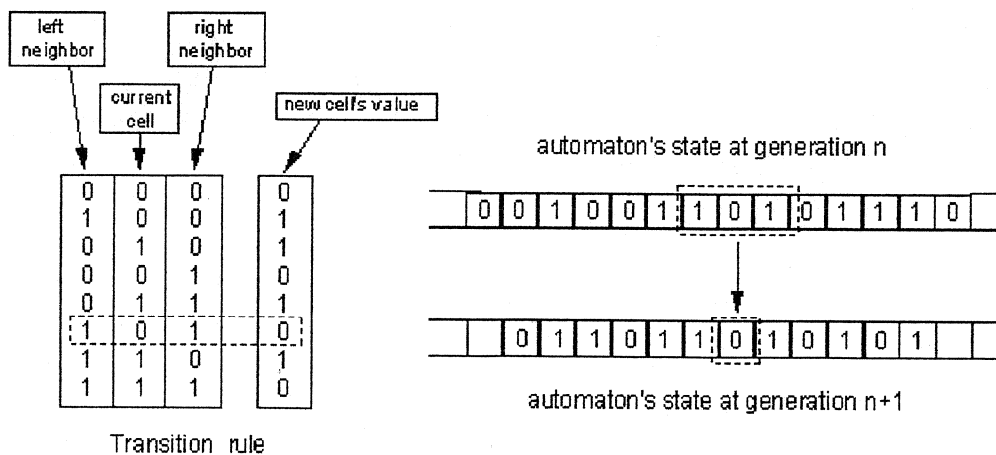
Στην ενότητα 1.2.4 γίνεται μία σύντομη λεπτομερέστερη αναφορά στα δύο αυτά είδη κυψελοειδών αυτόματων. Τα δισδιάστατα πλέγματα, εκτός από τετραγωνικά, μπορεί να είναι και τριγωνικά ή εξαγωνικά. (Gaylord και Nishidate 1996, σελ. 2-3, Schatten 2002).

### ΓΕΙΤΟΝΙΑ

Ένας κανόνας μετάβασης που εφαρμόζεται σε κάποιο κυψελοειδές αυτόματο είναι, εξ ορισμού, τοπικός. Η ενημέρωση των κυψελών απαιτεί μόνο τη γνώση της κατάστασης των γειτονικών κυψελών. Το μέγεθος της γειτονιάς (neighborhood) είναι κάτι το αυθαίρετο και εξαρτάται μόνο από τη βούληση του κατασκευαστή του

κυψελοειδούς αυτόματου. Το μόνο που πρέπει να τηρείται είναι το γεγονός ότι το μέγεθος της γειτονιάς δεν μπορεί να ποικίλει αλλά πρέπει να είναι το ίδιο για όλες τις κυψέλες. Ωστόσο, συνήθως, οι γειτονιές αφορούν μόνο τις διπλανές, παρακείμενες κυψέλες. Εάν η γειτονιά είναι πολύ μεγάλη, η πολυπλοκότητα του κανόνα μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα (Chopard και Droz 1998, σελ. 14). Ο Green (1993) αναφέρει ότι "γειτονιά είναι το σύνολο των κυψελών με το οποίο βρίσκεται σε αλληλεπίδραση η κάθε κυψέλη. Στο πλέγμα, αυτό το σύνολο, συνήθως, περιλαμβάνει τις κοντινότερες στη θεωρούμενη κυψέλη κυψέλες".

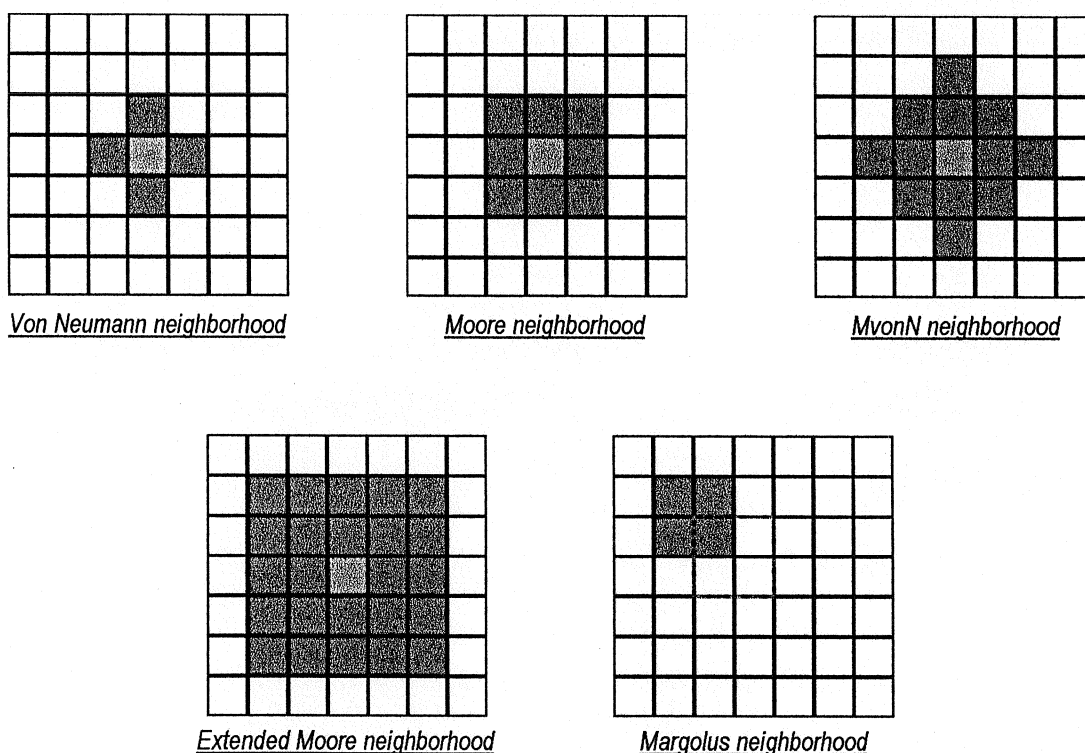
Στα μονοδιάστατα κυψελοειδή αυτόματα, όπου το πλέγμα, ουσιαστικά, είναι μία σειρά από κυψέλες, κάθε κυψέλη συνδέεται με  $n$  γειτονικές κυψέλες σε κάθε της πλευρά, όπου η παράμετρος  $n$  δηλώνει την ακτίνα έκτασης (δηλαδή τον αριθμό των κυψελών σε κάθε πλευρά). Συνεπώς, κάθε κυψέλη έχει συνολικά  $2n+1$  γειτονικές κυψέλες, συμπεριλαμβανομένου του εαυτού της. Το σχήμα 1.2 απεικονίζει ένα μονοδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο (Sipper 1996).



**Σχήμα 1.2:** Ένα μονοδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο. Η θεωρούμενη κυψέλη του σχήματος είναι σε κατάσταση 0 και η ακτίνα  $n$  ισούται με 1 ( $n=1$ ). Συνεπώς, στον καθορισμό της κατάστασής της στο επόμενο χρονικό βήμα, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δύο διπλανές της κυψέλες, σύμφωνα με τον κανόνα μετάβασης (transition rule), που αντιστοιχεί σ' αυτήν την περίπτωση, όπως δείχνει το σχήμα (βλ. σελ. 15 "κανόνες").

Στα δισδιάστατα κυψελοειδή αυτόματα τα πιο συχνά είδη γειτονιών είναι τα εξής (βλ. σχήμα 1.3):

- Von Neumann neighborhood: Αφορά τις τέσσερις κυψέλες που βρίσκονται πάνω, κάτω, δεξιά και αριστερά της θεωρούμενης κυψέλης. Η ακτίνα έκτασης  $v$  σ' αυτήν την περίπτωση είναι ίση με 1 ( $v=1$ ).
- Moore neighborhood: Αποτελεί μία μεγέθυνση της γειτονιάς von Neumann, συμπεριλαμβάνοντας και τις διαγώνιες κυψέλες (συνολικά οκτώ). Και σ' αυτήν την περίπτωση η ακτίνα έκτασης  $v$  είναι ίση με 1 ( $v=1$ ).
- MvonN neighborhood: Αφορά τις εννιά (οκτώ συν μία, η θεωρούμενη) κυψέλες στις οποίες αναφέρεται και η γειτονιά Moore συν τις τέσσερις κοντινότερες σ' αυτές που βρίσκονται πάνω, κάτω, δεξιά και αριστερά.
- Extended Moore neighborhood: Είναι ανάλογη της γειτονιάς Moore με τη μόνη διαφορά ότι λαμβάνει υπόψη της όχι μόνο τις άμεσα παρακείμενες κυψέλες αλλά και τις παρακείμενες αυτών κ.ο.κ. Με άλλα λόγια, η ακτίνα έκτασης  $v$  εδώ ισούται με 2 ή είναι μεγαλύτερη ( $v \geq 2$ ).
- Margolus neighborhood: Αποτελεί μία τελείως διαφορετική προσέγγιση. Ορίζει τμήματα  $2 \times 2$  κυψελών τα οποία, προφανώς, συμπεριλαμβάνουν τέσσερις κυψέλες. Η γειτονιά Margolus βασίζεται στην ιδέα ότι οι κανόνες εξέλιξης κάθε φορά εφαρμόζονται στις κυψέλες κάθε τέτοιου τμήματος ξεχωριστά, ανεξάρτητα από το αν στις κυψέλες αυτές πρόσκεινται άλλες εκτός του θεωρούμενου τμήματος. Κάθε κυψέλη αλλάζει κατάσταση σύμφωνα με έναν κανόνα ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τις τιμές των υπολοίπων κυψελών του τμήματος αυτού. Είναι δυνατό να εφαρμοστεί ένας διαφορετικός κανόνας, ανάλογα με το αν η κυψέλη βρίσκεται στον επάνω-δεξιά, επάνω-αριστερά, κάτω-δεξιά ή κάτω-αριστερά τόπο του θεωρούμενου τμήματος. Έπειτα από κάθε επανάληψη, η διάταξη του πλέγματος, που καθορίζει τα ξεχωριστά "Margolus" τμήματα, μετατοπίζεται μία κυψέλη κάτω-δεξιά, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανταλλαγή πληροφοριών σε όλο το πλέγμα. Προφανώς, η γειτονιά Margolus μπορεί να γενικευτεί και για τμήματα μεγαλύτερων διαστάσεων (Sipper 1996, Gaylord και Nishidate 1996, σελ. 4-5, Chopard και Droz 1998, σελ. 14-15).



Σχήμα 1.3: Είδη γειτονιών

## ΚΑΝΟΝΕΣ

Σύμφωνα με όσα έχουν ειπωθεί μέχρι τώρα, οι διατεταγμένες σε ένα πλέγμα κυψέλες αναπαριστούν μία στατική, αμετάβλητη κατάσταση. Για να μετατραπεί αυτό το σύστημα σε δυναμικό, πρέπει να προστεθούν και να εφαρμοστούν ορισμένοι κανόνες (rules) (βλ. και σχ. 1.2). Αυτοί οι κανόνες καθορίζουν την κατάσταση στην οποία θα βρίσκεται κάθε κυψέλη του πλέγματος στην επόμενη χρονική στιγμή, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση της γειτονιάς της. Δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη συνταγή για τη δημιουργία κανόνων. Σε μερικά κυψελοειδή αυτόματα οι κανόνες μπορούν να εξαρτώνται από τις τιμές των γειτονικών κυψελών, ενώ σε άλλα μπορεί να είναι μία συνάρτηση των τιμών των γειτονικών κυψελών. Τέλος, κάποια κυψελοειδή αυτόματα είναι δυνατό να χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερους κανόνες συγχρόνως, που εφαρμόζονται διαδοχικά (Gaylord και Nishidate 1996, σελ 8, Schatten 2002). Οι κανόνες αυτοί συχνά αναφέρονται ως "κανόνες μετάβασης" ("transition rules") ή "κανόνες εξέλιξης" ("evolution rules").

Ένα παράδειγμα ενός απλού κανόνα μετάβασης είναι ο γνωστός "κανόνας ισοτιμίας" ("parity rule") που προτάθηκε τη δεκαετία του 1970 από τον Edward Fredkin και εφαρμόζεται σε ένα τετραγωνικό δισδιάστατο πλέγμα (Chopard και Droz 1998, σελ. 8). Στο παράρτημα (Π.1 Ο κανόνας ισοτιμίας) της παρούσας εργασίας γίνεται μία σύντομη αναφορά σ' αυτόν τον κανόνα.

## ΟΡΙΑ

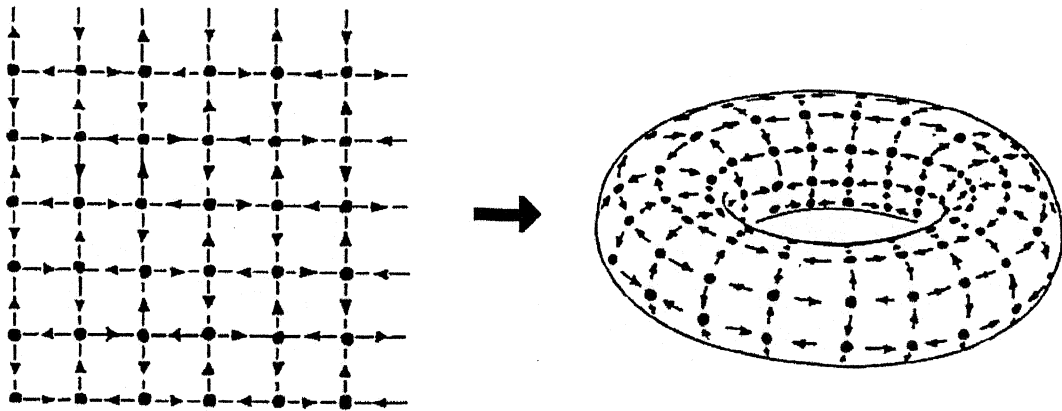
Στην πράξη, όταν εφαρμόζεται ένας κανόνας σε κάποιο κυψελοειδές αυτόματο, δεν είναι εύκολο να χρησιμοποιούνται μη πεπερασμένα πλέγματα. Το σύστημα πρέπει να είναι πεπερασμένο και να έχει όρια (boundaries). Προφανώς, μία κυψέλη που βρίσκεται στο όριο του πλέγματος δεν έχει την ίδια γειτονιά με τις "εσωτερικές" κυψέλες. Για να καθοριστεί η συμπεριφορά αυτών των κυψελών στις περιπτώσεις αυτές, μπορεί να εφαρμοστεί σ' αυτές τις κυψέλες ένας διαφορετικός κανόνας μετάβασης, ο οποίος αναφέρεται στην κατάλληλη, κάθε φορά, γειτονιά.

Ακολουθώντας αυτό το σκεπτικό, είναι δυνατό να οριστούν και διάφοροι τύποι ορίων, ο καθένας από τους οποίους έχει διαφορετικές ιδιότητες και συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι τόποι του πλέγματος μπορούν να κωδικοποιήσουν την πληροφορία για το αν βρίσκονται ή όχι στο όριο του πλέγματος και, με τον τρόπο αυτό, να επιλέγεται κάθε φορά ένας διαφορετικός, κατάλληλος κανόνας. Υπάρχουν, λοιπόν, διάφορα είδη ορίων και, ανάλογα με την περίπτωση, χρησιμοποιείται το καταλληλότερο.

Αντί, όμως, να ισχύει κάποιος διαφορετικός κανόνας στα όρια του πλέγματος, είναι προτιμότερο να επεκταθεί ή, γενικότερα, να αλλάξει μορφή η γειτονιά στους τόπους αυτούς. Έτσι, έχουμε τους εξής τύπους ορίων (βλ και ακόλουθα σχήματα 1.4α και 1.4β):

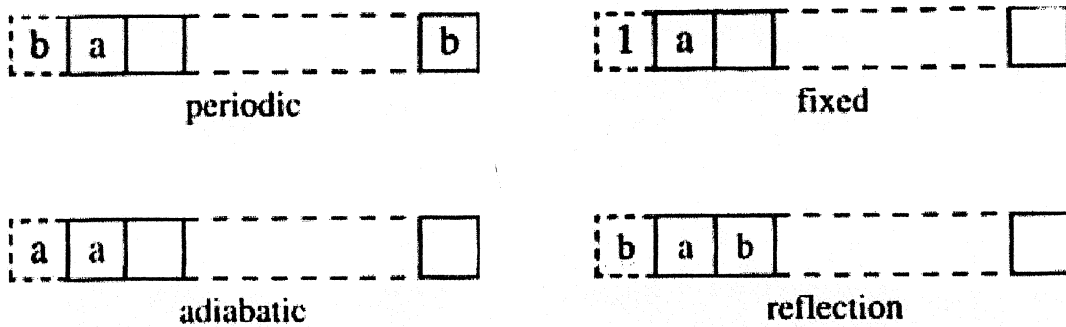
- Περιοδικά (κυκλικά) όρια (Periodic (cyclic) boundaries): Μία πολύ συχνή επιλογή είναι να εφαρμόσουμε περιοδικά (κυκλικά) όρια. Σ' αυτήν την περίπτωση υποτίθεται ότι το πλέγμα έχει τη μορφή δακτυλίου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.4α. Έτσι σε ένα δισδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο, αυτό σημαίνει ότι η πάνω με την κάτω και η αριστερή με την δεξιά άκρη συνδέονται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, σε ένα μοντέλο κυψελοειδούς αυτόματου που περιέχει αντικείμενα τα οποία "κινούνται" στο πλέγμα, η χρήση αυτού του είδους ορίων έχει ως αποτέλεσμα τα αντικείμενα αυτά να βγαίνουν από τη μία άκρη του πλέγματος και

να ξαναπαίρνουν από την άλλη. Τα όρια αυτά χρησιμοποιούνται συχνά στις περιπτώσεις κυψελοειδών αυτόματων που προτυποποιούν μη πεπερασμένα συστήματα (infinite systems).



Σχήμα 1.4α: Στα περιοδικά (κυκλικά) όρια το πλέγμα έχει τη μορφή δακτυλίου

- Προκαθορισμένα/Απορροφητικά/Ανοικτά όρια (Fixed/Absorbing/Open boundaries): Σ' αυτήν την περίπτωση θεωρείται ότι οι κυψέλες, που βρίσκονται στους τόπους αυτούς, λαμβάνουν μία προκαθορισμένη (fixed) τιμή.
- Αδιαβατικά όρια (Adiabatic boundaries): Εδώ, η κυψέλη, που βρίσκεται ακριβώς στο όριο του πλέγματος, παίρνει την τιμή που έχει η ακριβώς προηγούμενη (προτελευταία) κυψέλη.
- Ανακλαστικά/Κλειστά όρια (Reflecting/Closed boundaries): Κατά την εφαρμογή τους, η κυψέλη, που βρίσκεται ακριβώς στο όριο του πλέγματος, παίρνει την τιμή που έχει η ακριβώς αντίθετη γειτονική της προηγούμενης (προτελευταίας) κυψέλης.



Σχήμα 1.4β: Οι τέσσερις τύποι των ορίων στο πλέγμα ενός κυψελοειδούς αυτόματου

Πολλές φορές, το είδος των ορίων που εφαρμόζεται κάθε φορά στο πλέγμα του κυψελοειδούς αυτόματου που χρησιμοποιείται, εξαρτάται από τη φύση του συστήματος που προτυποποιείται. Τέλος, ένας τρόπος να αποφευχθεί ο εκ των προτέρων ορισμός του τύπου των ορίων, που πρέπει να εφαρμοστεί, είναι να προσαρμόζεται το μέγεθος του πλέγματος του κυψελοειδούς αυτόματου σε κάθε χρονικό βήμα, έτσι ώστε να μη συμβαίνει τίποτε το "ενδιαφέρον" κοντά στα όρια (Gaylord και Nishidate 1996, σελ. 7-8, Chopard και Droz 1998, 15-16).

#### **1.2.4 Παραδείγματα Κυψελοειδών Αυτόματων**

Στην ενότητα αυτή γίνεται μία παρουσίαση των τριών ειδών, ως προς τις διαστάσεις, κυψελοειδών αυτόματων που υπάρχουν. Μάλιστα, στις δύο πρώτες περιπτώσεις (μονοδιάστατα και δισδιάστατα κυψελοειδή αυτόματα) δίνεται και από ένα παράδειγμα. Στο τέλος, υπάρχει μία ενδεικτική αναφορά σε μοντέλα κυψελοειδών αυτόματων που ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς. Πολύ καλές αναφορές στο σκέλος αυτό αποτελούν οι μελέτες των Miranda (2001a), και Gaylord και Nishidate (1996), οι οποίες περιέχουν αρκετά και χρήσιμα παραδείγματα.

##### **1.2.4.1 Μονοδιάστατα (Γραμμικά) Κυψελοειδή Αυτόματα (One-Dimensional (Linear) Cellular Automata)**

Ένα μονοδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο αποτελείται από δύο στοιχεία: μία σειρά κυψελών και ένα σύνολο κανόνων. Κάθε κυψέλη μπορεί να βρίσκεται σε μία από ένα σύνολο διαφόρων καταστάσεων. Το μονοδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο δύο καταστάσεων είναι ο απλούστερος τύπος κυψελοειδούς αυτόματου. Οι κανόνες μετάβασης καθορίζουν τον τρόπο αλλαγής ή όχι της κατάστασης των κυψελών. Μαθηματικά, σε ένα μονοδιάστατο σύστημα, στο οποίο οι καταστάσεις των κυψελών αναπαριστώνται από αριθμητικές τιμές, μπορεί κανείς να ορίσει τον κανόνα αυτόν ως το άθροισμα της κατάστασης της κυψέλης και των καταστάσεων των γειτονικών της



κυψελών, που βρίσκονται αριστερά και δεξιά ( $2n+1$ ). Κατά τα άλλα, ισχύουν όλα όσα έχουν ειπωθεί προηγουμένως (Hoke 1996).

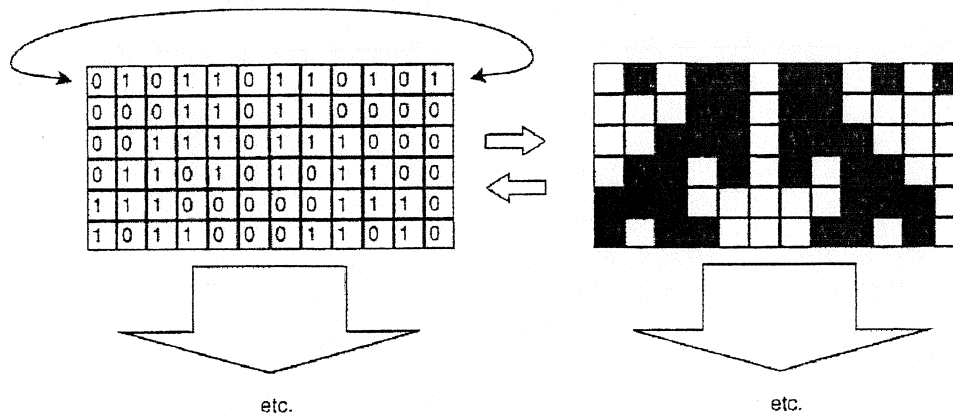
Ένα παράδειγμα μονοδιάστατου κυψελοειδούς αυτόματου φαίνεται στα παρακάτω σχήματα 1.5 και 1.6. Έχουμε μία σειρά 12 κυψελών, καθεμία από τις οποίες μπορεί να πάρει τιμή 0 ή 1, δηλαδή να βρίσκεται σε δύο καταστάσεις, κάτι που στην οθόνη του υπολογιστή αντιστοιχεί σε άσπρο ή μαύρο χρώμα. Από μία τυχαία αρχική διάταξη, σε κάθε χτύπο του ρολογιού, οι τιμές όλων των κυψελών αλλάζουν ταυτόχρονα, από πάνω προς τα κάτω στην οθόνη του υπολογιστή, σύμφωνα με έναν κανόνα μετάβασης που καθορίζει μία νέα τιμή για κάθε κυψέλη. Ο κανόνας μετάβασης που εφαρμόζεται σε κάθε κυψέλη, αφορά την κατάσταση της θεωρούμενης κυψέλης και των δύο διπλανών της. Συνεπώς, εφόσον πρέπει να ληφθούν υπόψη συνολικά οι καταστάσεις τριών κυψελών, έχουμε τις ακόλουθες  $2^3=8$  περιπτώσεις:

- Αν μία κυψέλη ισούται με 0 και οι δύο γειτονικές της ισούνται αμφότερες με 0 ή 1, τότε αυτή η κυψέλη εξακολουθεί να είναι ίση με 0 στο επόμενο χρονικό βήμα.
- Αν μία κυψέλη ισούται με 0 και από τις δύο γειτονικές της η μία ισούται με 1 και η άλλη με 0 (με οποιονδήποτε συνδυασμό), τότε αυτή η κυψέλη αλλάζει κατάσταση ώστε να είναι ίση με 1 στο επόμενο χρονικό βήμα.
- Αν μία κυψέλη ισούται με 1 και από τις δύο γειτονικές της η μία ισούται με 1 και η άλλη με 0 (με οποιονδήποτε συνδυασμό), τότε αυτή η κυψέλη εξακολουθεί να είναι ίση με 1 στο επόμενο χρονικό βήμα.
- Αν μία κυψέλη και οι δύο γειτονικές της βρίσκονται στην ίδια κατάσταση 0 ή 1, τότε αυτή η κυψέλη ισούται με 0 στο επόμενο χρονικό βήμα.

Ο παραπάνω κανόνας μετάβασης μπορεί πολύ απλά να αναπαρασταθεί σχηματικά όπως δείχνει ο παρακάτω πίνακας:

1	if	111	then	0
2	if	110	then	1
3	if	101	then	0
4	if	100	then	1
5	if	011	then	1
6	if	010	then	0
7	if	001	then	1
8	if	000	then	0

Στο παράδειγμα αυτό χρησιμοποιείται ο τύπος των περιοδικών (κυκλικών) ορίων (βλ. σχήμα 1.5) (Miranda 2001a, σελ. 121-122).



**Σχήμα 1.5:** Χρήση των περιοδικών (κυκλικών) ορίων στο παραπάνω παράδειγμα

Στην παρακάτω εικόνα (σχήμα 1.6) φαίνονται αναλυτικότερα οι έξι πρώτες καταστάσεις του αυτόματου:

Frame 1

0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



Frame 2

0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0



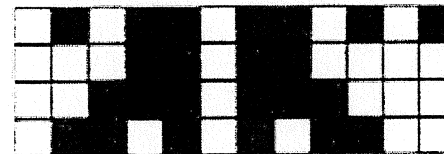
Frame 3

0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0



Frame 4

0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0

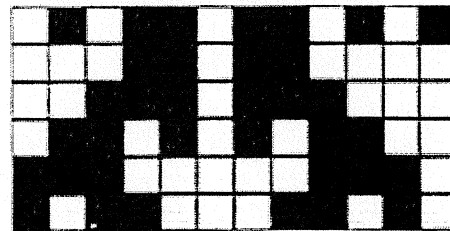
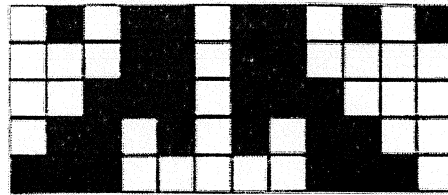


Frame 5

0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0

Frame 6

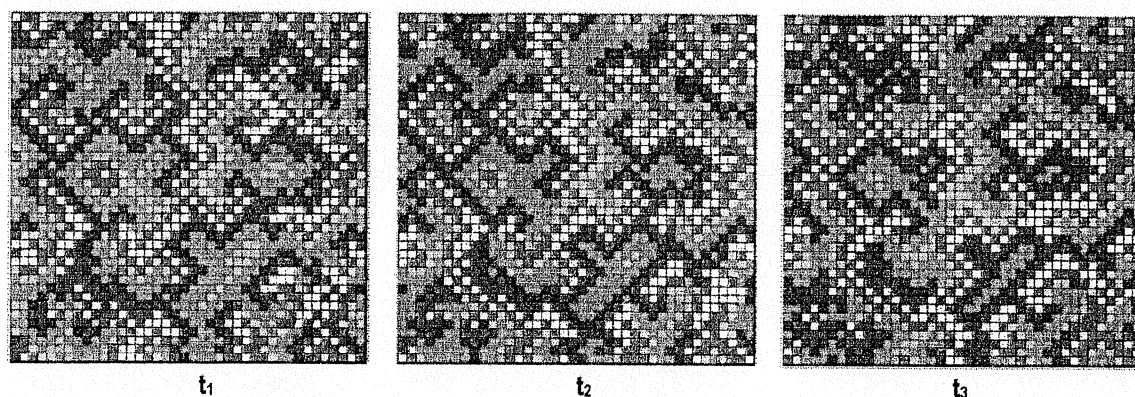
0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0



*Σχήμα 1.6: Οι έξι πρώτες καταστάσεις του αυτόματου*

#### 1.2.4.2 Δισδιάστατα Κυψελοειδή Αυτόματα (Two-Dimensional Cellular Automata)

Εδώ έχουμε να κάνουμε με επίπεδες επιφάνειες - πλέγματα - κυψελών. Συνήθως στα δισδιάστατα κυψελοειδή αυτόματα εφαρμόζονται οι γειτονιές von Neumann και Moore. Από τη στιγμή που σε κάθε χρονικό βήμα αλλάζει ολόκληρη η μορφή της επιφάνειας, αυτός ο τύπος κυψελοειδούς αυτόματου συνήθως παρουσιάζεται στην οθόνη ως μία ακολουθία εικόνων αποτελούμενων από πολλές μικρές κυψέλες, σύμφωνα με τους χτύπους ενός φανταστικού ρολογιού, όπως δείχνει η ακόλουθη εικόνα (σχήμα 1.7):



Σχήμα 1.7: Οι τρεις διαφορετικές καταστάσεις ενός δισδιάστατου κυψελοειδούς αυτόματου κατά τα χρονικά βήματα  $t_1$ ,  $t_2$  και  $t_3$ .

Ένα πολύ γνωστό δισδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο δύο καταστάσεων είναι το "Game of Life", μία σύντομη παρουσίαση του οποίου γίνεται στη συνέχεια.

### GAME OF LIFE

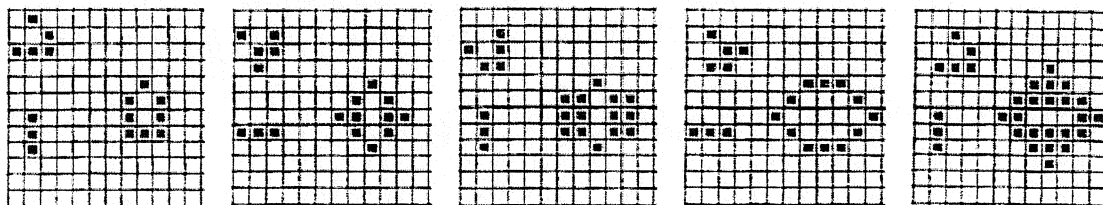
Το Game of Life (GOL) αποτελεί ίσως το υπόδειγμα των κυψελοειδών αυτόματων. Σχεδιάστηκε το 1970 από τον Βρετανό μαθηματικό John Conway και λέγεται ότι ήταν το πρώτο λογισμικό που έτρεξε σε υπολογιστή παράλληλης επεξεργασίας. Παρόλο που την εποχή εκείνη ήταν ήδη αναγνωρισμένη η επιτυχία του αυτόματου του von Neumann, ως μηχανής που θα μπορούσε να προσομοιάσει οποιαδήποτε γνωστή λειτουργία άλλης μηχανής, με τη χρήση ορισμένων κανόνων, ήταν τόσο σύνθετο, καθώς χρησιμοποιούσε χιλιάδες κυψέλες σε μία από τις 29 δυνατές καταστάσεις που προέβλεπε. Ο Conway προσπάθησε να φτάσει στο ίδιο αποτέλεσμα με απλούστερο τρόπο. Το κλειδί σ' αυτήν την προσπάθεια ήταν οι ίδιοι οι κανόνες, που θα υπεδείκνυαν τρεις καταστάσεις - επιβίωση, γέννηση και θάνατος (survival, birth, death).

Στο κυψελοειδές αυτόματο του Conway οι κυψέλες μπορούν να βρίσκονται σε δύο μόνο καταστάσεις, "ζωντανές" ή "νεκρές". Στην οθόνη του υπολογιστή οι ζωντανές κυψέλες απεικονίζονται ως μαύρες και οι νεκρές ως άσπρες. Στη θεωρία, το GOL ορίζεται πάνω σε ένα μη πεπερασμένο τετραγωνικό ορθογώνιο πλέγμα, αλλά για πρακτικούς λόγους θεωρείται ότι αποτελείται από έναν πίνακα κυψελών

διαστάσεων  $m \times n$  με περιοδικά όρια. Οι κανόνες μετάβασης που εφαρμόζονται έχουν αναλυτικά ως εξής:

- Γέννηση (Birth): Μία κυψέλη που είναι νεκρή τη χρονική στιγμή  $t$ , γίνεται ζωντανή τη χρονική στιγμή  $t+1$  αν ακριβώς τρεις από τις γειτονικές της κυψέλες είναι ζωντανές τη χρονική στιγμή  $t$ .
- Θάνατος λόγω συνωστισμού (Death by overcrowding): Μία κυψέλη που είναι ζωντανή τη χρονική στιγμή  $t$ , πεθαίνει τη χρονική στιγμή  $t+1$  αν τέσσερις ή περισσότερες από τις γειτονικές της κυψέλες είναι ζωντανές τη χρονική στιγμή  $t$ .
- Θάνατος λόγω έκθεσης (Death by exposure): Μία κυψέλη που είναι ζωντανή τη χρονική στιγμή  $t$ , πεθαίνει τη χρονική στιγμή  $t+1$  αν έχει μία ή καμία ζωντανή γειτονική κυψέλη τη χρονική στιγμή  $t$ .
- Επιβίωση (Survival): Μία κυψέλη που είναι ζωντανή τη χρονική στιγμή  $t$ , θα παραμείνει ζωντανή τη χρονική στιγμή  $t+1$  μόνο αν έχει δύο ή τρεις ζωντανές γειτονικές κυψέλες τη χρονική στιγμή  $t$  (Miranda 2001a, σελ. 124-125).

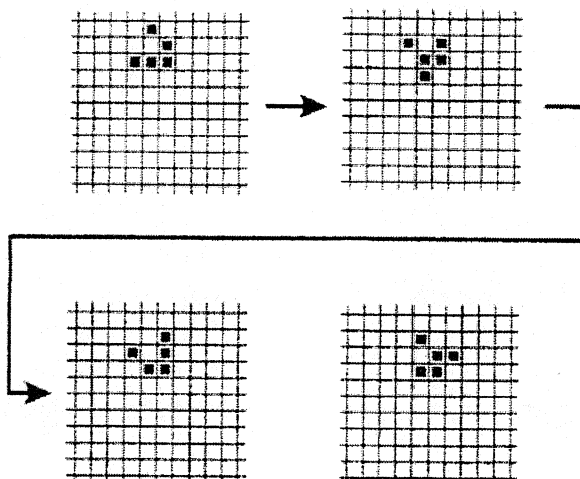
Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.8) απεικονίζονται πέντε διαδοχικά βήματα του αυτόματου Game of Life:



Σχήμα 1.8: Πέντε διαδοχικά βήματα του αυτόματου Game Of Life του Conway

Με την εφαρμογή όλων των παραπάνω, αποδεικνύεται ότι το αυτόματο Game of Life έχει απρόβλεπτη και πολύ πλούσια συμπεριφορά. Όπως, χαρακτηριστικά, αναφέρουν και οι Chopard και Droz (1998, σελ. 3) "...πολύ συχνά μέσα από μία πρωτόγονη πυκνή ομίχλη προκύπτουν πολύπλοκοι σχηματισμοί που εξελίσσονται αναπτύσσοντας διάφορες ικανότητες...". Για παράδειγμα, αντικείμενα, όπως τα λεγόμενα "gliders" (βλ. σχήμα 1.9), έχουν την ιδιότητα να κινούνται στο χώρο πάνω σε μία νοητή τροχιά. Εκτός από τα gliders, υπάρχουν κι άλλοι ιδιαίτεροι σχηματισμοί

(π.χ. three quarter cross, Cheshire cat, cross, puffer trains, blinkers, snakes, ships, aircraft carrier, beacon, billiard table, bhepto, boat, bow tie, centinal, clock, cup, eater, fence post, galaxy, glider gun, large ship, max, pond, pump, toad, zipper), μερικοί από τους οποίους απεικονίζονται στο σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.9: Αντικείμενα, όπως τα λεγόμενα "gliders", έχουν την ιδιότητα να κινούνται στο χώρο πάνω σε μία νοητή τροχιά

*Beacon*



*Bhepto*



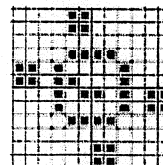
*Blinker*



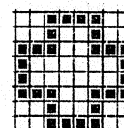
*Cheshire Cat*



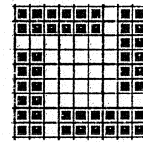
*Clock*



*Cross*



Galaxy

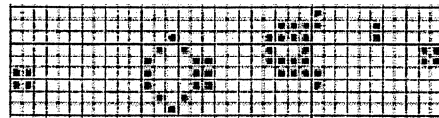


Glider



Σχήμα 1.10: Απεικόνιση ιδιαίτερων σχηματισμών που δημιουργούνται στην οθόνη στο κυψελοειδές αυτόματο Game Of Life

Glider Gun



### 1.2.4.3 Τρισδιάστατα Κυψελοειδή Αυτόματα (Three-Dimensional Cellular Automata)

Τα τρισδιάστατα κυψελοειδή αυτόματα είναι ακόμη πιο εξειδικευμένα και πολύπλοκα. Στην περίπτωση τους, οι κυψέλες έχουν τη μορφή στερεών (σωμάτων) και όχι επιφανειών, μιας και ορίζονται, όπως άλλωστε και όλο το πλέγμα, από τρεις άξονες και όχι από έναν ή δύο, όπως στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, αντίστοιχα. Συνεπώς, οι γειτονιές που λαμβάνονται υπόψη και οι κανόνες εξέλιξης που εφαρμόζονται στις κυψέλες είναι ανάλογου τύπου.

### 1.2.5 Συμπεριφορά των Κυψελοειδών Αυτόματων

Σε ορισμένα συστήματα κυψελοειδών αυτόματων ο ορισμός των διαφορετικών, μεταξύ τους, αρχικών τιμών των κυψελών γίνεται κατά τρόπο τυχαίο. Παρόλο που η κάθε κυψέλη υπόκειται στον ίδιο κανόνα, αυτή η τυχαία αρχική διάταξη αφήνει περιθώρια για ξεχωριστή, κάθε φορά, συμπεριφορά. Σε κάθε περίπτωση, η καθολική συμπεριφορά του κυψελοειδούς αυτόματου ανήκει σε μία από τις εξής τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες (classes), όπως τις όρισε ο S. Wolfram το 1984:

- Μετά από έναν πεπερασμένο αριθμό βημάτων, το σύστημα έχει την τάση να λαμβάνει μία μοναδική, συγκεκριμένη κατάσταση, ανεξάρτητα από την αρχική διάταξη των κυψελών.
- Συχνά δημιουργούνται σχηματισμοί που επαναλαμβάνονται ή είναι σταθεροί.
- Από όλες σχεδόν τις αρχικές διατάξεις κυψελών, το σύστημα οδηγείται σε απεριόδικους - χαοτικούς σχηματισμούς, οι οποίοι όμως φαίνεται να έχουν

συγκεκριμένες τάσεις οργανωμένης συμπεριφοράς, όπως παραλλαγμένες επαναλήψεις. Η κατηγορία αυτή είναι η συνηθέστερη.

- Μετά από έναν πεπερασμένο αριθμό βημάτων, το σύστημα "πεθαίνει" - όλες οι κυψέλες λαμβάνουν την τιμή 0, λόγω της αλληλεπίδρασης και της αλληλεξουδετέρωσής τους. Ωστόσο, είναι πιθανοί ελάχιστοι εναπομείναντες σταθεροί ή περιοδικοί σχηματισμοί. Ένα δημοφιλές παράδειγμα αυτόματου αυτής της κατηγορίας είναι το Game of Life (Roads 1996, σελ. 864-865, Schatten 2002).

### **1.2.6 Εφαρμογές των Κυψελοειδών Αυτόματων εκτός Μουσικής και Παραδείγματα Μοντέλων**

Η αυξανόμενη χρήση των υπολογιστών οδήγησε την ανθρωπότητα σε έναν νέο τρόπο εξέτασης και σύλληψης του κόσμου. Η ίδια η φύση άρχισε να αντιμετωπίζεται σαν μία μεγάλη υπολογιστική μηχανή, τα εξαρτήματα της οποίας αποτελούσαν, τα ίδια, μικρούς υπολογιστές προγραμματισμένους να εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες, τηρώντας αυστηρά ένα σύνολο κανόνων. Τα κυψελοειδή αυτόματα εφαρμόζουν αυτήν την ιδέα παρέχοντας έναν τρόπο σύλληψης του κόσμου μέσω συστημάτων πληθυσμών κυψελών σε αλληλεπίδραση. Με την εφαρμογή κατάλληλων κανόνων σε ένα σύστημα κυψελοειδούς αυτόματου, είναι δυνατό να προσομοιάσουμε ποικίλες μορφές σύνθετης και πολύπλοκης συμπεριφοράς που παρατηρούνται στη φύση (Green 1993).

Τα κυψελοειδή αυτόματα, λοιπόν, έχουν χρησιμοποιηθεί στην προτυποποίηση βιολογικών συστημάτων στο επίπεδο της δραστηριότητας και της αλληλεπίδρασης των κυττάρων (cells) και του σχηματισμού σμηνών κυττάρων (clusters of cells) και πληθυσμών οργανισμών (populations of organisms). Στον τομέα της χημείας, τα κυψελοειδή αυτόματα έχουν χρησιμοποιηθεί στην προτυποποίηση της κινητικής μοριακών συστημάτων (kinetics of molecular systems) και της κρυσταλλικής ανάπτυξης (crystal growth). Στη φυσική, έχουν χρησιμοποιηθεί στη μελέτη δυναμικών συστημάτων (dynamical systems), (π.χ. υδροδυναμική, θερμοδυναμική, ρευστοδυναμική), τόσο σε μικροσκοπικό όσο και σε μακροσκοπικό επίπεδο, και σμηνών γαλαξιών (clustering of galaxies). Στην επιστήμη των υπολογιστών, τα κυψελοειδή αυτόματα έχουν χρησιμοποιηθεί στην προτυποποίηση της παράλληλης



επεξεργασίας (parallel processing) και των μηχανών von Neumann ή των αυτοαναπαραγόμενων μηχανών (self-reproducing machines). Μία μηχανή κυψελοειδούς αυτόματου θα μπορούσε να επονομαστεί "συνθετητής κόσμων" (Rietman 1993, σελ. 167).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα μοντέλων κυψελοειδών αυτόματων, που έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορους επιστημονικούς τομείς για την προτυποποίηση συστημάτων.

### **1.2.6.1 Παραδείγματα Μοντέλων Κυψελοειδών Αυτόματων**

- Στερεοποίηση (Solidification): Οι Liu και Goldenfeld το 1990 δημιούργησαν ένα ντετερμινιστικό κυψελοειδές αυτόματο για να μοντελοποιήσουν την κρυσταλλική ανάπτυξη.
- Νιφάδες χιονιού (Snowflakes): Ο N.H. Packard το 1986 χρησιμοποίησε ένα κυψελοειδές αυτόματο εξαγωνικού πλέγματος με σκοπό να προσομοιάσει το σχήμα και τη δομή των νιφάδων χιονιού υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες.
- Αλληλεπιδρώντες τυχαίοι βηματιστές (Interacting random walkers): Πολλές, προφανώς ανόμοιες, διαδικασίες στη φύση έχουν μοντελοποιηθεί με το φαινόμενο των τυχαίων βηματιστών, κατά το οποίο ένα ή περισσότερα αντικείμενα κινούνται στο χώρο κάνοντας βήματα σε τυχαία επιλεγμένες κατευθύνσεις.
- Μέτωπα διάχυσης και βαθμιαία διήθηση σε επιφάνειες συνεπαφής (Interfacial diffusion fronts and gradient percolation): Όταν δύο υλικά έρχονται σε επαφή δημιουργείται μεταξύ τους ένα μέτωπο διάχυσης και μετάδοσης (π.χ. δυνάμεις συνάφειας, πεδία δυνάμεων, μεταφορά θερμότητας, ηλεκτρική αγωγιμότητα), με αποτέλεσμα το σχηματισμό συμπλεγμάτων που περιέχουν στοιχεία και από τα δύο υλικά. Το φαινόμενο αυτό έχει μοντελοποιηθεί με συστήματα κυψελοειδών αυτομάτων.
- Συνένωση (Coalescence): Η συνένωση διαφορετικών σωμάτων σε ένα (π.χ. η τάση ζώων, όπως τα ψάρια, να συγκεντρώνονται σε ομάδες, ο πολυμερισμός χημικών ενώσεων, ο σχηματισμός σταγονιδίων στα σημεία εναπόθεσης ατμού, τα

ατμοσφαιρικά στρώματα σύννεφων, ομίχλης και ατμοσφαιρικής ρύπανσης) έχει προσομοιαστεί κι αυτή με συστήματα κυψελοειδών αυτόματων.

- Προσρόφηση - Αποπροσρόφηση (Adsorption - Desorption): Το 1988 οι Dickman και Burschka, με το επονομαζόμενο "A model" κυψελοειδές αυτόματο, προσπάθησαν να μιμηθούν το φαινόμενο της προσρόφησης - αποπροσρόφησης που παρατηρείται σε δυναμικά μοντέλα με ενδιαφέρουσα μη ισορροπημένη συμπεριφορά σε καταστάσεις μετάβασης (π.χ. κατά τη διάρκεια εκπομπής ηλεκτρονίων στην ετερογενή κατάλυση).
- Δραστηριότητα αποικίας μυρμηγκιών (Ant colony activity): Οι B. Goodwin και D. Gordon το 1994 και 1995, αντίστοιχα, προσομοίωσαν τη συμπεριφορά και την οργάνωση αποικιών μυρμηγκιών μέσω ενός κυψελοειδούς αυτόματου, θέλοντας να δείξουν ότι, ενώ ένα μυρμηγκι μόνο του δεν είναι ποτέ ικανό να εκτελέσει ούτε την πιο απλή αποστολή, μία ομάδα/αποικία μυρμηγκιών παρουσιάζει κοινωνική δομή και οργάνωση, μέχρι κάποιο συγκεκριμένο βαθμό.
- Οικοσυστήματα θηρευτών - θηραμάτων (Predator - pray ecosystems): Το 1984, με το κυψελοειδές αυτόμάτό του "Wa-Tor", ο A.K. Dewdney δημιούργησε ένα τεχνητό οικοσύστημα κατοικούμενο από δύο είδη οργανισμών (θηρευτής και θήραμα), τα οποία προσπαθούσαν να επιβιώσουν.
- Μεταδοτική επίδραση σε διεγέρσιμα μέσα (Contagion in excitable media): Ο Schonfisch το 1995, με το ντετερμινιστικό επιδημικό κυψελοειδές αυτόμάτό του, προσομοίωσε την εξάπλωση και μετάδοση ασθενειών μεταξύ οργανισμών, τον σχηματισμό αστέρων σε σπειροειδείς γαλαξίες, τις εξελισσόμενες διαδικασίες κατά τις χημικές αντιδράσεις, τη συστολή του καρδιακού ιστού και άλλα παρόμοια φυσικά, χημικά, βιολογικά και κοινωνικά φαινόμενα.
- Στοχαστική πυρκαγιά σε δάσος (Stochastic forest fire): Οι Dossel και Schwabl το 1994 προσομοίωσαν την εμφάνιση και εξάπλωση πυρκαγιάς σε δάση.
- Εξέλιξη της συνεργασίας και το παιχνίδι διλήμματος φυλακισμένου σε κάποιον χώρο (The evolution of cooperation and the spatial prisoner's dilemma game): Το 1992-95 οι M.A. Nowak και R.M. May χρησιμοποίησαν ένα κυψελοειδές αυτόματο για την προτυποποίηση του είδους, της φύσης και της εξέλιξης της συνεργασίας μεταξύ φυλακισμένων ατόμων με σκοπό την εκπόνηση σχεδίου απόδρασης από το χώρο της φυλάκισής τους αλλά και την επιβίωσή τους. (Gaylord και Nishidate 1996, σελ. 49-183)

## 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο

---

### Εφαρμογές Κυψελοειδών Αυτόματων στη Μουσική

**Σ**το κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι εφαρμογές που είναι δυνατό να έχει το σύστημα των κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική. Αρχικά, γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή στην αλγοριθμική και computer μουσική, καθώς τα συστήματα των κυψελοειδών αυτόματων βασίζονται στη χρήση αλγορίθμων και, κατά την διαδικασία σύνθεσης της μουσικής μέσω των κυψελοειδών αυτόματων, χρησιμοποιείται, συνήθως, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής. Παράλληλα, αναφέρονται και συγκεκριμένα παραδείγματα, που αφορούν συνθέτες ή/και έργα. Στις επόμενες

ενότητες παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές υλοποίησης της εφαρμογής των κυψελοειδών αυτόματων στη διαδικασία σύνθεσης μουσικής σε διάφορα στάδια. Μάλιστα κάποιες από αυτές έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στη σύνθεση μουσικών έργων. Τέλος, εκτίθενται ορισμένα λογισμικά υπολογιστή τα οποία αποτελούν την πρακτική εφαρμογή των όσων ειπώθηκαν στις προηγούμενες ενότητες και επιτρέπουν μία πιο ολοκληρωμένη και σαφή κατανόηση του θέματος.

## **2.1 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή Αλγοριθμικής και Computer Μουσικής (Algorithmic - Computer Music)**

Η μουσική αναφέρεται, γενικά, ως μία μορφή καλλιτεχνικής οργάνωσης του ήχου και έκφρασης των συναισθημάτων, μέσω αυτού. Είναι παραδεκτό, όμως, ότι η "αιτία" παίζει σημαντικό ρόλο στην ύπαρξη, στη σύνθεση και στην εξέλιξη της μουσικής. Για παράδειγμα, η ικανότητα αναγνώρισης και αναπαραγωγής μοτίβων και δομικών στοιχείων σε ένα μουσικό έργο απαιτεί ορισμένους πολύπλοκους μηχανισμούς της ανθρώπινης μνήμης, όπως συνειδητή επεξεργασία ιδεών και υποσυνείδητη πρόσβαση σε εκατομμύρια νευρολογικών δεσμών συνδεδεμένων μεταξύ τους (Miranda 2001a, εισαγωγή).

Αυτή η τάση κατανόησης και αναπαραγωγής της μουσικής οδήγησε την ανθρωπότητα από πολύ νωρίς στην προσπάθεια συστηματοποίησής της. Δεν ήταν λίγες οι φορές, μάλιστα, που τα μαθηματικά και ορισμένες τυποποιημένες (formal) διαδικασίες έπαιζαν πρωταρχικό ρόλο στην προσπάθεια αυτή. Φτάνοντας στη σημερινή εποχή, η χρήση των μαθηματικών και η εφαρμογή τους στην επιστήμη της μουσικής και της μουσικολογίας, γενικότερα, γίνεται συχνότατα με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών (Xenakis 1992, σελ. 132).

Επιχειρώντας μία πρώτη σύντομη ιστορική αναδρομή αυτού του γεγονότος, θα μπορούσαμε να ξεκινήσουμε από τον Πυθαγόρα. Μόλις τον 6ο-5ο π.Χ. αιώνα, λοιπόν, ο Πυθαγόρας στην Αρχαία Ελλάδα εξέφρασε τα μουσικά διαστήματα με

μαθηματικούς λόγους\*. Μάλιστα, τα αποτελέσματα της μεθόδου του τηρούνται αυστηρά και χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα.

Παρόμοιες διαδικασίες, προερχόμενες από τα μαθηματικά, έχουν χρησιμοποιηθεί σε όλη τη γνωστή ιστορία της ανθρωπότητας, κυρίως για τη σύνθεση της μουσικής. Μάλιστα ο δανεισμός μεθόδων και συστημάτων οργάνωσης υλικού και εννοιών από εξωμουσικούς τομείς, είχε γίνει πολύ συνήθης από τον Μεσαίωνα ακόμη. Η λεγόμενη "αυτοματοποιημένη" σύνθεση μουσικής (automated music composition) έγκειται στην χρήση και εφαρμογή ορισμένων τυποποιημένων διαδικασιών με τη μικρότερη δυνατή ανθρώπινη παρέμβαση. Πολύ σαφή παραδείγματα παρουσιάζονται στις μελέτες των Salzman (1988), Manning (1989), Roads (1996) και Maurer (1999).

Συνεχίζοντας αυτήν την ιστορική αναδρομή, θα λέγαμε ότι ένα από τα καλύτερα παραδείγματα "αυτοματοποιημένης" σύνθεσης μουσικής χρονολογείται γύρω στο 1026 μ.Χ., όταν ο Guido d' Arezzo ανέπτυξε μία τεχνική σύνθεσης μελωδίας με σκοπό την προσαρμογή της σε κείμενο (Roads 1996, σελ. 822-823). Αντιστοίχισε ένα τονικό ύψος σε κάθε φωνήεν, οπότε η μελωδία άλλαζε σύμφωνα με το φωνητικό περιεχόμενο του κειμένου.

Αυτή η προσέγγιση της μουσικής από τον Guido d' Arezzo, ουσιαστικά ήταν μία υπόνοια εφαρμογής αλγορίθμου ως αυτοματοποιημένης διαδικασίας παραγωγής μουσικής. Ο όρος "αλγόριθμος" (βλ. γλωσσάρι) προέρχεται από την επιστήμη των υπολογιστών και της πληροφορικής. Ωστόσο, η λεγόμενη "αλγοριθμική μουσική" σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί υποσύνολο της computer music, καθώς ο υπολογισμός (computation) δεν είναι απαραίτητο συστατικό ενός αλγορίθμου (Supper 2001). Η αλγοριθμική μουσική αναφέρεται σε μία μέθοδο μουσικής σύνθεσης, η οποία χρησιμοποιεί συγκεκριμένες διαδικασίες που απαιτούν την όσο το δυνατό μικρότερη ανθρώπινη παρέμβαση (Alpern 1995). Η χρήση των υπολογιστών συντελεί απλά και μόνο στην αύξηση της ταχύτητας επεξεργασίας κάποιων δεδομένων.

Μετά τον Guido d' Arezzo και μέχρι τη σημερινή εποχή, υπάρχουν αναρίθμητα παραδείγματα συστηματοποίησης της μουσικής, με σκοπό τη σύνθεσή της, που

---

\* Ωστόσο, ένα μεγάλο μέρος της αποδιδόμενης σ' αυτόν διδασκαλίας, ιδιαίτερα ο μαθηματικός υπολογισμός των διαστημάτων, οφείλεται με βεβαιότητα σε μεταγενέστερους εκπροσώπους της σχολής του, τους λεγόμενους "Πυθαγόρειους" (Γιάννου 1994, σελ. 60).

αποτελούν ανεξάρτητες αλγοριθμικές διαδικασίες, είτε αφορούν τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή είτε όχι. Μερικά από αυτά αναφέρονται παρακάτω.

Την περίοδο 1300-1450 πολλοί συνθέτες - ανάμεσά τους και οι Guillaume de Machaut, Guillaume Dufay, John Dunstable - χρησιμοποίησαν επαναλαμβανόμενες ρυθμικές σειρές ως τυποποιημένη διαδικασία σύνθεσης (ισορυθμικά μοτέτα). Ο Guillaume Dufay (ca1400-1474), μάλιστα, εφάρμοσε την αναλογία της χρυσής τομής (περίπου 1:1,618...) στη δόμηση ορισμένων συνθέσεών του και αναζήτησε τα tempi των διαφόρων μερών ενός μοτέτου του στις διαστάσεις ενός καθεδρικού ναού της Φλωρεντίας (Roads 1996, σελ. 823, Järveläinen 2000, σελ. 1).

Το rondeau, η chasse/caccia, ο κανόνας, η φούγκα και οι παραλλαγές στην παραδοσιακή δυτική μουσική είναι όλα παραδείγματα περισσότερο ή λιγότερο τυποποιημένων μουσικών διαδικασιών. Όμως, το πιο διάσημο, ίσως, ιστορικά, παράδειγμα αλγοριθμικής σύνθεσης είναι το "Musikalisches Würfelspiel" του W.A. Mozart - ένα παιχνίδι με ζάρια, με σκοπό την κατασκευή μενουέτων μέσω ενός συνόλου προγεγραμμένων μουσικών μέτρων. Κάθε ζαριά αντιπροσώπευε ένα συγκεκριμένο μέτρο, οπότε μετά τη ρίψη οχτώ ζαριών, ήταν έτοιμη μία μουσική φράση (περίοδος).

Το 1822 στη Βοστώνη αμερικανοί επιχειρηματίες κυκλοφόρησαν στην αγορά το "Kaleidoacousticon system" - μία συσκευή που ήταν ικανή να εκτελεί εντολές μέσω καρτών με οδηγίες και μπορούσε να συνθέσει πάνω από 214 εκατομμύρια βάλς. Το 1865, ένα παρόμοιο εγχείρημα, το ονομαζόμενο "Quadrille Melodist", μπορούσε να παρέχει σε κάποιον πιανίστα 428 εκατομμύρια καντρίλια (Roads 1996, σελ. 823-825).

Τον εικοστό αιώνα, η εξάπλωση της επιστημονικής σκέψης οδήγησε στην εισαγωγή πολυπλοκότερων μαθηματικών διαδικασιών στη μουσική σύνθεση. Πλέον, οποιαδήποτε μαθηματική αρχή θα μπορούσε να αποτελεί μέσο δημιουργίας και καθορισμού μουσικών παραμέτρων και δεδομένων. Παράλληλα, άρχισαν να χρησιμοποιούνται σειραϊκές και στοχαστικές έννοιες, με τις οποίες οποιοσδήποτε μουσικός παράγοντας μπορούσε να καθοριστεί σύμφωνα με τους ιδιαίτερους κανόνες που διείπαν αυτές τις μαθηματικές αρχές. Η δωδεκάφθογγη τεχνική και ο σειραϊσμός (Arnold Schönberg (1874-1951), Anton Webern (1883-1945), Alban Berg (1885-1935)), που επινοήθηκαν και εφαρμόστηκαν από τη δεκαετία του '30 και μετά, αποτέλεσαν κινήσεις προσπάθειας ελέγχου όλων των μουσικών παραμέτρων με σκοπό την αφαιρετικότητα και τυποποίηση της μουσικής (Λεξικό μουσικής της Οξφόρδης 1985).

Ο Olivier Messiaen (1908-1992) χρησιμοποίησε στη μουσική του την έννοια της σειράς, εφαρμόζοντάς την στο ρυθμό, στη διαδοχή συγχορδιών, τονικών υψών και διαστημάτων. Στο έργο του για πιάνο "Τρόπος αξιών και εντάσεων" ("Mode de valeurs et d' intensites") ο Messiaen χρησιμοποιεί 36 σειρές τονικών υψών, 24 διαρκειών, 12 κρούσεων και 7 εντάσεων στις οποίες το κάθε τονικό ύψος έχει συγκεκριμένο ρυθμικό σχήμα, δυναμική και άρθρωση. Πολύ γνωστές είναι και οι μελέτες του για τους "τρόπους πεπερασμένων μεταθέσεων". Επίσης, ο Messiaen χρησιμοποίησε σειρές που βασίζονταν στους "πρώτους αριθμούς" (Mauger 1999, Ξενάκης 2001, σελ. 36).

Ο Pierre Boulez (γ. 1925) εφάρμοσε τη σειραϊκή τεχνική σε όλες τις μουσικές παραμέτρους τηρώντας με πολύ αυστηρό τρόπο τους κανόνες που θέσπισε ο ίδιος.

Ο John Cage (1912-1992) πειραματίστηκε με την αοριστία και με το "τυχαίο". Η εκτέλεσή του έργου του "Reunion" πραγματοποιείται παίζοντας σκάκι σε μία σκακιέρα, η οποία είναι εφοδιασμένη με ένα φωτοευαίσθητο όργανο που, ανάλογα με τις κινήσεις των παικτών, παράγει ήχους, οπότε κάθε εκτέλεση του κομματιού είναι διαφορετική και μοναδική. Επίσης, ο Cage χρησιμοποίησε φυσικά φαινόμενα για να συνθέσει μουσική. Το έργο του "Atlas Eclipticalis" (1961) βασίζεται σε αστρονομικούς χάρτες (Alpern 1995). Ο Cage ήταν από τους πρώτους που εκμεταλλεύτηκαν τα πλεονεκτήματα της χρήσης της μαγνητικής ταινίας στην αποθήκευση και αναπαραγωγή του ήχου (Manning 1985, σελ. 86).

Από τα τέλη της δεκαετίας του '50 και μετά, η εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, παρόλο που εκείνη την εποχή ακόμη ήταν σπάνιοι, αποτέλεσε μία ισχυρή βοήθεια σ' αυτήν την τάση συστηματοποίησης και τυποποίησης της μουσικής.

Ο Lejaren Hiller (1924-1992) είναι ο πρώτος συνθέτης στην ιστορία που χρησιμοποίησε ηλεκτρονικό υπολογιστή στην αλγοριθμική σύνθεση (Roads 1996, σελ. 830). Το διάσημο έργο του "The Illiac String Quartet" είναι το πρώτο μουσικό έργο στην ιστορία, συντεθειμένο αποκλειστικά από υπολογιστή.

Ο Pierre Schaeffer (γ. 1910) άρχισε τα πειράματα το 1948 με συνθέσεις βασισμένες σε συναρμολογήσεις προηχογραφημένων ήχων. Γι' αυτές επινόησε τον όρο "musique concrète" ("συγκεκριμένη μουσική") (Λεξικό μουσικής της Οξφόρδης 1985).

Ο Ιάννης Ξενάκης (1922-2000) χρησιμοποίησε τους υπολογιστές κυρίως λόγω των δυνατοτήτων που προσέφεραν, εξαιτίας του ελάχιστου απαιτούμενου χρόνου

επεξεργασίας δεδομένων και εξαγωγής αποτελεσμάτων. Στις αλγοριθμικές συνθέσεις του "Atrées" (1962) και "Morsima-Amorsima" (1978), ο υπολογιστής χρησιμοποιείται μόνο ως μέσο παραγωγής στοχαστικών δεδομένων (Alpern 1995). Επίσης, πολλά άλλα έργα του I. Ξενάκη συντέθηκαν μέσω και της χρήσης αλγοριθμικών διαδικασιών, π.χ. "Analogique A" και "Analogique B" (1958-9), "Syrmos" (1959), "Pithoprakta" (1955-56), "Horos" (1986), "Ata", "N'Shima", "Achorripsis" (1956-57), "La Légende d' Eer" (Ξενάκης 1992, Alpern 1995, Maurer 1999, Supper 2001). Ο Ξενάκης, γενικά, εφάρμοσε πολλές και διάφορες μαθηματικές έννοιες και αρχές (π.χ. στατιστική, θεωρία πιθανοτήτων, αρχές απροσδιοριστίας, μαθηματικά των μεγάλων αριθμών, θεωρία των ομάδων, θεωρία των παιγνίων) στη σύνθεση των έργων του. Μάλιστα, από το "νόμο των μεγάλων αριθμών\*", που διατύπωσε το 18ο αιώνα ο Ελβετός μαθηματικός Jacques Bernoulli, δανείστηκε το επίθετο "στοχαστικός" για να χαρακτηρίσει τη μουσική του (Λαπιδάκης 2002).

Ο Karlheinz Stockhausen (γ. 1928) χρησιμοποίησε τους υπολογιστές στη σύνθεση ήχου αλλά και στην επεξεργασία ηχογραφημένου υλικού. Πειραματίστηκε με τη χρήση ηλεκτρικών γεννητριών ήχου και συνέθεσε πολλά έργα για μαγνητοταινία (π.χ. "Gesang Jünglinge" (1955-56), "Telemusik" (1966)). Επίσης, εφάρμοσε στη μουσική του σειραϊκές και στοχαστικές τεχνικές (Λεξικό μουσικής της Οξφόρδης 1985). Σημαντικό χαρακτηριστικό στοιχείο, που δηλώνει και την αντίληψη που είχε για τη μουσική, είναι η άποψή του ότι "η μουσική αποτελείται από ιεραρχικές σχέσεις (ordnungsverhältnisse, order-relationships) στον χρόνο" (Λαπιδάκης 2002).

Από τη δεκαετία του '50 και μετά, πολλοί άλλοι συνθέτες (Γιάννης Χρήστου, Ανέστης Λογοθέτης, Larry Austin ("Canadian Coastline" (1980)), Pierre Barbaud, Rick Bidlack, Tommaso Bolognesi, Herbert Brün, Charles Dodge ("The Earth's Magnetic Field" (1970)), James Harley, Kevin Jones, Leon Kirschner, Gottfried Michael Koenig, Otto Laske, Max Mathews, John Myhill, Gary Lee Nelson, Pauline

---

\* Με απλά λόγια, σύμφωνα με αυτόν τον νόμο, όσες περισσότερες φορές λαμβάνει χώρα ένα γεγονός - όπως, για παράδειγμα, το γύρισμα ενός νομίσματος - τόσο περισσότερο τείνει το αποτέλεσμα προς ένα καθορισμένο και προσδιορίσιμο τέλος/στόχο - στην περίπτωση του νομίσματος το αποτέλεσμα τείνει προς μία ισομερή κατανομή της "κορώνας" και των "γραμμάτων". Ο όρος "στοχαστική μουσική" αναφέρεται στη μουσική στην οποία το ηχητικό υλικό αναπτύσσεται προς κάποιο "στόχο" (Λαπιδάκης 2002).



Oliveros, Ron Pellegrino ("Metabiosis" (1972)), Michel Phillipot ("Composition pour double orchestre" (1960)), Steve Reich, Terry Riley, James Tenney, Rodney Waschka II, Charles Wuorinen κ.ά.) συνέθεσαν μουσική με ή χωρίς τη βοήθεια αλγοριθμικών διαδικασιών και του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Όσον αφορά, συγκεκριμένα, τα κυψελοειδή αυτόματα, που αποτελούν και το κύριο αντικείμενο αυτής της εργασίας, και τη χρήση τους ως αλγοριθμικές διαδικασίες οι οποίες συμβάλλουν στη σύνθεση μουσικής, υπάρχουν πολύ λίγες βιβλιογραφικές αναφορές. Ο σημαντικότερος και γνωστότερος, ίσως, συνθέτης που χρησιμοποίησε συστήματα κυψελοειδών αυτόματων στη σύνθεση των μουσικών έργων του, είναι ο Ιάννης Ξενάκης.

Ο ίδιος, (Xenakis 1992, εισαγωγή) αναφέρει: "Μία ακόμη προσέγγιση στο μυστήριο των ήχων είναι η χρήση των κυψελοειδών αυτόματων, τα οποία έχω εφαρμόσει σε διάφορες οργανικές συνθέσεις τα τελευταία λίγα χρόνια. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί μέσω μίας παρατήρησης που έκανα: οι κλίμακες τονικών υψών (κόσκινα (sieves\*)) αυτομάτως καθιερώνουν ένα είδος συνολικού μουσικού ύφους, μία, κατά κάποιον τρόπο, μακροσκοπική 'σύνθεση' των μουσικών έργων, κάτι σαν ένα 'φάσμα συχνοτήτων, ή επαναλήψεων (iterations) '. Οι εσωτερικές συμμετρίες ή οι ασυμμετρίες τους είναι ο λόγος που συμβαίνει αυτό. Επομένως, μέσω μίας οξυδερκούς λογικο-αισθητικής επιλογής κλιμάκων που δε βασίζονται στο διάστημα της οκτάβας, μπορούμε να πετύχουμε πολύ ενδιαφέρουσες συνηχήσεις (και συγχορδίες) ή μελωδικές διαδοχές που αποδίδουν μεγάλη σημασία και γενικεύουν τονικές, τροπικές ή σειριακές απόψεις. Με βάση αυτή την αρχή των κοσκίνων, τα κυψελοειδή αυτόματα μπορούν να αποδειχθούν χρήσιμα στη αρμονική εξέλιξη (harmonic progressions) που δημιουργεί νέου είδους μείξεις και ομογενοποιήσεις του ηχοχρώματος των οργάνων της ορχήστρας, ως σύνολο. Παραδείγματα αυτής της θέσης μπορούν να βρεθούν σε έργα μου, όπως στα 'Ata', 'Hogros', κ.τ.λ....". Τα έργα "Ata" και "Hogros" συνετέθησαν τα έτη 1987 και 1986, αντίστοιχα.

Εκτός από τον Ιάννη Ξενάκη, ένας άλλος συνθέτης που έχει χρησιμοποιήσει τα κυψελοειδή αυτόματα και αναφέρεται στη σχετική βιβλιογραφία αυτής της εργασίας, είναι ο Eduardo Reck Miranda, ο οποίος έχει κάνει σημαντική έρευνα στον τομέα των κυψελοειδών αυτόματων. Μάλιστα, έχει δημιουργήσει ο ίδιος, είτε μόνος είτε σε

---

\* ("...scales of pitch (sieves) automatically establish a kind of global music style..."): Ο Ιάννης Ξενάκης αποκαλεί "κόσκινα" ("sieves") τις γνωστές, σε όλους μας, κλίμακες.

συνεργασία με άλλους επιστήμονες, λογισμικά υπολογιστή που αποσκοπούν στη σύνθεση ήχου και μουσικής, μέσω της εφαρμογής των κυψελοειδών αυτόματων. Με τη βοήθεια αυτών των προγραμμάτων έχει συνθέσει μουσικά έργα, όπως τα "Entre l'Absurde et le Mystère" (1995), για ορχήστρα δωματίου, "Olivine Trees" (1994) και "Goma Arábica" (1995), που είναι συνθέσεις ηλεκτρακουστικής μουσικής, "Wee Batucada Scotica" (1996), για κουαρτέτο εγχόρδων, "Grain Streams" (1999), για πιάνο και ηλεκτρακουστικούς ήχους (Miranda 2001b). Στο παράρτημα (Π.2) υπάρχει ένα μικρό απόσπασμα της παρτιτούρας του έργου "Wee Batucada Scotica" και του "Grain Streams".

## **2.2 Κυψελοειδή Αυτόματα και Μουσική - Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο 1 είδαμε ότι ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών μεταξύ τους κυψελοειδών αυτόματων και κανόνων μετάβασης έχουν χρησιμοποιηθεί και εφαρμοστεί στην προτυποποίηση συστημάτων σε διάφορους τομείς της επιστήμης, όπως στη φυσική, στη βιολογία, στη χημεία και στις κοινωνικές επιστήμες. Εξαιτίας των οργανωτικών αρχών που τα διέπουν, τα κυψελοειδή αυτόματα έχουν προσελκύσει και το ενδιαφέρον των μουσικοσυνθετών. Ο Miranda (2001a, σελ. 124) χαρακτηριστικά αναφέρει ότι "...από τη στιγμή που τα κυψελοειδή αυτόματα παράγουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων που αφορούν τη μορφή (pattern data) και, θεωρώντας ότι η σύνθεση της μουσικής βασίζεται στην τήρηση, επεξεργασία και διάδοση μορφολογικών σχημάτων (pattern propagation and formal manipulation), δεν μας εκπλήσσει το γεγονός ότι κάποιοι μελετητές πιστεύουν πως τα κυψελοειδή αυτόματα θα μπορούσαν να σχετιστούν με την αναπαράσταση, κατά κάποιο τρόπο, μουσικών παραμέτρων, αποσκοπώντας στην παραγωγή μουσικοσυνθετικού υλικού".

Ο ίδιος επιστήμονας (Miranda), σε πολλές άλλες προσωπικές του εργασίες (βιβλία, ανακοινώσεις σε συνέδρια, δημοσιεύσεις, διατριβές κ.ά.) παρέχει πληθώρα σημαντικών πληροφοριών, σχετικά με τους τρόπους που μπορούν να εφαρμοστούν τα κυψελοειδή αυτόματα στη σύνθεση της μουσικής (βλ. ενότητα Π.3 και βιβλιογραφία).

Η εξελικτική συμπεριφορά των κυψελοειδών αυτομάτων είναι δυνατό να προτυποποιήσει συνθετικές διαδικασίες παραγωγής ήχου ή μουσικών παραμέτρων,

μιας και τόσο τα αυτόματα, όσο και η μουσική είναι διαδικασίες που εξελίσσονται στο χρόνο. Τη μεγαλύτερη προσοχή αποσπούν τα κυψελοειδή αυτόματα που επιδεικνύουν κυκλική συμπεριφορά (cyclic behavior), αυτοοργάνωση (self-organisation) και/ή ιδιότητες διάδοσης σχημάτων (pattern propagation properties). Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη διαισθητική αναλογία μεταξύ των συστατικών μερών ενός αυτόματου και των μουσικών παραμέτρων του ήχου. Έχουν γίνει, όμως, διάφορες προσπάθειες δημιουργίας μιας τέτοιας αντιστοιχίας (mapping), με αποτέλεσμα ένας αλγόριθμος να "μεταφράζει" τις διάφορες καταστάσεις του αυτόματου σε παραμέτρους ελέγχου (συχνά μέσω κώδικα midi) και, τελικά, τα δεδομένα να οδηγούνται σε μία γεννήτρια ήχου.

### 2.3 Τρόποι/Μέθοδοι Εφαρμογής των Κυψελοειδών Αυτόματων στη Μουσική

Τα κυψελοειδή αυτόματα, που εξετάζονται στην εργασία αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί μέσω, πολλές φορές, κατάλληλων λογισμικών στη σύνθεση του ήχου και της μουσικής με διάφορους τρόπους. Υπάρχουν τεχνικές που εφαρμόζουν τις ιδιότητες των κυψελοειδών αυτόματων ποικιλοτρόπως στη μουσική δημιουργία, αντιστοιχίζοντας τα χαρακτηριστικά τους σε διάφορες μουσικές παραμέτρους, ανάλογα με το αποτέλεσμα που επιθυμεί ο δημιουργός. Βεβαίως, πολύ συχνά είναι απαραίτητη και η χρήση συγκεκριμένων λογισμικών, που είναι υπεύθυνα για το είδος αυτής της αντιστοίχισης (mapping) που πραγματοποιείται. Ήδη, στην ενότητα 2.1, είδαμε ότι ορισμένοι συνθέτες χρησιμοποίησαν τα κυψελοειδή αυτόματα στη συνθετική τους δημιουργία.

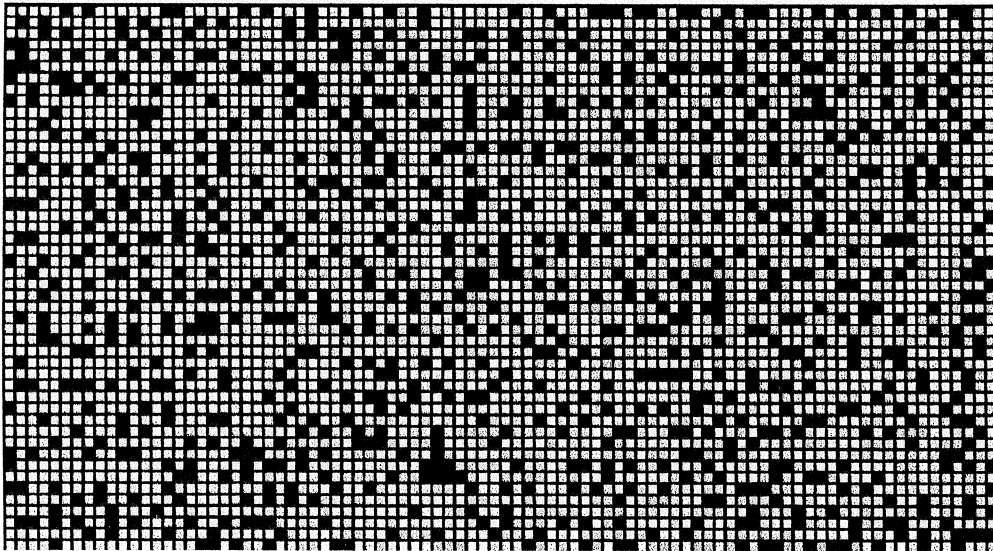
Είναι, λοιπόν, δυνατόν, η χρήση ενός κυψελοειδούς αυτόματου να οδηγεί στην εξαγωγή δεδομένων που καθορίζουν μουσικές παραμέτρους, όπως τονικό ύψος, χρονική διάρκεια, πλάτος, δυναμική κ.ο.κ. Μία τέτοιου είδους χρήση μπορεί να επιστρατευτεί σε διάφορα στάδια της διαδικασίας σύνθεσης. Το αποτέλεσμα, ωστόσο, μπορεί να ποικίλει, καθώς εξαρτάται από το αν η εφαρμογή γίνεται σε μακροδομικό ή μικροδομικό επίπεδο της συνθετικής δημιουργίας. Προφανώς, τα πάντα εξαρτώνται από το αποτέλεσμα που επιθυμεί και θέλει να εξάγει, τελικά, ο δημιουργός.

Σε κάθε περίπτωση, τα δεδομένα που εξάγονται από ένα κυψελοειδές αυτόματο είναι δυνατό να συνεισφέρουν στην παραγωγή μουσικής παρτιτούρας, υποδηλώνοντας νότες (συγκεκριμένα τονικά ύψη με σαφή, ή όχι, χρονική διάρκεια και δυναμική), το όργανο από το οποίο εκτελούνται αυτές κ.τ.λ. Επίσης, η εφαρμογή τους μπορεί να γίνει κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ενεργοποιούνται ταλαντωτές που να παράγουν συγκεκριμένες συχνότητες, καθορίζοντας συγχρόνως, πολλές φορές, και χαρακτηριστικά του παραγόμενου ήχου, όπως τη μορφή της περιβάλλουσάς του ή το πλάτος του, κάτι που, συνολικά, έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του ηχητικού φάσματος. Με άλλα λόγια, τα κυψελοειδή αυτόματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους τομείς, από τη σύνθεση κυματομορφών μέχρι τη σύνθεση ολόκληρων μουσικών έργων. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση των κυψελοειδών αυτόματων έχει ως συνέπεια το παραγόμενο αποτέλεσμα να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του με την πάροδο του χρόνου, έχοντας μία δυναμική εξέλιξη (Roads 1996, σελ. 865).

Ορισμένα παραδείγματα των μεθόδων χρήσης των κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες 2.3.1 - 2.3.4. Επίσης, στις ενότητες 2.4.1 - 2.4.4 αναφέρονται, ενδεικτικά, ορισμένα λογισμικά υπολογιστή τα οποία λειτουργούν εφαρμόζοντας τις τεχνικές αυτές.

### **2.3.1 Χρήση των Κυψελοειδών Αυτόματων στην Παραγωγή Μουσικής Παρτιτούρας**

Η λειτουργία ενός κυψελοειδούς αυτόματου μπορεί, σαφώς, να γίνει πιο εύκολα κατανοητή εάν έχουμε μία γραφική αναπαράσταση του πλέγματος που περιέχει τις κυψέλες. Μάλιστα, όταν χρησιμοποιείται και κάποιο λογισμικό υπολογιστή που να μας προσφέρει την εξέλιξη του αυτόματου με κάποιον άμεσο τρόπο (π.χ. εναλλαγές καρτέ στην οθόνη του υπολογιστή), το αποτέλεσμα είναι πολύ χρήσιμο και εντυπωσιακό. Στην ακόλουθη εικόνα (σχήμα 2.1) φαίνεται μία στιγμιαία κατάσταση ενός δισδιάστατου κυψελοειδούς αυτόματου σε τυχαία χρονική στιγμή  $t$ , έτσι όπως αποτυπώθηκε στην οθόνη του υπολογιστή:



*Σχήμα 2.1: Η κατάσταση ενός κυψελοειδούς αυτόματου σε μία τυχαία χρονική στιγμή  $t$*

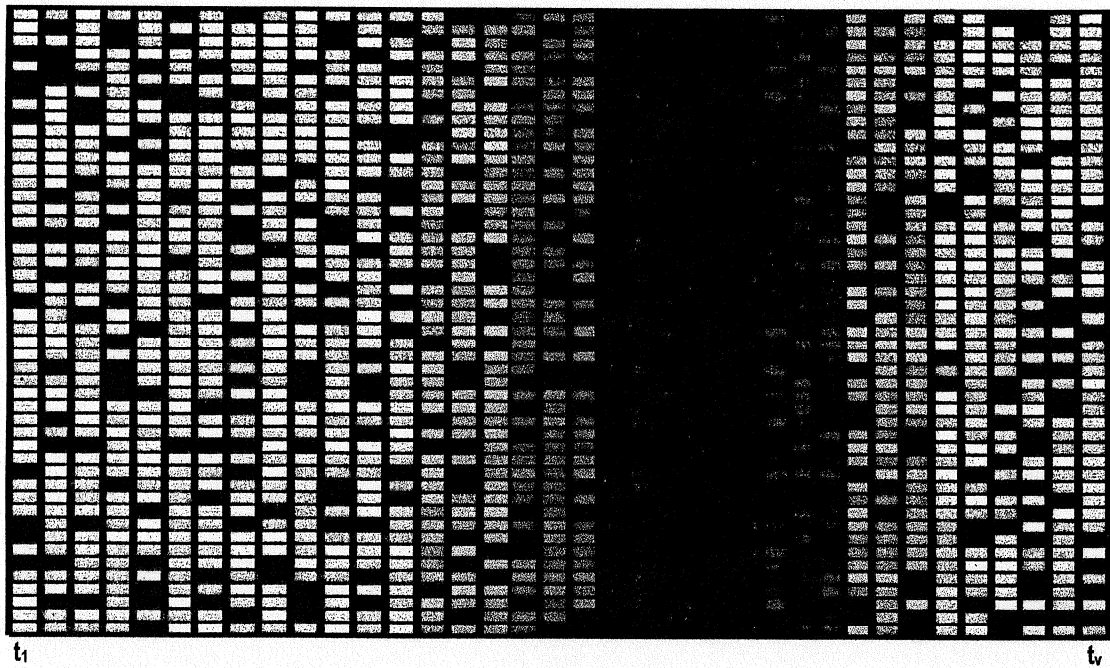
Αυτό που είναι βέβαιο είναι ότι στην εικόνα αυτή η κάθε κυψέλη βρίσκεται σε μία κατάσταση και όλες μαζί δηλώνουν την συνολική κατάσταση του αυτόματου. Έχουμε, λοιπόν, μία γραφική αναπαράσταση καταστάσεων, μέσω συγκεκριμένων σημαδιών-σημείων. Κάτι ανάλογο συμβαίνει στις μουσικές παρτιτούρες, όπου οι νότες και άλλα μουσικά σημεία, που υπακούουν σε ένα σύστημα κανόνων, οι οποίοι αφορούν τη σημειογραφία, αποτελούν τη γραφική αναπαράσταση μουσικών παραμέτρων, όπως τονικό ύψος, διάρκεια, δυναμική, tempo κ.τ.λ.

Το γεγονός αυτό παραπέμπει σε μία αντιστοίχιση (mapping) μεταξύ των γραφικά αναπαριστώμενων κυψελών και των μουσικών παραμέτρων. Συνεπώς, θα μπορούσε να υποτεθεί ότι οι κυψέλες αποτελούν μουσικά σύμβολα, όμοια με τις νότες σε μία μουσική παρτιτούρα, διαφορετική από τις παραδοσιακές παρτιτούρες της δυτικής μουσικής. Η παραπάνω εικόνα, μπορεί να ερμηνευτεί από κάποιους ως μία μουσική παρτιτούρα (Miranda 2001a, σελ. 124).

Ο τρόπος ερμηνείας της θα μπορούσε να ποικίλει. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε κάποιο αυτοτελές έργο, ο εκτελεστής του οποίου θα εκτελούσε με οποιοδήποτε τρόπο, σύμφωνα με τη δική του κρίση, αυτό που έβλεπε μπροστά του. Θα συνέβαινε, δηλαδή, κάτι ανάλογο με αυτό που συμβαίνει στο γνωστό έργο του Earle Brown "Folio" (1952) (βλ. παράρτημα, σχήμα Π.5).

Επίσης, το σχήμα 2.1 θα μπορούσε να απεικονίζει τις διάφορες καταστάσεις ενός μονοδιάστατου κυψελοειδούς αυτόματου. Σ' αυτήν την περίπτωση, κάθε στήλη

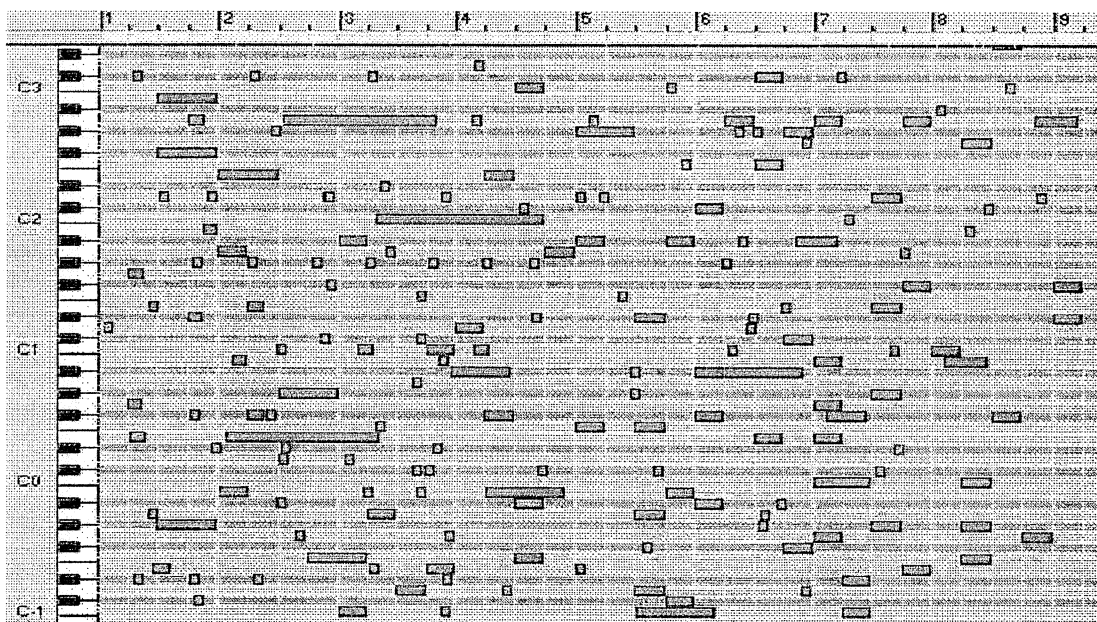
μπορεί να αποτελεί και μία κατάσταση του αυτόματου, από τη χρονική στιγμή  $t_1$  ως τη χρονική στιγμή  $t_n$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.2. Η κάθε κυψέλη μπορεί να βρίσκεται σε μία από επτά πιθανές καταστάσεις, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί ένα χρώμα.



*Σχήμα 2.2: Οι καταστάσεις ενός μονοδιάστατου κυψελοειδούς αυτόματου στις χρονικές στιγμές  $t_1$  έως  $t_n$*

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η εικόνα αυτή θυμίζει, ίσως, το γνωστό σε όλους μας, ριανο-roll (σχήμα 2.3). Η κατάσταση της κάθε κυψέλης αντιστοιχίζεται σε τονικά ύψη και χρονικές διάρκειες.





*Σχήμα 2.3: Οι καταστάσεις των κυψελών αντιστοιχίζονται σε τονικά ύψη και χρονικές διάρκειες, θυμίζοντας ένα piano-roll*

Τα κυψελοειδή αυτόματα, λοιπόν, είναι δυνατόν, μέσω μίας κατάλληλης αντιστοίχισης (mapping), να εξάγουν δεδομένα που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σύνθεση μίας παρτιτούρας. Ο τρόπος, βέβαια, με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί αυτή η αντιστοίχιση εξαρτάται τόσο από τον κατασκευαστή, όσο και από τον χρήστη του αυτόματου. Στη συνέχεια, το αποτέλεσμα, που θα προκύψει από την αντίστοιχιση, μπορεί να "μεταφραστεί" σε παραδοσιακή μορφή παρτιτούρας, ή όχι. Στην ενότητα 2.4.1 δίνεται ένα παράδειγμα για την εφαρμογή των κυψελοειδών αυτόματων στη δημιουργία μουσικής παρτιτούρας, μέσω δύο λογισμικών, του CAMUS και του CAMUS 3D, το οποίο αποτελεί μία τρισδιάστατη έκδοση του πρώτου.

### **2.3.2 Χρήση των Κυψελοειδών Αυτόματων στον Καθορισμό του Ηχητικού Φάσματος**

Αυτή η κατηγορία είναι πολύ ενδιαφέρουσα και σύνθετη, καθώς οι ιδιότητες των κυψελοειδών αυτόματων μπορούν να εφαρμοστούν με πολλούς και διάφορους

τρόπους στον καθορισμό του φάσματος ενός ήχου, με πολύ εντυπωσιακά αποτελέσματα. Το φάσμα του ήχου, όπως είναι γνωστό, αφορά τις εξής παραμέτρους: συχνότητα και πλάτος. Προφανώς, οποιαδήποτε μεταβολή συμβαίνει στο πεδίο ορισμού καθενός από αυτά τα μεγέθη, έχει ως αποτέλεσμα μία αλλαγή στο φάσμα του ήχου.

Με το σκεπτικό αυτό, τα κυψελοειδή αυτόματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να καθορίζουν την εξέλιξη ενός ή περισσότερων από τα μεγέθη που προαναφέρθηκαν. Η αντιστοίχιση (mapping) που θα γίνει εξαρτάται από τον ίδιο του δημιουργό. Σε κάθε περίπτωση όμως, η εξελικτική ιδιότητα που χαρακτηρίζει το σύστημα των κυψελοειδών αυτόματων, έχει ανάλογα αποτελέσματα και στο φάσμα του ήχου.

Απτά παραδείγματα αυτού του τρόπου λειτουργίας των κυψελοειδών αυτόματων αποτελούν δύο λογισμικά, το Virtual Waves 2.1 και το Chaosynth, τα οποία παρουσιάζονται στις ενότητες 2.4.3 και 2.4.4, αντίστοιχα. Το καθένα, βέβαια, χρησιμοποιεί τα κυψελοειδή αυτόματα με διαφορετικό τρόπο, αλλά και τα δύο αποσκοπούν στη διαμόρφωση του φάσματος του παραγόμενου ήχου και στην παραγωγή ήχων με ιδιαίτερο ηχόχρωμα.

### **2.3.3 Τεχνική Ανακυκλούμενου Κυματοπίνακα - Πίνακας Ανάγνωσης Κυψελοειδών Αυτόματων**

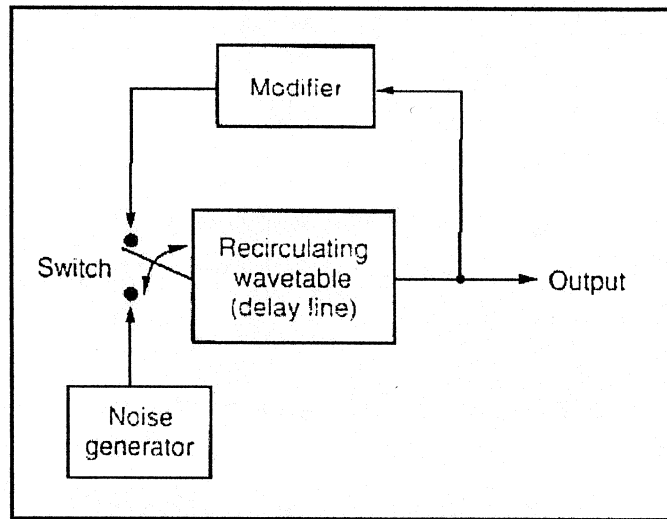
Η τεχνική του ανακυκλούμενου κυματοπίνακα (recycling wavetable) είναι, γενικά, μία από τις μεθόδους σύνθεσης ήχου μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ιδιαίτερων ήχων, το ηχόχρωμα των οποίων έχει κάποια δεδομένη εξέλιξη με την πάροδο του χρόνου. Το αποτέλεσμά, ορισμένες φορές, μοιάζει με τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται οι ήχοι που παράγονται από πραγματικά ακουστικά ή φανταστικά μουσικά όργανα. Καλή πηγή πληροφοριών για την τεχνική του ανακυκλούμενου κυματοπίνακα αποτελεί ο Roads (1996).

Η βασική λειτουργία της τεχνικής αφορά τη χρήση ενός πίνακα ανάγνωσης (lookup table) (βλ. και γλωσσάρι) καθορισμένων διαστάσεων, που συμπληρώνεται από τυχαίες τιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται στον καθορισμό μίας κυματομορφής. Δημιουργούνται, έτσι, σειρές δειγμάτων, τα οποία, καθώς εξέρχονται από τον πίνακα,



μέσω της εξόδου στα δεξιά της κάθε σειράς, υφίστανται επεξεργασία σε μία μονάδα τροποποίησης (modifier) σύμφωνα με κάποιον συγκεκριμένο αλγόριθμο ανάδρασης (feedback algorithm) και το αποτέλεσμα οδηγείται ξανά στον πίνακα, στην είσοδο της θεωρούμενης σειράς. Το σχήμα 2.4 δείχνει την γραφική απεικόνιση της λειτουργίας του.

Στην αρχή κάθε γεγονότος, η είσοδος του πίνακα, μέσω ενός διακόπτη (switch), συνδέεται με μία γεννήτρια θορύβου. Έτσι, ο πίνακας ανάγνωσης συμπληρώνεται με τυχαίες τιμές. Στη συνέχεια, ο διακόπτης κλείνει το ~~σφ~~ βρόχο που σχηματίζεται με τον τροποποιητή (modifier), ο οποίος επεξεργάζεται τις τιμές εξόδου του



πίνακα, εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο ανάδρασης. Αυτός ο αλγόριθμος υπολογίζει το μέσο

**Σχήμα 2.4:** Η γραφική απεικόνιση της λειτουργίας του ανακυκλούμενου κυματοπίνακα

όρο της τρέχουσας τιμής του δείγματος της εξόδου και της προηγούμενης της και εισάγει ξανά τη νέα τιμή στον πίνακα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται εκατοντάδες φορές το δευτερόλεπτο.

Πρόκειται δηλαδή, ουσιαστικά, για ένα σύστημα, το οποίο αποτελείται από μία μονάδα γραμμής υστέρησης (delay line), η οποία λειτουργεί χρησιμοποιώντας μία μονάδα φίλτρων. Το τελικό αποτέλεσμα έγκειται σε έναν ήχο που, από ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, που περιέχει αρχικά, καταλήγει σε λίγες και συγκεκριμένες συχνότητες. Ένα κλασικό παράδειγμα αυτής της τεχνικής είναι η τεχνική Karplus-Strong (Karplus και Strong 1983) (βλ. γλωσσάρι). Το είδος του αλγόριθμου που χρησιμοποιείται καθορίζει και το τελικό αποτέλεσμα (Roads 1996, σελ. 293-294, Miranda 1998, σελ. 95).

Όσον αφορά τη σχέση των κυψελοειδών αυτόματων με την τεχνική του ανακυκλούμενου κυματοπίνακα, αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον πίνακα ανάγνωσης, συμπληρώνοντάς τον με τιμές, οι οποίες δε δηλώνουν τίποτε άλλο παρά την κατάσταση των κυψελών τους. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στον καθορισμό

της κυματομορφής τόσο στο αρχικό στάδιό της (τυχαία διάταξη των κυψελών) όσο και στα επόμενα. Οι Chopard και Droz (1998, σελ. 332) αναφέρουν ότι "όλες οι πιθανές καταστάσεις του κυψελοειδούς αυτόματου είναι προϋπολογισμένες και εμφανίζονται μέσα στον πίνακα ανάγνωσης. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι "νέες" τιμές του σήματος προϋπάρχουν, χωρίς να είναι απαραίτητο να γίνει ο υπολογισμός τους μέσω της μεθόδου που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η χρήση του πίνακα ανάγνωσης κυψελοειδών αυτόματων προσφέρει μία άμεση εφαρμογή της δυναμικής του κυψελοειδούς αυτόματου καθώς, όσο πολύπλοκοι και να είναι οι κανόνες μετάβασης, η εξέλιξη της κατάστασης της κάθε κυψέλης γίνεται απευθείας μέσω της άντλησης τιμών από τον πίνακα ανάγνωσης, που, ουσιαστικά, αποτελεί ένα είδος 'μνήμης". Με άλλα λόγια, δε χρησιμοποιείται ούτε ο αλγόριθμος ανάδρασης ούτε η γεννήτρια θορύβου.

Έτσι, λοιπόν, η συνολική διαδικασία του συστήματος έχει ως εξής: Το σύστημα θεωρεί τη σειρά κυψελών ενός μονοδιάστατου κυψελοειδούς αυτόματου με κυκλικά όρια ως έναν πίνακα ανάγνωσης, στον οποίο κάθε κυψέλη αντιστοιχεί σε μία τιμή. Οι καταστάσεις των κυψελών ενημερώνονται, μέσω της εφαρμογής συγκεκριμένων κανόνων μετάβασης και σύμφωνα με τους κτύπους ενός υποθετικού ρολογιού, και οι νέες τιμές "μεταφράζονται", στη συνέχεια, σε ήχο ή σε άλλα χαρακτηριστικά του ήχου, μέσω ενός ψηφιακού-αναλογικού μετατροπέα (digital-to-analog converter - DAC) (Miranda 1998, σελ. 103-105).

Στη συνέχεια, στην παράγραφο 2.4.2, παρουσιάζεται ένα λογισμικό, το LASy, το οποίο λειτουργεί με την τεχνική του πίνακα ανάγνωσης κυψελοειδών αυτόματων.

#### **2.3.4 Κυψελοειδή Αυτόματα, Γενετικοί Αλγόριθμοι και Μουσική**

Η μελέτη των γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithms) (βλ. γλωσσάρι) αποτελεί ένα πολύ μεγάλο και ξεχωριστό κεφάλαιο και απαιτεί μία εκτεταμένη και λεπτομερή εξέτασή τους, ώστε αυτοί να γίνουν πλήρως κατανοητοί. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία, γίνεται απλώς μία σύντομη αναφορά.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (συχνά αναφέρονται και ως εξελικτικοί (evolutionary) αλγόριθμοι), σύμφωνα με τους Mitchell, Crutchfield και Das (2000) "είναι στοχαστικές μέθοδοι αναζήτησης, εμπνευσμένες από τη βιολογική εξέλιξη (biological

evolution), που συχνά χρησιμοποιούνται ως απλά μοντέλα εξελικτικών διαδικασιών". Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ευρέως στις προσπάθειες εύρεσης των καταλληλότερων, ανάμεσα σε πληθώρα εναλλακτικών, λύσεων σε σύνθετα μηχανικά, σχεδιαστικά και βιολογικά προβλήματα. Οι διάφορες αυτές πιθανές λύσεις είναι δυνατό να υπολογιστούν με παραδοσιακές μεθόδους εύρεσης → δοκιμής → απόρριψης / επιλογής. Οι γενετικοί αλγόριθμοι, όμως, εφαρμόζουν διαφορετική τεχνική, η οποία στοχεύει κατευθείαν στην εύρεση και εκλογή των πιο ευνοϊκών επιλογών, προτυποποιώντας βιολογικές διαδικασίες που παρατηρούνται στη φύση.

Τέλος, καλό είναι να γίνει αναφορά σε ορισμένες πηγές που παρέχουν πληθώρα πληροφοριών πάνω στο θέμα αυτό, αλλά και στο συνδυασμό των γενετικών αλγόριθμων με τα κυψελοειδή αυτόματα και τη μουσική. Χρήσιμες πηγές, λοιπόν, είναι ο Miranda (2001a), καθώς και οι μελέτες των Bilotta, Pantano και Talagico (2000). Επίσης, στο CD-ROM που συνοδεύει την παρούσα εργασία, υπάρχει ένα λογισμικό, το Harmony Seeker, το οποίο χρησιμοποιεί τους γενετικούς αλγόριθμους και τα κυψελοειδή αυτόματα, συνδυάζοντας τα μεταξύ τους, με σκοπό την παραγωγή μουσικών φράσεων, οι οποίες καταλήγουν, κάθε φορά, στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, από άποψη σύμφωνων αρμονικών και μελωδικών διαστημάτων.

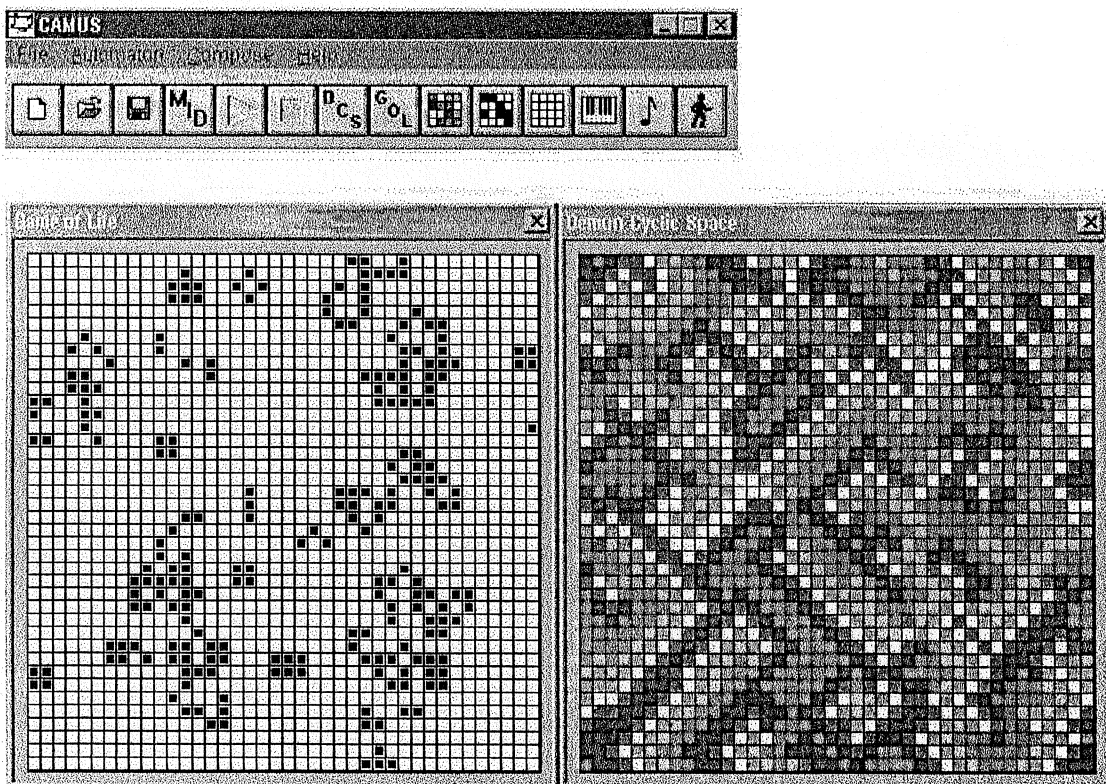
## **2.4 Παρουσίαση Λογισμικών**

Στην ενότητα 2.4 παρουσιάζονται οι τεχνικές που εξετάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα 2.3, μέσω των ανάλογων λογισμικών. Έτσι, στις παραγράφους 2.4.1 έως 2.4.4 παρουσιάζονται τα προγράμματα CAMUS και CAMUS 3D, Virtual Waves 2.1, ChaoSynth και LASy αντίστοιχα, σε αντιστοιχία με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.3. Τα προγράμματα περιέχονται και στο συνοδευτικό CD-ROM.

### **2.4.1 CAMUS και CAMUS 3D**

Το CAMUS (Cellular Automata MUSic) είναι ένα λογισμικό δημιουργίας μουσικής σχεδιασμένο από τον E.R. Miranda και περαιτέρω ανεπτυγμένο από τους Kenny McAlpine και Stuart Hoggar. Χρησιμοποιεί τα κυψελοειδή αυτόματα για τη

δημιουργία και εξαγωγή μουσικής παρτιτούρας (βλ. ενότητα 2.3.1). Από την πληθώρα διαφορετικών κυψελοειδών αυτομάτων που υπάρχουν σήμερα, δύο έχουν επιλεχθεί για το CAMUS, το ήδη αναφερθέν "Game Of Life" (John Horton Conway) (βλ. ενότητα 1.2.4.2) και το "Demon Cyclic Space", σχεδιασμένο από τον David Griffeth (σχήμα 2.5) (Miranda 2001a, σελ. 124).



Σχήμα 2.5: Το κύριο παράθυρο του CAMUS στην οθόνη του υπολογιστή

## GAME OF LIFE

Το Game Of Life (βλ. λεπτομερέστερη περιγραφή στην παράγραφο 1.2.4) είναι ένα δισδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο που επιχειρεί να προσομοιάσει την εξέλιξη μίας αποικίας απλών οργανισμών. Το αυτόματο αποτελείται από έναν πίνακα ( $m \times n$ ) κυψελών, καθεμία από τις οποίες μπορεί να υπάρχει σε δύο καταστάσεις - ζωντανή, αναπαριστάμενη με 1 (μαύρη στην οθόνη του υπολογιστή), ή νεκρή, αναπαριστάμενη με 0 (άσπρη στην οθόνη του υπολογιστή). Συνοπτικά, οι κανόνες που καθορίζουν την εξέλιξη του αυτόματου είναι οι εξής: α) Μία νεκρή κυψέλη θα είναι ζωντανή στη χρονική στιγμή  $t+1$  αν και μόνο αν έχει ακριβώς τρεις ζωντανές γειτονικές κυψέλες (μη

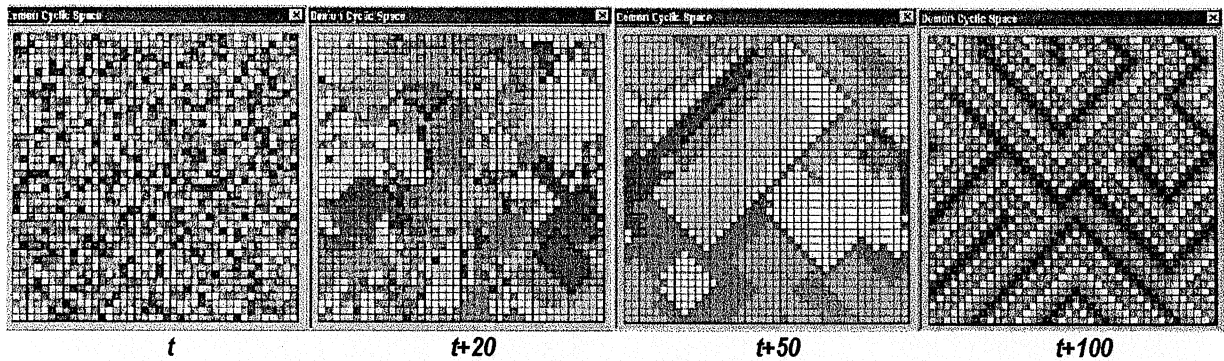
συμπεριλαμβανομένου του εαυτού της) στη χρονική στιγμή  $t$  και  $\beta$ ) μία κυψέλη που είναι ζωντανή στη χρονική στιγμή  $t$  θα παραμείνει ζωντανή στη χρονική στιγμή  $t+1$  αν και μόνο αν έχει δύο ή τρεις ζωντανές γειτονικές κυψέλες (μη συμπεριλαμβανομένου του εαυτού της) στη χρονική στιγμή  $t$ . Με την εφαρμογή αυτού του κανόνα, οποιαδήποτε αρχική διάταξη των κυψελών μπορεί να αναπτύσσεται ατέρμονα, να οδηγεί σε ένα κυκλικό σχήμα ή, τελικά, να πεθαίνει.

Μάλιστα, το ίδιο το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να εφαρμόσει κι άλλους κανόνες, διαφορετικούς από αυτόν τον αρχικό του Conway.

### DEMON CYCLIC SPACE

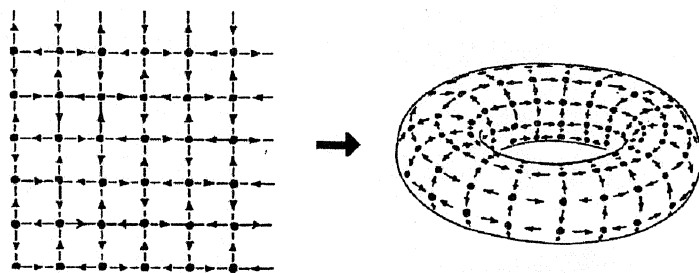
Το Demon Cyclic Space είναι ένα δισδιάστατο αυτόματο  $p$  ( $0,1,2,\dots,p-1$ ) πιθανών καταστάσεων που αποτελείται από έναν πίνακα ( $m \times n$ ) κυψελών (στην οθόνη του υπολογιστή αναπαριστώνται με  $p$  διαφορετικά χρώματα). Η εξέλιξη του αυτόματου καθορίζεται από τον ακόλουθο κανόνα: *μία κυψέλη που βρίσκεται στην κατάσταση  $j$  κατά τη χρονική στιγμή  $t$  θα κυριαρχήσει όλων των γειτονικών κυψελών της που βρίσκονται στην κατάσταση  $j-1$ , μεταβάλλοντας την κατάσταση τους από  $j-1$  κατά τη χρονική στιγμή  $t$  σε  $j$  κατά τη χρονική στιγμή  $t+1$* . Ο κανόνας αυτός μοιάζει με μία αλυσίδα στην οποία μία κυψέλη σε κατάσταση 2 καταλαμβάνει όλες τις διπλάνες της που είναι σε κατάσταση 1, ακόμη κι αν οι τελευταίες καταλαμβάνουν τις κυψέλες κατάστασης 0. Προφανώς, η λειτουργία και εξέλιξη του αυτόματου είναι ατέρμονη, που σημαίνει ότι το αυτόματο είναι κυκλικό.

Το Demon Cyclic Space δημιουργεί απίστευτα πολύπλοκες μικρογραφίες κόσμων. Με οποιαδήποτε τυχαία αρχική διάταξη των κυψελών, πάντα οδηγεί σε σταθερές διατάξεις που θυμίζουν δομές ανάπτυξης κρυστάλλων και πρωτόγονες μορφές ζωής (βλ. ακόλουθο σχήμα 2.6).



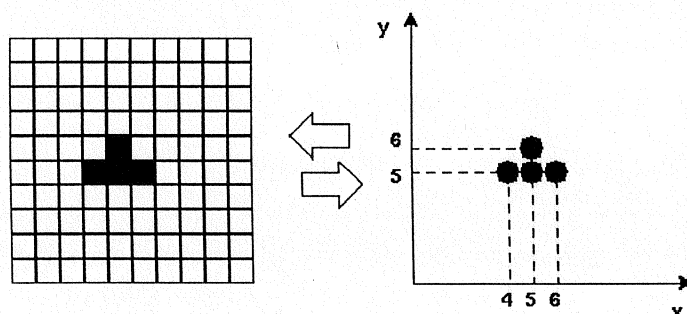
**Σχήμα 2.6:** Με οποιαδήποτε τυχαία αρχική διάταξη των κυψελών, το *Demon Cyclic Space* πάντα οδηγεί σε σταθερές διατάξεις που θυμίζουν δομές ανάπτυξης κρυστάλλων και πρωτόγονες μορφές ζωής. Το σχήμα απεικονίζει την κατάσταση του αυτόματου *Demon Cyclic Space* στην αρχική του κατάσταση και σε καταστάσεις που προκύπτουν ύστερα από 20, 50 και 100 επαναλήψεις

Τόσο το Game Of Life όσο και το *Demon Cyclic Space* λειτουργούν με περιοδικά (κυκλικά) όρια, όπως δείχνει το διπλανό σχήμα (σχήμα 2.7).

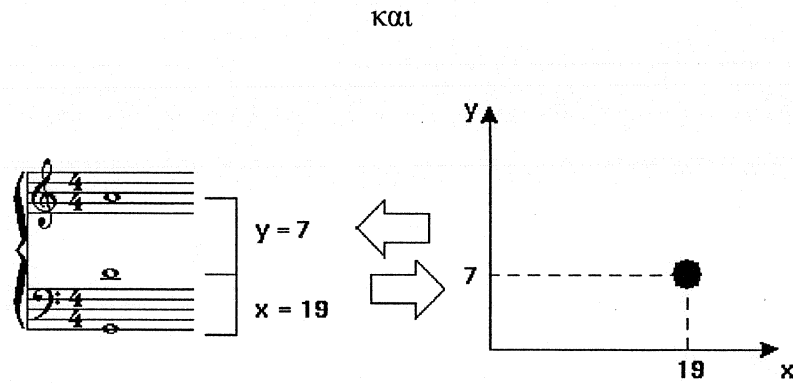


**Σχήμα 2.7:** Τόσο το *Game Of Life* όσο και το *Demon Cyclic Space* λειτουργούν με περιοδικά (κυκλικά) όρια

Το CAMUS χρησιμοποιεί ένα καρτεσιανό επίπεδο για να αναπαραστήσει τρίφωνες συγχορδίες μουσικών φθόγγων. Το επίπεδο αυτό βρίσκεται σε απόλυτη αντιστοιχία με το αυτόματο *Game Of Life*. Το παράθυρο του *Game Of Life* δίνει πληροφορίες για μουσικά γεγονότα σε μία γραφική μορφή. Κάθε φορά που το αυτόματο *Game Of Life* παράγει μία νέα κυψέλη, οι συντεταγμένες της δίνουν τους δύο υψηλότερους φθόγγους της συγχορδίας. Ο άξονας  $x$  δίνει την απόσταση σε ημιτόνια της μέσης από τη βάση της συγχορδίας και ο άξονας  $y$  δίνει την αντίστοιχη απόσταση της κορυφής από τη μέση της συγχορδίας (βλ. σχήμα 2.8 παρακάτω).



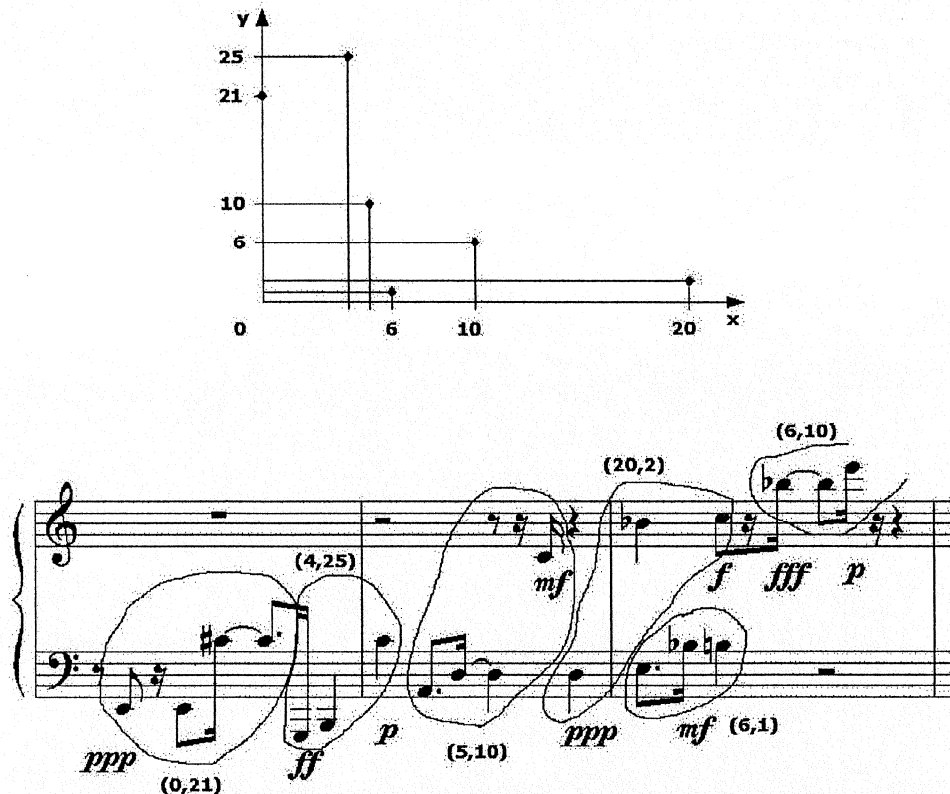




Σχήμα 2.8: Το CAMUS χρησιμοποιεί ένα καρτεσιανό επίπεδο για να αναπαραστήσει τρίφωνες συγχορδίες μουσικών φθόγγων

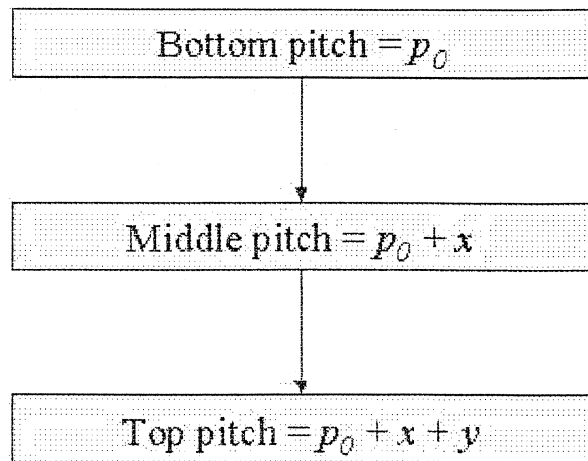
Ο έλεγχος όλων των κυψελών στο πλέγμα για την παραγωγή των συγχορδιών, γίνεται από το λογισμικό εξετάζοντας το πλέγμα κάθετα (στήλη προς στήλη), ξεκινώντας από την κυψέλη (0,0) πάνω αριστερά και προχωρώντας προς τα κάτω.

Στην παρακάτω εικόνα (σχήμα 2.9) φαίνεται η γραφική αναπαράσταση μιας μουσικής φράσης, συνθεμένης από το CAMUS με τον τρόπο που περιγράφηκε προηγουμένως:



Σχήμα 2.9: Απόσπασμα παρτιτούρας συνθεμένης από το λογισμικό CAMUS

Δίπλα (σχήμα 2.10) φαίνεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το CAMUS για τον υπολογισμό των φθόγγων της συγχορδίας που ορίζεται από την κυψέλη  $(x,y)$  με τονικό ύψος  $p_0$ . Οι ζωντανές (μαύρες) κυψέλες, λοιπόν, που είναι υπεύθυνες για την παραγωγή μουσικών γεγονότων, πρέπει να αντιμετωπιστούν ως συγχορδίες και όχι ως ξεχωριστές νότες, όπως συμβαίνει σε μία παραδοσιακή παρτιτούρα μουσικής.



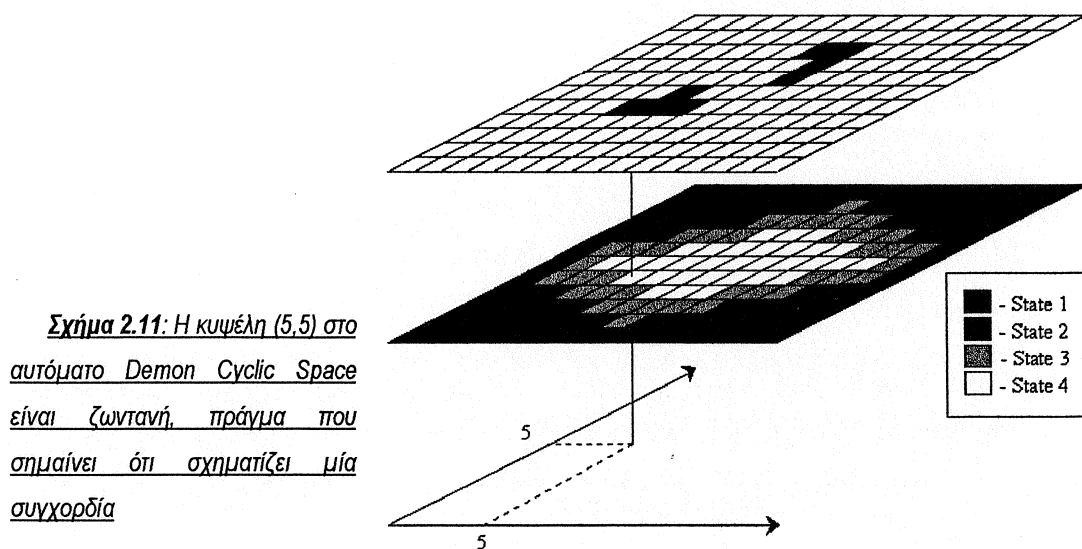
Σχήμα 2.10: Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το CAMUS για τον υπολογισμό των φθόγγων της συγχορδίας που ορίζεται από την κυψέλη  $(x,y)$  με τονικό ύψος  $p_0$

Το τονικό ύψος της βάσης της κάθε συγχορδίας (χρωματικά από το C2 ως το g8) καθορίζεται εκ των προτέρων από τον χρήστη. Παράλληλα, πριν ακόμη να τεθεί σε λειτουργία το αυτόματο, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει και κάποιες άλλες μουσικές παραμέτρους, οι οποίες αφορούν το tempo και τις δυναμικές, μέσω κάποιας συγκεκριμένης πιθανοτικής κατανομής αριθμών, που αφορούν τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Έτσι, με την εξέλιξη του αυτόματου, γίνεται και υπολογισμός της διάρκειας και της δυναμικής του κάθε φθόγγου χωριστά της κάθε συγχορδίας, μέσω αυτών των τυχαίων αριθμών.

Το αυτόματο Demon Cyclic Space χρησιμοποιείται στον καθορισμό της ενορχήστρωσης της σύνθεσης. Ο χρήστης, αρχικά, προσδιορίζει τον αριθμό των χρωμάτων που θα υπάρχουν στο αυτόματο. Καθένα από αυτά τα χρώματα ισοδυναμεί με μία κατάσταση στην οποία μπορεί να βρίσκεται η κάθε κυψέλη. Παράλληλα, το κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε κάποιο midi όργανο, ανάλογα με την επιθυμία του χρήστη. Συνεπώς, το αυτόματο Demon Cyclic Space, αναλόγως με την επιθυμία του χρήστη, υποδεικνύει το όργανο που θα εκτελέσει τους φθόγγους που παράγονται από μία κυψέλη που βρίσκεται στην ίδια  $(x,y)$  θέση ακριβώς στο αυτόματο Game Of Life. Για παράδειγμα, στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.11), η κυψέλη  $(5,5)$  στο αυτόματο Game Of Life είναι ζωντανή, πράγμα που σημαίνει ότι σχηματίζει μία συγχορδία. Η

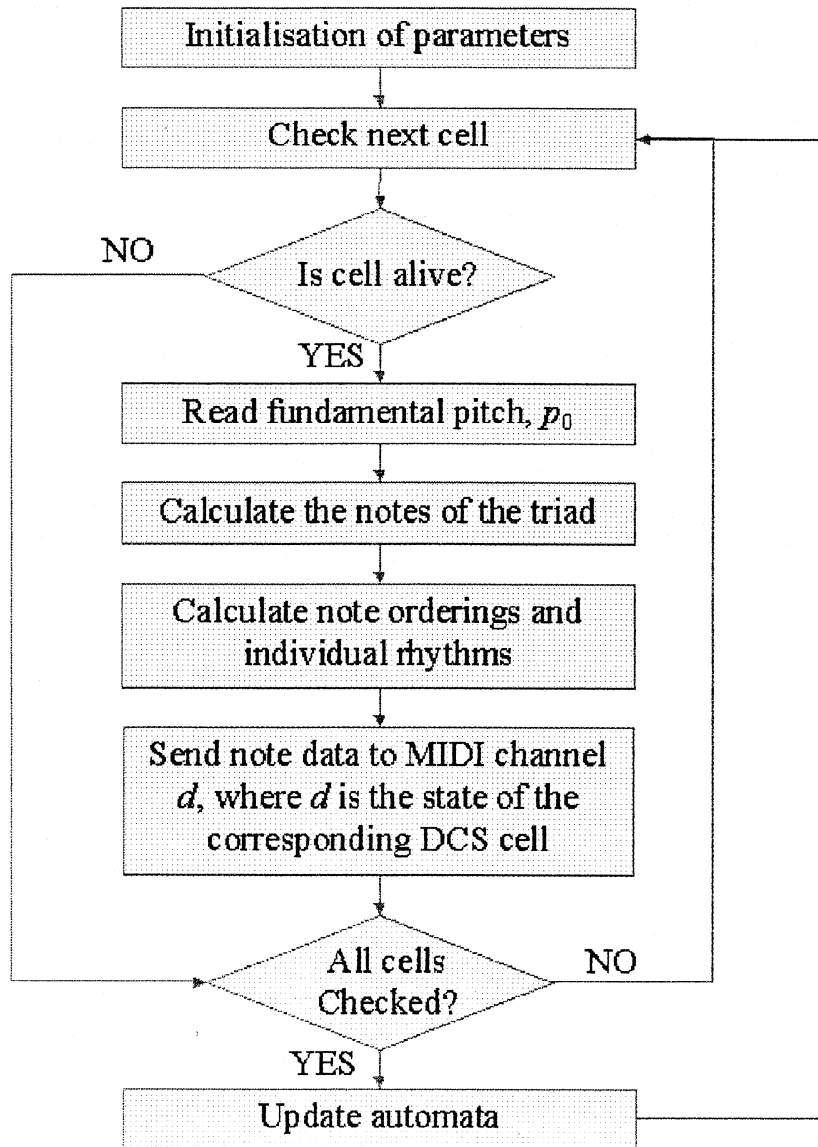


αντίστοιχη κυψέλη στο αυτόματο Demon Cyclic Space είναι στην κατάσταση 4, που σημαίνει ότι η συγχορδία θα εκτελεστεί από το midi όργανο/κανάλι 4. Η αρχική διάταξη των κυψελών στο αυτόματο Demon Cyclic Space είναι πάντα τυχαία, χωρίς να μπορεί να παρέμβει σ' αυτήν ο χρήστης.



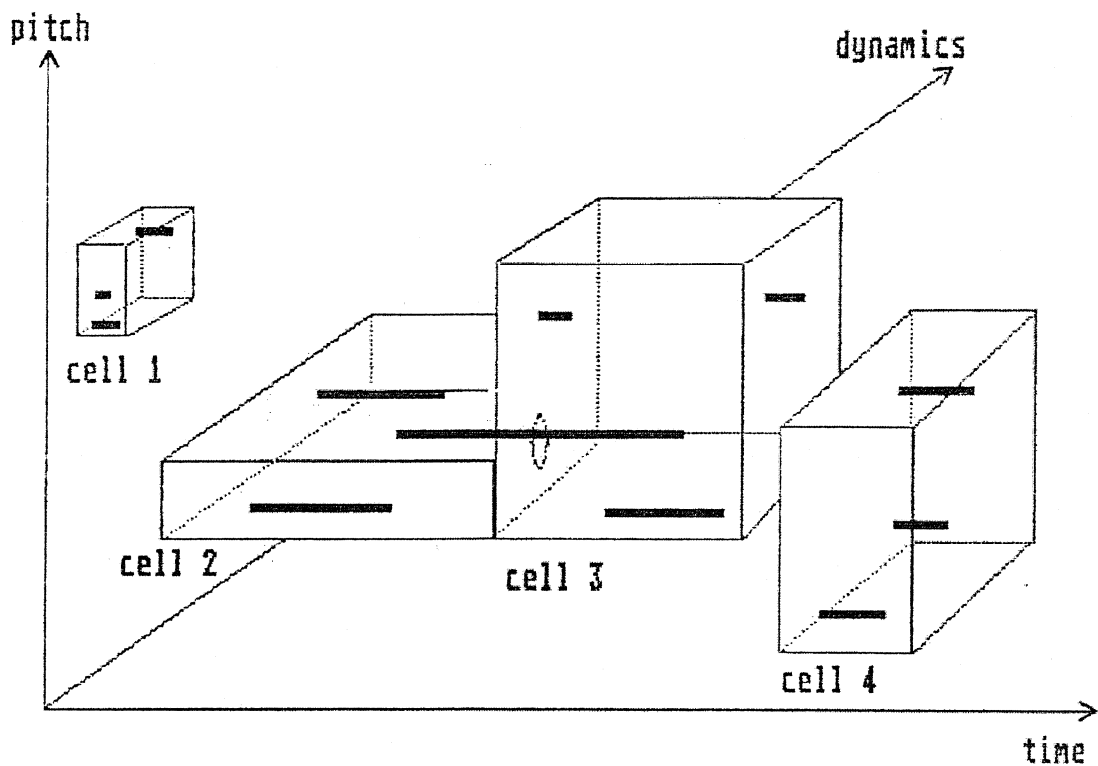
Τέλος, για την αποφυγή μιας σύνθεσης που θα αποτελείται αποκλειστικά και μόνο από μία διαδοχή συγχορδιών, το CAMUS χρησιμοποιεί μία μέθοδο για να καθορίσει την ακριβή χρονική στιγμή ενεργοποίησης του κάθε φθόγγου. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τις καταστάσεις των γειτονικών κυψελών στο αυτόματο Game Of Life για να υπολογίσει τη στιγμή που θα ακουστεί ο κάθε φθόγγος της συγχορδίας αλλά και τη διάρκεια που θα έχει αυτός. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι πολύπλοκη και θα ήταν αρκετά χρονοβόρα και επίπονη μία παρουσίασή της στην παρούσα εργασία. Στο tutorial του λογισμικού, που εμπεριέχεται στο CD-ROM που συνοδεύει την εργασία, υπάρχει λεπτομερής εξήγηση αυτής της διαδικασίας. Πάντως, είναι δυνατό ορισμένες φορές, μετά από τον υπολογισμό αυτό, να τυχαίνει κάποιοι φθόγγοι να ακούγονται ταυτόχρονα.

Συνοπτικά, η συνολική διαδικασία (αλγόριθμος) που ακολουθεί το λογισμικό CAMUS, φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (σχήμα 2.12):



**Σχήμα 2.12:** Η συνολική διαδικασία (αλγόριθμος) που ακολουθεί το λογισμικό CAMUS

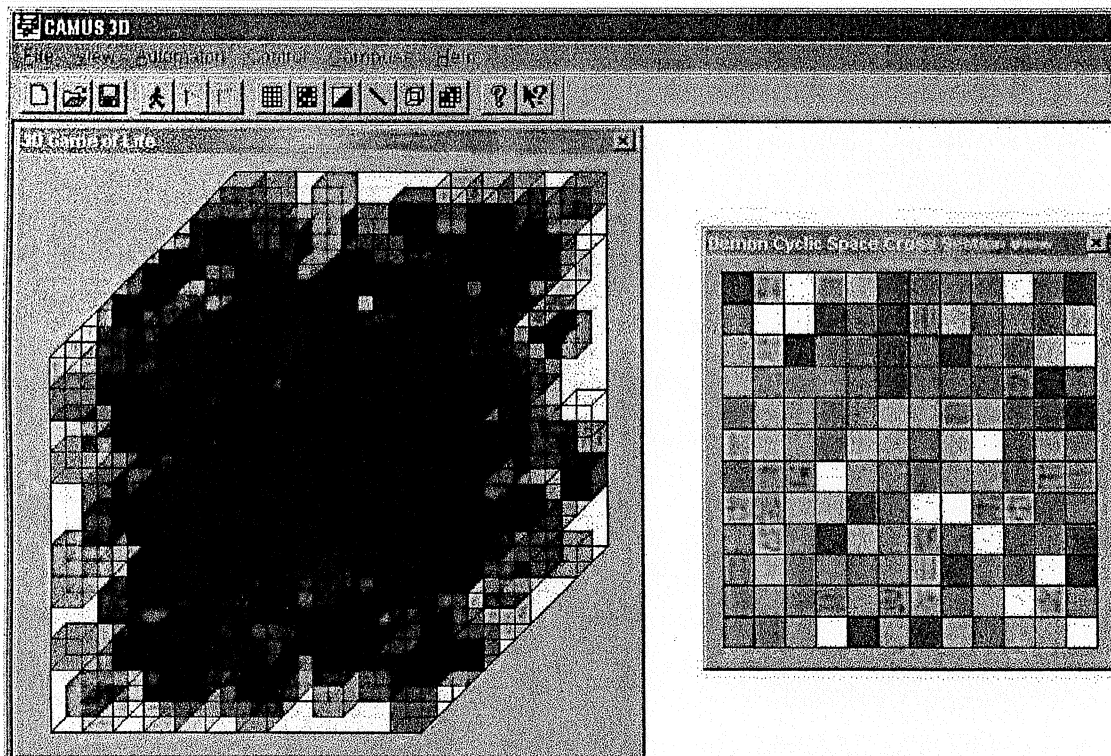
Στο σχήμα 2.13 έχουμε την γραφική απεικόνιση ενός παραδείγματος της συνολικής λειτουργίας του CAMUS:



Σχήμα 2.13: Γραφική απεικόνιση ενός παραδείγματος της συνολικής λειτουργίας του CAMUS

### CAMUS 3D

Το CAMUS 3D (σχήμα 2.14) αποτελεί απλώς μία τρισδιάστατη εκδοχή του CAMUS. Τόσο το αυτόματο Game of Life όσο και το αυτόματο Demon Cyclic Space εξελίσσονται σε τρεις διαστάσεις, που σημαίνει ότι και οι κανόνες μετάβασης εφαρμόζονται πλέον σε κυψέλες που είναι διατεταγμένες στο χώρο.



*Σχήμα 2.14: Το κύριο παράθυρο του CAMUS 3D στην οθόνη του υπολογιστή*

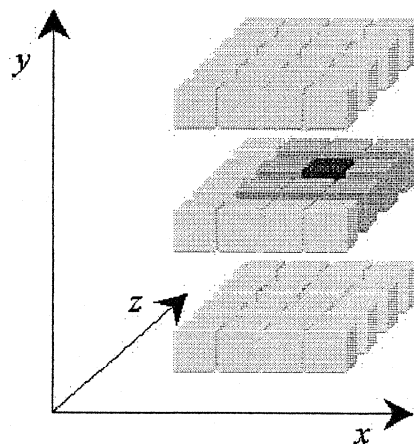
### 3D GAME OF LIFE

Το 3D Game Of Life είναι ένα τρισδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο που αποτελείται από μία  $(1 \times m \times n)$  διάταξη κυψελών, καθεμία από τις οποίες μπορεί να υπάρχει σε δύο καταστάσεις - ζωντανή, αναπαριστάμενη με 1 (μαύρη στην οθόνη του υπολογιστή), ή νεκρή, αναπαριστάμενη με 0 (άσπρη στην οθόνη του υπολογιστή). Οι κανόνες που καθορίζουν την εξέλιξη του αυτόματου είναι οι εξής: α) μία νεκρή κυψέλη θα είναι ζωντανή στη χρονική στιγμή  $t+1$  αν και μόνο αν έχει ακριβώς έξι ζωντανές γειτονικές κυψέλες (μη συμπεριλαμβανομένου του εαυτού της) στη χρονική στιγμή  $t$  (σε κάθε άλλη περίπτωση παραμένει νεκρή) και β) μία κυψέλη που είναι ζωντανή στη χρονική στιγμή  $t$  θα παραμείνει ζωντανή στη χρονική στιγμή  $t+1$  αν και μόνο αν έχει πέντε, έξι ή επτά ζωντανές γειτονικές κυψέλες (μη συμπεριλαμβανομένου του εαυτού της) στη χρονική στιγμή  $t$  (σε κάθε άλλη περίπτωση πεθαίνει).

### 3D DEMON CYCLIC SPACE

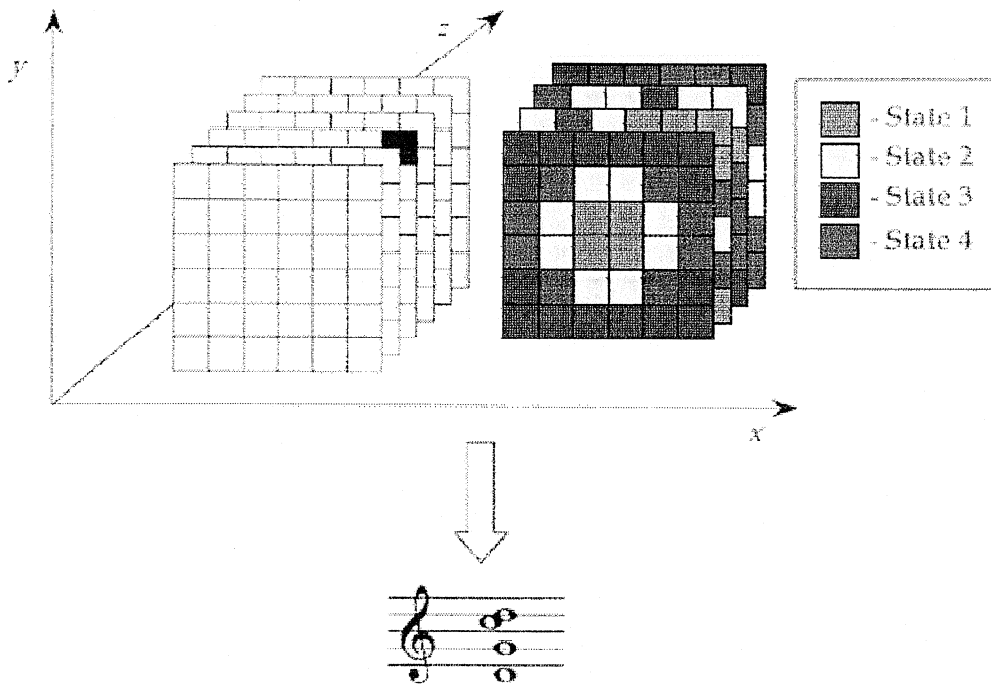
Το 3D Demon Cyclic Space είναι ένα τρισδιάστατο αυτόματο  $p$  ( $0,1,2,\dots,p-1$ ) πιθανών καταστάσεων ( $1 \times m \times n$ ) κυψελών, επίσης (στην οθόνη του υπολογιστή αναπαριστώνται με  $p$  διαφορετικά χρώματα). Η εξέλιξη του αυτόματου 3D Demon Cyclic Space γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο με το αυτόματο Demon Cyclic Space, με τη διαφορά ότι εδώ ο κανόνας μετάβασης εφαρμόζεται πια σε τρεις και όχι σε δύο διαστάσεις.

Κατά τα άλλα, η λειτουργία του προγράμματος CAMUS 3D είναι παρόμοια με του προγράμματος CAMUS, αν και η εύρεση των κυψελών στο πλέγμα μπορεί να γίνεται και με διαφορετικό τρόπο. Εκτός από τη μέθοδο που εφαρμόζει το CAMUS, το CAMUS 3D μπορεί να εξετάζει το πλέγμα του αυτόματου Game Of Life θεωρώντας μία στοίβα παράλληλων δισδιάστατων Game Of Life αυτόματων και ξεκινώντας από την κυψέλη  $(0,0)$  (βλ. σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.15: Το CAMUS 3D μπορεί να εξετάζει το πλέγμα του αυτόματου Game Of Life θεωρώντας μία στοίβα παράλληλων δισδιάστατων Game Of Life αυτόματων

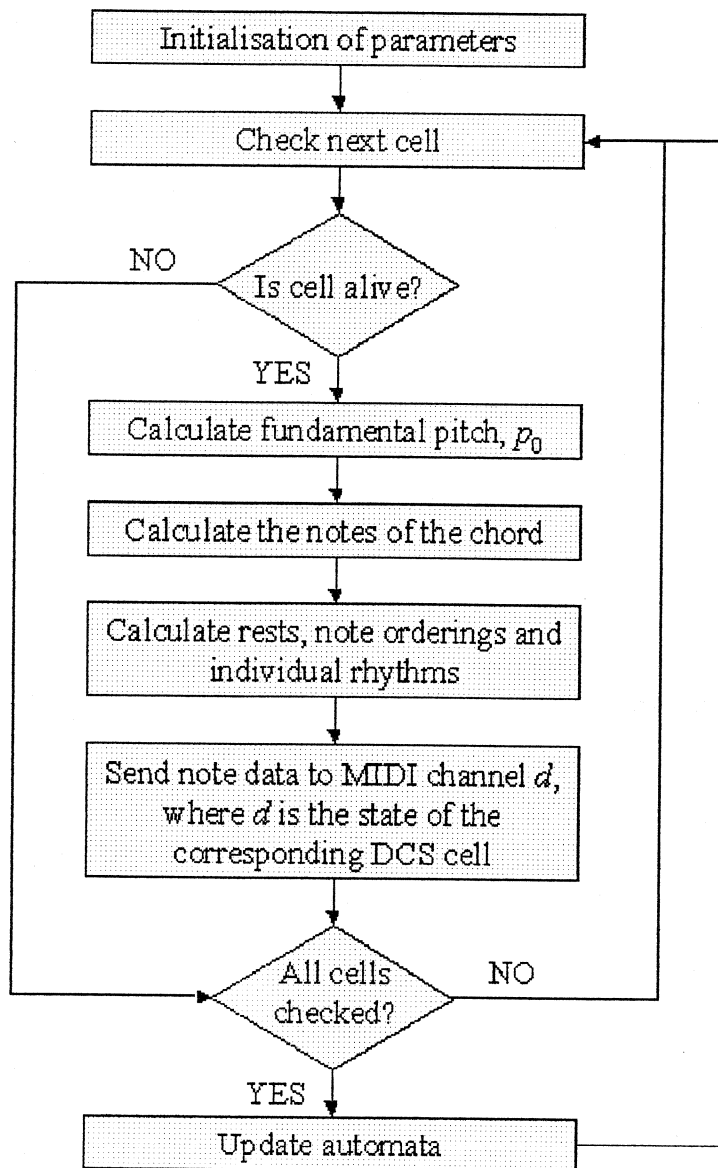
Προφανώς, στο CAMUS 3D οι συντεταγμένες της κάθε κυψέλης αναλύονται και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό τετράφωνων συγχορδιών, όπως δείχνει το σχήμα 2.16: Η κυψέλη  $(5,5,2)$  είναι ζωντανή, οπότε παράγει ένα μουσικό γεγονός. Η τετράφωνη συγχορδία που δημιουργείται, χτίζεται πάνω στον αρχικό φθόγγο  $re1$  - που έχει επιλεγεί με κάποιον τρόπο αρχικά - ανεβαίνοντας διαδοχικά 5, 5, και 2 ημιτόνια.



**Σχήμα 2.16:** Η τετράφωνη συγχορδία που δημιουργείται από την ζωντανή κυψέλη (5,5,2) χτίζεται πάνω στον φθόγγο ρε1 ανεβαίνοντας διαδοχικά 5, 5 και 2 ημιτόνια

Αυτό, όμως, που είναι αρκετά διαφορετικό, είναι το γεγονός ότι, καθώς εξελίσσεται η σύνθεση, οι διατάξεις που προκύπτουν είναι δυνατό να υποβάλλονται σε διαδοχικές επαναλήψεις και διάφορες μετατροπές, όπως μεταφορά, αναστροφή, μεγέθυνση κ.ά., σύμφωνα με κάποιες επιλογές που κάνει ο χρήστης. Ακόμη, τα τονικά ύψη των βάσεων των συγχορδιών, καθώς και η χρονική στιγμή που θα ακουστούν οι φθόγγοι των συγχορδιών και η χρονική τους διάρκεια μπορούν να καθοριστούν είτε μέσω μιας πιθανοτικής κατανομής που ορίζει ο χρήστης είτε απόλυτα, πάλι από τον ίδιο το χρήστη. Παράλληλα, το CAMUS 3D, για να ορίσει τη σειρά με την οποία ακούγονται οι τέσσερις φθόγγοι μίας συγχορδίας χρησιμοποιεί μία αλυσίδα Markov πρώτης τάξης, που πρόκειται για μία στοχαστική διαδικασία (McAlpine, Miranda και Hoggar 1999, σελ. 24).

Συνοπτικά, η συνολική διαδικασία (αλγόριθμος) που ακολουθεί το λογισμικό CAMUS 3D, φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (σχήμα 2.17):



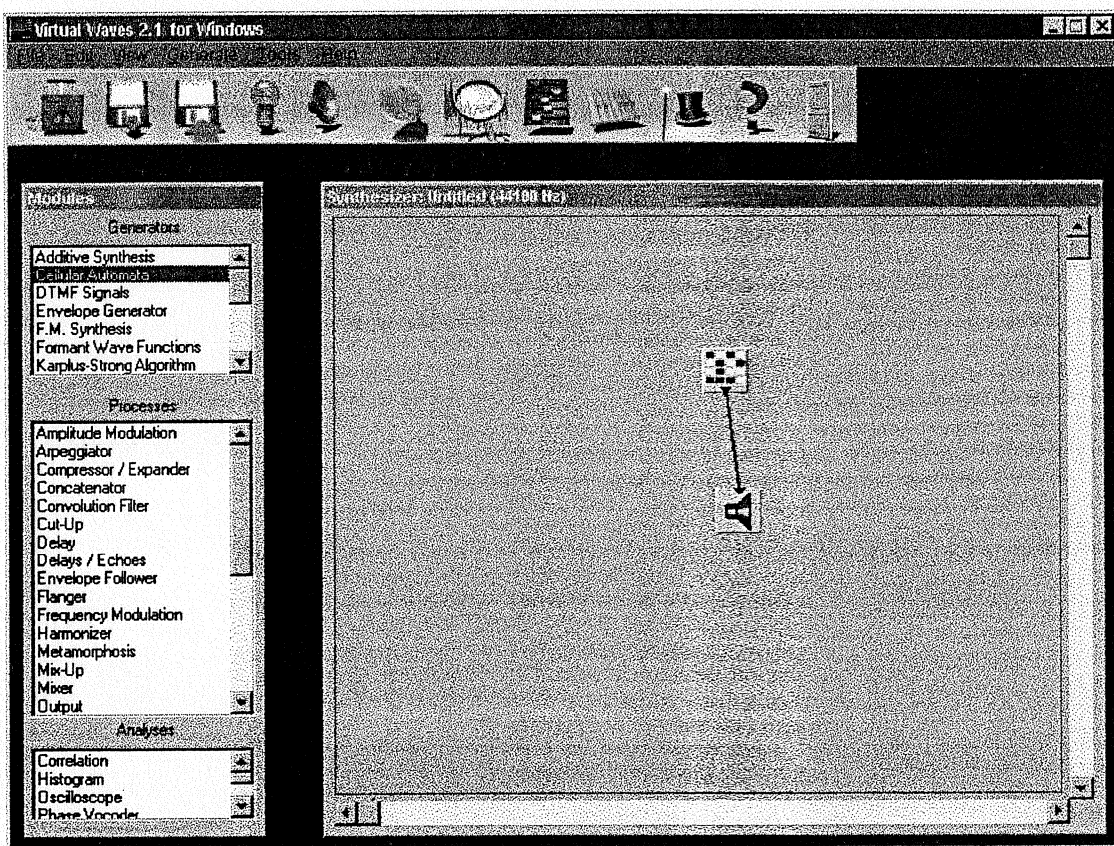
**Σχήμα 2.17:** Η συνολική διαδικασία (αλγόριθμος) που ακολουθεί το λογισμικό CAMUS 3D

Και στα δύο προγράμματα το αποτέλεσμα μπορεί να εξαχθεί και σαν αρχείο \*.mid, που σημαίνει ότι είναι δυνατή η εκτύπωση αλλά και η περαιτέρω επεξεργασία της ανάλογης παρτιτούρας. Τα tutorial και help files στο CD-ROM παρέχουν περισσότερες και λεπτομερέστερες πληροφορίες για τα δύο προγράμματα.

### 2.4.2 Virtual Waves 2.1

Το Virtual Waves 2.1 (σχήμα 2.18) είναι ένα απλό στη χρήση αλλά, συγχρόνως, αρκετά σύνθετο λογισμικό που προσφέρει στοιχειώδεις, αλλά με καλά αποτελέσματα πολλές φορές, λειτουργίες σύνθεσης, επεξεργασίας και ανάλυσης ήχου. Μεταξύ των πολλών επιλογών και τεχνικών σύνθεσης και επεξεργασίας ήχου που προσφέρει μέσω ανάλογων μονάδων, είναι και μία μονάδα κυψελοειδούς αυτόματου.

Η χρήση της συγκεκριμένης μονάδας αποσκοπεί στη δημιουργία ιδιαίτερων ηχοχρωμάτων, παράγοντας ήχους που έχουν μία δεδομένη εξέλιξη στο χρόνο, εξαιτίας της οποίας μπορούν να γίνονται αντιληπτοί ως ξεχωριστοί (βλ. παράγραφο 2.3.2).

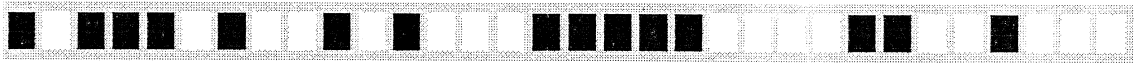


**Σχήμα 2.18:** Το κύριο παράθυρο του Virtual Waves 2.1 στην οθόνη του υπολογιστή

Το κυψελοειδές αυτόματο που χρησιμοποιεί είναι μονοδιάστατο και οι 32 κυψέλες, από τις οποίες αποτελείται, μπορούν να βρίσκονται σε δύο καταστάσεις 0



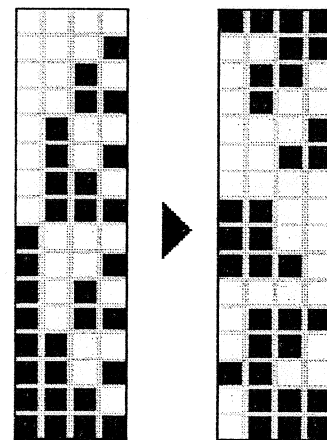
(νεκρές) ή 1 (ζωντανές), οι οποίες, στην οθόνη του υπολογιστή, δηλώνονται με τα χρώματα άσπρο και μαύρο, αντιστοίχως (σχήμα 2.19):



**Σχήμα 2.19:** Το μονοδιάστατο κυψελοειδές αυτόματο με τις 32 κυψέλες σε δύο καταστάσεις

Η εξέλιξη του αυτόματου γίνεται εφαρμόζοντας κατάλληλους κανόνες μετάβασης στις κυψέλες. Οι κανόνες λαμβάνουν υπόψη τους τετράδες γειτονικών κυψελών, χωρίζοντας το σύνολο των 32 κυψελών σε 8 ομάδες και εφαρμόζονται σε κάθε τετράδα ξεχωριστά, χωρίς να επηρεάζονται οι παρακείμενές τους. Το λογισμικό χρησιμοποιεί ένα είδος γραφικής αναπαράστασης των κανόνων μετάβασης, όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα (σχήμα 2.20).

**RULES**

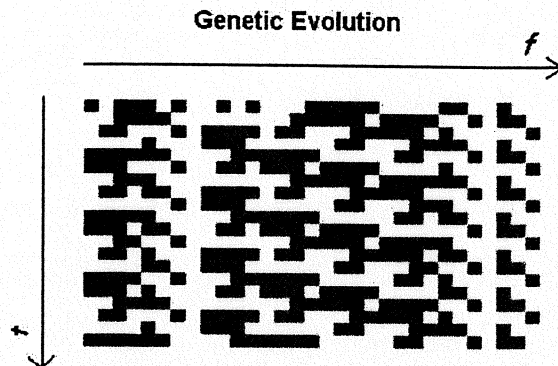


**Σχήμα 2.20:** Οι κανόνες μετάβασης

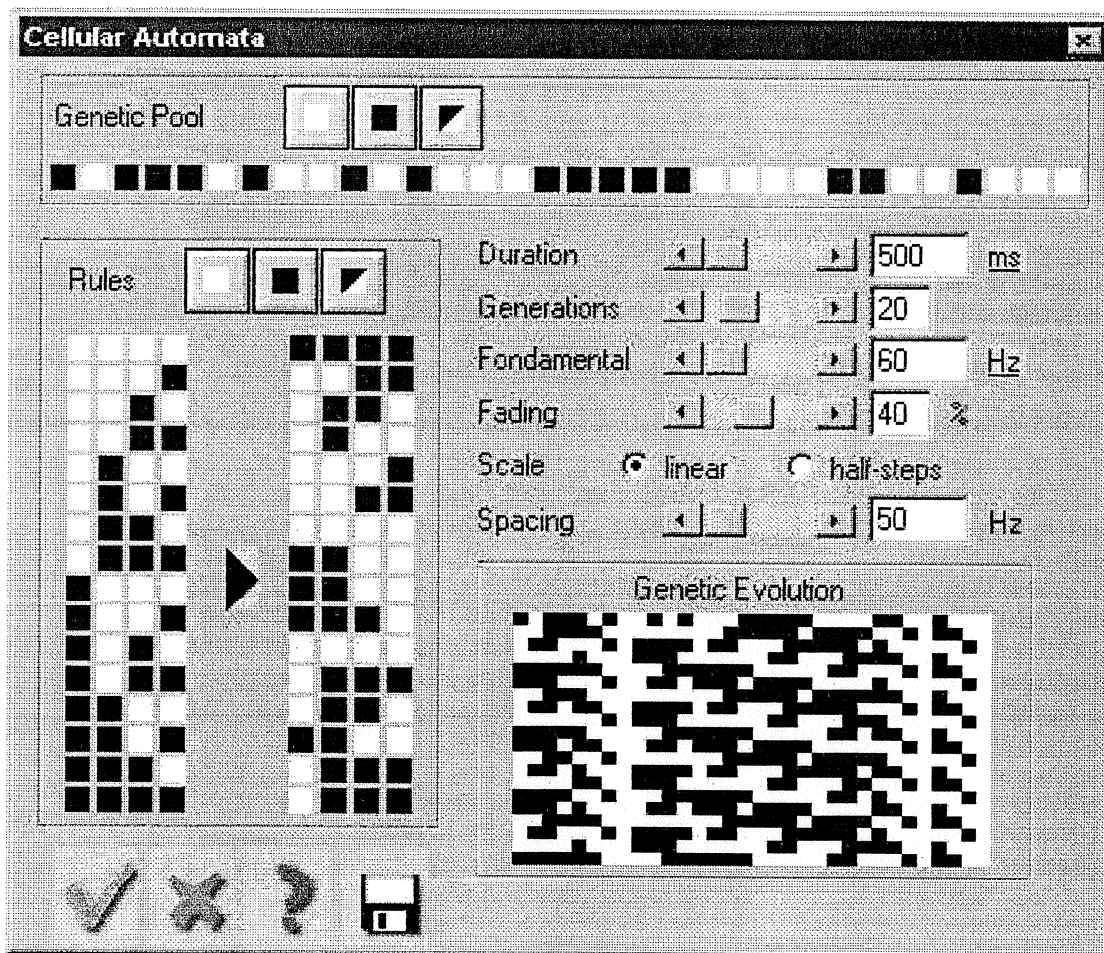
Όσον αφορά την αντιστοίχιση (mapping), κάθε κυψέλη αντιπροσωπεύει μία συγκεκριμένη συχνότητα και ανάλογα με το αν είναι σε κατάσταση 1 (μαύρη) ή 0 (άσπρη), αυτή η συχνότητα ηχεί ή όχι, αντίστοιχα. Με την εφαρμογή των κανόνων μετάβασης στο αυτόματο, "ενεργοποιούνται" ή, αντιθέτως, "απενεργοποιούνται" ορισμένες συχνότητες, καθώς γεννιούνται νέες ή πεθαίνουν οι ήδη υπάρχουσες κυψέλες, αντιστοίχως. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε επανάληψη (iteration) το φάσμα του παραγόμενου ήχου είναι δυνατό να μεταβάλλεται. Η ακόλουθη εικόνα (σχήμα

2.21) αναπαριστά με γραφικό τρόπο αυτήν την εξέλιξη του αυτόματου και, συνεπώς, του φάσματος του παραγόμενου ήχου.

Σχήμα 2.21: Η γραφική αναπαράσταση του ηχητικού φάσματος



Η αρχική διάταξη των κυψελών στο μοντέλο, η οποία είναι στη διάθεση του χρήστη, δίνει και το φάσμα του παραγόμενου ήχου στην πρώτη γενιά (generation), κατά τη χρονική στιγμή  $t=0$ . Αυτό σημαίνει ότι η ατάκα μπορεί να δοθεί σύμφωνα με το γούστο και την επιθυμία του χρήστη. Γενικότερα, όμως, ολόκληρη η γενετική λειτουργία του μοντέλου μπορεί να καθοριστεί αρχικά από τον ίδιο το χρήστη, μιας και αυτός μπορεί πολύ εύκολα να παρέμβει τόσο στους κανόνες μετάβασης του αυτόματου, όσο και σε κάποια άλλα στοιχεία που έχουν να κάνουν με το ίδιο το ηχητικό αποτέλεσμα. Έτσι, είναι δυνατό να οριστούν εξαρχής οι συχνότητες που θα αντιπροσωπεύουν οι κυψέλες, ξεκινώντας από μία θεμέλιο, καθώς και η διάρκεια του συνολικού ήχου, οι επαναλήψεις (iterations) του αυτόματου κ.ά. Το πλαίσιο καθορισμού αυτών των τιμών απεικονίζεται πιο κάτω (σχήμα 2.22):



*Σχήμα 2.22: Το πλαίσιο καθορισμού τιμών από το χρήστη*

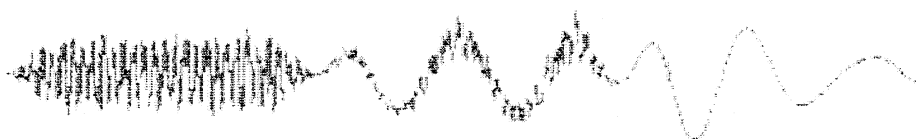
Αφού θεσπιστούν όλες οι τιμές από τον χρήστη αρχικά, το αυτόματο εξελίσσεται ελεύθερα και το λογισμικό παράγει τον ανάλογο ήχο, διοχετεύοντας το σήμα στον μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (digital-to-analog converter (DAC)).

Αυτή η ελευθερία που προσφέρει το λογισμικό, όσον αφορά τη μονάδα του κυψελοειδούς αυτόματου, είναι πολύ σημαντική, καθώς είναι δυνατό να παραχθούν ήχοι με εξαιρετικά μεγάλη ποικιλία τόσο στο ηχόχρωμά τους, όσο και στην εξέλιξη του ηχοχρώματος αυτού στο χρόνο. Για παράδειγμα, η εφαρμογή ενός κανόνα ο οποίος αποσκοπεί σε μία "εξελικτική" συμπεριφορά του αυτόματου (δηλαδή όλο και περισσότερες κυψέλες ενεργοποιούνται με το χρόνο), έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ήχων, των οποίων το φάσμα γίνεται όλο και πιο πλούσιο και σύνθετο με την πάροδο του χρόνου.

### 2.4.3 ChaoSynth

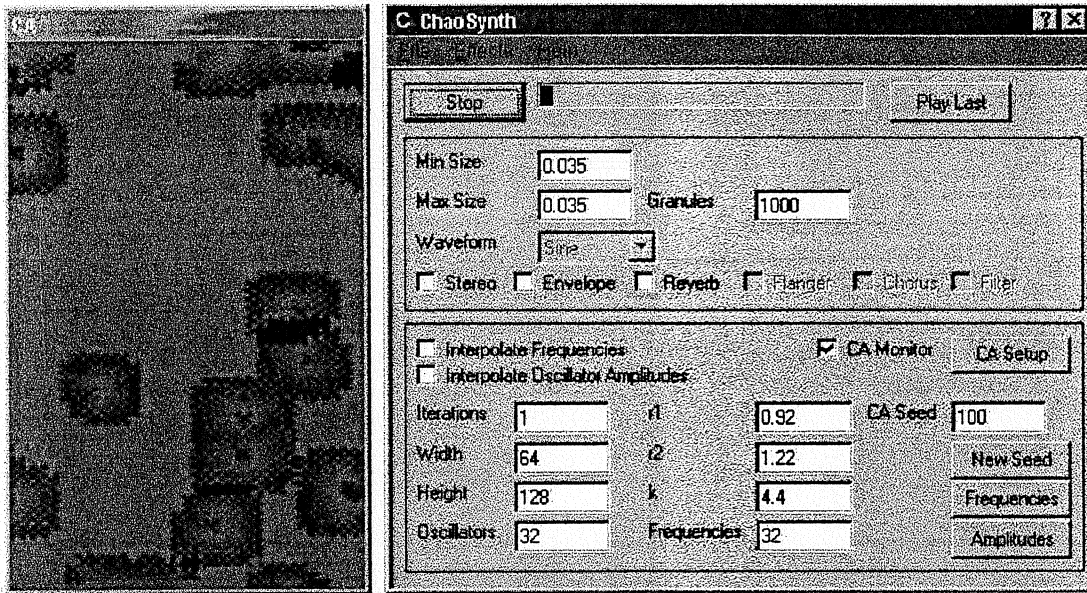
Το ChaoSynth είναι ένα λογισμικό σύνθεσης ήχου, κατασκευασμένο από τον E.R. Miranda που χρησιμοποιεί τα κυψελοειδή αυτόματα για τον καθορισμό του ηχητικού φάσματος (βλ. παράγραφο 2.3.2). Ωστόσο, για την παραγωγή του τελικού ήχου χρησιμοποιεί την κοκκώδη τεχνική σύνθεσης ήχου. Σε αντίθεση, λοιπόν, με άλλα συστήματα κοκκώδους σύνθεσης, τα οποία σχεδόν πάντοτε χρησιμοποιούν εξ ολοκλήρου στοχαστικές διαδικασίες για την παραγωγή και τον έλεγχο των κόκκων (π.χ. για τον έλεγχο της κυματομορφής και της διάρκειας του κάθε κόκκου ξεχωριστά), το ChaoSynth προτείνει μία διαφορετική μέθοδο: τη χρήση ενός κυψελοειδούς αυτόματου που ονομάζεται ChaOs (αρκτικόλεξο των λέξεων Chemical Oscillator) (Miranda 2001b).

Προτού, όμως, να προχωρήσουμε στην παρουσίαση του ChaoSynth, θα ήταν καλό να πούμε λίγα λόγια για την κοκκώδη τεχνική σύνθεσης ήχου. Οι Roads (1996, σελ. 168-184) και Miranda (1998, σελ. 107-113) αναφέρουν για την τεχνική αυτή τα εξής: Ο τύπος αυτός σύνθεσης ήχου λειτουργεί παράγοντας μία πολύ γρήγορη διαδοχή μικρών (20-50 msec) ηχητικών δειγμάτων, τα οποία όταν ακουστούν διαδοχικά μαζί, δημιουργούν μεγαλύτερες " ηχητικές μάζες". Τα ελάχιστα αυτά ηχητικά δείγματα ονομάζονται "κόκκοι" ("grains") και το καθένα τους φέρει τα χαρακτηριστικά ενός κανονικού, ικανοποιητικού σε διάρκεια, ήχου (συγκεκριμένη αρχική και τελική χρονική στιγμή, περιβάλλουσα, κυματομορφή, περίοδο και συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων) (σχήμα 2.23).



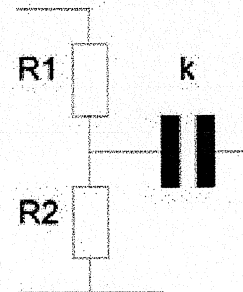
Σχήμα 2.23: Η τεχνική κοκκώδους σύνθεσης ήχου

Όσον αφορά και πάλι το λογισμικό ChaoSynth (σχήμα 2.24), το κυψελοειδές αυτόματο ChaOs, που χρησιμοποιεί, λειτουργεί σε ένα διδιάστατο πλέγμα ( $m \times n$ ) κυψελών. Η κάθε κυψέλη μπορεί να βρίσκεται σε μία από  $p$  πιθανές καταστάσεις, όπου  $p \leq 32$ . Στην οθόνη του υπολογιστή οι διάφορες καταστάσεις των κυψελών αναπαριστώνται με παραλλαγές του κόκκινου και του μαύρου χρώματος.



**Σχήμα 2.24:** Το κύριο παράθυρο του Chaosynth στην οθόνη του υπολογιστή

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του προγράμματος, το ChaOs μπορεί να θεωρηθεί ως μία διάταξη πανομοιότυπων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων φόρτισης-εκφόρτισης (βλ. σχήμα 2.25).



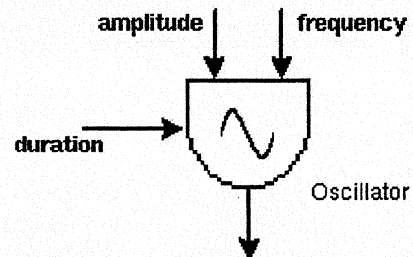
**Σχήμα 2.25:** Η κάθε κυψέλη του αυτόματου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα φόρτισης-εκφόρτισης

Αυτά τα κυκλώματα δεν είναι τίποτε άλλο παρά οι κυψέλες του κυψελοειδούς αυτόματου, καθεμία από τις οποίες, σε μία δεδομένη χρονική στιγμή, μπορεί να είναι είτε σε ηρεμία (quiescent), είτε να είναι αποπολωμένη (depolarised), είτε κατεστραμμένη (burned). Η κατάσταση της κάθε κυψέλης αναπαριστάται από μία τιμή μεταξύ 0 και  $p - 1$  ( $p$  = το πλήθος των διαφορετικών καταστάσεων). Η τιμή 0 σημαίνει ότι η κυψέλη είναι σε ηρεμία, ενώ η τιμή και  $p - 1$  δηλώνει ότι η κυψέλη είναι κατεστραμμένη. Οι υπόλοιπες ενδιάμεσες τιμές υποδηλώνουν ένα βαθμό αποπόλωσης.

Υποτίθεται ότι κάθε κυψέλη βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με τις οκτώ γειτονικές της μέσω της ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης, είναι δυνατό να μεταβληθεί η κατάσταση της. Ο κανόνας μετάβασης που εφαρμόζεται σε κάθε κυψέλη εξαρτάται, προφανώς, από την τρέχουσα κατάσταση της κυψέλης (σε ηρεμία, αποπολωμένη, κατεστραμμένη). Σε κάθε περίπτωση, οι κανόνες εφαρμόζονται συγχρόνως σε όλες τις κυψέλες του πλέγματος και ο κατάλληλος επιλέγεται από το σύνολο των εξής τριών:

- κυψέλη σε ηρεμία: η κυψέλη μπορεί ή όχι να αποπολωθεί στο επόμενο χρονικό βήμα  $t+1$ . Αυτό εξαρτάται από τον αριθμό των πολωμένων (polarised) γειτονικών της κυψελών, τον αριθμό των κατεστραμμένων γειτονικών της κυψελών και από την αντίσταση του κυκλώματος της θεωρούμενης κυψέλης που είναι πιθανόν να καταστραφεί.
- αποπολωμένη κυψέλη: έχει την τάση να αποπολωθεί περισσότερο με την πάροδο του χρόνου  $t$ .
- κατεστραμμένη κυψέλη: μία κατεστραμμένη κυψέλη κατά τη χρονική στιγμή  $t$  δημιουργεί μία νέα κυψέλη σε ηρεμία στο επόμενο χρονικό βήμα  $t+1$ .

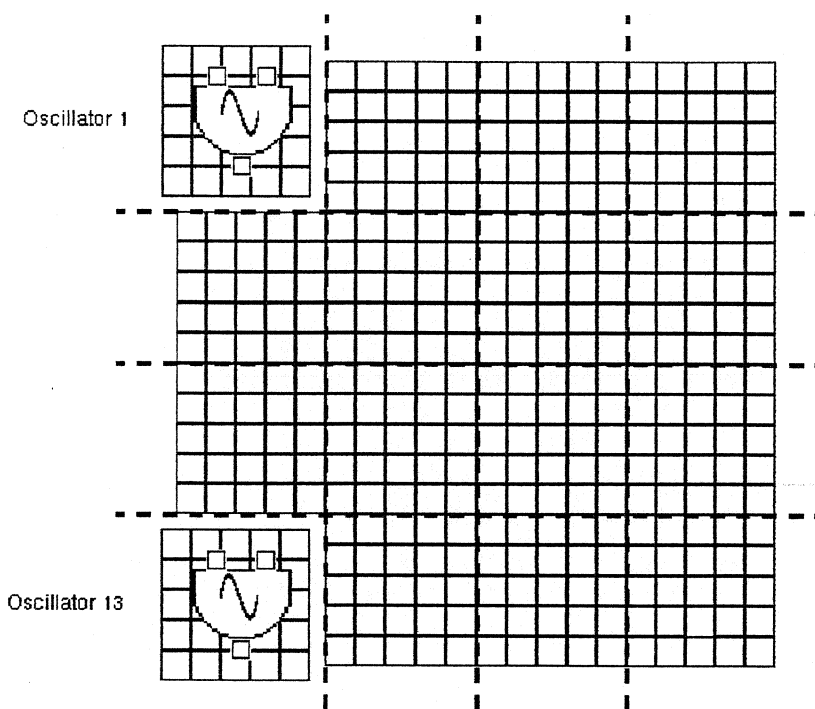
Όλες οι κυψέλες, που βρίσκονται διατεταγμένες στο πλέγμα, αντιπροσωπεύουν, κατά ομάδες, ταλαντωτές. Κάθε ταλαντωτής περιέχει ίσο αριθμό κυψελών. Αυτοί οι ψηφιακοί ταλαντωτές είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή κυματομορφών και χρειάζονται τρεις παραμέτρους για να λειτουργήσουν (σχήμα 2.26): συχνότητα, πλάτος και διάρκεια (σε milliseconds) (frequency, amplitude, duration) του σήματος. Οι τιμές  $(0 - p-1)$ , που δηλώνουν την κατάσταση των κυψελών, αντιστοιχίζονται σε τιμές συχνοτήτων και ο μέσος όρος των τιμών των συχνοτήτων των κυψελών που περιέχει ένας ταλαντωτής, δίνει, τελικά, την τιμή της συχνότητας της κυματομορφής που παράγει αυτός. Η διαδικασία αυτή αφορά, προφανώς, μία χρονική στιγμή  $t$ , αλλά επαναλαμβάνεται σε κάθε επανάληψη του κυψελοειδούς αυτόματου, οπότε η τιμή της συχνότητας της κάθε κυματομορφής μεταβάλλεται. Συνεπώς, μεταβάλλεται και το συνολικό ηχητικό



**Σχήμα 2.26:** Κάθε ταλαντωτής χρειάζεται τρεις παραμέτρους για να λειτουργήσει: συχνότητα, πλάτος και διάρκεια του σήματος



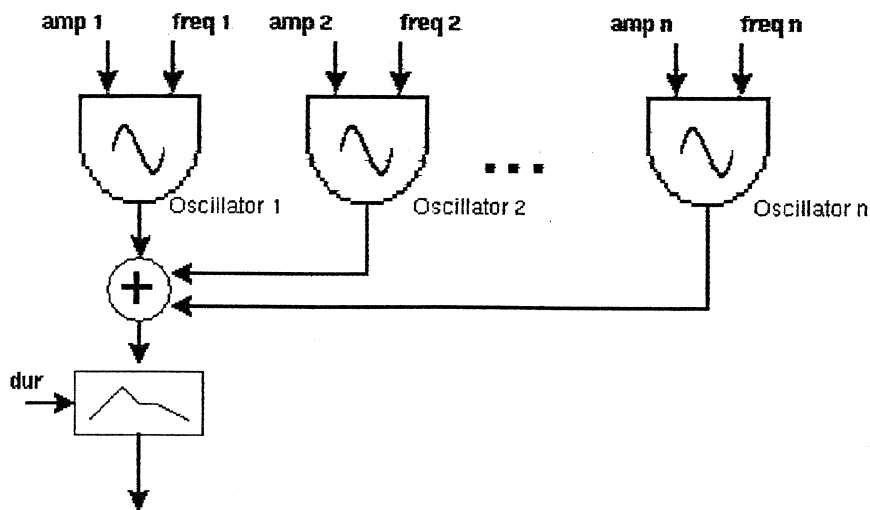
αποτέλεσμα. Ένα παράδειγμα πλέγματος 400 κυψελών κατανεμημένων ισόποσα σε 16 ταλαντωτές φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (σχήμα 2.27):



**Σχήμα 2.27:** Ένα πλέγμα 400 κυψελών κατανεμημένων ισόποσα σε 16 ταλαντωτές

Όλοι οι ταλαντωτές παράγουν την ημιτονοειδή κυματομορφή και οι συχνότητες που παράγονται από όλους τους ταλαντωτές, υπολογίζονται σε παράλληλη διάταξη. Το ηχητικό αποτέλεσμα του κάθε ταλαντωτή αποτελεί και έναν κόκκο, οπότε ο συνδυασμός όλων των κόκκων μαζί συντελεί στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα.

Κάθε κόκκος είναι, ουσιαστικά, το προϊόν μίας διαδικασίας προσθετικής σύνθεσης (additive synthesis) ήχου (σχήμα 2.28): σε κάθε επανάληψη (iteration) του ChaOs, όλοι οι ταλαντωτές παράγουν ταυτόχρονα κυματομορφές, οι συχνότητες των οποίων εξαρτώνται από την κατάσταση των κυψελών, που περιέχουν οι ταλαντωτές, στη δεδομένη στιγμή:



**Σχήμα 2.28:** Κάθε κόκκος είναι το προϊόν μίας διαδικασίας προσθετικής σύνθεσης ήχου

Η διάρκεια του συνολικού ήχου εξαρτάται από τον αριθμό των επαναλήψεων (iterations) του κυψελοειδούς αυτόματου και από τη διάρκεια του κάθε κόκκου. Για παράδειγμα, 100 επαναλήψεις κόκκων διάρκειας 35 msec ο καθένας τους, έχει ως αποτέλεσμα έναν ήχο συνολικής διάρκειας 3,5 sec.

Ο χρήστης είναι δυνατόν να καθορίσει εκ των προτέρων διάφορες παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα. Στη διάθεση του, λοιπόν, είναι ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων στην οποία μπορεί να βρίσκεται μία κυψέλη, η αντιστοίχιση αυτών των καταστάσεων των κυψελών σε τιμές συχνοτήτων, οι διαστάσεις του πλέγματος, ο αριθμός των ταλαντωτών στο πλέγμα, η περιβάλλουσα του ηχητικού φάσματος της κυματομορφής που παράγει ο κάθε ταλαντωτής (δηλαδή η περιβάλλουσα του κάθε κόκκου), οι τιμές ( $R1$ ,  $R2$  και  $k$ ) των μονάδων (αντιστάσεις, πυκνωτές) που υπάρχουν στα ηλεκτρονικά κυκλώματα (δηλαδή στις κυψέλες) κ.ά. Από εκεί και πέρα, το λογισμικό επεξεργάζεται αυτά τα δεδομένα και "αποφασίζει" για τον τελικό ήχο που παράγει.

Σε γενικές γραμμές, το αυτόματο έχει την τάση να εξελίσσεται από μία τυχαία κατανομή των κυψελών στο πλέγμα, σε μία περιοδική επανάληψη σχημάτων (oscillatory cycle of patterns). Η συμπεριφορά του ChaOs μοιάζει με τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται οι περισσότεροι ήχοι που παράγονται από φυσικά μουσικά όργανα: ξεκινώντας από μία ευρεία κατανομή συχνοτήτων (π.χ. θόρυβος), έχουν την



τάση να συγκλίνουν σε συγκεκριμένα ταλαντωτικά σχήματα και έτσι γίνονται, τελικά, αντιληπτοί ως ιδιαίτεροι ήχοι συγκεκριμένου τονικού ύψους και ξεχωρίζουν.

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του προγράμματος, E.R. Miranda, το ChaoSynth είναι ένα χρήσιμο εργαλείο στους συνθέτες ambient και ηλεκτρακουστικής μουσικής, καθώς προορίζεται να παράγει ήχους που δεν μπορούν να βρεθούν στον "πραγματικό" ακουστικό κόσμο (π.χ. εφφέ που χρησιμοποιούνται στις ταινίες επιστημονικής φαντασίας). Ωστόσο, τα αποτελέσματά του είναι πιθανό να μοιάζουν με πραγματικούς ήχους, όπως με αυτόν του τρεχούμενου νερού, με το κελήδισμα των πουλιών ή το ζουζούνισμα των εντόμων. Επιπλέον, το ChaoSynth μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο για την παραγωγή εκπληκτικών γραφικών και κινουμένων σχεδίων.

Ο Miranda χρησιμοποίησε το ChaoSynth για τη δημιουργία ήχων, με σκοπό τη χρησιμοποίησή τους σε έναν αριθμό ηλεκτρακουστικών συνθέσεων, μεταξύ των οποίων είναι το "Olivine Trees" και το βραβευμένο "Goma Aràbica".

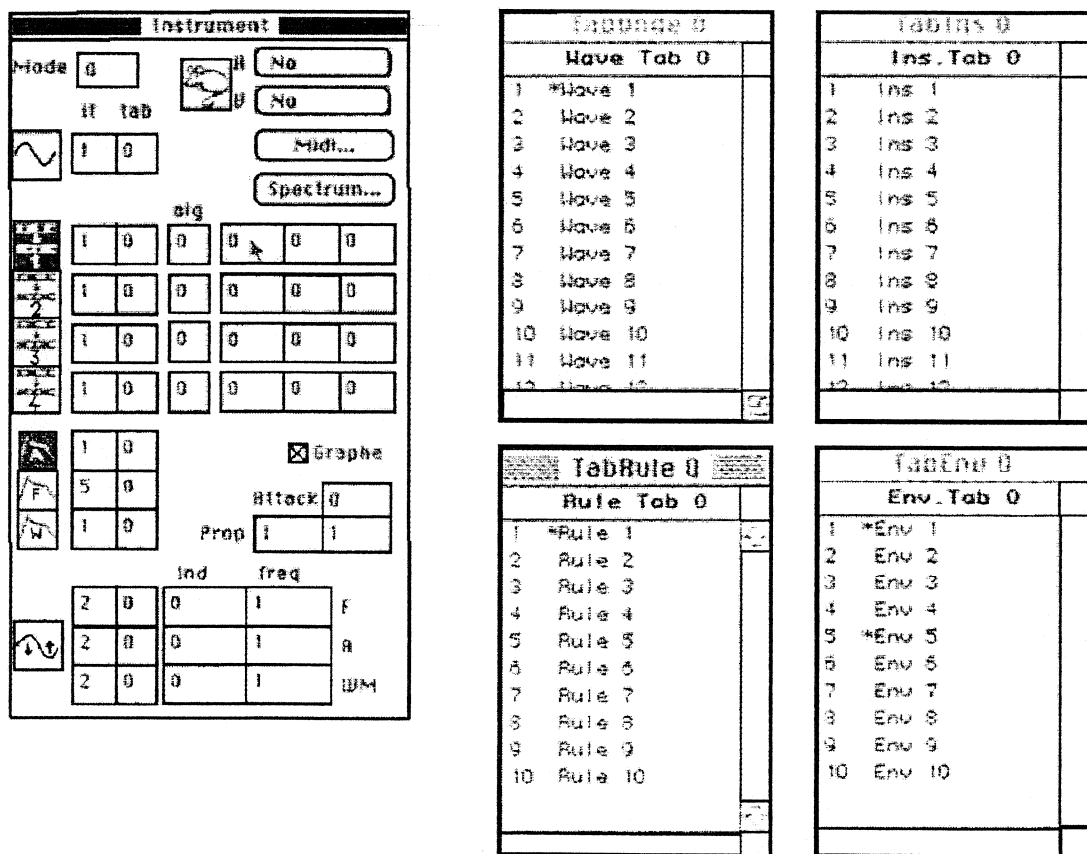
#### **2.4.4 LASy (Linear Automata Synthesis)**

Το LASy είναι ένα λογισμικό σύνθεσης ήχου σε πραγματικό χρόνο, σχεδιασμένο από τον Jacques Chareyron, το οποίο λειτουργεί με την τεχνική πίνακα ανάγνωσης κυψελοειδών αυτόματων (cellular automata lookup table) (βλ. παράγραφο 2.3.3).

Η όλη διαδικασία έγκειται στη χρήση ενός μονοδιάστατου κυψελοειδούς αυτόματου ως ενός πίνακα ανάγνωσης, ο οποίος περιέχει τιμές που σχηματίζουν μία αρχική κυματομορφή, σύμφωνα με την αρχική διάταξη του κυψελοειδούς αυτόματου. Η αναπαραγωγή αυτής της κυματομορφής γίνεται περιοδικά και, σε κάθε επανάληψή της, ο αλγόριθμος, με βάση τον οποίο εξελίσσεται το κυψελοειδές αυτόματο, επεξεργάζεται την κυματομορφή. Σκοπός του συστήματος είναι να υποβάλλονται τα στοιχεία του πίνακα ανάγνωσης - ουσιαστικά, οι καταστάσεις των κυψελών - σε διαρκή μεταβολή, σύμφωνα, όμως, με κάποιο είδος "γενετικού κώδικα" ("genetic code"). Συνεπώς, η συνολική διαδικασία σύνθεσης του ήχου μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν μία εφαρμογή ενός είδους ψηφιακού φίλτρου σε ένα χρονικά καθορισμένο σήμα (time-limited signal), η διάρκεια του οποίου εξαρτάται από την

εξέλιξη του αυτόματου. Πρόκειται, λοιπόν, για ένα πλαίσιο εργασίας το οποίο προσφέρει τη δημιουργία μίας αυτό-εξελισσόμενης και αυτο-τροποποιούμενης κυματομορφής (self-modifying waveform).

Το λογισμικό προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα καθορισμού του είδους της αρχικής κυματομορφής του πίνακα ανάγνωσης (οπότε, κατά κάποιο τρόπο και της αρχικής διάταξης των κυψελών), των διαφόρων ειδών κανόνων μετάβασης που μπορεί να εφαρμοστούν στο κυψελοειδές αυτόματο για την εξέλιξή του, καθώς και της περιβάλλουσας του πλάτους και της συχνότητας του ήχου. Το τελευταίο, μάλιστα, μπορεί να γίνεται και σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του αυτόματου (σχήμα 2.29).



**Σχήμα 2.29:** Το κύριο παράθυρο του LASy στην οθόνη του υπολογιστή

Ωστόσο, ο χρήστης δεν έχει οπτική επαφή με τη γραφική αναπαράσταση του κυψελοειδούς αυτόματου στην οθόνη του υπολογιστή. Τόσο η αρχική όσο και οι επόμενες διατάξεις του, καθώς επίσης και οι κανόνες μετάβασης, εκφράζονται με

αριθμητικά ποσά, τα οποία ανήκουν σε ένα ορισμένο και πεπερασμένο σύνολο τιμών. Το γεγονός αυτό απαιτεί κάποια σχετική εμπειρία και εξοικείωση από την πλευρά του χρήστη με αυτές τις αντιστοιχίες που, όμως, αν επιτευχθεί, μπορεί να οδηγήσει σε πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Ο ίδιος ο Jacques Chareyron αναφέρει χαρακτηριστικά ότι "...οι πλήρεις δυνατότητες του αλγόριθμου LASy θα αποκαλυφθούν μόνο όταν εφαρμοστούν πιο εξωτικοί κανόνες μετάβασης...". Επίσης, ο J. Chareyron ταξινομεί το αποτέλεσμα του LASy σε τρεις κατηγορίες, σύμφωνα με τον τύπο των κανόνων μετάβασης που εφαρμόζονται στο κυψελοειδές αυτόματο:

- *Ήχοι με απλή εξέλιξη που οδηγούν σε μία σταθερή κατάσταση:* οι απλοί κανόνες μετάβασης έχουν ως αποτέλεσμα μία μονότονη εξέλιξη του ηχητικού φάσματος, στο οποίο η περιβάλλουσα ακολουθεί μία αύξουσα ή φθίνουσα πορεία, οδηγώντας, τελικά, σε μία σταθερή κατάσταση.
- *Ήχοι με απλή εξέλιξη αλλά χωρίς τέλος:* καθώς γίνονται πιο πολύπλοκοι οι κανόνες μετάβασης, παράγονται ατέρμονες διαδοχές παρόμοιων αλλά όχι πανομοιότυπων κυματομορφών.
- *Αιώνιοι πολύπλοκοι ήχοι:* όσο περισσότερο σύνθετοι είναι οι κανόνες μετάβασης τόσο πιο απρόβλεπτη είναι η συμπεριφορά του κυψελοειδούς αυτόματου και, συνεπώς, και της εξέλιξης του ήχου (Miranda 1998, σελ. 46-48).

Γενικά, ο αλγόριθμος LASy είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για την δημιουργία κάποιων ιδιαίτερων και γρήγορων σταδίων της παραγωγής ενός ήχου, όπως είναι το στάδιο της ατάκας. Το γεγονός αυτό βοηθάει πολύ στην προσομοίωση διαφόρων πραγματικών πνευστών και νυκτών μουσικών οργάνων αλλά και στη δημιουργία νέων φανταστικών. Μάλιστα, σαν υποπερίπτωση της λειτουργίας του προγράμματος, είναι δυνατή και η εφαρμογή της τεχνικής Karplus-Strong (βλ. γλωσσάρι και LASy/readme file στο CD-ROM).

## Επίλογος

Όπως έγινε κατανοητό, υπάρχουν διάφοροι τρόποι αντιστοιχίας (mapping) των ιδιοτήτων των κυψελοειδών αυτόματων και διαφόρων μουσικών παραμέτρων. Αυτό, βέβαια, είναι θέμα επιλογής από την πλευρά του χρήστη. Παρόλα αυτά, φάνηκε ότι,

οποιαδήποτε μορφή και να είχε αυτή η αντιστοιχία, το αποτέλεσμα ήταν εξίσου απρόβλεπτο. Αυτό είναι πιθανό να συμβαίνει γιατί τα κυψελοειδή αυτόματα, από τη φύση τους, λειτουργούν με τον τρόπο αυτό. Όσο κι αν η αρχική διάταξη των κυψελών στο πλέγμα ή οι κανόνες μετάβασης είναι προκαθορισμένα από τον χρήστη του αυτόματου, ποτέ δεν είναι δυνατό να προβλεφθεί το τελικό αποτέλεσμα. Χωρίς αμφιβολία, η εφαρμογή του αλγορίθμου των κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική δημιουργία, σε κάθε περίπτωση, οδηγεί πολύ συχνά σε τυχαία και απρόβλεπτα αποτελέσματα. Πολύ πιθανό να είναι αυτή η αιτία που τα κυψελοειδή αυτόματα έχουν προσεγγίσει σε τόσο μεγάλο βαθμό την προσοχή των μουσικοσυνθετών και των μουσικών, γενικότερα.

Σε κάθε περίπτωση, οι ήχοι ή, γενικότερα, η μουσική, που δημιουργείται, έχει αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς παρουσιάζει μία δυναμική εξέλιξη μέσα στο χρόνο και, ορισμένες φορές, μία "ψευδοπεριοδικότητα". Αυτά, άλλωστε, είναι και τα κύρια χαρακτηριστικά των κυψελοειδών αυτόματων, οπότε θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η μουσική που αυτά παράγουν είναι της ίδιας υφής και δομής. Η εκτέλεση των προγραμμάτων που προαναφέρθηκαν και παρουσιάζονται στις ενότητες 2.4.1 - 2.4.5, αποτελεί, μία πολύ καλή απόδειξη αυτού του γεγονότος.

## 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο

---

### Κριτική - Σχολιασμός - Συμπεράσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε μία σύντομη αναφορά στο σύστημα των κυψελοειδών αυτόματων και εξετάστηκαν κάποιοι από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί στη μουσική. Παράλληλα δόθηκαν και ορισμένα παραδείγματα λογισμικών σχεδιασμένα ακριβώς για το σκοπό αυτό.

Στο κεφάλαιο αυτό, ως επίλογος αυτής της εργασίας γίνεται μία σύντομη κριτική τόσο της χρήσης των κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική όσο και των συγκεκριμένων μουσικών λογισμικών που παρουσιάζονται. Ωστόσο, η κριτική αυτή δεν αποσκοπεί στη θέσπιση κανόνων που να ορίζουν μία εκ των πραγμάτων αποδοχή

ή απόρριψη των αντικειμένων στα οποία αναφέρεται. Αντιθέτως, πρόκειται για έναν σχολιασμό που έχει ως σκοπό να προβληματίσει τον αναγνώστη και να τον παροτρύνει να επιδοθεί σε περαιτέρω έρευνα των όσων αναφέρονται στην παρούσα εργασία.

Στο θέμα της κριτικής του συστήματος των κυψελοειδών αυτόματων και, κυρίως, της σχέσης του με τη μουσική, αξιόλογες πηγές αποτελούν Ξενάκης (1992, 2001) και Roads (1996). Επίσης πολύ σημαντικές είναι οι μελέτες που έχουν γίνει από τον Miranda, ο οποίος έχει συγγράψει βιβλία και πολλά άρθρα που ασχολούνται με το θέμα.

### **3.1 Σχολιασμός Λογισμικών**

Στην ενότητα 2.4 παρουσιάστηκαν τα λογισμικά CAMUS, CAMUS 3D, LASy, Virtual Waves 2.1 και ChaoSynth, τα οποία χρησιμοποιούν, το καθένα με ξεχωριστό τρόπο, το σύστημα των κυψελοειδών αυτόματων, για μουσικούς σκοπούς\*. Αντικείμενό τους, όπως είδαμε, μπορεί να είναι η σύνθεση ξεχωριστών ηχοχρωμάτων και μουσικής παρτιτούρας. Αυτό, βέβαια, δε σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπάρξουν και άλλες μορφές εφαρμογής των κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική. Ωστόσο, η ενότητα αυτή ασχολείται με τα πέντε αυτά συγκεκριμένα λογισμικά και επιχειρεί ένα είδος κριτικής και, κυρίως, σχολιασμού του τρόπου λειτουργίας τους και των μουσικών αποτελεσμάτων τους.

Οι McAlpine, Miranda και Hoggar (1999, σελ. 25), αναφερόμενοι στα λογισμικά CAMUS και CAMUS 3D, κάνουν λόγο για ένα είδος "ηχοποίησης" ('sonification') της εξελικτικής συμπεριφοράς των κυψελοειδών αυτόματων που χρησιμοποιούν. Ωστόσο, τα μουσικά στοιχεία που εξάγονται, προκύπτουν από την εξέλιξη του αυτόματου και είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν εξαρχής. Οποιοδήποτε είδους μακροπρόθεσμη τάση που προκύπτει στον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται το αυτόματο, αποτελεί παράδειγμα εξελικτικής συμπεριφοράς και μόνο. Οι κανόνες μετάβασης που εφαρμόζονται σε ένα κυψελοειδές αυτόματο, ισχύουν

---

\* Επίσης, το λογισμικό Harmony Seeker χρησιμοποιεί τα κυψελοειδή αυτόματα σε συνδυασμό με τους γενετικούς αλγόριθμους, όπως εξάλλου αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.3.4, και εσωκλείεται στο CD-ROM που συνοδεύει την εργασία.

μόνο σε μία γειτονιά τελείως προκαθορισμένων διαστάσεων, γύρω από την θεωρούμενη κυψέλη. Συνεπώς, οι διάφορες καθολικές τάσεις του αυτόματου που προκύπτουν, είναι σαφές ότι δεν υπολογίζονται εκ των προτέρων".

Αυτό, άλλωστε, γίνεται αντιληπτό από το εξής γεγονός: τα λογισμικά CAMUS και CAMUS 3D επιτρέπουν στον χρήστη να "σώσει" όλα τα δεδομένα και τις τιμές που ο ίδιος έχει θεσπίσει εκ των προτέρων. Με τον τρόπο αυτό, σίγουρα το μουσικό υλικό μπορεί να αναπαραχθεί, με σημαντικές, όμως, διαφοροποιήσεις. Αυτές οι αλλαγές είναι, κατά κάποιο τρόπο, "ενσωματωμένες" στις αρχικές επιλογές του χρήστη, οι οποίες λειτουργούν βασισμένες σε πιθανοτικές διεργασίες. Έτσι, κάθε δημιουργία που προέρχεται από τα λογισμικά αυτά δεν μπορεί να είναι ίδια και απaráλλαχτη. Η "εκτέλεση" των αρχικών εντολών που θέτει ο χρήστης στο λογισμικό από αυτό ποικίλει κάθε φορά, παρόλο που οι εντολές αυτές είναι οι ίδιες, Σύμφωνα, με τον δημιουργό, E.R Miranda, των λογισμικών, κάτι ανάλογο συμβαίνει και στην εκτέλεση ενός μουσικού έργου. Ποτέ δύο εκτελέσεις του ίδιου έργου δεν είναι ακριβώς ίδιες.

Ακόμη, όμως, και σε μία πρωτότυπη, καινούρια χρήση των προγραμμάτων αυτών, το τελικό αποτέλεσμα είναι σχεδόν απίθανο να προβλεφθεί. Από την άλλη πλευρά, ασχέτως από το αποτέλεσμα για το οποίο είναι σχεδιασμένα να παράγουν, τα υπόλοιπα λογισμικά προσφέρουν μεγαλύτερη δυνατότητα πρόβλεψης. Αυτό, βεβαία, είναι πιθανό να οφείλεται και σε ορισμένες άλλες επιλογές που προσφέρουν στο χρήστη, οι οποίες δεν σχετίζονται με την καθαυτό λειτουργία του κυψελοειδούς αυτόματου που χρησιμοποιούν αλλά με το τελικό παραγόμενο αποτέλεσμα.

Για παράδειγμα, το λογισμικό LASy, κατά τη διάρκεια της "ηχοποίησης" του αυτόματου, προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να επέμβει σε μεγάλο βαθμό σ' αυτήν, μεταβάλλοντας τιμές παραμέτρων που έχουν να κάνουν με τον παραγόμενο ήχο (π.χ. έλεγχος της δυναμικής ή του τονικού ύψους μέσω της οριζόντιας και κάθετης, αντίστοιχα, κίνησης του ποντικιού). Με τον τρόπο αυτό, το αυτόματο αποτελεί ένα είδος γεννήτριας μουσικών δεδομένων, τα οποία, όμως, "επιδιορθώνονται" από τον χρήστη του λογισμικού και, μάλιστα, σε πραγματικό χρόνο.

Κανένα άλλο από τα πέντε λογισμικά δε λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και, συνεπώς, ο χρόνος που απαιτείται από τον χρήστη για την επιλογή και/ή την απόρριψη των πιθανών αποτελεσμάτων, που έχει τελικά στη διάθεσή του, είναι πολύ μεγαλύτερος. Και αυτό συμβαίνει, επίσης, γιατί, προφανώς, όπως αναφέρει και ο E.R.

Miranda σε διάφορες μελέτες του για τα προγράμματα CAMUS και CAMUS 3D, "...κανένα τους δε διαθέτει κάποιο είδος αισθητικής κριτικής, ώστε το αποτέλεσμα που παράγουν να γίνεται αμέσως αποδεκτό. Ωστόσο, σε συνδυασμό με την ανθρώπινη κρίση αλλά και με τις συνθετικές ικανότητες που ο χρήστης τους θα πρέπει να διαθέτει, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι επιθυμητά. Τα λογισμικά αυτά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως γεννήτριες μουσικού υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία μουσική σύνθεση. Από εκεί και πέρα μπορεί να επιλεγεί μόνο αυτό το υλικό που ικανοποιεί τους αισθητικούς σκοπούς του συνθέτη. Επίσης, είναι πιθανό ο συνθέτης να κάνει περαιτέρω τροποποιήσεις στο υλικό αυτό θέλοντας να επιτύχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για το έργο του. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν τα προγράμματα χρησιμοποιούνται σαν 'μηχανές ιδεών'. Η μουσική, που παράγεται, αποτελεί τη βάση για περισσότερο πολύπλοκες συνθέσεις. Κατά αυτόν τον τρόπο, το CAMUS 3D έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση του βραβευμένου κομματιού μου 'Entree I' Absurde et le Mystere'" (Miranda 2001b).

Όσον αφορά, συγκεκριμένα, το λογισμικό Virtual Waves 2.1 και, κυρίως, το ChaoSynth, τα αποτελέσματά τους ίσως να είναι πιο ελκυστικά, από την άποψη της αισθητικής ικανοποίησης που προσφέρουν. Ο ήχος που παράγουν, ακολουθώντας, διαφορετική οδό (πέρα από τη χρήση των κυψελοειδών αυτόματων), είναι παρόμοιος και, μορφολογικά και ηχοχρωματικά, μοιάζει, πολλές φορές, όπως είδαμε στις παραγράφους 2.4.2 και 2.4.3, με πραγματικούς, φυσικούς ήχους. Είναι, ίσως, από τα καλύτερα παραδείγματα που μπορούν να δοθούν για τον τρόπο με τον οποίον μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο των κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική. Κι αυτό γιατί, αν και, πάλι, η αντιστοίχιση (mapping), που γίνεται, είναι καθορισμένη από τους δημιουργούς των λογισμικών, το αποτέλεσμα είναι αρκετά εντυπωσιακό και ευχάριστο.

Γενικότερα, όμως, όπως φάνηκε και στην παρουσίαση των λογισμικών αυτών, στις αντίστοιχες παραγράφους, η αντιστοίχιση (mapping) που γίνεται μεταξύ των ιδιοτήτων των κυψελοειδών αυτόματων και των μουσικών παραμέτρων, πραγματοποιείται κατά κάποιον τρόπο αυθαίρετο, σύμφωνα, με τις προτιμήσεις των κατασκευαστών τους. Έτσι, ενώ τα λογισμικά CAMUS και CAMUS 3D έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή παρτιτούρας, μέσω της μονάδας MIDI, τα λογισμικά Virtual Waves 2.1 και ChaoSynth αποσκοπούν στην καθορισμό του ηχητικού φάσματος, παράγοντας συχνότητες διαφόρων χρονικών διαρκειών και εντάσεων. Από



την άλλη, το λογισμικό LAsy αντιστοιχίζει τις καταστάσεις των κυψελών σε αριθμητικές τιμές που χρησιμοποιούνται στη δημιουργία κυματομορφών.

Το κάθε λογισμικό, λοιπόν, εφαρμόζει με το δικό του, αυθαίρετο, ίσως, τρόπο μοντέλα κυψελοειδών αυτόματων στη μουσική δημιουργία, αποσκοπώντας σε κάποιο συγκεκριμένο, προκαθορισμένο, σε γενικό πλαίσιο, μουσικό αποτέλεσμα. Το γεγονός αυτό είναι δυνατό να αποτελέσει ένα είδος τροχοπέδης στους χρήστες των λογισμικών, καθώς αυτά δεν είναι σε θέση να τους προσφέρουν περισσότερες δυνατότητες επιλογών. Αντιθέτως, το καθένα τους χρησιμοποιεί τα κυψελοειδή αυτόματα με διαφορετικό τρόπο και για διαφορετικό σκοπό, μέχρι ενός σημείου. Συνεπώς, ένας συνδυασμός τους ίσως να οδηγούσε σε πιο επιθυμητά αποτελέσματα. Ωστόσο, και τα πέντε λογισμικά προσφέρουν επιλογές που σχετίζονται με το τυχαίο. Μάλιστα, αυτό, με όποια μορφή κι αν εκφράζεται, έχει εξέχοντα ρόλο στην όλη λειτουργία των λογισμικών, καθώς αποτελεί αρκετές φορές τη βάση όλων των διαδικασιών που γίνονται για τον υπολογισμό διάφορων μουσικών παραμέτρων. Έτσι, για παράδειγμα, στο CAMUS, ο παράγοντας της δυναμικής καθορίζεται από μία πιθανοτική κατανομή τιμών και στο ChaosSynth, η χρονική διάρκεια του κάθε κόκκου αφήνεται στην τύχη του λογισμικού, το οποίο "αποφασίζει" μόνο του, μέχρι ενός σημείου.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι το τυχαίο έχει να κάνει μόνο με το μουσικό αποτέλεσμα, από τη στιγμή που αυτό παράγεται από το κυψελοειδές αυτόματο, που χρησιμοποιείται σε κάθε λογισμικό. Δηλαδή, ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί και εξελίσσεται το κάθε αυτόματο είναι εξ' ολοκλήρου ντετερμινιστικός. Αυτό σημαίνει ότι, εάν το αυτόματο τεθεί σε εφαρμογή με την ίδια ακριβώς διάταξη κυψελών στο πλέγμα και με τους ίδιους κανόνες μετάβασης, το τελικό αποτέλεσμα θα είναι πάντα το ίδιο\*. Στην παρούσα εργασία, όλα τα κυψελοειδή αυτόματα που χρησιμοποιούνται στα λογισμικά που παρουσιάζονται, είναι ντετερμινιστικά. Αφού το αυτόματο τεθεί σε λειτουργία, παράγεται το μουσικό αποτέλεσμα. Από εκεί και πέρα όλες οι τιμές που καθορίζουν μουσικές παραμέτρους βασιζόμενες στον

---

\* Η λειτουργία ενός μη-ντετερμινιστικού κυψελοειδούς αυτόματου σχετίζεται με τη χρήση κάποιας πιθανοτικής κατανομής, που αφορά βασικά συστατικά του. Έτσι, για παράδειγμα σε μία κυψέλη ενός μη-ντετερμινιστικού κυψελοειδούς αυτόματου, η οποία βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση, είναι δυνατό να εφαρμοστούν περισσότεροι από ένας κατάλληλοι κανόνες μετάβασης. Η επιλογή που πρόκειται να γίνει, μπορεί να πραγματοποιείται με τυχαίο τρόπο.

παράγοντα του τυχαίου, δεν έχουν καμία απολύτως σχέση με την καθαυτό λειτουργία του αυτόματου, παρά μόνο εξαρτώνται από επιλογές που κάνει ο ίδιος ο χρήστης του λογισμικού.

Σε κάθε περίπτωση, λοιπόν, τα πάντα εξαρτώνται από τον χρήστη των λογισμικών και των συστημάτων των κυψελοειδών αυτόματων, που χρησιμοποιούν αυτά, γενικότερα, καθώς αυτός είναι που θέτει στο αυτόματο τους κανόνες μετάβασης ή όποια άλλα δεδομένα απαιτούνται για τη λειτουργία του και διάφορες άλλες τιμές, σύμφωνα με τις οποίες το λογισμικό καθορίζει κάποιες μουσικές παραμέτρους με πιθανοτικές, συνήθως, διεργασίες. Ο καθένας μπορεί να θεσπίσει δικούς του κανόνες και δικές του αρχικές διατάξεις κυψελών στο πλέγμα και να χρησιμοποιήσει τα κυψελοειδή αυτόματα οπωσδήποτε και οπουδήποτε επιθυμεί. Βέβαια, εφόσον η μουσική σύνθεση (ήχου, παρτιτούρας, κυματομορφών κ.τ.λ.) αποτελεί τον τελικό σκοπό της όλης διαδικασίας, το αποτέλεσμα που θα εξαχθεί θα πρέπει να υπηρετεί μουσικούς σκοπούς και μόνο. Ας μην ξεχνάμε ότι αντικείμενό μας είναι η μουσική και τίποτε άλλο, οπότε στόχος μας θα πρέπει να είναι η αισθητική ικανοποίηση των αυτιών μας και όχι των ματιών ή άλλων οργάνων του σώματός μας.

### **3.2 Συμπεράσματα - Προτάσεις**

Σύμφωνα με τον Lewis (1999, σελ. 99) "...είναι σίγουρα γνωστή η άποψη ότι η μουσική επιβάλλεται στον κόσμο μας από μόνη της ή ανεπίσσειται από μία νοημοσύνη μη ανθρώπινης μορφής. Προϋπήρχε πολύ πριν την εμφάνιση του ανθρώπου, ο οποίος κατάφερε να συμφιλιωθεί μαζί της κατά έναν τρόπο που ικανοποιούσε τις αισθητικές του αναζητήσεις. Με τους αιώνες, αυτή η ιδέα απασχόλησε διάφορους τομείς της ανθρώπινης ζωής και δραστηριότητας, όπως είναι η τέχνη, η επιστήμη και η παράδοση, έχοντας ως συνέπεια την στροφή του ανθρώπου στην αναζήτηση της απαρχής και της οργάνωσης του κόσμου...".

Διάφορες μέθοδοι, όπως τα κυψελοειδή αυτόματα, οι γενετικοί αλγόριθμοι, τα κλασματοειδή, τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν στον τομέα της επιστημονικής έρευνας ως μέσα αυτών των προσπαθειών αναζήτησης. Τα αποτελέσματα των ερευνών, που συνεχίζονται ακόμη και σήμερα, αποτελούν τον

καρπό μίας μακρόχρονης σκέψης και έρευνας, βασισμένων στην παράδοση και στην επιστημονική γνώση (Miranda 2001a, σελ. 120).

Οι διαδικασίες, όπως αυτές που αναφέρθηκαν, είναι δομημένες πάνω στο θεμελιώδες ερώτημα "τι μπορεί να συμβεί στον κόσμο μας, δεδομένης της Α ή Β κατάστασης;" Η παρατήρηση του κόσμου από τον άνθρωπο, έτσι όπως τον αντιλαμβάνεται αυτός, οδήγησαν στην κωδικοποίηση αυτών των γνώσεων που απέρρευσαν από την μελέτη και την έρευνα. Κατά την προσπάθεια που έκανε ο άνθρωπος να κατανοήσει όσα έβλεπε γύρω του, δημιούργησε τεχνητούς κόσμους, παρόμοιους των πραγματικών, σύμφωνα, πάντα, με τον τρόπο που αυτός τους αντιλαμβανόταν. Οι σύγχρονοι επιστήμονες στρέφουν όλο και περισσότερο το βλέμμα τους στη μελέτη των λειτουργικών χαρακτηριστικών που εμφανίζουν τα εξαιρετικά πολύπλοκα φυσικά συστήματα, όπως είναι η αλληλεπίδραση και η διασύνδεση των συστατικών τους και η καθολική συμπεριφορά που παρουσιάζουν αυτά.

Αυτοί οι νέοι τομείς εργασίας και έρευνας, δε θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς την υποστήριξη που προσφέρουν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, καθώς εκτελούν πολύπλοκες και μακρόχρονες εργασίες ευκολότερα και γρηγορότερα. Οι επιστήμονες πια είναι σε θέση να κατασκευάζουν τεχνητούς κόσμους, ως υποκατάστατα των φυσικών, αποσκοπώντας στην εκτέλεση δύσκολων και σύνθετων πειραμάτων που, υπό οποιεσδήποτε άλλες συνθήκες, κάτι τέτοιο θα ήταν αδύνατο. Έτσι, λοιπόν, ξεκίνησε η προσπάθεια δημιουργίας τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence) και τεχνητής ζωής (artificial life).

Παρόλα αυτά, τα ακριβή όρια της τεχνητής νοημοσύνης είναι ακόμη ασαφή και διαφεύγουν της αντίληψής μας, καθώς σχετίζονται με αυτό που αποκαλούμε "νοήμονα συμπεριφορά", μία έννοια που ακόμη δεν έχει αποσαφηνιστεί εξ ολοκλήρου από τον άνθρωπο. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, οι υπολογιστές και οι μηχανές είναι σε θέση να διεκπεραιώνουν όλο και πιο δύσκολες και σύνθετες εργασίες με άρτια αποτελέσματα (Miranda 2001a, εισαγωγή).

Όσον αφορά τον τομέα της μουσικής, είναι γεγονός ότι στη σημερινή εποχή η ψαλίδα μεταξύ των ικανοτήτων ενός υπολογιστή και ενός εκ φύσεως ευφυούς μουσικού κλείνει. Βέβαια, η συνηθέστερη περίπτωση, ακόμη, είναι αυτή κατά την οποία χρησιμοποιούνται υπολογιστικά συστήματα που απαιτούν από τον εκτελεστή ή το χρήστη τους να "κατέλθει" στο επίπεδό τους, ώστε να θέσουν εις πέρας ακόμη και την πιο εύκολη μουσική εργασία που τους ανατίθεται. Συνεπώς, θέλοντας να

εξελιξουμε και να προωθήσουμε τη μουσική και, γενικότερα, την τέχνη, συμπεριλαμβάνοντας και τους υπολογιστές, σε ένα ανώτερο επίπεδο, είναι απαραίτητο να τους "διδάξουμε" κάτι περισσότερο αναφορικά με τη μουσική και τον τρόπο αλληλεπίδρασής τους με τους μουσικούς (Roads 1989, σελ. 635-636). Σ' αυτή την προσπάθεια ίσως θα ήταν χρήσιμη η επιστράτευση επιστημονικών μεθόδων, παρόμοιων με αυτές που προαναφέρθηκαν.

Τα κυψελοειδή αυτόματα και άλλα παρεμφερή υπολογιστικά συστήματα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο των διαφόρων σταδίων μιας συνθετικής διαδικασίας της μουσικής, μέσω της προτυποποίησής της, μελετώντας τις οργανωτικές, και όχι μόνο, αρχές που παρατηρούνται σε παγκοσμίως αποδεκτά σοβαρά μουσικά παραδείγματα και, κατόπιν, της αναπαραγωγής της. Αποσκοπώντας στην κατανόηση της μουσικής, ως φυσικού στοιχείου, αυτή η προσπάθεια προτυποποίησης ορισμένων φυσικών μουσικών φαινομένων θα μπορούσε, πράγματι, να αποφέρει καρπούς. Μάλιστα, πολύ νωρίς, συστήματα κυψελοειδών αυτόματων είχαν δημιουργηθεί, ώστε να γίνει εφικτή η προσομοίωση και η αναπαραγωγή, με τεχνητό τρόπο, δυναμικών συστημάτων, όπως οι κινήσεις των ρευστών. Ο Supper (2001, σελ. 52) δίνει ένα παράδειγμα: "...στη ρευστοδυναμική, ένα σωματίδιο ρευστού υλικού μπορεί να αναπαρασταθεί από μία κυψέλη. Όλα αυτά τα σωματίδια επηρεάζουν το ένα το άλλο, καθώς κινούνται στο χώρο και συγκρούονται μεταξύ τους, συμβάλλοντας, όμως, έτσι στη συνολική συμπεριφορά του ρευστού σώματος. Παρόλο που η κατανόηση και η μελέτη της συμπεριφοράς του καθενός σωματιδίου (της καθεμίας κυψέλης) ξεχωριστά δεν είναι καθόλου δύσκολη, η επίπτωση που μπορεί να έχει αυτή στη συνολική συμπεριφορά του συστήματος είναι πολύ πιθανό να έχει τεράστιο μέγεθος. Αυτό συμβαίνει γιατί, εξ ορισμού, η κάθε κυψέλη επηρεάζεται από τις γειτονικές της αλλά, συγχρόνως, τις επηρεάζει...".

Συνεχίζοντας, ο Supper, στο ίδιο κείμενο, αναφέρει: "Αυτές ακριβώς οι ιδιότητες των κυψελοειδών αυτόματων προσέλκυσαν το ενδιαφέρον πολλών μουσικών και συνθετών, οι οποίοι δεν φοβήθηκαν να τα χρησιμοποιήσουν στις συνθετικές τους διαδικασίες. Ο P. Beys αναφέρει χαρακτηριστικά: '...ως συνθέτης, ενδιαφέρομαι σε εξελικτικά και αναπτυξιακά μοντέλα και όχι σε θεωρίες περί δομικού σχεδιασμού...'. Για τον Ιάννη Ξενάκη, τα κυψελοειδή αυτόματα αποτέλεσαν εργαλείο δημιουργίας πολύπλοκων, ως προς τη δομή, κατασκευών, οι οποίες, όμως,



τελικά, είχαν ελάχιστη σημασία στο συνολικό έργο\*...". Βέβαια, όπως αναφέρει ο ίδιος ο Ξενάκης (Xenakis 1992, σελ. 133), "...τέτοιες υπολογιστικές μηχανές είναι απαραίτητες διότι, παρέχοντας άμεσα λειτουργίες που έχουν τεκμηριωθεί μέσα από πειράματα, επιταχύνουν τις διεργασίες του ανθρώπινου εγκεφάλου και ανοίγουν το δρόμο για σκέψη σε βαθύτερο επίπεδο...".

Συνεπώς, αυτό που χρειάζεται κατά την εφαρμογή συστημάτων, όπως τα κυψελοειδή αυτόματα, στη μουσική, είναι ιδιαίτερη προσοχή. Ίσως για πολλούς και διάφορους αισθητικούς, ή όχι, λόγους, μπορεί να μην αρκεί μία απλή και αυθαίρετη αντιστοίχιση (mapping) των χαρακτηριστικών των κυψελοειδών αυτόματων σε μουσικές παραμέτρους, όπως είναι το τονικό ύψος, η χρονική διάρκεια, η διαστηματική απόσταση δύο γεγονότων (π.χ. φθόγγων), η έκταση, η άρθρωση, το πλάτος, η δυναμική, το ηχόχρωμα, η κυματομορφή κ.τ.λ. Πολύ εύκολα ο πειραματιστής θα μπορούσε να οδηγηθεί είτε σε αδιέξοδα είτε σε παραπλανητικά, απατηλά και κίβδηλα αποτελέσματα. Πράγματι, χρειάζεται μεγάλη προσπάθεια και προσοχή για τον "δαμασμό" αυτών των κόσμων και για τη συμφιλίωση μαζί τους. Εφόσον, όμως, η χρήση τους και η συνολική εργασία που πρόκειται να γίνει, πραγματοποιηθεί με τρόπο υπεύθυνο και αξιοπρεπή, το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να αποδειχθεί πολύ θετικό. Πολύ χαρακτηριστική είναι μία φράση του Ξενάκη (Xenakis 1992, σελ. 144): "... με τη βοήθειά τους ο συνθέτης μετατρέπεται σε ένα είδος πιλότου: πατάει κουμπιά, εισάγει συντεταγμένες και επιτηρεί τις ρυθμίσεις ενός κοσμικού σκάφους που ταξιδεύει στο σύμπαν του ήχου, διασχίζοντας ηχητικούς αστερισμούς και γαλαξίες που μονάχα θα μπορούσε να φανταστεί σε κάποιο στιγμιαίο όνειρο. Τώρα, μπορεί να τους εξερευνήσει με την ησυχία του, καθισμένος σε μία πολυθρόνα...".

---

\* Για παράδειγμα, οι εξελικτικές ιδιότητες των κυψελοειδών αυτόματων καθορίζουν την πορεία της δυναμικής των ορχηστρικών clusters στο έργο "Heros" (1986).

## Παράρτημα

### Π.1 Ο Κανόνας Ισοτιμίας

Ένα παράδειγμα ενός απλού κανόνα μετάβασης είναι ο γνωστός "κανόνας ισοτιμίας / κανόνας  $\oplus$ " ("parity rule" / " $\oplus$  rule") που προτάθηκε τη δεκαετία του 1970 από τον Edward Fredkin και εφαρμόζεται σε ένα τετραγωνικό δισδιάστατο πλέγμα.

Κάθε τόπος στο πλέγμα είναι και μία κυψέλη η οποία περιγράφεται από τη θέση της  $\vec{r} = (i,j)$ , όπου  $i$  και  $j$  είναι η οριζόντια και κάθετη συντεταγμένη, αντίστοιχα, στο πλέγμα. Μία συνάρτηση  $\psi_t(\vec{r})$  χρησιμοποιείται στο πλέγμα για να περιγράψει την κατάσταση της κάθε κυψέλης σε κάθε επανάληψη  $t$ . Η ποσότητα αυτή μπορεί να είναι ίση με 0 ή 1.

Ο κανόνας που εφαρμόζεται καθορίζει τον τρόπο υπολογισμού των νέων καταστάσεων  $\psi_{t+1}$  από τις καταστάσεις της επανάληψης  $t$ . Αρχίζουμε από μία αρχική κατάσταση τη χρονική στιγμή  $t=0$  με μία δοσμένη configuration των τιμών  $\psi_0(\vec{r})$  στο πλέγμα. Η κατάσταση στη χρονική στιγμή  $t=1$  υπολογίζεται ως εξής:

1. Για κάθε τόπο (site)  $\vec{r}$  υπολογίζεται το άθροισμα των τιμών  $\psi_0(\vec{r}')$  των τεσσάρων κοντινότερων γειτονικών τόπων  $\vec{r}'$  βόρεια, νότια, δυτικά και ανατολικά. Το σύστημα υποτίθεται ότι είναι περιοδικό και στις δύο  $i,j$  διευθύνσεις (όπως σε έναν δακτύλιο (torus)), έτσι ώστε αυτός ο υπολογισμός να αφορά όλους τους τόπους.
2. Εάν το άθροισμα είναι ζυγός αριθμός, η νέα κατάσταση  $\psi_1(\vec{r})$  είναι 0 (άσπρο χρώμα), ειδάλλως είναι 1 (μαύρο χρώμα).

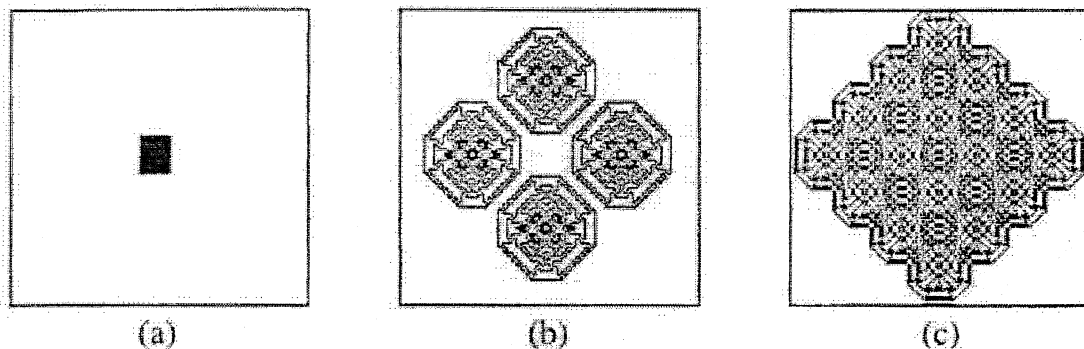
Ο ίδιος κανόνας εφαρμόζεται κατ' επανάληψη για την εύρεση των καταστάσεων τις χρονικές στιγμές  $t=2,3,4,\dots$

Από μαθηματική άποψη, αυτός ο "κανόνας ισοτιμίας" μπορεί να εκφραστεί μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\psi_{t+1}(i,j) = \psi_t(i+1,j) \oplus \psi_t(i-1,j) \oplus \psi_t(i,j+1) \oplus \psi_t(i,j-1)$$

όπου το σύμβολο  $\oplus$  σημαίνει τη λογική πράξη XOR (exclusive OR logical operation). Είναι επίσης το άθροισμα με ακέραιο υπόλοιπο 2:  $1 \oplus 1 = 0 \oplus 0 = 0$  και  $1 \oplus 0 = 0 \oplus 1 = 1$ .

Με την εφαρμογή αυτού του κανόνα, δημιουργούνται πολύ όμορφα γεωμετρικά σχήματα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (σχήμα Π.1):



Σχήμα Π.1: Ο κανόνας  $\oplus$  σε ένα  $256 \times 256$  περιοδικό πλέγμα: (a) αρχική διάταξη, (b) και (c) διατάξεις μετά από 93 και 110 επαναλήψεις, αντίστοιχα

Οι μηχανισμοί που οδηγούν στις πολύπλοκες συνθέσεις που παράγονται από τον "κανόνα ισοτιμίας", προκύπτουν από την συνεχόμενη εναπόθεση του αρχικού pattern, μεταφραζόμενου πολλές φορές από μία διαφορετική ποσότητα.

Τέλος, είναι ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι ο "κανόνας  $\oplus$ " αποτελεί μία γενίκευση σε δύο διαστάσεις του διάσημου "κανόνα 90" του Wolfram (Chopard και Droz 1998, σελ. 8-12).

**Π.2 Παρτιτούρες****KAGOLA***Soave e espressivo*

Georgios Emmanouil 1/2003

Piano

The first system of the piano score for 'KAGOLA' consists of two staves. The right hand (treble clef) is mostly silent, with a few notes appearing at the end of the system. The left hand (bass clef) plays a rhythmic pattern of eighth and sixteenth notes, starting with a triplet of eighth notes. The key signature has one flat (B-flat), and the time signature is common time (C).

The second system of the piano score starts at measure 6. The right hand begins with a melodic line of eighth notes, featuring an 8va (octave) marking. The left hand continues with a similar rhythmic pattern. The system ends with a triplet of eighth notes in the right hand.

The third system of the piano score starts at measure 11. The right hand has a melodic line with an 8va marking and a triplet of eighth notes. The left hand has a more complex rhythmic pattern with triplets and slurs. The system ends with a triplet of eighth notes in the right hand.

The fourth system of the piano score starts at measure 16. The right hand has a melodic line with a flat (B-flat) and a triplet of eighth notes. The left hand has a complex rhythmic pattern with slurs and a triplet of eighth notes. The system ends with a triplet of eighth notes in the right hand.

The fifth system of the piano score starts at measure 21. The right hand has a melodic line with an 8va marking, a 15ma (fifteenth) marking, and another 8va marking. The left hand has a complex rhythmic pattern with slurs and a triplet of eighth notes. The system ends with a triplet of eighth notes in the right hand.



The image displays a musical score for piano, consisting of six systems of music. Each system includes a treble clef staff and a bass clef staff. The score is marked with measure numbers 26, 31, 36, 41, 46, and 51. The music features complex rhythmic patterns, including triplets and sixteenth notes. There are several instances of the Greek word 'δύο' (two) written above the treble clef staff, indicating specific rhythmic or melodic elements. The bass clef staff contains dense chordal textures and moving lines. The overall style is contemporary and technically demanding.

*Σχήμα Π.2: Τα πρώτα 55 μέτρα του έργου "KAGOLA" για πιάνο που συντέθηκε από τον συντάκτη μέσω και της χρήσης των κυψελοειδών αυτόματων*

The image displays a musical score for the piece "Wee Batucada Scotica" by Eduardo Reck Miranda, specifically measures 42 through 47. The score is written for a four-staff ensemble, including a violin, a flute, a double bass, and a cello. The music is in 4/4 time and features a variety of dynamic markings and articulations. Measures 42-44 show a complex rhythmic pattern with dynamics ranging from *p* (piano) to *ff* (fortissimo). Measure 45 is marked *mf* (mezzo-forte) and *fff* (fortississimo). Measure 46 is marked *f* (forte). Measure 47 is marked *pizz.* (pizzicato) and *p* (piano). The score includes numerous triplets and slurs, and a fermata is present over the final measure. The key signature is one sharp (F#).

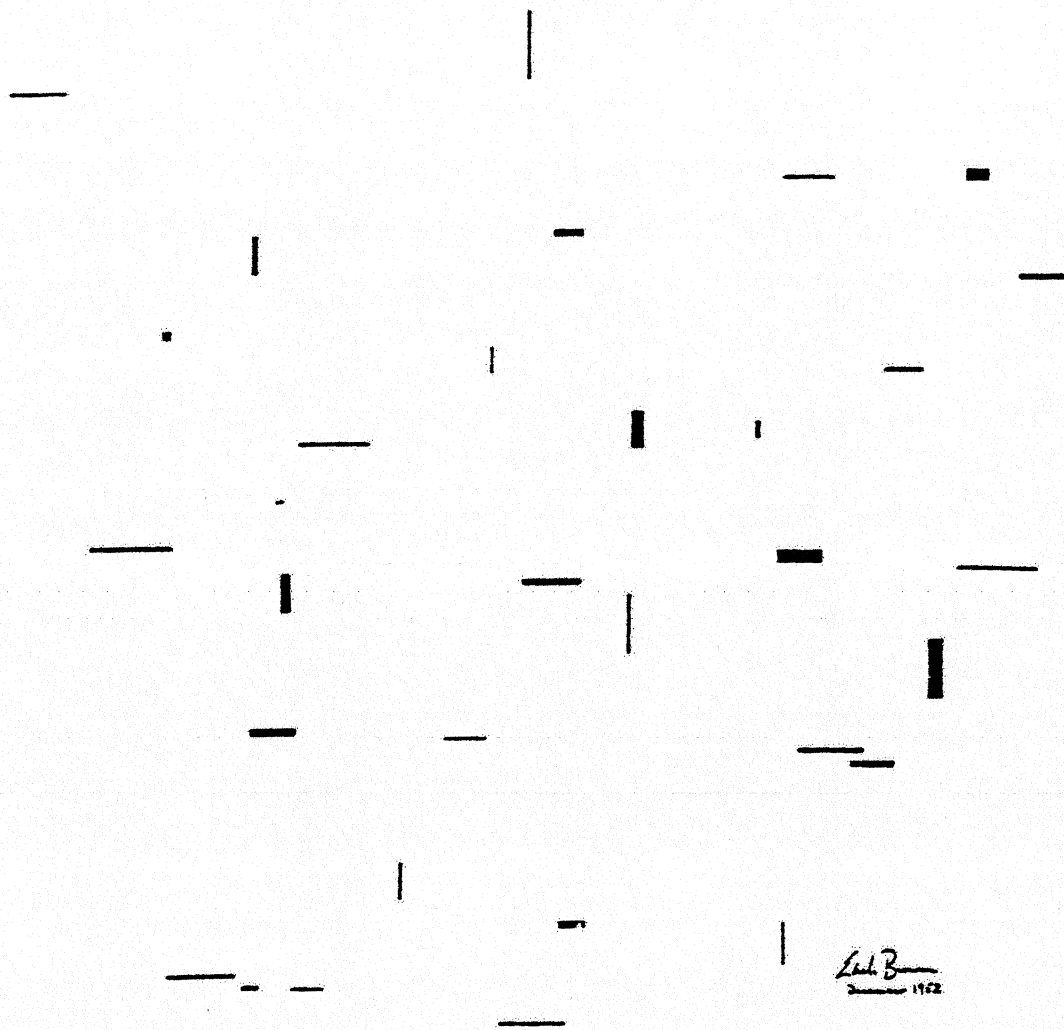
Σχήμα Π.3: Απόσπασμα του έργου "Wee Batucada Scotica" του Eduardo Reck Miranda

**III - Vanishing Point**  
(3rd movement of Grain Streams)

Eduardo Reck Miranda

The image displays a musical score for the piece "III - Vanishing Point" by Eduardo Reck Miranda. The score is for Piano and Electronics. It consists of two systems of music. The first system shows the Piano part with a melodic line and the Electronics part with a corresponding waveform. The second system shows the Piano part with a more complex melodic line and the Electronics part with a waveform that has a distinct pulse. The score includes various musical notations such as notes, rests, and dynamic markings.

*Σχήμα Π.4: Απόσπασμα της τρίτης κίνησης "Vanishing Point" του έργου "Grain Streams" του Eduardo Reck Miranda*



Σχήμα Π.5: Παρτιτούρα του έργου για πιάνο "Folio" (1952) του Earle Brown. Στο έργο αυτό ζητείται από τον πιανίστα να εκτελέσει ό,τι μπορεί να σκεφτεί βλέποντας αυτή τη γραφική παρτιτούρα. Μάλιστα, δε δίνονται περαιτέρω οδηγίες για την εκτέλεση.

### **Π.3 Διαδικτυακοί Δεσμοί (Links)**

Εκτός των διαδικτυακών τόπων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, οι παρακάτω ηλεκτρονικές διευθύνσεις περιέχουν χρήσιμες και ενδιαφέρουσες πληροφορίες τόσο για τα κυψελοειδή αυτόματα όσο και για άλλους τομείς, όπως αλγοριθμική σύνθεση μουσικής και ήχου και μέθοδοί της, τεχνητή ζωή, τεχνητή νοημοσύνη, computer music κ.ά. Επίσης, ορισμένες από αυτές προσφέρουν και επιλογές "download" για διάφορα λογισμικά, κάποια από τα οποία εσωκλείονται στο CD-ROM που συνοδεύει την παρούσα εργασία, καθώς και χρήσιμους διαδικτυακούς δεσμούς (links) για περαιτέρω έρευνα και μελέτη.

- Beckert, D. (2002) *Algorithmic Composition*. Retrieved January 10, 2002 from the World Wide Web: <http://www.digitale-medien.de/beckert.html>
- Bennett, G. *Chaos, Self-Similarity, Musical Phrase and Form*. Retrieved December 24, 2001 from the World Wide Web: <http://computermusic.ch/files/articles/Chaos,Self-Similarity/Chaos.html>
- Bilotta, E., Pantano, P. and Talarico, V. (2000). *Music Generation through Cellular Automata: How to Give Life to Strange Creatures*. Retrieved September 22, 2002 from the World Wide Web: <http://galileo.cincom.unical.it/Pubblicazioni/papers/2000/milano.html>
- Bourke, P. (1991). *An Introduction to Fractals*. Retrieved January 17, 2003 from the World Wide Web: <http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/fractals/fracintro.html>
- Burns, K.H. (1997). *Algorithmic Composition*. Retrieved December 23, 2001 from the World Wide Web: <http://music.dartmouth.edu/~wowem/hardware/algorithmdefinition.html>
- Ehrencrona, A. *Cellular Automata*. Retrieved September 22, 2002 from the World Wide Web: <http://cgi.student.nada.kth.se/cgi-bin/d95-aeH/get/lifeeng.html>

- McCormack, J. (1996). *Grammar-Based Music Composition*. Retrieved December 26, 2001 from the World Wide Web:  
<http://www.csu.edu.au/ci/vol03/mccorm/mccorm.html>
- Miranda, E.R. (1993). *Cellular Automata Music Composition: A Bio-Logical Inspiration*. Retrieved September 25, 2002 from the World Wide Web:  
[www.isea.qc.ca/symposium/archives/isea93/abs/tracts11.html](http://www.isea.qc.ca/symposium/archives/isea93/abs/tracts11.html)
- Miranda, E.R. (2001) *Evolutionary Music Research*. Retrieved September 22, 2002 from the World Wide Web:  
<http://website.lineone.net/~edandalex/celautom.html>
- Miranda, E.R. (2001). *Chaosynth A Cellular Automata-based Granular Synthesiser*. Retrieved December 5, 2002 from the World Wide Web:  
<http://website.lineone.net/~edandalex/chaosynt.html>
- Miranda, E.R. (2002). *Origins of Music*. Retrieved September 25, 2002 from the World Wide Web:  
<http://www.csl.sony.fr/Research/Experiments/OriginsOfMusic/index.html>
- Miranda, E.R. (2002). *CAMUS A Cellular Automata Music Generator*. Retrieved December 5, 2002 from the World Wide Web:  
<http://website.lineone.net/~edandalex/camus.html>
- Mucherino, N. *Recursion: A Paradigm For Future Music?*. Retrieved December 23, 2001 from the World Wide Web:  
<http://www.ks.rus.uni.stuttgart.de/people/schulz/fmusic/recursion.html>
- Rennard J.-P. (2001). *Genetic Algorithm Viewer 1.0*. Retrieved October 15, 2002 from the World Wide Web: <http://www.rennard.org/alife/english/gavgb.html>
- Rucker, R. (1998). *Cellular Automata Basics*. Retrieved September 22, 2002 from the World Wide Web: [www.mathcs.sjsu.edu/capow.html](http://www.mathcs.sjsu.edu/capow.html)
- Rucker, R. and Walker, J. (1998). *Cellab Cellular Automata Laboratory*. Retrieved September 22, 2002 from the World Wide Web:  
<http://fourmilab.ch/cellab.html>
- Solomon, L. (1998). *The Fractal Nature of Music*. Retrieved December 24, 2001 from the World Wide Web:  
<http://www.community.pima.edu/users/larry/fracmus.html>
- Tyler, T. Retrieved September 27, 2002 from the World Wide Web:  
<http://cafaq.com/threads/index.html>

- Worall, D. (1990). *The Computer as Alter-Ego: The Use of Computers in the Composition of Music*. Retrieved December 28, 2001 from the World Wide Web:
- <http://www.anu.edu.au/ITA/ACAT/drw/Articles/ComputerAsAlterEgo.html>
- <http://www.rennard.org/alife.html> Retrieved September 22, 2002
- <http://cgi.student.nada.kth.se/cgi-bin/d95-aeh/get/lifeeng.html> Retrieved September 22, 2002
- <http://www.rennard.org/alife/english/acgb.html> Retrieved September 22, 2002
- <http://jmge.net/camusic.html> Retrieved September 22, 2002
- <http://www.unm.edu/~keithw/strangeUniverse.html> Retrieved September 22, 2002
- <http://www.wolfram.com/s.wolfram/articles/indices/ca.html> Retrieved September 22, 2002
- <http://www.santafe.edu/projects/evca.html> Retrieved September 22, 2002
- <http://www.brunel.ac.uk/depts/AI/alife/al-ca.html> Retrieved September 22, 2002
- [http://www.mic.atr.co.jp/~rodney/Alife\\_Music.html](http://www.mic.atr.co.jp/~rodney/Alife_Music.html) Retrieved September 25, 2002
- <http://jmusic.ci.qut.edu.au/jmtutorial/CellularAutomata.html> Retrieved September 25, 2002
- <http://www.openhere.com/science/computer-science/artificial-life/cellular-automata.html> Retrieved September 25, 2002
- <http://www.noyzelab.com/research/informal/informal.html> Retrieved September 25, 2002
- <http://www.maths.gla.ac.uk/research/preprints/pp97/pp97.html> Retrieved September 25, 2002
- <http://www.algorithmicmusic.com> Retrieved September 27, 2002
- <http://tamw.atari-users.net.html> Retrieved September 27, 2002
- <http://www.myatari.net/issues/jan2001/music.html> Retrieved September 27, 2002
- [www.sharemation.com/~bravedog/cyberdelia4.html](http://www.sharemation.com/~bravedog/cyberdelia4.html) Retrieved September 27, 2002
- <http://muse.jhu.edu/demo/cmj/25.1supper.html> Retrieved September 27, 2002
- <http://www.cim.mcgill.ca/~clark/nordmodularbook/nmalgorithmic.html> Retrieved September 27, 2002
- <http://alife.12pt.com> Retrieved January 10, 2003

## **Π.4 Περιεχόμενα CD-ROM**

Το CD-ROM που συνοδεύει την εργασία περιέχει ποικίλο υλικό. Οι φάκελοι camus, LASy, Virwaves, Chsynth και harmseek περιέχουν τα λογισμικά CAMUS, CAMUS 3D, LASy, Virtual Waves 2.1, ChaoSynth και Harmony Seeker, που αναφέρθηκαν στην εργασία, στην ενότητα 2.4. Οι φάκελοι Life, Cellab, Gan και Carow98 περιέχουν ενδιαφέροντα λογισμικά που εφαρμόζουν με κάποιο τρόπο τα κυψελοειδή αυτόματα. Τέλος, ο φάκελος compositions περιέχει ποικίλο μουσικό υλικό, αποσπάσματα από μουσικά έργα σε μορφή ήχου και εικόνας. Για περισσότερες πληροφορίες και οδηγίες σχετικά με την εγκατάσταση των λογισμικών ανατρέξτε στο αρχείο ReadMe του CD-ROM, το οποίο παρέχει τις ανάλογες χρήσιμες πληροφορίες.



## **Π.5 Γλωσσάρι**

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι ορισμοί ορισμένων εννοιών που υπάρχουν στην παρούσα εργασία με συνοπτικό τρόπο, διευκολύνοντας το έργο του αναγνώστη. Καλό είναι να αναφερθεί ότι πολύ καλές πηγές για την αναζήτηση και διευκρίνιση των ίδιων ή περισσότερων όρων, αποτελούν οι μελέτες των Chopard και Droz (1998), Miranda (2001a,b) και Roads (1996), καθώς και οι διαδικτυακοί τόποι που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Αρκετοί από τους ορισμούς που δίνονται στη συνέχεια είναι δανεισμένοι από αυτές τις πηγές.

### **Αλγόριθμος**

Στα μαθηματικά αλγόριθμος είναι η λογική σειρά βημάτων για την επίλυση προβλήματος σύμφωνα με καθορισμένους κανόνες. Στην πληροφορική αλγόριθμος είναι η διαδοχή των λογικών βημάτων που απαιτούνται για την επίλυση προβλήματος με ηλεκτρονικό υπολογιστή σε γλώσσα κατανοητή από αυτόν ή σε γλώσσα που χρησιμοποιεί όμοια δομή (συμβολική γλώσσα). Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι αλγόριθμος είναι μία πεπερασμένη ακολουθία αυστηρώς καθορισμένων εντολών, καθεμιά από τις οποίες είναι εκτελέσιμη σε πεπερασμένο μήκος χρόνου για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Οι αλγόριθμοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση προβλημάτων τόσο μαθηματικών, φυσικών, χημικών και, γενικότερα, επιστημονικών όσο και προβλημάτων από την καθημερινή ζωή. Η λέξη αλγόριθμος προέρχεται από παραφθορά του ονόματος ενός μεγάλου Άραβα μαθηματικού, του Abu Ja'far Mohammed ibn Musa al Khowarizmi, που έζησε τον 9ο αιώνα μ.Χ. (Αντωνάκος, Βογιατζής, Κατωπόδης, Πατριαρχέας 2000)

### **Αυτόματο (Automaton)**

Μηχανές σχεδιασμένες να προσομοιώνουν τη λειτουργία αντικειμένων ή ζωντανών οργανισμών, μετατρέποντας πληροφορίες από μία μορφή σε άλλη. Τα αυτόματα είναι ικανά να αντιδρούν σε ερεθίσματα που δέχονται από το περιβάλλον τους, παίρνοντας λογικές αποφάσεις, υπό την καθοδήγηση κανόνων που έχει δημιουργήσει ο κατασκευαστής τους και με τους οποίους λειτουργούν. (Sippl 1985)

**Γειτονιά (Neighborhood)**

Το σύνολο των απαραίτητων, για τον ορισμό ενός κανόνα κυψελοειδούς αυτόματου, κυψελών. Μία γειτονιά συνήθως συντίθεται από έναν αριθμό διπλανών μεταξύ τους κυψελών, οι οποίες οργανώνονται σε μία απλή γεωμετρική δομή. (Chopard και Droz, 1998)

**Γενετικός / εξελικτικός αλγόριθμος (Genetic / evolutionary algorithm)**

Μία υπολογιστική στοχαστική μέθοδος αναζήτησης των καταλληλότερων λύσεων σε προβλήματα που συναντώνται σε διάφορους επιστημονικούς τομείς. Η μέθοδος αυτή είναι εμπνευσμένη από βιολογικές διεργασίες, κυρίως από αυτές που πιστεύεται ότι αποτελούν τις κινητήριες δυνάμεις της απαρχής και της εξέλιξης των ειδών. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται, συνήθως, για την εύρεση των καταλληλότερων μεθόδων επίλυσης προβλημάτων, από ένα σύνολο πιθανών εναλλακτικών επιλογών, η καταλληλότητα, όμως, των οποίων δεν μπορεί να εξακριβωθεί προτού να τεθούν σε εφαρμογή και να ελεγχθούν. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες κοινές συνδυαστικές διεργασίες, οι γενετικοί αλγόριθμοι διαθέτουν ισχυρούς μηχανισμούς οι οποίοι στοχεύουν μόνο σε πιθανούς καρποφόρους συνδυασμούς. Αυτοί οι μηχανισμοί μοιάζουν με αυτούς που χρησιμοποιούνται σε βιολογικές διεργασίες που είναι σχετικές με την εξέλιξη, όπως η μετάλλαξη και η γενετική διασταύρωση (εξ ου και ο όρος "γενετικός αλγόριθμος"). (Järveläinen 2000, Mitchell, Crutchfield και Das 2000, Miranda 2001a)

**Δυναμικό σύστημα (Dynamic system)**

Ένα σύστημα εξισώσεων (διαφορικών ή διακριτών (discretized) εξισώσεων) που προτυποποιεί τη δυναμική συμπεριφορά ενός φυσικού συστήματος και έχει την ιδιότητα να μεταβάλλει την κατάσταση του συναρτήσει του χρόνου. (Chopard και Droz, 1998)

**Κανόνας μετάβασης/εξέλιξης (Transition/Evolution rule)**

Κανόνες που καθορίζουν την κατάσταση στην οποία θα βρίσκεται κάθε κυψέλη του πλέγματος στην επόμενη χρονική στιγμή, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση της ίδιας της κυψέλης, στην οποία εφαρμόζονται, αλλά και των γειτονικών της. Σε μερικά κυψελοειδή αυτόματα οι κανόνες μπορούν να εξαρτώνται από τις τιμές των γειτονικών κυψελών, ενώ σε άλλα μπορεί να είναι μία συνάρτηση των τιμών των γειτονικών κυψελών. (Schatten 2002)

**Karplus-Strong Τεχνική (Karplus-Strong technique)**

Μία τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως για την προσομοίωση του ήχου των νυκτών εγχόρδων. Η λειτουργία του είναι η εξής: Αρχικά συμπληρώνεται ένας πίνακας ανάγνωσης (lookup table) με τυχαίες αριθμητικές ποσότητες. Στη συνέχεια, ο πίνακας διαβάζεται

επανειλημμένα και, σε κάθε επανάληψη, το αποτέλεσμα φιλτράρεται. Ο τελικός ήχος έχει μία πολύ πλούσια σε υπέρτονους ατάκα, όμως πολύ γρήγορα εξασθενεί, χάνοντας σταδιακά τους αρμονικούς του, και, στο τέλος, σβήνει. Η εξέλιξη του παραγόμενου ήχου μοιάζει πολύ με την εξέλιξη του ήχου ενός νυκτού εγχόρδου, όπως της άρπας, της κιθάρας ή της τεχνικής pizzicato του βιολιού. (Roads 1996, Miranda 1998)

### **Κλασματοειδές (Fractal)**

Γεωμετρικό σχήμα που μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους τμήματα, το καθένα από τα οποία αποτελεί ένα πιστό αντίγραφο του αρχικού, σε μικρότερη κλίμακα. Ένα πολύ γνωστό παράδειγμα κλασματοειδούς είναι το τρίγωνο του Sierpinski. Ένας καλός τρόπος εξοικείωσης και κατανόησης των κλασματοειδών είναι οι γνωστές σε όλους ρώσικες μπάμπουσκες. (Miranda 2001a)

### **Κοκκώδης Τεχνική (Granular technique)**

Τεχνική σύνθεσης ήχου που λειτουργεί παράγοντας μία ταχύτατη διαδοχή από ηχητικούς "κόκκους" ("grains"), ελάχιστης διάρκειας (από 20 έως 50 milliseconds). Κάθε κόκκος έχει τις δικές του τιμές συχνότητας και πλάτους και τη δική του κυματομορφή. Το σύνολο των κόκκων αντιμετωπίζεται σαν ένα "σύννεφο" που σχηματίζει ένα μεγαλύτερο ηχητικό γεγονός. Ο Ιάννης Ξενάκης χρησιμοποίησε πολύ αυτή την τεχνική στις συνθέσεις των έργων του. (Roads 1996, Miranda 1998)

### **Κυψέλη (Cell)**

Το βασικό στοιχείο ενός κυψελοειδούς αυτόματου. Είναι ένα είδος "μνήμης", αποθηκεύοντας καταστάσεις. Μπορεί να λάβει τιμές από ένα πεπερασμένο σύνολο τιμών, οι οποίες δηλώνουν διαφορετικές καταστάσεις. Οι καταστάσεις όλων των κυψελών ενημερώνονται και μεταβάλλονται ταυτόχρονα, με την εφαρμογή των κατάλληλων κανόνων μετάβασης/εξέλιξης (Schatten 2002)

### **Κυψελοειδές αυτόματο (Cellular automaton)**

Αποτελεί κατηγορία των αυτόματων. Είναι ένα σύστημα αποτελούμενο από γειτονικές κυψέλες, συνήθως οργανωμένων σε ένα κανονικό πλέγμα, και εξελίσσεται σε διακριτά χρονικά βήματα. Κάθε κυψέλη χαρακτηρίζεται από μία εσωτερική κατάσταση, της οποίας η τιμή ανήκει σε ένα πεπερασμένο σύνολο. Η ενημέρωση (updating) αυτών των καταστάσεων γίνεται παράλληλα (σε παράλληλη διάταξη) σύμφωνα με έναν τοπικό κανόνα που αφορά μόνο μία καθορισμένη γειτονιά της κάθε κυψέλης (Chopard και Droz 1998). Μία γνωστή εφαρμογή κυψελοειδούς αυτόματου είναι το "Game of life" που προτυποποιεί την εξέλιξη απλών οργανισμών.

**Νευρωνικά δίκτυα (Neural nets/networks)** Ένα δίκτυο αποτελούμενο από συνδεδεμένες μεταξύ τους μονάδες οι οποίες έχουν τη μορφή νευρώνων. Οι μονάδες αυτές μεταφέρουν εντολές που διεγείρουν ή αναστέλλουν τη λειτουργία άλλων μονάδων. Οι σύνδεσμοι μεταξύ των μονάδων μπορεί να ποικίλουν σε σταθερότητα, οπότε και μία μονάδα μεταφέρει την εντολή στην επόμενη, ανάλογα με το πόσο ισχυρός είναι ο δεσμός μεταξύ τους. Παρόλο που κάθε μονάδα είναι ικανή μόνο για να δέχεται ή να μεταδίδει εντολές, το δίκτυο σαν σύνολο μπορεί να επιδείξει νοήμων συμπεριφορά όταν είναι θεμελιωμένο σε πολλές μονάδες, πολυποικίλως συνδεδεμένες μεταξύ τους, που δρουν συγχρόνως. Συνεπώς, η συμπεριφορά του δικτύου εξαρτάται από το είδος και την ισχύ των συνδέσμων μεταξύ των μονάδων που το συναποτελούν. Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ή προσομοίωση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης (π.χ. εγκέφαλος). (Bhagucha και Olney 1989)

**Όρια (Boundaries)** Οι άκρες του πλέγματος που περιέχει τις κυψέλες του κυψελοειδούς αυτόματου. Οι κυψέλες που βρίσκονται ακριβώς στα όρια του πλέγματος, είναι δυνατόν να τυγχάνουν διαφορετικής συμπεριφοράς από τις υπόλοιπες που βρίσκονται στο μέσο. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ορίων, ο καθένας από τους οποίους έχει διαφορετική ιδιότητα και συμπεριφορά, οι οποίοι ρυθμίζουν τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η ενημέρωση της κατάστασης των κυψελών που βρίσκονται στα όρια. (Schatten 2002)

**Πίνακας ανάγνωσης (Lookup table)** Πίνακας στον οποίο είναι προϋπολογισμένες όλες οι πιθανές τιμές μίας συνάρτησης, ώστε στη συνέχεια να είναι δυνατή η εύκολη και γρήγορη επιλογή και εξαγωγή των επιθυμητών τιμών. Ο πίνακας ανάγνωσης ενός κυψελοειδούς αυτόματου περιέχει αριθμητικές τιμές που δηλώνουν την κατάσταση όλων των κυψελών του πλέγματος του αυτόματου. Η χρήση του προσφέρει μία άμεση εφαρμογή της δυναμικής του κυψελοειδούς αυτόματου καθώς, όσο πολύπλοκοι και να είναι οι κανόνες μετάβασης, η εξέλιξη της κατάστασης της κάθε κυψέλης γίνεται απευθείας μέσω της άντλησης τιμών από τον πίνακα ανάγνωσης, ο οποίος παίζει τον ρόλο μίας υποθετικής "μνήμης". (Chopard και Droz 1998, Miranda 1998)

**Πλέγμα (Lattice)** Ένα δίκτυο στο χώρο, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις κυψέλες που συναποτελούν το κυψελοειδές αυτόματο. Ο απλούστερος τύπος πλέγματος είναι το μονοδιάστατο, που αποτελείται από μία σειρά κυψελών. Επίσης, υπάρχουν δισδιάστατα και τρισδιάστατα πλέγματα. (Schatten 2002)

**Τεχνητή Ζωή (Artificial Life)** Τομέας επιστημονικής μελέτης και ανάλυσης της συμπεριφοράς ζωντανών οργανισμών με σκοπό την προσπάθεια δημιουργίας προγραμμάτων/μηχανών που παρουσιάζουν λογική/νοήμονα συμπεριφορά μέσω υπολογιστών ή άλλων τεχνητών μέσων. Η Τεχνητή Ζωή μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη θεωρητική βιολογία, τοποθετώντας την έννοια "η-ζωή-όπως-την-ξέρουμε" μέσα στο ευρύτερο πλαίσιο της έννοιας "η-ζωή-όπως-θα-μπορούσε-να-ήταν". Αυτή η προσπάθεια κωδικοποίησης της γνώσης και εμφύτευσής της σε μηχανές (τεχνητά μέσα (artificial media)) αποτελεί ένα από τα αντικείμενα της επιστήμης των υπολογιστών. (Rietman 1993)

**Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence)** Ο τομέας της Τεχνητής Νοημοσύνης διαιρείται σε δύο ευρείς κατηγορίες. Η πρώτη αφορά μία επιστημονική προσέγγιση (γνωστή και ως γνωστική επιστήμη (cognitive science)) που είναι αφιερωμένη στην ανάπτυξη θεωριών για την ανθρώπινη νοημοσύνη. Η δεύτερη κατηγορία είναι μία μηχανική προσέγγιση (γνωστή και ως εφαρμοσμένη Τεχνητή Νοημοσύνη (applied Artificial Intelligence)) που είναι αφιερωμένη στην ανάπτυξη προγραμμάτων που επιδεικνύουν νοήμων συμπεριφορά, ανθρώπινης ή μη-ανθρώπινης ποιότητας. Το ερευνητικό έργο που έχει γίνει στον τομέα της μουσικής έχει βρει εφαρμογές τόσο στον επιστημονικό όσο και στον εφαρμοσμένο παράγοντα. (Roads 1989)

## Βιβλιογραφία

- Αντωνάκος, Ν., Βογιατζής, Γ., Κατωπόδης, Ι., Πατριαρχέας, Κ. (2000). *Ανάπτυξη εφαρμογών σε προγραμματιστικό περιβάλλον*. Κορυφή Α.Ε., Αθήνα.
- Γιάννου, Δ. (1995). *Ιστορία της Μουσικής*. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Λαπιδάκης, Μ. (2001). Στοιχεία Σύνθεσης: Μουσικές Τεχνικές 20ου αιώνα Ι, αδημοσίευτες σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος, Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Λαπιδάκης, Μ. (2002). Στοιχεία Σύνθεσης: Μουσικές Τεχνικές 20ου αιώνα ΙΙ, αδημοσίευτες σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος, Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Λεξικό Μουσικής της Οξφόρδης. (1989). Εκδόσεις Γιαλλελή, Αθήνα.
- Ενάκης, Ι. (2001). *Κείμενα περί μουσικής και αρχιτεκτονικής*. Επιλογή κειμένων - μουσικολογική επιμέλεια: Σολωμός, Μ., Εκδόσεις Ψυχογιός, Αθήνα.
- Ρήγας, Δ. (1992). *Αγγλοελληνικό Λεξικό Ηλεκτρονικής Ηλεκτρολογίας*. Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε., Θεσσαλονίκη.
- Τσουκαλάς, Ε.Χ. (1995). Θεωρία γλωσσών: Γλώσσες, Αυτόματα, Υπολογιστικές Μηχανές (Σημειώσεις του ομώνυμου μαθήματος του Τμήματος Πληροφορικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης).
- Alpern, A. (1995). *Techniques for Algorithmic Composition of Music*. Retrieved September 27, 2002 from the World Wide Web:  
<http://hamp.hampshire.edu/~adaF92/algocomp/algocomp95.html>
- Bharucha, J.J., Olney, K.L. (1989). Tonal Cognition, artificial intelligence and neural nets. *Contemporary Music Review*, 4, 341-356.
- Bilotta, E., Pantano, P. and Talarico, V. (2000). *Music Generation through Cellular Automata: How to Give Life to Strange Creatures*. Retrieved September 22, 2002 from the World Wide Web:  
<http://galileo.cincom.unical.it/Pubblicazioni/papers/2000/milano.html>
- Chopard, B., Droz, M. (1998). *Cellular Automata Modeling of Physical Systems*. Cambridge University Press, Cambridge (UK).

- Dodge, C., Jerse, T.A. (1985). *Computer Music. Synthesis, Composition and Performance*. Schirmer Books, New York.
- Eck, D.J. *Introduction to One-dimensional Cellular Automata*. Retrieved September 27, 2002 from the World Wide Web: <http://godel.hws.edu/xJava/CA.html>
- Gaylord, R.J., Nishidate, K. (1996). *Modeling Nature*. Springer-Verlag New York, Inc., New York.
- Green, D.G. (1993). *Cellular Automata*. Retrieved September 27, 2002 from the World Wide Web: <http://life.csu.edu.au/complex/tutorials.html>
- Hamman, M. (2000). *Priming Computer-Assisted Music Composition through Design of Human/Computer Interaction*. Retrieved February 13, 2003 from the World Wide Web: [http://www.shout.net/~mhamman/papers/amta\\_2000.html](http://www.shout.net/~mhamman/papers/amta_2000.html)
- Hoke, B.P. (1996). *Cellular Automata and Art*. Retrieved September 27, 2002 from the World Wide Web: <http://psoup.math.wisc.edu/extras/hoke/hoke.html>
- Järveläinen, H. (2000). Algorithmic Musical Composition. *Seminar on content creation*, Telecommunications software and multimedia laboratory, Helsinki University of Technology, Helsinki.
- Jones, K. (1981) Compositional Applications of Stochastic Processes. *Computer Music Journal*, 5(2):45-61.
- Lewis, G.E. (1999). Interacting with Latter-Day Musical Automata. *Contemporary Music Review*, 18, 99-112.
- Lorrain, D. (1980) A Panoply of Stochastic "Canons". *Computer Music Journal*, 4(1):53-81.
- Manning, P. (1985). *Electronic & Computer Music*. Clarendon Press, Oxford (UK).
- Maurer, J.A. (1999). *A Brief History of Algorithmic Composition*. Retrieved December 23, 2001 from the World Wide Web: <http://www.ccrma.stanford.edu/~blackrse/algorithm.html>
- Miranda, E.R. (1991). *Cellular Automata Music System: an interdisciplinary project*. MA/MSc in Music Technology, Music Technology Group, University of York.
- Miranda, E.R. (1998). *Computer Sound Synthesis for the Electronic Musician*. Focal Press, Oxford (U.K.).
- Miranda, E.R. (2001). *Composing Music with Computers*. Focal Press, Oxford (U.K.).
- Miranda, E.R. (2001). *Evolving Cellular Automata Music: From Sound Synthesis to Composition*. Retrieved February 9, 2003 from the World Wide Web: <http://dev.csl.sony.fr/downloads/papers/2001/miranda-almma.html>

- Miranda, E.R. (2002). Mimetic Development of Intonation. *Proceedings of International Conference in Music & Artificial Intelligence, ICMAI, LNAI*, 107-118.
- Mitchell, M., Crutchfield, J.P., Das, R. (2000). *Evolving cellular automata with genetic algorithms*. Retrieved September 22, 2002 from the World Wide Web: <http://www.santafe.edu/projects/evca.html>
- McAlpine, K., Miranda, E.R., Hoggar, S. (1999). Making Music with Algorithms: A Case-Study System. *Computer Music Journal*, **23**(2):19-30.
- Najim, K., Poznyak, A.S. (1994). *Learning Automata Theory and Applications*. Elsevier Science Ltd, Oxford (U.K.).
- Najim, K., Poznyak, A.S. (1997). *Learning Automata and Stochastic Optimization*. Springer-Verlag London Limited, London.
- Pope, S.T. (1995). *Fifteen Years of Computer-Assisted Composition*. Retrieved February 9, 2003 from the World Wide Web: <http://www.create.ucsb.edu/~stp/PostScript/SBC.95.AlgComp.html>
- Rietman, E. (1993). *Creating Artificial Life Self-Organization*. Windcrest Books, (USA).
- Roads, C. (1996). *The Computer Music Tutorial*. The MIT Press, Cambridge (USA).
- Roads, C. (1989). *The Music Machine: Selected Readings from Computer Music Journal*, The MIT Press, Cambridge (USA).
- Rockman, B., Nelson, R. (2002). Automata Theory. *Encyclopedia Britannica 2003* [CD-ROM]. London: Encyclopedia Britannica Inc.
- Rockman, B., Nelson, R. (2002). Automaton. *Encyclopedia Britannica 2003* [CD-ROM]. London: Encyclopedia Britannica Inc.
- Salzman, E. (1988). *Twentieth-Century Music An Introduction*. Prentice Hall, New Jersey.
- Schatten, A. (2002). *Cellular Automata Digital Worlds*. Retrieved September 22, 2002 from the World Wide Web: <http://www.ifs.tuwien.ac.at/~aschatt/info/ca/ca.html>
- Sipl, C.J. (1985). *Computer Dictionary*. Howard W. Sams & CO., Inc. Indianapolis (USA).
- Sipper, M. (1996). *A Brief Introduction to Cellular Automata*. Retrieved September 27, 2002 from the World Wide Web: <http://lslwww.epfl.ch/~moshes/ca.html>



- Supper, M. (2001). A Few Remarks on Algorithmic Composition. *Computer Music Journal*, **25**(1):48-53.
- Vaidhyanathan, S. Minai, A., Helmuth, M. (1999). **ca**: A System for Granular Processing of sound using Cellular Automata. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> COST G-6 Workshop on Digital Audio (DAFx99)*, NTNU, Trondheim.
- Wuensche, A., Lesser, M. (1992). *The Global Dynamics of Cellular Automata*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, (USA).
- Xenakis, I. (1992). *Formalized Music*. Revised edition Pendragon Press, New York.