ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837

ΦΙΛΟΣΟΦΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

(ΜΟΥΣΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ)

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ

(ΜΟΥΣΙΚΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΙΑ ΝΕΑ ΜΕΣΑ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηχητικά Είδη: Ηλεκτροακουστική σύνθεση με Στοιχειώδη Κυτταρικά Αυτόματα και Game of Life

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΠΑΓΙΔΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΓΕΩΡΓΑΚΗ, καθηγήτρια ΤΜΣ ΕΚΠΑ,
ΘΑΝΟΣ ΠΟΛΥΜΕΝΕΑΣ - ΛΙΟΝΤΗΡΗΣ συνθέτης - διδάσκων ΤΜΣ ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηχητικά Είδη: Ηλεκτροακουστική σύνθεση με Στοιχειώδη Κυτταρικά Αυτόματα και Game of Life

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΠΑΓΙΔΑΣ

Τριμελής Επιτροπή: **Αναστασία Γεωργάκη, Καθηγήτρια**

Αρετή Ανδρεοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια

Ιάκωβος Σταϊνχάουερ, Επίκουρος Καθηγητής

Σημείωμα του συγγραφέα

Το δοκίμιο αυτό αποτελεί πτυχιακή εργασία η οποία συντάχθηκε για το Τμήμα Μουσικών Σπουδών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και υποβλήθηκε προς εξέταση τον Οκτώβριο του 2022. Ο συγγραφέας, Παγίδας Δημήτριος, βεβαιώνει ότι το περιεχόμενο του παρόντος έργου είναι αποτέλεσμα προσωπικής εργασίας και ότι έχει γίνει η κατάλληλη αναφορά στην εργασία τρίτων, όπου κάτι τέτοιο ήταν απαραίτητο, σύμφωνα με τους κανόνες της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Οι απόψεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία εκφράζουν αποκλειστικά τον/την συγγραφέα και όχι τον/την επιβλέποντα/επιβλέπουσα Καθηγητή/τρια.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές μου Αναστασία Γεωργάκη και Θάνο Πολυμενέα - Λιοντήρη για την υποστήριξη που μου παρείχαν κατά εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Daniel Brown, Κωνσταντίνο Μπακογιάννη και Βαγγέλη Πουλάκη, για την προθυμία τους να έρθουν σε επαφή μαζί μου και να παράσχουν χρήσιμες ιδέες για την εξέλιξη της εργασίας αυτής. Τέλος, θα ήθελα ευχαριστήσω τον καθηγητή κο Ιάκωβο Σταϊνχάουερ για το ενδιαφέρον του και τις παρατηρήσεις του κατά το αρχικό στάδιο διαμόρφωσης της θεματικής της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ABSTRACT 7

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ 10

1.1 Δεκαετία 1950 - 1960: Γένεση των κυτταρικών αυτομάτων 10

1.2 Δεκαετία 1970 - Game of Life 11

1.3 Δεκαετία 1980 - Σήμερα: Στοιχειώδη κυτταρικά Αυτόματα - Η συνεισφορά του Stephen Wolfram 12

2. ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΤΤΑΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΩΝ 15

2.1 Κυτταρικά αυτόματα ως δυναμικά συστήματα 15

2.2 Μορφογένεση - Από τη μικροδομή στη μακροδομή 16

2.3 Πολυπλοκότητα - ανάδυση και κυτταρικά αυτόματα και η σχέση με τη μουσική δημιουργία 17

3. ΤΑ ΚΥΤΤΑΡΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΟΥΣΙΚΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ 20

3.1 Τεχνικές 20

3.2 Συνθέτες, έργα και προβληματισμοί 26

3.3 Κυβερνητική, Κυτταρικά Αυτόματα και Μουσική Δημιουργία 31

4. ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΕΡΓΟΥ 33

4.1 *Ηχητικά Είδη* - Εννοιολογική προσέγγιση και δομή του μουσικού έργου 33

4.2 Ο αλγόριθμος των στοιχειωδών κυτταρικών αυτομάτων 36

4.2.1 Ο βασικός αλγόριθμος 36

4.2.2 Τάξη και διαταραχή ως συνθετικό εργαλείο - Ο βαθμός πολυπλοκότητας του συστήματος 37

4.3 Ο Λευκός Θόρυβος ώς πρώτη ύλη και η αξιοποίησή του συνθετικά 39

4.3.1 FFT για τη διαμόρφωση βασικών φασμάτων ήχου (spectra). 39

4.3.2 Η επιλογή της τεχνικής σύνθεσης Karplus - Strong: waveguide resonators και η αισθητική λειτουργία τους 41

4.4 Πρώτο πλέγμα 43
4.4.1 Οργάνωση του πρωταρχικού ηχητικού υλικού σε μικροεπίπεδο και μακροεπίπεδο 43
4.5 Δεύτερο πλέγμα 46
4.5.1 Waveshaping με παραμόρφωση ημιτονοειδούς κυματομορφής 46
4.5.2 Ρυθμικά Μοτίβα 48
4.6 Granular sampling και MC όργανα - Χρήση του Game of Life 49
4.6.1. Αναπαραγωγή από το CA2 και Game of Life 50
4.6.2 Spectrograms για ανατροφοδότηση του Game of Life 51
5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 57

ABSTRACT

Τα κυτταρικά αυτόματα ως υπολογιστικό μοντέλο εντοπίζονται, μέσω των συνεχώς αυξανόμενων εφαρμογών τους, σε ένα εύρος επιστημονικών κλάδων και τεχνών. Το χαρακτηριστικότερο γνώρισμα των κυτταρικών αυτομάτων είναι η δυνατότητα απρόβλεπτης συμπεριφοράς η οποία όμως προκύπτει ή *αναδύεται* από πολύ απλούς κανόνες. Τα είδη αυτομάτων στα οποία μπορεί κανείς να παρατηρήσει με σαφήνεια τη συμπεριφορά που περιγράφουμε είναι αυτά που ακολουθούν και τους απλούστερους κανόνες. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε για τη μουσική δημιουργία τα στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα (elementary cellular automata) και το Game of Life, δυο συστήματα με πολύ απλές αρχές λειτουργίας. Η μελέτη των συστημάτων αυτών έγινε παράλληλα με τη διερεύνηση του διεπιστημονικού υποβάθρου αλλά και συναφών φιλοσοφικών εννοιών όπως αυτή της ανάδυσης και του δυισμού μορφής - ύλης που έχουν αφετηρία τις θεωρίες του Αριστοτέλη. Ως το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας αυτής, δημιουργήθηκε ένα μουσικό έργο σε δύο μέρη τα οποία αποτελούν δύο ξεχωριστές εκτελέσεις σε ένα σύστημα που δημιουργήσαμε στο Max/MSP όπου αξιοποιούνται δύο αλγόριθμοι στοιχειωδών κυτταρικών αυτομάτων και το Game of Life παράλληλα. Βαρύτητα ιδιαίτερη δόθηκε στη δυνατότητα των μερών του συστήματος να επικοινωνούν μεταξύ τους με τρόπο που να αποφεύγεται η προβλεψιμότητα αλλά και η αίσθηση της τυχαιότητας στο μουσικό αποτέλεσμα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιδέα της σύνθεσης πρωτότυπου ήχου από τις πιο απλές μορφές του όπως ένας ταλαντωτής, αποτέλεσε για μένα, όπως και για εκατομμύρια νεαρών μουσικών, το κίνητρο για τη χρήση ηλεκτρονικών (συνθεσάιζερ, ηλεκτρονικά εφέ / επεξεργαστές ήχου) μέσων σύνθεσης ήχου. Σταδιακά προέκυψε η ανάγκη αναζήτησης τρόπων για να αναπτύξω μια περισσότερο διαλεκτική διαδικασία σύνθεσης όπου το μέσο και ο εαυτός ως παρατηρητής - συνθέτης - εκτελεστής συνδράμουμε ισότιμα. Μέρος της αναζήτησης αυτής είναι και η εκπόνηση παρούσας εργασίας. Το ζητούμενο στην προσπάθεια αυτή, είναι η δημιουργία ήχων που να γεννιούνται και να οργανώνονται από τις πιό ουδέτερες και αέναες μορφές του όπως ο θόρυβος και το ημιτονοειδές κύμα. Η ιδέα της γέννησης και της μορφοποίησης σταδιακά με οδήγησε στην ανασκόπηση των φιλοσοφικών αρχών του Αριστοτέλη σχετικά με το δυϊσμό ύλης και μορφής και την δυνατότητα αυτοοργάνωσης (*εντελέχεια*) της ύλης σε μορφές (*είδη*) που φέρουν μέσα τους το σκοπό της δημιουργίας τους (*τέλος*).

Μια κατηγορία νέων μέσων που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροακουστική σύνθεση είναι οι αλγόριθμοι εξελικτικής υπολογιστικής (evolutionary computation). Τέτοιοι αλγόριθμοι, όπως υποδηλώνει ο όρος, πηγάζουν από στοιχεία της εξελικτικής βιολογίας. Τέτοιους αλγορίθμους αποτελούν και τα κυτταρικά αυτόματα (cellular automata) τα οποία χρησιμοποιώ ώς ένα δημιουργικό εργαλείο παραγωγικής τέχνης (generative art) κατά τη μουσική μου δημιουργία (εξελικτική σύνθεση - evolutionary composition). Το υπολογιστικό αυτό μοντέλο έχει σαφείς καταβολές από τη Βιολογία τη Φυσιολογία και τα Μαθηματικά και άμεση συνάφεια με τα δυναμικά συστήματα και τη Θεωρία του Χάους. Η συμπεριφορά των κυτταρικών αυτομάτων συνοψίζεται ως πολυπλοκότητα από πολύ απλούς κανόνες παρόμοια με αυτή που συναντάμε στη φύση. Η αγάπη του Ιάννη Ξενάκη για την "ταραχώδη, άγρια φύση" και η θεώρηση των αυτομάτων από τον ίδιο ώς ένα "μοντέλο αυτονομίας" ήταν κίνητρο για να γίνει από τους πρώτους συνθέτες που τα αξιοποίησαν στη συνθετική τους διαδικασία, δημιουργώντας πρωτότυπες αρμονικές προόδους και την ποικιλία ηχοχρωμάτων (*sonorities*) (Solomos, 2005). Τα κυτταρικά αυτόματα έχουν χαρακτηριστεί ως "ελκυστικά μοντέλα για μουσικό πειραματισμό" καθώς παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκης συμπεριφοράς με χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις (Beyls, 2010 σ. 1).

Πέρα όμως από την κατανόηση και την εφαρμογή των αυτομάτων σε τεχνικό επίπεδο βρίσκεται πάντα για ένα / μια συνθέτη το ζήτημα της μουσικής αξιοποίησης της διαθέσιμης αυτής τεχνολογίας και σε ποιό βαθμό η ηχοποίηση (sonification) των συστημάτων αυτών από μόνη της υπηρετεί το σύνολο του παραγόμενου μουσικού έργου ως αποτέλεσμα.

Στην εργασία αυτή, ερευνητικό ζητούμενο είναι η εύρεση κατάλληλων πρακτικών στη χρήση κυτταρικών αυτομάτων για μουσική εκτέλεση και σύνθεση πραγματικού χρόνου κατά την οποία:

1. Η μουσική σύνθεση πραγματοποιείται σε μικροεπίπεδο από τα κυτταρικά αυτόματα και σε μακροεπίπεδο από τα κυτταρικά αυτόματα και το συνθέτη - εκτελεστή.
2. Η σύνθεση του ήχου έχει ως πρώτη ύλη δύο στοιχειώδεις ηχητικές μορφές, το λευκό θόρυβο και την ημιτονοειδή κυματομορφή
3. Ο συνθέτης - εκτελεστής παρεμβαίνει το ελάχιστο δυνατόν στην αλγοριθμική διαδικασία αλλά συνδιαμορφώνει το έργο παρακολουθώντας την εξέλιξη του αλγορίθμου και αξιολογώντας τα αισθητικά αποτελέσματα των ενεργειών του

Η έρευνα αυτή στον τομέα της μουσικής δημιουργίας περνά μέσα από τα εξής μεθοδολογικά στάδια: Της ιστορικής και τεχνικής επισκόπησης των κυτταρικών αυτομάτων και της διεπιστημονικής τεχνολογικής εφαρμογής τους (1η και 2η ενότητα). Της παράθεσης έργων και απόψεων συνθετών που έκαναν χρήση κυτταρικών αυτομάτων, την επισκόπηση σημαντικών μουσικών εφαρμογών και των τεχνικών που χρησιμοποιούν με γνώμονα το βαθμό στον οποίο διαμόρφωσαν ιδέες για τη δημιουργία του συστήματος με το οποίο εκτελέστηκε η μουσική της εργασίας (3η ενότητα). Της ανάλυσης και υποστήριξης των τεχνικών και αισθητικών επιλογών κατά τη δημιουργία του μουσικού συστήματος για το έργο, ως μια διαδικασία δημιουργίας και εκτέλεσης του έργου (4η ενότητα). Της εξαγωγής συμπερασμάτων που αφορούν στο παρόν σύστημα ως μια συνθετική πρακτική και ως μια αλληλεπιδραστική διαδικασία μουσικής δημιουργίας με εκτίμηση των δυνατοτήτων για μελλοντική εξέλιξη (5η ενότητα).

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή, παρουσιάζοντας παράλληλα τους βασικούς όρους που περιγράφουν τη λειτουργία των κυτταρικών αυτομάτων.

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Αρχικά είναι σκόπιμο να παρακολουθήσουμε την ιστορική εξέλιξη των κυτταρικών αυτομάτων όπως αυτά διαμορφώθηκαν μέσα από την επιστήμη των μαθηματικών και των υπολογιστών. Μαζί παρατίθενται και ορισμένες βασικές έννοιες για που κρίνονται χρήσιμες για την κατανόηση των βασικών λειτουργιών που αξιοποιούνται και για τη δημιουργία του μουσικού αυτού έργου.

1.1 Δεκαετία 1950 - 1960: Γένεση των κυτταρικών αυτομάτων

Η ιδέα της δημιουργίας μηχανών ικανών να σκέφτονται ώστε να εκτελούν εργασίες βρίσκεται ήδη στο προσκήνιο της επιστημονικής δραστηριότητας από τις αρχές του 20ου αιώνα. Ένα πρώτο δείγμα αυτή την κατεύθυνση αποτέλεσε η εφεύρεση του υπολογιστικού μοντέλου της Μηχανής Turing του άγγλου μαθηματικού και μηχανικού ηλεκτρονικών υπολογιστών Alan Turing. Το μοντέλο αυτό βασιζόταν στα βήματα του ελέγχου ενός από τα θεωρητικά άπειρα κελιά που συνιστούν μια κατάσταση (state), και την επιλογή της επόμενης ενέργειας βάσει καταχωρημένων κανόνων – οδηγιών προς τη λύση ενός προβλήματος, μέχρι αυτή να επιτευχθεί τελικά. Ο Turing, στο άρθρο του «Computing Machinery and Intelligence» το 1950, θέτει το ερώτημα αν «μπορούν οι μηχανές να σκέφτονται» (Turing, 1950) προτείνοντας αμέσως μετά το το Turing Test (που ο ίδιος στο άρθρο ονομάζει “the interrogation game”), μια δοκιμασία για την πιστοποίηση της ικανότητας ενός υπολογιστή να εξομοιώνει την ανθρώπινη νοημοσύνη, κάθε φορά που ένας δοκιμαστής δε μπορεί να ξεχωρίσει τις απαντήσεις της μηχανής από αυτές ενός άλλου ανθρώπου.

Την ίδια εποχή, ο ουγγρο-αμερικάνος John von Neumann ανέπτυσσε την ιδέα μιας αυτοαναπαραγώμενης μηχανής ικανής να κατασκευάζει αντίγραφα του εαυτού της. Το μοντέλο της αυτοαναπαραγόμενης μηχανής που παρουσίασε ο von Neumann χρησιμοποιούσε ένα μοντέλο κινητικών αυτομάτων (πρώιμη μορφή των κυτταρικών.) το οποίο εξασφάλιζε στη μηχανή τη δυνατότητα να αναζητά σε ένα έδαφος τα κατάλληλα υλικά αξιολογώντας τα ευρήματά της και στη συνέχεια να κατασκευάζει το αντίγραφο, ακολουθώντας τις οδηγίες ενός “βιβλίου” οδηγιών (κανόνων) αποθηκευμένου στη μνήμη της. (Von Neumann, 1966 σ. 82).

Ένα από τα βασικά κίνητρα του Von Neumann για την εξέλιξη των αυτομάτων του ήταν να αποδείξει ότι σύνθετα βιολογικά συστήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν μέσω υπολογιστικών συστημάτων. Λόγω της αδυναμίας μοντελοποίησης χημικών βιολογικών και φυσικών παραμέτρων της αναπαραγωγής, το μοντέλο των κινητικών αυτομάτων εξελίχθηκε σε αυτό των κυτταρικών αυτομάτων (cellular automata), μετά την πρόταση του συναδέλφου του, Stanislaw Ulam να χρησιμοποιήσει ένα διακριτό σύστημα αυτομάτων δύο διαστάσεων καθένα από τα οποία να επιδέχεται 29 διαφορετικές καταστάσεις (states). Τη λειτουργία αυτού του μοντέλου καθορίζουν δύο βασικοί παράγοντες: Η συνάρτηση μετάβασης (transition function) και ο κυτταρικός χώρος (cellular space): Η κάθε λίστα καταστάσεων των επιμέρους κελιών σε συνδυασμό με τους κανόνες που διέπουν τη μετάβαση στο επόμενο κελί, ονομάστηκαν *συναρτήσεις μετάβασης*. Ο χώρος - τετραγωνικό πλέγμα στο στον οποίο βρίσκονται τα κελιά ονομάστηκε *κυτταρικός χώρος* ή *πλέγμα* (*lattice*). Ο πεπερασμένος αριθμός κελιών που συνορεύουν ως πλευρές (βόρεια, νότια, ανατολικά, δυτικά) και καθορίζουν τις μεταξύ τους μεταβάσεις, ορίστηκαν ώς οι γείτονες και τα σύνολά τους ως *γειτονιά* (neigh-bors, -hood) (Burks, 1969 σ. 7-8, 10). Το μοντέλο αυτό του Von Neumann παρείχε τη δυνατότητα καθολικού υπολογισμού (universal computing), τη δυνατότητα δηλαδή για την εκτέλεση οποιουδήποτε προγράμματος.

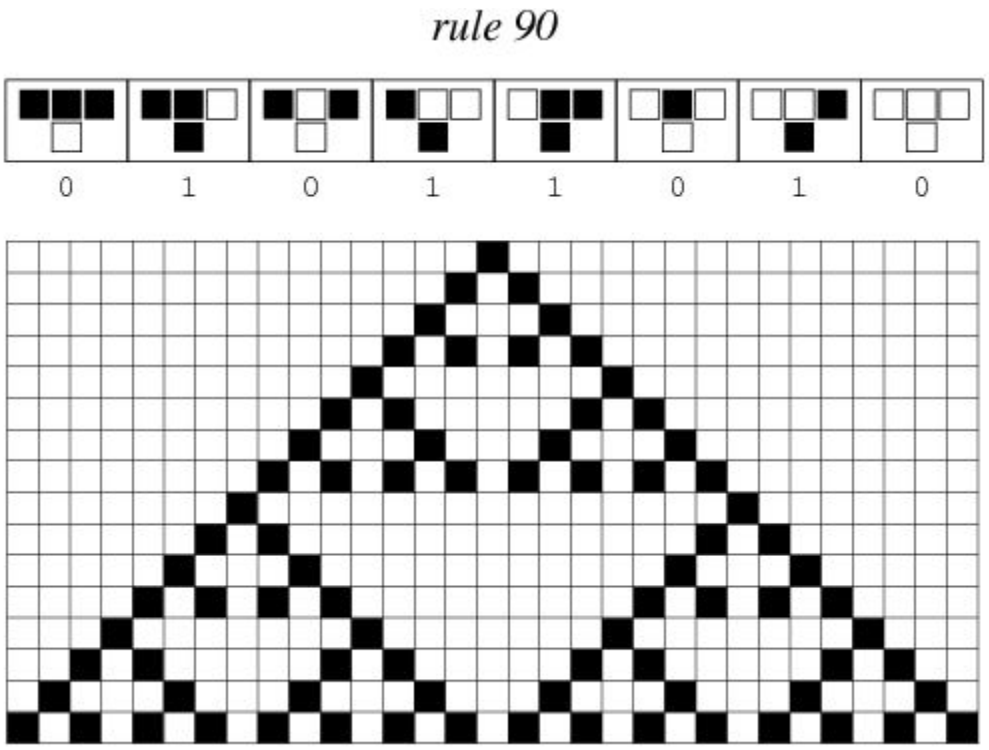
1.2 Δεκαετία 1970 - Game of Life

Το 1970 παρουσιάζεται το *Game of Life* ή *Life* ως ένα μαθηματικό "παιχνίδι εξομοίωσης" των "ανόδων, των πτώσεων και των εναλλαγών μιας κοινωνίας ζωντανών οργανισμών" (Gardner, 1970 σ. 120) το οποίο αποτελεί μέχρι σήμερα ένα από τα πιο δημοφιλή κυτταρικά αυτόματα. Οι βασικοί κανόνες του Conway ήταν: 1. Κάθε ζωντανό κελί με 2 ή 3 ζωντανούς γείτονες παραμένει ζωντανό 2. Κάθε ζωντανό κελί με πάνω από 3 ζωντανούς γείτονες πεθαίνει από υπερπληθυσμό και 3. Κάθε ζωντανό κελί με κάτω από 2 ζωντανούς γείτονες πεθαίνει λόγω αραιού πληθυσμού 4. Κάθε νεκρό κελί με 3 ζωντανούς γείτονες έρχεται στη ζωή. Στα αυτόματα του Life σταδιακά μελετήθηκαν και ανακαλύφθηκαν ορισμένα μοτίβα - μορφές με συγκεκριμένη συμπεριφορά όπως αυτή του "glider" (μορφή από πέντε κελιά που κινείται περιστρεφόμενο διαγώνια στον κυτταρικό χώρο). Το Game of Life αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για τον Brian Eno και για τη μετέπειτα ενασχόλησή του

με αυτό που ο ίδιος ονόμασε *Generative Music* (Eno, 1996 σ. 308, 330). Σχετικά με τη λειτουργία του Game of Life θα επανέλθουμε στη συνέχεια καθώς τα συγκεκριμένα αυτόματα αξιοποιούνται για τη μουσική δημιουργία της εργασίας αυτής.

1.3 Δεκαετία 1980 - Σήμερα: Στοιχειώδη κυτταρικά Αυτόματα - Η συνεισφορά του Stephen Wolfram

Η μεγαλύτερη κατα κοινή ομολογία συνεισφορά στη μελέτη των στοιχειωδών κυτταρικών αυτομάτων (elementary cellular automata) προέρχεται από τον Stephen Wolfram του οποίο το ιδιαίτερα διαδεδομένο σύγγραμμα, *A New Kind of Science* αποτελεί μια εκτενή ανάλυση στη λειτουργία και τη σημασία των κυτταρικών αυτομάτων. Το ενδιαφέρον του για τη μελέτη του κίνησε η ιδιότητα των κυτταρικών αυτομάτων να αναπτύσσουν σύνθετες και πρακτικά απρόβλεπτες διατάξεις ακολουθώντας απλούς κανόνες. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 ο βρετανο-αμερικάνος φυσικός ανέλυσε τα αποτελέσματα εκτενών πειραμάτων κυρίως σε *μονοδιάστατα* (1-D) ή *στοιχειώδη* κυτταρικά αυτόματα παραγόμενα από σύνολο 255 κανόνων μετάβασης. Στα στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα (που χρησιμοποιούνται και για το μουσικό έργο) η μελλοντική κατάσταση (0 ή 1 / ανενεργό ή ενεργό) ενός κελιού εξαρτάται από αυτή του ίδιου και αυτές των εκατέρωθέν του κελιών (γειτονιά). Ο δυνατός αριθμός συνδυασμών καταστάσεων κελιών k για μια τέτοια γειτονιά ακτίνας n = 1 ενός κελιού δηλαδή είναι $k = S^{2n+1}$ δηλαδή 8, με S τον αριθμό των πιθανών καταστάσεων (2). Για κάθε κανόνα αντιστοιχίζεται ο συνδυασμός καταστάσεων των κελιών της γειτονιάς με μια απ' τις δύο πιθανές μελλοντικές καταστάσεις του μεσαίου κελιού (μετάβαση). Έτσι έχουμε ένα σύνολο δυνατών κανόνων $R = S^{S(2n+1)}$ δηλαδή 256 πιθανών κανόνων.



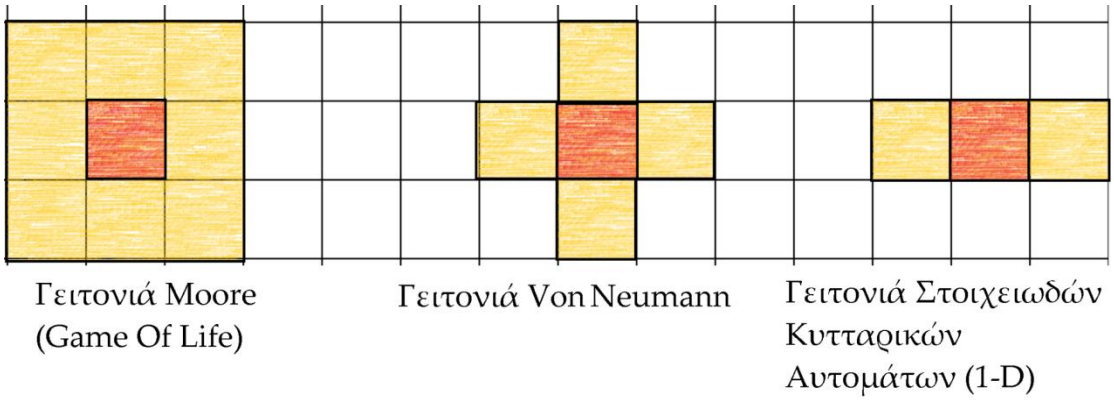
Ο κανόνας (ή σύνολο κανόνων) 90 - Η επάνω γραμμή του υπομνήματος αποτελεί την κατάσταση κάθε γειτονιάς τριών κελιών και η κάτω στήλη τη μελλοντική κατάσταση κάθε μεσαίου κελιού (πηγή: https://mathworld.wolfram.com/Rule90.html)

Ο Wolfram ορισε τα κυτταρικά αυτόματα ως "διακριτά δυναμικά συστήματα απλής κατασκευής αλλά με σύνθετη αυτο-οργανούμενη συμπεριφορά" που παρατηρείται ανεξαρτήτως του "αταξίας" της αρχικής κατάστασης τους. Παράλληλα, προχώρησε στον πρώτο χαρακτηρισμό και στην παρακάτω ταξινόμηση των κυτταρικών αυτομάτων βάσει της συμπεριφοράς τους, δηλαδή του τρόπου οι διατάξεις τους στο χώρο εξελίσσονται κατα το πέρασμα του χρόνου.

1. Αυτόματα που εξελίσσονται σε ομοιογενείς καταστάσεις
2. Αυτόματα που εξελίσσονται σε απλής μορφής διαχωρισμένες ή περιοδικές διατάξεις
3. Αυτόματα που εξελίσσονται σε χαοτικές διατάξεις
4. Αυτόματα που εξελίσσονται σε πολύπλοκες διατάξεις με δημιουργία τοπικών δομών (Wolfram, 1984 σ. 419)

Σε μια γενικότερη κατηγοριοποίηση του Ilachinski, τα πεδία εφαρμογών των κυτταρικών αυτομάτων σε τέσσερις μπορούν να τοποθετηθούν σε κατηγορίες κατά αύξουσα σημασία: 1. Ως υπολογιστικές μηχανές 2. Ως διακριτά δυναμικά συστήματα

3. Ως εννοιολογικά οχήματα για τη μελέτη του σχηματισμού μοτίβων / διατάξεων (patterns) 4. Ως πρωτότυπα μοντέλα θεμελιωδών νόμων της φυσικής (Ilachinski, 2002 σ. 7). Από αυτές τις κατηγορίες η εργασία καταπιάνεται περισσότερο με τις δυνατότητες των κατηγοριών νο. 2 και νο. 3 μιας και παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως προς την οργάνωση ηχητικών και μουσικών παραμέτρων. Η δεκαετία του 1980 σηματοδοτεί την αρχή αξιοποίησης των κυτταρικών αυτομάτων στη μουσική δημιουργία από συνθέτες ηλεκτροακουστικής μουσικής όπως ο Peter Beyls, ο Ιάννης Ξενάκης και ο Warren Burt.



Οι τύποι γειτονιάς των αυτομάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω

Τα κυτταρικά αυτόματα αναλόγως με τις ανάγκες του εκάστοτε μοντέλου που πραγματοποιούν, έχουν πλέον πολλές διαφορετικές μορφές και κατηγοριοποιήσεις (σχήμα και διαστάσεις πλέγματος, ντετερμινιστικά ή πιθανοκρατικά κ.α.). Για τη μουσική δημιουργία της εργασίας αυτής χρησιμοποιούνται τα στοιχειώδη (μονοδιάστατα) κυτταρικά αυτόματα του Wolfram με τους αντίστοιχους κανόνες τους καθώς και τα δισδιάστατα αυτόματα του Game of Life του Conway. Για το λόγο αυτό δεν κρίνεται σκόπιμη η θεωρητική επέκταση και παρουσίαση διαφορετικών τύπων, όσο η παράθεση σε επόμενες παραγράφους, της σημασίας τους ως μοντέλο συστημάτων στις θετικές επιστήμες, τη φιλοσοφία και την τέχνη.

2. ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΤΤΑΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΩΝ

Στην παραπάνω ενότητα δόθηκε ο χαρακτηρισμός των κυτταρικών αυτομάτων ως *δυναμικά συστήματα* ενώ αναφέρθηκαν οι όροι *ντετερμινισμός, χάος* και *πολυπλοκότητα.* Θα προχωρήσουμε σε μια σύντομη κατά το δυνατόν παρουσίαση αυτών τον εννοιών, καθώς καλύπτουν ένα ευρύτατο γνωστικό πεδίο που εκτείνεται κατά κύριο λόγω στους κλάδους των φυσικών επιστημών, της θεωρίας πληροφορίας και της φιλοσοφίας.

2.1 Κυτταρικά αυτόματα ως δυναμικά συστήματα

Τα δυναμικά συστήματα και η θεωρία του χάους αποτελούν ένα διεπιστημονικό πεδίο στο οποίο μαθηματικά μοντέλα περιγράφουν μέσω συναρτήσεων την εξάρτηση της θέσης σημείων στο γεωμετρικό χώρο, από την πάροδο του χρόνου. Η θεωρία των δυναμικών συστημάτων έχει ένα διεπιστημονικό φάσμα εφαρμογών σε πεδία όπως φυσική, βιολογία, ιατρική ακόμα και ανθρωπιστικά πεδία όπως η ιστορία. ‘Οπως και στην περιπτωση των αυτομάτων που περιγράψαμε, τα δυναμικά συστήματα εξελίσσονται βάσει μιας *συνάρτησης μετάβασης*, η οποία καθορίζει τις νέες *καταστάσεις* των σημείων στο χώρο καταστάσεων (αντίστοιχα *κυτταρικό χώρο*). Οι συναρτήσεις που δίνουν πάντα την ίδια διαφορά καταστάσεων κατά το χρόνο της μετάβασης, ονομάζονται *ντετερμινιστικές*, που σημαίνει ότι είναι δυνατόν, κατά μικρές μεταβολές χρόνου, να προβλέπονται (Katok & Hasselblatt, 1997). Παρόλα αυτά, για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ελάχιστες μεταβολές στην αρχική κατάσταση των σημείων μπορεί να προκαλέσει απρόβλεπτες νέες καταστάσεις Μια τέτοια συμπεριφορά ονομάζεται *ντετερμινιστικό χάος* (Kellert, 1993 σ. 32-33). Τέτοια δυναμικά συστήματα χαρακτηρίζονται ως *πολύπλοκα* συστήματα. Τα κυτταρικά αυτόματα λοιπόν, ως διακριτά δυναμικά συστήματα (ιδιαίτερα της 3ης κλάσης του Wolfram) παρουσιάζουν μια βασική ιδιότητα του χάους, την *ευαισθησία στις αρχικές καταστάσεις* (Burranston, 2006 σ. 16). Για παράδειγμα ακόμη και η μεταβολή της κατάστασης δύο γειτονικών κελιών μπορεί να οδηγήσει σε άμεσες μεταβολές στη συμπεριφορά. Αυτή η ιδιότητα αποτέλεσε ένα βασικό κίνητρο για το μουσικό πειραματισμό με τα κυτταρικά αυτόματα γενικότερα, και συγκεκριμένα για τον

πειραματισμό με μεταβολές των αρχικών καταστάσεων (*seeds*) με τρόπο που αναλύεται στην ενότητα 4.2 της περιγραφής του συστήματος.

2.2 Μορφογένεση - Από τη μικροδομή στη μακροδομή

Μια πεποίθηση του Wolfram, πως τα μοτίβα των αυτομάτων μπορούν στο μέλλον να εξηγήσουν φυσικά φαινόμενα δημιουργίας μοτίβων της φύσης, έχει ανταπόκριση στη σύγχρονη επιστήμη. Συστήματα κυτταρικών αυτομάτων του Von Neumann χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μοντέλων για διαδικασίες όπως η *μορφογένεση*, μια βιολογική διαδικασια της ανάπτυξης σύνθετων κυτταρικών δομών (Rasolonjanahary & Vasiev 2020) Η μορφογένεση, όπως εισήχθη από τον D'Arcy Wentworth Thompson και διατυπώθηκε από τον Turing (2004) περιγράφει την εξελικτική διαμόρφωση *μοτίβων* από κύτταρα, ιστούς και οργανισμούς. Κατα τα τέλη της δεκαετίας του 1960, ο ούγγρος βιολόγος Astrid Lindenmeyer χρησιμοποίησε τις δομές κυτταρικών αυτομάτων για τη δημιουργία των *L-Systems* που χρησιμοποίησε για τη μοντελοποίηση τις ανάπτυξης φυτικών κυττάρων (Lindenmeyer, 1968). Σε σύγχρονες μελέτες βλέπουμε τη μορφογένεση να μοντελοποιείται από κυτταρικά αυτόματα και να αξιοποιείται κατα κανόνα στους της βιολογίας και της νευροφυσιολογίας. Οι χιλιανοί βιολόγοι και κυβερνητιστές Humberto Maturana και Francisco Varela οι οποίοι εισήγαγαν τον όρο *αυτοποίηση* (*autopoiesis*) στις αρχές της δεκαετίας του 1970 για να περιγράψουν τη δυνατότητα των οργανισμών να αναπαράγουν τους εαυτούς τους. Οι ίδιοι χρησιμοποίησαν αργότερα το Game of Life ως τεχνητών χημικών αντιδράσεων (Turney, 2021 σ. 5). Κλάσεις δομών του Game of Life (Glider, Still Life, Oscillators) χρησιμοποιούνται ώς σήμερα για τη δημιουργία μοντέλων αυτοποίησης. Από την προοπτική της μακροδομής, η ιδιότητα της αυτο-αναπαραγωγής σε συνδυασμό με αυτή της αυτο-οργάνωσης, καθιστά τα κυτταρικά αυτόματα ικανά να αναπτύσσονται ώς ανεξάρτητα οικοσυστήματα. Σε ευρύτερο διεπιστημονικό επίπεδο, από τη δεκαετία του 1990 χρησιμοποιούνται ως μοντέλα υπολογισμού της αστικής ανάπτυξης και το Game of Life χρησιμοποιείται ως παράδειγμα στις κοινωνικές επιστήμες για την δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων, τα οποία δείχνουν κανόνες μικροδομών να δημιουργούν μακροσκοπικά φαινόμενα συμπεριφορών (Wahyudi & Liu, 2016 - Epstein, 2012).

2.3 Πολυπλοκότητα - ανάδυση και κυτταρικά αυτόματα και η σχέση με τη μουσική δημιουργία

Τα στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα, ως δυναμικά συστήματα και όπως παρατήρησε ο Wolfram, μπορούν να παρουσιάσουν την ανάπτυξη σύνθετων από ορισμένους πολύ απλούς κανόνες μια συμπεριφορά που δε μπορεί να προβλεφθεί από την παρατήρηση περιορισμένων χρονικών βημάτων και που δημιουργεί μοτίβα που παρατηρούνται και στη φύση (με χαρακτηριστικό το παράδειγμα των μοτίβων του κοχυλιού, που παρουσιάζουν παρόμοια μοτίβα με αυτά που δημιουργεί ο κανόνας 30). Το φαινόμενο αυτό το περιγράφει ως *πολυπλοκότητα.* Η πολυπλοκότητα αποτελεί ένα ρευστό εννοιολογικά όρο του οποίου οι ορισμοί ποικίλουν επιστημονικής κοινότητας ακόμα και εσωτερικά των κλάδων. Η γενική της έννοια παρόλαυτά μπορεί να συνοψιστεί ως η συμπεριφορά ενός συστήματος του οποίου οι μονάδες αλληλεπιδρούν σε τοπικό επίπεδο προκειμένου να προκύψουν συνθετότερες δομές των οποίων τα χαρακτηριστικά δεν προσδιορίζουν ή περιγράφουν ευρύτερο αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης των μονάδων αυτών. Η θεωρία της πολυπλοκότητας αφορά στην κατανόηση καθολικών φαινομένων όπως η αυτοοργάνωση ενός συστήματος.

Έκφανση της πολυπλοκότητας αποτελεί η *ανάδυση* (*emergence*), και τα *αναδυόμενα φαινόμενα*. Μια πρώτη έννοια της ανάδυσης εισάγεται ιστορικά από τη φιλοσοφία του Αριστοτέλη οποίος στα *Μεταφυσικά* περιγράφει το φαινόμενο της *ολότητας* κατά το οποίο το *όλο είναι κάτι πέραν των μερών* (όχι το μεγαλύτερο από άθροισμα των μερών όπως συχνά παραφράζεται) (O'Connor, 2020 - Lennox, 2014 - Aristotle, 2009). Στη σύγχρονη φιλοσοφία διακρίνει η ανάδυση διακρίνεται σε *ισχυρή* (η συμπεριφορά του μακρο-επιπέδου δε μπορει να συναχθεί από αυτή του μικρο-επιπέδου) και *ασθενή* (η συμπεριφορά του μακροεπιπέδου μπορεί να συναχθεί αλλά όχι να προβλεφθεί από αυτή του μικροεπιπέδου). (Chalmers, 2008).

Στο πεδίο του emergent computing (αναδυόμενα φαινόμενα μέσω υπολογιστικής) διακρίνονται τρεις βασικές θεματικές που αφορούν την ανάδυση: *η αυτοοργάνωση* ως άμεση διαμόρφωση τάξης από τυχαίες αρχικές καταστάσεις, τα *συλλογικά φαινόμενα* αλληλεπιδράσεις μεταξύ πρακτόρων του λογισμικού και η *συνεργατική συμπεριφορά* ως τη σύνθεση επιμέρους οδηγιών για την πρόκληση μιας νέας καθολικής συμπεριφοράς (Smith & Forrest, 1990 σ. 8-9). Ο Langton υποστηρίζει πως κάθε

συμπεριφορά που παρατηρείται σε κλίμακα μεγαλύτερη του ενός κελιού θεωρείται ικανή να δημιουργήσει αναδυόμενη συμπεριφορά αφού καμία συνάρτηση μετάβασης δεν περιγράφει με λεπτομέρεια τη συμπεριφορά τους (Langdon, 1986 σ. 126). Θα μπορούσε κανείς να αναρωτηθεί σε ποιά κατηγορία ανάδυσης ανήκει η συμπεριφορά των κυψελικών αυτομάτων. Στην περίπτωση των στοιχειωδών κυψελικών αυτομάτων που θεωρούνται διακριτά δυναμικά συστήματα φαίνεται αρχικά πως πρόκειται περίπτωση ασθενούς ανάδυσης μιας και θεωρητικά, η συμπεριφορά τους σε μακροεπίπεδο μπορεί να συναχθεί από αυτή του μικροεπιπέδου. Στην περαιτέρω μελέτη του ζητήματος προβάλλεται το ζήτημα της *υπολογιστικής μη αναγωγιμότητας* (*computational irreducibility*) του Wolfram και η συζήτηση στην επιστημονική κοινότητα σχετικά με το ποιοί κανόνες του Wolfram παρουσιάζουν πράγματι μη αναγώγιμη συμπεριφορά (Israeli & Goldenfeld, 2004).

Σχετίζονται όμως αυτά τα θεωρητικά ζητήματα με το συγκεκριμένο έργο ή με τη μουσική δημιουργία γενικότερα και σε ποιό βαθμό είναι χρήσιμο να λαμβάνονται υπ' όψιν; Μια πρώτη απάντηση είναι πως μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος θεωρούμε πως ενισχύει τη μουσική αξιοποίηση του στο βαθμό που ο συνθέτης μπορεί να την ενσωματώσει μεσα σε ένα μουσικό σύστημα που να παράγει μουσική με συνέχεια και δομή. Όπως θα δούμε, παρακάτω αλλά και στην ενότητα 3.2 συχνά μια τέτοια συνέχεια και δομή απουσιάζει από έργα δημιουργημένα με συστήματα κυτταρικών αυτομάτων. Στον τομέα της μουσικής δημιουργία η ανάδυση περιγράφεται από τον Di Scipio ως μια διαδικασία κατά την οποία δημιουργούνται νέες ηχητικές μορφές μέσω της συνύπαρξης ξεχωριστών στοιχείων με επιμέρους χαρακτηριστικά. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά αυτά διαφέρουν από τα γενικά χαρακτηριστικά των ανώτερων μορφών που δημιουργούνται ως εξελισσόμενες στο χρόνο χροιές του ήχου (Anderson, 2005 σ. 12). Στο τεχνικό - μουσικό επίπεδο του παρόντος έργου, η δημιουργία των χροιών τελείται πράγματι από τα κυψελικά αυτόματα. Η διαδικασία όμως τη δημιουργίας ενός έργου γενικότερα ως μια απόδειξη της ισχύος αφηρημένων φαινομένων ανάδυσης δεν μπορεί να είναι αυτοσκοπός. Άλλωστε όπως επισημαίνει ο Burt, "η μουσική δεν έχει την αποδεικτική ικανότητα που αποτελεί την ουσία της επιστήμης" και για το λόγο αυτό, ο μουσικός, παρότι θεμιτά δανείζεται από την επιστήμη, δεν υποχρεούται να προσποιείται τον επιστήμονα (Burt, 2007 σ. 28).

Αν θα έπρεπε να τοποθετήσουμε την έννοια της ανάδυσης στη συνθετική και προγραμματιστική διαδικασία του παρόντος έργου θα την περιγράφαμε ως το δείκτη δημιουργικής αξιοποίησης των δεδομένων για τη δημιουργία χροιάς, υφών και ηχητικών αντικειμένων και ταυτόχρονα της ενσωμάτωσης των τελευταίων σε απρόβλεπτες αλλά αναγνωρίσιμες για τον ακροατή (άρα και όχι τυχαίου χαρακτήρα) μεσο-δομές και μακρο-δομές κατά το μουσικό πειραματισμό. Ο συνδυασμός γνώσης βασικών αρχών της συμπεριφοράς ενός συστήματος με τον πειραματισμό κατά το μουσικό προγραμματισμό μπορεί να οδηγήσει σε αποτελέσματα που δε μπορούν πρακτικά να προβλεφθούν αρα και να επαναληφθούν από χειρονομίες του συνθέτη και αυτό είναι το ζητούμενο εδώ. Όπως υποστηρίζουν και οι McCormack και Dorin "η ανάδυση μπορεί μόνο να αναγνωριστεί αφού έχει προκύψει αφού δε μπορεί κατ' αρχήν να προβλεφθεί" (McCormack & Dorin 2001 σ. 6).

Το ζήτημα αυτό όπως υποστηρίζουν οι περισσότεροι συνθέτες υπολογιστικής μουσικής αφορά αφενός στις κατάλληλες οδηγίες - mapping των δεδομένων που εξάγονται από το σύστημα, πρακτικές που θα συζητήσουμε στα επόμενα κεφάλαια 3.2 και 4.

3. ΤΑ ΚΥΤΤΑΡΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΟΥΣΙΚΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε ορισμένες τεχνικές σύνθεσης, έργα και απόψεις συνθετών που σχετίζονται κυτταρικά αυτόματα. Συνολικά η επιλογή των συγκεκριμένων θεμάτων έγινε με γνώμονα τη σημασία τους στην εξέλιξη της generative ηλεκτρονικής σύνθεσης αλλά και τη συνάφεια με πρακτικές που χρησιμοποιούμε για το έργο αλλά και με ιδέες και προβληματισμούς πίσω από τη διαδικασία της δημιουργίας του. Το κεφάλαιο αυτό κλείνει με τη σχέση ιδεών της κυβερνητικής και τη θέση τους στο παρόν έργο.

3.1 Τεχνικές

Κυτταρικά αυτόματα και τεχνικές μακρο-δομής

Οι τεχνικές αυτές στις οποίες θα αναφερθούμε αφορούν στην επιλογή παραμέτρων μακροδομής όπως επιλογή νοτών, διαρκειών, ηχοχρωμάτων σε επίπεδο τράπεζας ήχων και γενικότερα σε παραμέτρους που ρυθμίζονται από εντολές κατα κανόνα ενός midi interface. Η αξιοποίηση των κυτταρικών αυτομάτων όπως είναι ίσως αναμενόμενο, ξεκίνησε από τη μακροδομή αφού η τεχνολογία της εποχής των πρώτων συστημάτων δεν επέτρεπε εκτεταμένο πειραματισμό με κυτταρικά αυτόματα και σύνθεση ήχου ιδιαίτερα σε επίπεδο πραγματικού χρόνου.

Οι πρώτες τεχνικές σε αυτό το πεδίο αναπτύχθηκαν από τον Peter Beyls τη δεκαετία του 1980. Το σύστημα το οποίο παρουσιάζει ο Beyls στο άρθρο του “Musical Universe of Cellular Automata” περιγράφεται από στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα των οποίων η συμπεριφορά για ένα συγκεκριμένο κελί καθορίζεται από μια συνάρτηση τριών παραγόντων: Την προηγούμενή τους τιμή, τις προηγούμενες (πρόσφατες) τιμές των κελιών της γειτονιάς και το είδος του κανόνα που εφαρμόζεται. Λόγω του συνυπολογισμού των πρόσφατων τιμών από προηγούμενες και επόμενες γενιές, οι κανόνες που χρησιμοποιούνται εδώ είναι δύο διαστάσεων. Ο στόχος του ήταν να δημιουργήσει, σε ένα δισδιάστατο επίπεδο, μια συμπεριφορά κυματικής αλληλεπίδρασης σωματιδίων - κελιών που φέρουν ως τιμή, ένα ποσό ενέργειας (Beyls, 1989 σ. 38). Ιδιαίτερα δυναμικό ήταν το midi mapping των αυτομάτων, το οποίο σε επίπεδο νότας γινόταν συνυπολογίζοντας την τιμή του κελιού

την αξιολόγηση του ιστορικού τιμών και μία τονική βαθμίδα επιλεγόμενη από το χρήστη. Η επιλογή καναλιού γινόταν με τον αριθμό ευρετηρίου του κελιού χρησιμοποιώντας τη λειτουργία mod για να αναθέσουν τις νότες στα διαθέσιμα midi κανάλια, ενώ η διάρκεια καθοριζόταν από την τιμή του κελιού σε συνδυασμό με μια συνθήκη ενός δέντρου αποφάσεων (Burraston, Edmonds, Livingstone & Miranda, 2004)

Ένα σύστημα της ίδιας εποχής, το *CA Workstation* των Andy Hunt, Ross Kirk και Richard Orton του πανεπιστημίου του York παρουσιάστηκε ως το πρώτο που δίνει την επιλογή στο χρήστη για αλληλεπίδραση πραγματικού χρόνου με το λογισμικό κατά τη διαδικασία της μουσικής σύνθεσης μεσω της δυνατότητας ελέγχου συγκεκριμένων παραμέτρων. Η γενική λογική αυτού του συστήματος έχει αρκετές ομοιότητες με αυτή που χρησιμοποιείται στο σύστημα της εργασίας. Το σύστημα αυτό βασίζεται σε στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα των οποίων το πλέγμα εξελίσσεται κατακόρυφα. Η εκάστοτε κατάσταση του πλέγματος αντιστοιχεί στην επιλογή - εκτέλεση στοιχείων (νοτών) συγκεκριμένων κλάσεων τονικού ύψους οι οποίες είτε προκαθορίζονται απο διάφορες συνθετικές επιλογές μέσω του συστήματος και πραγματοποιούνται αυτόματα, είτε μπορούν να καταχωρούνται σε πραγματικό χρόνο μέσω ενός midi keyboard. Η τεχνική αυτή της ανάγνωσης του πλέγματος είναι η πλέον διαδεδομένη και χρησιμοποιείται για την επίτευξη διαφορετικών συνθετικών στόχων στο έργο. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος, είναι η δυνατότητα ανάθεσης δεδομένων των αυτομάτων σε midi παραμέτρους αλλά και για τη χαρτογράφηση αυτών των δεδομένων κατ' επιλογή του χρήστη για παράδειγμα για παραμετροποίηση ενός ηλεκτροακουστικού οργάνου (granular κλπ.). Μια ακόμα δυνατότητα του συστήματος είναι το zoom-in σε περιοχές του πλέγματος οι οποίες θεωρεί ο χρήστης οτι εμφανίζουν ενδιαφέροντα μοτίβα (Orton, Hunt & Kirk, 1991). Η πρακτική αυτή της επιλεγόμενης περιοχής του πλέγματος διευκολύνει σε πολλές περιπτώσεις την αποφυγή αναπαραγωγής μονότονων ή μη επιθυμητών μοτίβων και χρησιμοποιείται με παρόμοιο τρόπο στο σύστημα της παρούσας εργασίας όπως θα δούμε στο τέταρτο κεφάλαιο.

Ένα σύγχρονο σύστημα που χρησιμοποιεί μια παρόμοια τεχνική για midi συνθεση σε πραγματικό χρόνο είναι το WolframTones που έκανε την εμφάνισή online το Σεπτέμβρη του 2005 του στην ιστοσελίδα του Stephen Wolfram όπου είναι ενεργό ως

και σήμερα. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί μονοδιάστατα κυτταρικά αυτόματα τα οποία αναπτύσσονται εφαρμόζοντας τεσσάρων ειδών κανόνες οι οποίοι καθορίζουν τη γειτονιά του κάθε κελιού και. Ο τυπος κανόνα 7, αντιστοιχεί στη γειτονιά των στοιχειωδών αυτομάτων. Ο τύπος κανόνα 31 αντιστοιχεί σε γειτονιά των δύο προηγούμενων καταστάσεων του κελιού και της γειτονιάς τους σε απόσταση 2 κελιών. Ο τύπος κανόνα 15 αντιστοιχεί σε εξάρτηση από μεχρι 2 κελιά απόσταση στα αριστερά και ένα στα δεξιά, ενώ οι γενικοί τύποι κανόνων επιτρέπουν την εξάρτηση και από μη εφαπτόμενα κελιά. Το νούμερο του κάθε κανόνα σε δυαδικά ψηφία καθορίζει τον τρόπο αλληλεπίδρασης των κελιών του δυαδικού αριθμού με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς κελιών ανάλογα με την κατηγορία κανόνα (Wolfram, 2011).

Όσον αφορά στο mapping του τονικού ύψους, το WolframTones χρησιμοποιεί μια απλή τεχνική που βασίζεται πρώτον στην κάθετη περιστροφή του πλέγματος των αυτομάτων ωστέ η εξέλιξη τους να εντοπίζεται στον οριζόντιο άξονα και δεύτερον στην ταύτιση του τονικού ύψους το "ύψος" του κάθε εμφανιζόμενου κελιού (εδώ ύψος θεωρείται το πόσο δεξιά ή αριστερά είναι η θέση καθε κελιού πρίν την περιστροφή του πλέγματος). Αυτή η περιστροφή παρέχει μια αρκετά οικεία οπτικοποίηση της μουσικής διαδικασίας αφού το τονικό ύψος βρίσκεται στον κατακόρυφο άξονα και ο χρόνος στον οριζόντιο. Ο χρήστης επιλέγει την τονική ενώ τα κελιά αντιπροσωπεύουν διαστήματα ημιτονίων έτσι ώστε αναλόγως με την κατάσταση της αλληλουχίας τιμών 0 και 1 να καθορίζεται το είδος της κλίμακας. Για παράδειγμα ο αριθμός 2773 αντιστοιχεί στα διαστήματα μιας μείζονος κλίμακας αφού σε δυαδικό είναι 101011010101 και άρα σε μουσικά διαστήματα TTHTTT. Η εξέλιξη και ο μετασχηματισμός της αρχικής κλίμακας γίνεται βάσει των κανόνων που εφαρμόζονται. Το γενικό tempo καθορίζει και το ρυθμό δημιουργίας νέων γενιών αυτομάτων ενώ η διάρκεια κάθε νότας εξαρτάται από το χρόνο παραμονής του κάθε κελιού σε ενεργή κατάσταση για κάθε καινούργια γενιά.

Κυτταρικά αυτόματα και τεχνικές παραγωγής ρυθμικών μοτίβων

Οι τεχνικές ρυθμικών μοτίβων καθεαυτές φαίνεται έχουν μελετηθεί σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με αυτές του midi - pitch mapping, μιας και θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ένα υποσύνολο αυτών μιας και εντάσσονται στο επίπεδο μουσικής σύνθεσης σε μακροεπίπεδο, τουλάχιστον από την άποψη της αντίληψης του ρυθμού

ως μέρος μιας ενορχήστρωσης και όχι ως το στοιχείο του ηχοχρώματος μιας ηχητικής υφής (για παράδειγμα τα ρυθμικά στοιχεία μιας granular ηχητικής υφής). Παρακάτω παρουσιάζεται μια τεχνική τής οποίας η λογική και πολλά στοιχεία χρησιμοποιείται στο μουσικό έργο της εργασίας αυτής για ένα μεγάλο μέρος του ρυθμικού mapping.

Ο Andrew R. Brown του Queensland University of Technology παρουσίασε το 2005 ένα σύστημα μονοδιάστατων κυτταρικών αυτομάτων τα οποία χρησιμοποιούν totalistic rules -ένα είδος κανόνων με τους οποίους, στην προκειμένη περίπτωση, υπολογίζεται το άθροισμα των ενεργών (1) κελιών μιας γειτονιάς για την παραγωγή της επόμενης κατάστασης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, το οριζόντιο πλέγμα λειτουργεί ως ένα step sequencer, δηλαδή κάθε ενεργό κελί (1) αντιστοιχεί στην εκτέλεση μιας νότας ενώ κάθε ανενεργό κελί (0) όχι, ενώ το πλέγμα αυτό διαβάζεται από το ένα άκρο ως το άλλο. Οι κανόνες των αυτομάτων αυτών αποτελούν το σύνολο των συναρτήσεων μετάβασης και δίνουν τα εξής τέσσερα αποτελέσματα: μετάβαση σε παύση (0), μετάβαση σε νότα (1), αντιστροφή της κατάστασης, παραμονή στην ίδια κατάσταση. Ακολουθώντας τη λογική του Wolfram στην κατηγοριοποίηση των κυτταρικών αυτομάτων βάσει βαθμών πολυπλοκότητας της συμπεριφοράς, ο Brown κατηγοριοποιεί τους κανόνες με τις αντίστοιχες συμπεριφορές των αυτομάτων του (ρυθμικά μοτίβα) ως εξής: 1. *Καθυστερημένη σταθερότητα* 2. *Ρυθμική αναστροφή* 3. *Αραίωση πυκνότητας* 4. *Εξελισσόμενη αναστροφή* 5. *Αναδυόμενοι κύκλοι* (κύκλοι που ολοκληρώνονται μετα από μεγάλο αριθμό νέων γενεών) 6. *Πιθανοκρατικές μεταβάσεις* (για προτεραιότητα σε συγκεκριμένους χτύπους) 7. *Κανόνες ευαίσθητοι στη θέση* (μεγαλύτερη πιθανότητα ελέγχου στο δεξί ή αριστερό κελί) 8. *Ρυθμικό Phasing* 9. *Εναλλασσόμενα σημεία εκκίνησης* (phasing με μετακίνηση κελιών - bit shifting αντί καθυστέρησης) (Brown, 2005).

Η παραπάνω τεχνική μπορεί να συσχετιστεί αρκετά με μια ήδη υπάρχουσα τεχνική δημιουργίας ρυθμικού μοτίβου από έναν δυαδικό αριθμό. Όπως θα δούμε και στην περιγραφή των τεχνικών του έργου, η εκάστοτε κατάσταση του πλέγματος των αυτομάτων αντιστοιχεί σε έναν δυαδικό αριθμό (Hart, 2008 - Wagner 2009). Μια δεύτερη τεχνική που χρησιμοποιείται στο παρόν έργο γίνεται με μια κατακόρυφη ανάγνωση επιλεγμένων στηλών του πλέγματος και έχει ομοιότητες με το zooming περιοχών του πλέγματος που αναφέρεται παραπάνω στην περιγραφή του *CA Workstation*. Ένα ακόμα μια τεχνική - midi όργανο που προτείνεται για περαιτέρω

μελέτη είναι το Liqui-Prism του Alan Dorin του Centre for Electronic and Media Art του πανεπιστημίου Monash, το οποίο δημιουργεί πολυρυθμικά μοτίβα από καταστάσεις πλέγματος του Game of Life.

Κυτταρικά αυτόματα και τεχνικές σύνθεσης ήχου - μικροδομή

Το *Chaosynth* πρωτοπαρουσιάστηκε το 1995 από τον Eduardo Miranda και το Faculty of Music and Edinburgh Parallel Computing Centre (EPCC) του University of Edinburgh. Το σύστημα αυτό πήρε το όνομά του από το μοντέλο των chemical oscillators που στην επιστήμη της νευροφυσιολογίας περιγράφει το φαινόμενο ενός κυκλώματος αντήχησης (reverberating circuit, σχετιζόμενο με μνημονικές και μαθησιακές διαδικασίες). Τα κυτταρικά αυτόματα απεικονίζουν μια παράταξη κελιών που θεωρούνται ως νευρικά κύτταρα και δύνανται να βρίσκονται σε κατάσταση αδρανή, εκπολωμένη ή καμμένη (burned) . Τα κύτταρα αυτά αλληλεπιδρούν σε μία δισδιάστατη γειτονιά μέσω ροής ηλεκτρικού ρεύματος ανάμεσά τους ενώ διαθέτουν όρια Vmin και Vmax για τα οποία σε τιμή τάσης κατώτερη του Vmin καθίστανται αδρανή, σε τιμή εντός των ορίων εκπολωμένα ενώ αν φτάσουν το Vmax, τα κύτταρα καίγονται ενώ όλα τα κελιά διαθέτουν μια αντίσταση για τον παρεμποδισμό της εκπόλωσής τους. Κάθε καμμένο κύτταρο αντικαθίσταται από ένα αδρανές στο επόμενο χρονικό βήμα. Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως το γενικότερο σύστημα παρέχει τη δυνατότητα midi ενορχήστρωσης και την ανάθεση ρόλων στα διάφορα υποστηριζόμενα όργανα. Η επιλογή των συγκεκριμένων κελιών για την ανάπτυξη μιας solo γραμμής στο χρόνο γίνεται με αλγορίθμους που δεν αναφέρονται στην ιστοσελίδα που περιγράφει το σύστημα. Δίνεται βέβαια η επιλογή οποιοδήποτε όργανο να αναλαμβάνει διαφορετικό ρόλο, άρα η επιλογή του κελιού που θα αναπαράγει σε κάθε καινούργια γενιά να γίνεται από διαφορετικό αλγόριθμο.

Όσον αφορά στο mapping του συστήματος, κάθε ηχητικό σωματίδιο αποτελείται από ημιτονοειδή κύματα - partials που δέχονται παραμετροποίηση στη συχνότητα ταλάντωσης, τη διάρκεια του ήχου (τάξης milliseconds) και το πλάτος της ταλάντωσης. Οι δύο πρώτες παράμετροι καθορίζονται από τα κυτταρικά αυτόματα ενώ η το πλάτος από το χρήστη. Στο πλέγμα του συστήματος βρίσκονται οι ταλαντωτές οι οποίοι περιστοιχίζονται από κελιά των οποίων η τάση καθορίζει και τιμές συχνότητας. Η τιμή συχνότητας του ταλαντωτή στο κέντρο είναι ο μέσος όρος των συχνοτήτων της γειτονιάς. Λόγω της παράλληλης λειτουργίας πολλών

ταλαντωτών για τη δημιουργία ενός ηχητικού σωματιδίου η σύνθεση θεωρείται εκτός από granular, και additive (Miranda, 1995 σ. .297-298 και 2007, σ. 170-193).

Το Centre for Computer Music του University of Cincinnati παρουσίασε το 2000 το *CA*, ένα εργαλείο σύνθεσης που βασίζεται στην κοκκοποίηση (granulation) ενός δείγματος ήχου και στη δίοδο αυτών των ηχητικών κόκκων μέσα από μία τράπεζα 32 IIR (infinite impulse response) φίλτρων. Για τη λειτουργία των φίλτρων αυτών που καθορίζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά των κόκκων, χρησιμοποιούνται στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα σε ένα πλέγμα 32 κελιών χωρίς αναδιπλούμενα σύνορα και με γειτονιά τριών κελιών. Το ηχητικό δείγμα αποθηκεύεται σε ένα αρχικό buffer του ο οποίου δημιουργούνται 32 αντίγραφα που το καθένα ώς ηχητικοί κόκκοι περνούν τα αντίστοιχα 32 φίλτρα. Τα κυτταρικά αυτόματα ανάλογα με την κατάστασή τους ορίζουν τις παραμέτρους των φίλτρων και επιλέγουν το φασματικό περιεχόμενο των κόκκων που μετά τη δίοδο τους επαναθροίζονται και παράγουν το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα (Vaidhyanathan, Minai & Helmuth 2000 σ. 1-4). Μια αντίστοιχη τεχνική για τη φασματική επεξεργασία του ήχου είχε προταθεί από το Australian Centre for the Arts and Technology και τον Tim Kreger. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιούνται επίσης στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα των οποίων οι εναλλασσόμενες καταστάσεις ορίζουν ποιά bin ενός FFT equalizer θα ενεργοποιούνται για την επανασύνθεση (resynthesis) του ήχου και ποιά όχι, δημιουργώντας έτσι ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο φασματικό περιεχόμενο (Burraston & Edmonds, 2005). Η συγκεκριμένη τεχνική φασματικής επεξεργασίας του ήχου μέσω κυτταρικών αυτομάτων και FFT analysis - resynthesis αποτελεί ένα βασικό μέρος του συστήματος που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία και θα παρουσιαστεί στο επόμενο σκέλος.

Μια νεότερη φασματική τεχνική η οποία αξιοποιεί δισδιάστατα κυτταρικά αυτόματα βασισμένα στο Game of Life είναι αυτή που εφαρμόζεται στο σύστημα *SpectralConway* των Scott McLaughlin και Pierre Alexandre Tremblay του University of Huddersfield. Σε αυτό το σύστημα αντί των διακριτών τιμών που κατέχουν τα κελιά του Game of Life, δίνονται ζευγάρια συνεχών τιμών συχνότητας και πλάτους ταλάντωσης. Οι τιμές αυτές προέρχονται από μια λίστα από partials προερχόμενα από εργαλεία αναγνώρισης τονικού ύψους και ανάλυσης σε partials όπως το *fiddle~* και το *sigmund~*. Γειτονιά εδώ θεωρείται μια συχνοτική απόσταση

που αντιστοιχεί σε μία οκτάβα και όποια ζωντανά κελιά - partials βρίσκονται σε αυτή τη συχνοτική απόσταση αλληλεπιδρούν σύμφωνα με τους κανόνες του Game of Life. Το σύστημα αυτό εξετάζει μόνο το τονικό ύψος ενώ εξάγει για επανασύνθεση τα ζωντανά κελιά χωρίς να μεταβάλει το ύψος τους ή το πλάτος της ταλάντωσης (McLaughlin & Tremblay, 2010).

Το πρώτο σύστημα που συνδύασε τα κυτταρικά αυτόματα με τη wavetable synthesis αποτελεί το *LASy* του Jacques Chareyron του Laboratorio Informatica Musicale του πανεπιστημίου του Μιλάνου. Στο σύστημα αυτό του Chareyron χρησιμοποιούνται στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα με κάθε κελί να αποτελεί ένα δείγμα από μία κυματομορφή ώστε η τιμή πλάτους του κάθε δείγματος να λαμβάνεται από την κατάσταση του αντίστοιχου κελιού. Για να συμβεί αυτό, τα δεδομένα από τις διατάξεις της κάθε γενιάς τροφοδοτούν έναν μετατροπέα DAC για την έξοδο του ήχου. Με αυτό τον τρόπο, κατά την εμφάνιση νέων γενιών αυτομάτων, η κυματομορφή αλλάζει διαρκώς σχήμα και χαρακτηριστικά. Την τεχνική αυτή ο Chareyron την παραλληλίζει σχηματικά με την Karplus-Strong synthesis και υποστηρίζει πως παρουσιάζει παρόμοια ηχητικά αποτελέσματα (Chareyron, J. 1990). Η τεχνική αυτή παρότι είναι από τις πρώτες τεχνικές σύνθεσης ήχου κατά την έρευνα της εργασίας βρέθηκε μόνο μια περίπτωση σύγχρονης εφαρμογής τής στο διαδίκτυο το *Bendy* του Victor Shepardson

(https://notebook.community/victor-shepardson/bendy/bendy)

3.2 Συνθέτες, έργα και προβληματισμοί

Οι ιδιότητες της συμπεριφοράς των κυτταρικών αυτομάτων, όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον καλλιτεχνών στις παραστατικές αλλά και στις τέχνες του ήχου και τη μουσική .

Ιάννης Ξενάκης

Από τις πρώτες χρονολογικά περιπτώσεις χρήσης κυτταρικών αυτομάτων για μουσική σύνθεση είναι το έργο *Horos* του Ιάννη Ξενάκη (1986). Ο Ξενάκης στο σύγγραμμά του *Formalized Music* παραθέτει πώς το ενδιαφέρον του για τα κυτταρικά αυτόματα σχετίζεται με την ιδιότητά των κλιμάκων που δημιουργούν, να “εδραιώνουν αυτόματα ένα είδος σφαιρικής μουσικής τεχνοτροπίας, ένα είδος

μακροσκοπικής "σύνθεσης" μουσικών έργων αρκετά όμοιο με ένα "συχνοτικό φάσμα ή τις προσεγγίσεις της σωματιδιακής φυσικής" (Xenakis, 1992 σ. 12). Ιδιαίτερα σημαντική για τον Ξενάκη ήταν η ιδέα των κυτταρικών αυτομάτων ως μοντέλα που αναπαράγουν τη μηχανική της αναταραχής των υγρών σωμάτων, λόγω της γενικότερης θεώρησης της μουσικής του ως έκφραση φαινομένων της φύσης. Όσον αφορά στο έργο Horos, ο Σολωμός θεωρεί πως ο Ξενάκης χρησιμοποιεί τα αυτόματα για να δημιουργεί νέα αρμονικά ηχοχρώματα με δύο τρόπους: με αυξομειώσεις στην *πυκνότητα* δηλαδή στο εύρος της ομάδας οργάνων που εκτελούν τις συγχορδίες (όπου τα κυψελικά αυτόματα φαίνεται πως προκαλούν τη δυναμική αυξομείωση του εύρους αυτού) και προκαλούν δυναμικά εναλλασσόμενες παράλληλες συγχορδίες. Ο Σολωμός παρατηρεί επίσης πολλές περιπτώσεις επέμβασης στα μουσικά δεδομένα που εξήγαγε ο αλγόριθμος οι οποίες γίνονταν για την αποφυγή μη επιθυμητών μουσικών αποτελεσμάτων (τις περιγράφει με τον όρο *bricolage*) (Solomos, 2005) .

Peter Beyls

Ο Peter Beyls αποτελεί πρωτοπόρο στη χρήση κυτταρικών αυτομάτων για οπτικοακουστική δημιουργία ως καλλιτέχνης και ερευνητής στους τομείς της εξελικτικής υπολογιστικής και της αλληλεπίδρασης ανθρώπου και υπολογιστή στη μουσική δημιουργία. Ο Beyls αντλώντας ενδιαφέρον από μοντέλα βιολογικών, μικροβιολογικών κ.α. διεργασιών ανέπτυξε συστήματα για μουσική σύνθεση με κυτταρικά αυτόματα στο VUB Artificial Intelligence Laboratory, του πανεπιστημίου των Βρυξελλών από τη δεκαετία του 1980. Εκτός από συστήματα μουσικής σύνθεσης, δημιούργησε ως ερευνητής δημιούργησε από τις αρχές της δεκαετίας του 90 ίσως τα πρώτα μοντέλα αλληλεπίδρασης του μουσικού με το σύστημα παραγωγής των αυτομάτων. Μια σημαντική ιδέα του ήταν ότι ο έλεγχος βασικών παραμέτρων των αυτομάτων μπορεί να διαμορφώνεται σε πραγματικό χρόνο ωστε να ελέγχει με "ευελιξία" αλλά και "διαβάθμιση" το βαθμό της πολυπλοκότητας της συμπεριφοράς των αυτομάτων. Μια ιδέα που όπως θα αναφέρουμε και παρακάτω έχει καταβολές από την κυβερνητική. Σε πολλά από τα έργα του χρησιμοποιεί την παράμετρο των πρακτόρων (*agents*), μονάδων ενός συστήματος που αλληλεπιδρούν ως ανθρώπινα όντα σε ένα δεδομένο χώρο. Σε ένα από τα πιό σύγχρονα έργα του, την οπτικοακουστική εγκατάσταση *Petri*, αποτελεί ένα τεχνητό περιβάλλων σωματιδίων που αλληλεπιδρούν ακολουθώντας συγκεκριμένους κανόνες, ενώ η κινητική

δραστηριότητα του ανθρώπινου που αλληλεπιδρά, επηρεάζει το σύστημα σε τοπικό επίπεδο χωρίς να μπορεί να ελέγξει τη συνολική συμπεριφορά του (Beyls, 1991 και 2012).

Warren Burt

Ο συνθέτης ηλεκτρονικής μουσικής Warren Burt το 1986 με τη βοήθεια του μαθηματικού Henry Hunter συνέθεσε το έργο *Voices, Tuning Forks and Accordion.* Για τη δημιουργία του έργου αυτού ο Burt χρησιμοποίησε μια έκδοση του Game of Life γραμμένη από τον Hunter στην οποία τα αυτόματα του προγράμματος καθόριζαν το τονικό ύψος, το ηχόχρωμα και τη διάρκεια των νοτών του έργου. Ο ίδιος συνθέτης προχώρησε κατα τις δεκαετίες του 1990 και 2000 στη δημιουργία ηλεκτροακουστικών έργων με συνδυαστική χρήση ξεχωριστών λογισμικών για τη δημιουργία μονοδιάστατων στοιχειωδών ή στοχαστικών κυτταρικών αυτομάτων και για τη σύνθεση των ήχων μέσα από το mapping των εξαγωμένων από τα αυτόματα δεδομένων. Παρουσιάζοντας τη διαδικασία δημιουργίας του έργο του *Scrabbles* εστιάζει στη χρήση των αυτομάτων ώς διαρκώς μεταβαλλόμενα φάσματα συχνοτήτων (spectra) τα οποία δημιουργεί με ημιτονοειδείς ταλαντωτές και θόρυβο περιορισμένου συχνοτικού εύρους (Burt, 2007 σ. 27-33). Η προσέγγιση των κυτταρικών αυτομάτων ως spectra που διαμορφώνουν μια παλέτα χροιών για το συνθέτη έχει κοινά στοιχεία με αυτή που ακολουθείται στη σύνθεση του έργου της παρόντος εργασίας όπως θα δούμε στην αντίστοιχη ενότητα.

***01101110* - Μια σύγχρονη αλληλεπιδραστική εγκατάσταση με κυτταρικά αυτόματα**

Το *01101110*, ένα οπτικοακουστικό έργο - installation με χρήση στοιχειωδών κυτταρικών αυτομάτων του κανόνα 110 του Wolfram, παρουσιάστηκε το 2019 από τους Αλέξανδρο Κοντογεωργακόπουλο και Οδυσσέα Κλεισσούρα. Το έργο αυτό βασίζεται στην προβολή των στιγμιοτύπων από την εξέλιξη των κυτταρικών αυτομάτων του κανόνα 110 με λευκό φως το οποίο περνά μέσα από διάτρητα κυκλικά πάνελ. Η μουσική του έργου παράγεται από το mapping των κυτταρικών αυτομάτων και διαχέεται στο χώρο από ένα ζευγάρι ηχείων που βρίσκονται στην ίδια θέση με τα κουτιά των προβολών τα οποία οι δημιουργοί ονομάζουν *shadow boxes*. Το έργο αυτό στο σύνολό του διέπεται από μινιμαλιστική αισθητική στην

κατεύθυνση της αργής ανάπτυξης χωρίς δραματικές μεταβολές. Για το λόγο αυτό το μουσικό mapping των αυτομάτων είναι πολύ απλό σε σχέση με αυτό πιο σύνθετων συστημάτων που θα δούμε στην επόμενη ενότητα. Η βασική ιδέα του mapping είναι η οριζόντια ανάγνωση της κάθε γενιάς αυτομάτων από δεξιά στα αριστερά και η εκτέλεση ενός μουσικού γεγονότος κάθε φορά που εντοπίζεται ένα ενεργό (λευκό) κελί. Οι δύο πρωταρχικές πηγές ήχου που χρησιμοποιούνται είναι η γεννήτρια λευκού θορύβου και ο ταλαντωτής ημιτονοειδούς κυματομορφής. Τα ρυθμικά μοτίβα που παράγονται από την ανάγνωση της κάθε γενιάς αυτομάτων ηχογραφούνται ως ένα αρχείο ήχου και αναπαράγονται στη συνέχεια. Η διαδραστική συνθήκη του έργου αυτού είναι πως οι μεταβάσεις μεταξύ γενεών εξαρτώνται από τον προβαλλόμενο σχηματισμό των αυτομάτων. Έτσι, στην περίπτωση που οι θεατές - ακροατές σκιάζουν με την παρουσία τους οι γενιές που αποκρύπτονται δεν ηχοποιούνται.

Οι δημιουργοί, στο σχετικό με το έργο άρθρο, επισημαίνουν το βασικό ζήτημα της παραγωγής ενδιαφέρουσας μουσικής στην *process music* και στη μουσική μέσω συστημάτων γενικότερα που χαρακτηρίζει παλαιότερα ρεύματα αλγοριθμικής σύνθεσης. Υποστηρίζουν πως στην περίπτωση των κυτταρικών αυτομάτων η αυστηρή ηχοποίηση τους ως σύστημα δεν παρουσιάζει παντα ενδιαφέρον. Επισημαίνουν την ιδιαίτερη σημασία που έχει το δημιουργικό mapping των δεδομένων ώστε οι διαδικασίες να είναι αντιληπτές (παραθέτουν τη φράση του Reich "*processes must be perceptible*"). Τη θέση αυτή έχει υποστηρίξει και σε διάφορες περιπτώσεις ο Burt επισημαίνοντας την ανάγκη προσεκτικής ακρόασης των συστημάτων και μετατόπιση της εστίασης στο δημιουργικό mapping και όχι αναγκαία σε πολυπλοκότερους αλγορίθμους (Kontogeorgakopoulos & Klissouras, 2020 σ. 82-87 - Burt, 1996 σ.170 και 2007 σ.27-28).

Προβληματισμοί και ερωτήματα

Στις τελικές παρατηρήσεις τους οι Κοντογεωργακόπουλος και Κλεισσούρας παραθέτουν ως θέμα προβληματισμού, ένα συναφές θέμα με αυτό που συζητήσαμε στο τέλος του 2ου κεφαλαίου, την ισορροπία των διαδικασιών που σχετίζονται περισσότερο με την επιστήμη, με αυτά της καλλιτεχνικής δημιουργίας. Στο ζήτημα αυτό μπορεί να παρατηρήσει κανείς σημαντικές διαφορές στην προσέγγιση μεταξύ συνθετών, που ουσιαστικά φανερώνουν ποιές ιδιότητες αυτές των κυτταρικών αυτομάτων προσπαθούν να "φωτίσουν" μέσα από το έργο τους (επιστημονικό και

συστημικό ζήτημα) και ταυτόχρονα το βαθμό πολυπλοκότητας του mapping που χρησιμοποιεί για να προσεγγίσει αυτό που θεωρεί μουσικά ενδιαφέρον αποτέλεσμα (καλλιτεχνικό ζήτημα). Ο Beyls αναφερόμενος στο mapping των κυτταρικών αυτομάτων χαρακτηρίζει ως "εύθραυστη" την ισορροπία μεταξύ αυτόματων διεργασιών και άμεσης οδηγίας και περιγράφει μια διαδικασία μουσικής δημιουργίας όπου ο "εγγενής δομικός πλούτος" νοηματοδοτείται μουσικά από ένα σχεδιασμό με σαφείς οδηγίες (Beyls, 2004 σ.4).

Ο Curtis Roads αναφερόμενος σε τεχνικές ηλεκτροακουστικής σύνθεσης κατατάσσει τα κυτταρικά αυτόματα στην κατηγορία σύνθεσης που ονομάζει "abstract generative models". Υπογραμμίζει πως σε αντίθεση με την περίπτωση χρήσης μοντέλων φυσικών φαινομένων, μοντέλα όπως τα κυτταρικά αυτόματα έχουν το μειονέκτημα της απουσίας μιας "πολυεπίπεδης έννοιας της δομής". Μάλιστα ως παράδειγμα δίνει τα αυτόματα του Wolfram (σχετικά με τον οποίο δηλώνει πως είναι υποστηρικτής του έργου *New Kind of Science*) τα οποία όπως υπογραμμίζει η περιπτώσεις να δίνουν σε ικανοποιητικό βαθμό μεγαλύτερες και ενδιαφέρουσες δομές είναι ζήτημα "εικασίας". Παρατηρεί επίσης πως στην περίπτωση του WolframTones από τα μουσικά αποτελέσματα του αλγορίθμου λείπει η δυναμική ανάπτυξη της μακροδομής (Roads, 2012 σ.19 και 2015 σ. 297-298). Τα μειονεκτήματα που περιγράφει ο Roads εδώ, μπορεί ίσως να συσχετιστεί με την πρακτική του "*bricolage*" και της χειροκίνητης παρέμβασης στις διαδικασίες των κυτταρικών αυτομάτων από τον Ξενάκη για την επίτευξη των συνθετικών του στόχων, όπως το περιγράφεται από τον ο Σολωμό.

Οι δυσκολίες αυτές που παρατηρούνται και συχνά συνδέονται με περιορισμούς της παλαιότερης τεχνολογίας, είναι το κίνητρο στους νεότερους μουσικούς για ενσωμάτωση αλληλεπιδραστικών τεχνολογιών και πρακτικών ανατροφοδότησης σε συστήματα μουσικής δημιουργίας που κάνουν χρήση κυτταρικών αυτομάτων. Στο σημείο αυτό μπορεί να προστεθεί εύλογα το εξής επιμέρους ζήτημα: Υπάρχει άραγε η ανάγκη για εξωτερική τροφοδότηση με δεδομένα σε ένα σύστημα όπως τα κυτταρικά αυτόματα? Τα κυτταρικά αυτόματα ως συστήματα με ιδιότητες αυτοοργάνωσης προσφέρονται για τη δημιουργία αλληλεπιδραστικών περιβαλλόντων μουσικής δημιουργίας μιας και η ιδιότητα αυτή της αυτοοργάνωσης εξασφαλίζει ενσωμάτωση των εισερχόμενων από το συνθέτη δεδομένων ως ανατροφοδότηση. Και ως σημαντική ανάγκη στη σημερινή εποχή της μουσικής δημιουργίας με τεχνητή

νοημοσύνη (με όλα τα υπαρξιακά ζητήματα που δημιουργεί για τον ανθρώπινο συνθέτη - εκτελεστή) εμφανίζεται όλο και πιο έντονα αυτή της διαμόρφωσης τέτοιων δημιουργικών περιβαλλόντων στο πλαίσιο του Music and Human-Computer Interaction. Στην περίπτωση του παρόντος έργου παράλληλα με την αξιοποίηση των κυτταρικών αυτομάτων φάνηκε χρήσιμη η ενσωμάτωση μιας της κυβερνητικής διαδικασίας της ανάδρασης ή ανατροφοδότησης ως ένα εργαλείο για την αλληλεπίδραση υπολογιστή - μουσικού αλλά και των διαφορετικών μονάδων κυτταρικών αυτομάτων που χρησιμοποιούνται.

3.3 Κυβερνητική, Κυτταρικά Αυτόματα και Μουσική Δημιουργία

Έχει επισημανθεί πως η ιδέα των αυτο-αναπαραγόμενων αυτομάτων του Von Neumann σχετίζεται με ιδέες του μαθηματικού Robert Wiener και πως οι θεωρίες τους επηρέασαν η μια στην άλλη (Burks, 1969 σ. 1). Ο σκοπός της θεωρίας του Von Neumann ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου ερμηνείας της αυτο-αναπαραγωγής στη βιολογία και ο Wiener αντίστοιχα καταπιάστηκε με το ζήτημα της δυνατότητας μάθησης και αυτο-αναπαραγωγής των οργανισμών καθώς και αυτό της δυνατότητας να προσαρμόζονται στις συνθήκες του περιβάλλοντός τους (Wiener, 1961). Η κυβερνητική αποτελεί ένα ευρύ διεπιστημονικό γνωστικό πεδίο, που έχει στόχο τη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων, δηλαδή σύνθετων πληροφοριακών δομών που αποτελούνται από αυτόνομα μέρη που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με βασική κατά αυτή τη διαδικασία, τη λειτουργία της *ανάδρασης* (*feedback*). Ο Wiener, ο οποίος έθεσε τις βάσεις της θεωρίας της κυβερνητικής με το σύγγραμμα *Control and Communication between the Animal and the Machine* περιγράφει την ανάδραση ως μια διαδικασία με στόχο τον έλεγχο της *εντροπίας*, που παρατηρείται στους ζωντανούς οργανισμούς αλλά και στις "σύγχρονες μηχανές πληροφορίας" (Wiener, 1950 σ. 15). Τέτοιες σύγχρονες μηχανές πληροφορίας μπορούμε να θεωρήσουμε και τα κυτταρικά αυτόματα. Ένας σύγχρονος κυβερνητιστής, Ο Pickering υποστηρίζει πως τα κυτταρικά αυτόματα του Wolfram «μπορούν να λειτουργήσουν ως ένα οντολογικό θέατρο για εμάς σχετικά με το τι επακολουθεί – μικρά μοντέλα των θεμελιωδών μονάδων της κυβερνητικής οντολογίας. Εντός της σκληρής μη προγνωσιμότητάς τους εμφανίζουν σε μας αυτό που κάποιος θα ονόμαζε *οντολογία της μεταμόρφωσης*» (*ontology of becoming*) (Pickering, 2010 σ. 30).

Θεωρείται πως τα παλαιότερα συστήματα που χρησιμοποιούν κυτταρικά αυτόματα για τη μουσική δημιουργία κατα κανόνα λειτουργούν ως μηχανές που εκτελούν μια λειτουργία και η αλληλεπίδραση γίνεται μόνο με τον άνθρωπο και όχι μεταξύ μερών του συστήματος. Υποστηρίζεται πως η μουσική δημιουργία με κυτταρικά αυτόματα παρότι μοιράζεται πολλά κοινά με την κυβερνητική μουσική, δε μπορεί να θεωρηθεί κυβερνητική διαδικασία, καθώς δεν ακολουθεί πλήρως το πρότυπο της αλληλεπίδρασης ανθρώπου - μηχανής - περιβάλλοντος και η παράμετρος του περιβάλλοντος αγνοείται (Pickles, 2016 σ.22). Από την άλλη πλευρά, εξετάζοντας τις περιπτώσεις αλληλεπιδραστικών μουσικών συστημάτων με περισσότερα από ένα κυτταρικά αυτόματα, τότε θα μπορούσε κανείς να πει πως ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να αποτελεί το ίδιο ένα αυτόνομο περιβάλλον. Ο Beyls από τις αρχές της δεκαετίας του 90, χρησιμοποιώντας κυβερνητικούς όρους (*navigate, steer*), περιγράφει τις δυνατότητες του μουσικού να ελέγχει μέσω των κινήσεών του τη συμπεριφορά στα αλληλεπιδραστικά συστήματα πολλαπλών κυτταρικών αυτομάτων. Σε τέτοια παραδείγματα, ο χρήστης επεμβαίνει μεν στη διαδικασία δίνοντας νέα δεδομένα όπως μια μη προβλεπόμενη αρχική κατάσταση, διαμορφώνοντας νέους κανόνες ή τροποποιόντας την παράμετρο *Lambda* (υπολογισμός κανόνων για τον έλεγχο της εντροπίας), χωρίς να παρεμβαίνει στη ροή του παραγόμενου μουσικού αποτελέσματος (Beyls, 1991).

Μια τέτοια προσέγγιση υιοθετείται και για τη δημιουργία του συστήματος για τη μουσική δημιουργία της παρούσας εργασίας, αφού χρησιμοποιούνται δύο ή τρία ανα περίπτωση κυψελικά αυτόματα που εξελίσσονται παράλληλα. Έγινε προσπάθεια για τη συνεχή ανατροφοδότηση μεταξύ των τριών κυτταρικών αυτομάτων μέσω εξαγωγής δεδομένων από το καθένα (εικόνα νο. 5) με σκοπό τη συνεχή εξέλιξη του συστήματος και την αποφυγή της απόλυτης ισορροπίας - στασιμότητας. Η προσέγγιση αυτή της αντίληψης ενός παρατηρητή (συνθέτη) ως αλλά και ενός ή περισσότερων παράλληλων συστημάτων, ως παράγοντες (*agents*) που αλληλεπιδρούν, αποτελεί βασική ιδέα *Κυβερνητικής Δεύτερης Τάξης* (*Second Order Cybernetics*) (Heylighen & Joslyn, 2001).

4. ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΕΡΓΟΥ

4.1 *Ηχητικά Είδη* - Εννοιολογική προσέγγιση και δομή του μουσικού έργου

Το έργο έχει τον τίτλο *Ηχητικα Είδη* και βασίζεται στην ιδέα φανταστικών πρωτόγονων οργανισμων που γεννιούνται σε έναν ακατοίκητο πλανήτη / περιβάλλον. Οι οργανισμοί αυτοί αρχικά ανακαλύπτουν τον κόσμο τους αλληλεπιδρόντας με τα ανόργανα στοιχεία του περιβάλλοντος τη γη και τον αέρα. Με το πέρασμα του χρόνου αλληλεπιδρούν και εξελίσσονται διαμορφώνοντας σταδιακά τη συνείδηση του σκοπού της δραστηριότητάς τους (της *εντελέχειας* τους). Η συνείδηση αυτή που αποτελεί ένα μέρος του εννοιολογικού πλαισίου, είναι μια μεταφορά της συνείδησης του ίδιου του συνθέτη - εκτελεστή. Είναι μια διαδικασία που ξεδιπλώνεται κατα την αλληλεπίδρασή του με το σύστημα - περιβάλλον των αυτομάτων, κατα τη διάρκεια της μουσικής δημιουργίας. Ο συνθέτης ανακαλύπτει τις ιδιότητες των οργανισμών και φανερώνοντάς τες συνδιαμορφώνει το αισθητικό αποτέλεσμα.

Η ιδέα του οργανισμών αυτού βέβαια θα μπορούσε να συσχετιστεί αφηρημένα με τα διαστημικά σκάφη του Von Neumann. Ο Von Neumann οραματίστηκε τις συσκευές αυτές, που η τεχνητή τους νοημοσύνη θα τους επιτρέπει να κατασκευάζουν τις υποδομές που καθιστούν κατοικήσιμους ξένους πλανήτες, εξορυγνύοντας υλικά του πλανήτη και ύστερα να αυτο-αναπαράγονται ώστε να συνεχίζουν το έργο τους. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου έργου παρόλα αυτά, οι οργανισμοί αυτοί σχετίζονται περισσότερο με τα κυτταρικά αυτόματα του Wolfram και την ιδέα πως τέτοιες πρωτόγονες μορφές τεχνητής ζωής θα μπορούσαν να είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία συνθετων και πολύπλοκων δομών που παρατηρούνται στη φύση γενικότερα.

Η εννοιολογική αφετηρία του έργου είναι η *πρώτη ύλη*, αυτό που προϋπάρχει ακόμα και των τεσσάρων στοιχείων (γη, αέρα, φωτιά, νερού) για να δημιουργηθεί οτιδήποτε έχει *μορφή* (ή διαφορετικά *είδος*). Το έργο εμπνέεται από αυτή η βασική αυτή ιδέα δηλαδή στη φιλοσοφίας των *Μεταφυσικών* του Αριστοτέλη κατά τον οποίον η πρώτη ύλη έχει την απόλυτη δυνατότητα του μετασχηματισμού σε οποιοδήποτε στοιχείο και σε οποιαδήποτε μορφή, σε οποιοδήποτε δηλαδή δυνατό αντικείμενο (Ainsworth, 2020). Με αυτή την εννοιολογική αφετηρία υπ' όψιν επιλέχθηκε ως ηχητική πρώτη ύλη ο λευκός θόρυβος, μια πηγή ήχου που στην οποία ενυπάρχουν όλες οι δυνατές

συχνότητες με την ίδια ένταση σε ομοιόμορφη κατανομή. Στην αισθητική επιλογή του θορύβου -πέρα από την εννοιολογική του υπόσταση που παρουσιάσαμε παραπάνω- και στη μουσική του μεταχείριση, σημαντικές επιρροές ασκούνται από τις εφευρέσεις πειραματικών συνθετών όπως ο φουτουριστής Russolo (*Intonarumori, Art of Noises*). Υπάρχουν παράλληλα αναφορές από κλασικά ηλεκτροακουστικά έργα όπως *Gesange der Junglinge* του Stockhausen με το χαρακτηριστικό φιλτραρισμένο θόρυβο και το *La Fabbrica Illuminata* του Luigi Nono με το συνδυασμό θορύβου του όχλου και μελωδιών soprano φωνής. Οι αναφορές αυτές παρουσιάζονται και στην ενότητα της τεχνικής και αισθητικής προσέγγισης. Σε αναφορά με πιο σύγχρονα το έργο αυτό προσεγγίζει συνθέσεις του Denis Smalley (κυρίως τα *Wind Chimes* και *Valley Flow*) ή σε ακόμη μεταγενέστερα, το *Mobilization of Ecstasy* του Marc Behrens.

Η ανάδυση, ως διαδικασία της παράλληλη εξέλιξης της μικροδομής και μακροδομής και οι πιθανές διαδικασίες από τις οποίες μπορεί μια τέτοια εξέλιξη να πραγματοποιείται, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και κίνητρο για την καλλιτεχνική δημιουργία. Μάλιστα από μουσική άποψη έχει ενδιαφέρον η περιγραφή του κυτταρικού χώρου από τον Langton (1986) ως ένα σύμπαν μέσα στο οποίο το κάθε κελί αποτελεί ένα *αντικείμενο*. Ένας τέτοιος χαρακτηρισμός θα μπορούσε να συσχετιστεί με το *ηχητικό αντικείμενο* όπως το όρισαν οι Pierre Schaffer και Abraham Moles, ως δηλαδή μέρος της διαδικασίας *ανάδυσης* ηχητικών μορφών. Το αισθητικό ζήτημα λοιπόν στην παρούσα εργασία είναι η μουσική έκφραση μιας διαρκούς και παράλληλης εξέλιξης από το επίπεδο δημιουργίας μιας "παλέτας" στοιχειωδών μορφών (*ειδών*) με την ευρύτερη εξέλιξη και τη διαμόρφωση μουσικών δομών. Με άλλα λόγια το σύστημα που θα δημιουργεί το έργο, θα αποτελεί ιδανικά ένα τεχνητό οικοσύστημα μέσα από οποίο θα προκύπτει η σύνθεση των μουσικών αντικειμένων και η οργάνωσή τους σε επίπεδο μακροδομής. Η δημιουργική πρόκληση που παρουσιάζει μια τέτοια διαδικασία περιγράφεται από τον Chion ως ανάγκη να υπάρχει "συνάφεια μεταξύ του ηχητικού αντικειμένου (μικρο-δομή) και της μουσικής φράσης (μακρο-δομή)" και να πραγματοποιείται η ανάδυση από το *αντιληπτικό χώρο* (τονικό ύψος, διάρκεια, ηχηρότητα) "παραλλαγών αξιών κοινών σε αρκετά ηχητικά αντικείμενα του ίδιου *είδους*". Ως *είδος* ο Chion θεωρεί το ηχόχρωμα μιας συγκεκριμένης δομής που διαμορφώνεται μοναδικά από το όργανο που το παράγει (Chion, 2009 σ. 42, 49, 59).

Ως προς τη δομή του, το μουσικό έργο αποτελείται από δύο κομμάτια. Τα κομμάτια αυτά δημιουργήθηκαν από εκτελέσεις πραγματικού χρόνου με το μουσικό σύστημα στο Max/MSP. Και τα δύο κομμάτια έχουν μια δομή τύπου A-B-A' με αρχή και τέλος τις ηχητικές υφές του θορύβου. Στο πρώτο κομμάτι οι ύφές αυτές του θορύβου μετασχηματίζονται σε πολυφωνικές συνηχήσεις κατά το πρώτο μέρος ενώ στο παρασκήνιο είναι διακριτή η δημιουργία ηχητικών αντικειμένων σε επίπεδο μεσοδομής κοντά στο φάσμα έγχορδων και ξύλινων πνευστών οργάνων. Στο δεύτερο μέρος μονοφωνικά όργανα αυτά έρχονται στο προσκήνιο και εκτελούν ένα μουσικό κανόνα ενώ όσο ο κανόνας αυτός μετασχηματίζεται από τα αυτόματα, προκύπτουν παράλληλα και νέα ηχητικά αντικείμενα στο φάσμα χάλκινων πνευστών και κρουστών (glockenspiel) οργάνων. Το τρίτο μέρος του κομματιού έχουμε επανεμφάνιση των συγχορδιών του 1ου μέρους με μεγαλύτερη δυναμικότητα ενώ ταυτόχρονα έχουμε καινούργιες ηχητικές υφές / χειρονομίες από sampling / granulation των ηχητικών αντικειμένων και πολυφωνική αναπαραγωγή τους ως συνδετικό στοιχείο με το δεύτερο κομμάτι.

Στο δεύτερο κομμάτι επιχειρείται μια παρόμοια εξέλιξη πρώτο μέρος με ηχητικές υφές και συνηχήσεις του θορύβου, σε ένα δεύτερο μέρος που αυτή τη φορά χρησιμοποιεί όχι κανόνα των πρωτογενών αυτομάτων αλλά των δισδιάστατων αυτομάτων του Game of Life. Εδώ όπως συνέβει και με το δυναμικό μουσικό κανόνα που εκτελείται στο πρώτο κομμάτι, έχουμε μια δυναμική αναπαραγωγή των granular samples με ενα crescendo, μια βίαιη αλληλεπίδραση όλων σχεδόν των αντικειμένων που δημιουργούνται και τη σταδιακή τους αλληλοεξουδετέρωση. Κατά την έξοδο αυτή γίνεται η επανεμφάνιση των πρωταρχικών ηχητικών δομών του 1ου μέρους του 1ου κομματιού σα μια επιστροφή στην αρχική ανόργανη ύλη μέσα στην οποία δημιουργήθηκαν ο οργανισμοί αυτοί.

Η μετάβαση αυτή στην ουσία είναι και μία μετάβαση στην αντιληψιμότητα των χειρονομιών του εκτελεστή από το 2ο και 3ο βαθμό υποκατάστασης (*2nd - 3rd order surrogacy* κατά τον Dennis Smalley) στον 3ο βαθμό και το βαθμό απομακρυσμένης υποκατάστασης (*remote surrogacy*) του δεύτερου κομματιού. Θα μπορούσαμε να συνδέσουμε σε αυτό το σημείο να προβάλλουμε την έννοια της υποκατάστασης (του Smalley) μαζί με αυτή της ανάδυσης (του Di Scipio) ως ανάλογα μεγέθη αφού αν μια ήπια ή μηδενική χειρονομία του εκτελεστή - συνθέτη του έργου προκαλέσει δυναμικά

αποτελέσματα στις ηχητικές τροχιές τότε θα μπορούσε σημαίνει ταυτόχρονα υψηλού βαθμού υποκατάσταση αλλά και φαινόμενο ισχυρής ανάδυσης (Smalley, 1997).

4.2 Ο αλγόριθμος των στοιχειωδών κυτταρικών αυτομάτων

4.2.1 Ο βασικός αλγόριθμος

Ο αλγόριθμος των στοιχειωδών κυτταρικών αυτομάτων που χρησιμοποιηθηκε για το συγκεκριμένο έργο βασίζεται σε έναν κώδικα κυτταρικών αυτομάτων που ακολουθούν τους κανόνες του Wolfram. Ο κώδικας αυτός είναι δημιουργημένος για το Max/MSP (με το οποίο εκτελείται και το patch για τη μουσική του έργου) από το μουσικό Dan Derks για το πρόγραμμά του Max for Live, *Less-Concepts*. (https://cycling74.com/tutorials/algorithms-less-concepts-max-for-live-device-cellular-automata)

Ο αρχικός αλγόριθμος περιέχει ένα πλέγμα μεγέθους 8 κυψελών με περιοδικές οριακές συνθήκες (periodic / cyclic boundary conditions) κατά τις οποίες το τα ακριανά κελιά επικοινωνούν μεταξύ τους ελλείψει ενός άπειρου πλέγματος. Στον αλγόριθμο αυτό, η κάθε κατάσταση του πλέγματος αποδίδεται με δυαδικό (0 για ανενεργά και 1 για ενεργά κελιά) αλλά και δεκαδικό αριθμό. Αυτός ο δεκαδικός αριθμός τις εκάστοτε κατάστασης μετατρέπεται εκ νέου σε δυαδικό και τροφοδοτεί τον κανόνα για την κάθε επανάληψη. Αυτό σημαίνει πως δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να τροφοδοτεί τον επιλεγμένο κανόνα με διαφορετικές από τις τρέχουσες καταστάσεις, ουσιαστικά ξεκινώντας τον αλγόριθμο από μια διαφορετική αρχική κατάσταση. Στην εργασία χρησιμοποιούνται 2 πλέγματα αυτομάτων με δυνατότητα κατακόρυφου στοιβάγματος (stacking) των γενεών σε ένα πλέγμα πλάτους 24 και ύψους 64 κελιών (θα το ονομάσουμε CA1 ή πρώτο πλέγμα) και ένα δεύτερο πλέγμα πλάτους 32 και ύψους 64 κυψελών (θα το ονομάσουμε CA2 ή δεύτερο πλέγμα). Τα αυτόματα του CA1 πλέγματος λειτουργουν σε πλάτος 32 κυψελών, παρόλα αυτά επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένα "παράθυρο" 24 κυψελών για τη διαχείριση 12φθογγικών σειρών εύρους 2 οκτάβων που θα αναλύσουμε παρακάτω.

4.2.2 Τάξη και διαταραχή ως συνθετικό εργαλείο - Ο βαθμός πολυπλοκότητας του συστήματος

Γενικό ζήτημα προβληματισμού σε σχέση με τη σύνθεση με κυτταρικά αυτόματα αποτελεί ο η παραγωγή και ο εντοπισμός μοτίβων που ο συνθέτης θεωρεί ενδιαφέροντα και στη συνέχεια η αξιοποίησή τους. Στη συγκεκριμένη εργασία ζητούμενο ήταν να αποφεύγεται η έντονη επαναληψη των μοτίβων όπως και η κατάληξη σε ομοιογενείς καταστάσεις (αμετάβλητες διατάξεις κελιών / εξαφάνιση ενεργών κελιών κλπ)

Κάθε σύστημα περιορισμένου πλάτους πλέγματος εμφανίζει αναγκαία επαναλήψεις στα μοτίβα. Η συχνότητα των επαναλήψεων αυτών μειώνεται έντονα με την αύξηση του πλάτους του πλέγματος σε βαθμό που διαφέρει ανάλογα και με τον κανόνα που χρησιμοποιούμε (Wolfram, 2002 σ. 258-259). Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο να μειώνει το βαθμό πολυπλοκότητας των αυτομάτων κατά την ανάπτυξή τους στο χώρο και χρόνο. Η επέκταση του αρχικού αλγόριθμου σε πλάτος 32 κελιών θεωρήθηκε ικανοποιητική παρόλα αυτά γιατι κατέστησε δυνατή την ανάπτυξη και αξιοποίηση μοτίβων που μπορούν να εντοπιστούν και να αξιοποιηθούν λόγω ακριβώς αυτού του περιορισμένου χώρου ανάπτυξης. Οι κυκλικές οριακές συνθήκες που εφαρμόζει ο αρχικός αλγόριθμος έχουν αποδειχθεί πειραματικά πως προκαλούν μία αυξομείωση στην πολυπλοκότητα ανάλογη με αυτή που εμφανίζουν οι αρχικές καταστάσεις και γι αυτό το λόγο δεν κρίθηκε σκόπιμη η μετατροπή τους (LuValle, 2019 σ.122). Προκειμένου να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ προβλέψιμης και απρόβλεπτης συμπεριφοράς, το CA1 ξεκινά από μια καθορισμένη από το χρήστη αρχική κατάσταση και κανόνα και να ανατροφοδοτεί με την εκάστοτε κατάσταση του πλέγματός του το CA2 το οποίο "αντιδρά" βάσει του κανόνα του στις νέες αυτές καταστάσεις. Με αυτό τον τρόπο έχουμε μια περιοδική (για κάθε νέα γενιά του CA1) ανατροφοδότηση του CA2 ώστε να αποφεύγεται είτε η εξαφάνιση των κελιών είτε η παραμονή τους σε μια ομοιογενή και στάσιμη κατάσταση σε περίπτωση που ο κανόνας παράγει τέτοιου είδους συμπεριφορά.

Στο έκτο κεφάλαιο του *New Kind Of Science*, ο Wolfram εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο τα κυτταρικά αυτόματα αναλόγως του κανόνα που ακολουθούν, παρουσιάζουν μια σχετική ευαισθησία απέναντι στην μεταβολή της αρχικής τους κατάστασης (*sensitivity to initial conditions*). Το είδος της "αντίδρασης" των αυτομάτων στις

μεταβολές της αρχικής κατάστασης, κατηγοριοποιείται από τον Wolfram σε αντιστοιχία με τις τέσσερις κλάσεις βαθμού πολυπλοκότητας των κανόνων που παρατέθηκαν στο πρώτο μέρος της εργασίας. Τα είδη της συμπεριφοράς είναι:

1η κλάση: κατά τις μεταβολές της αρχικής κατάστασης η καινούργια πληροφορία δεν περνά στις επόμενες γενιές και αγνοείται.

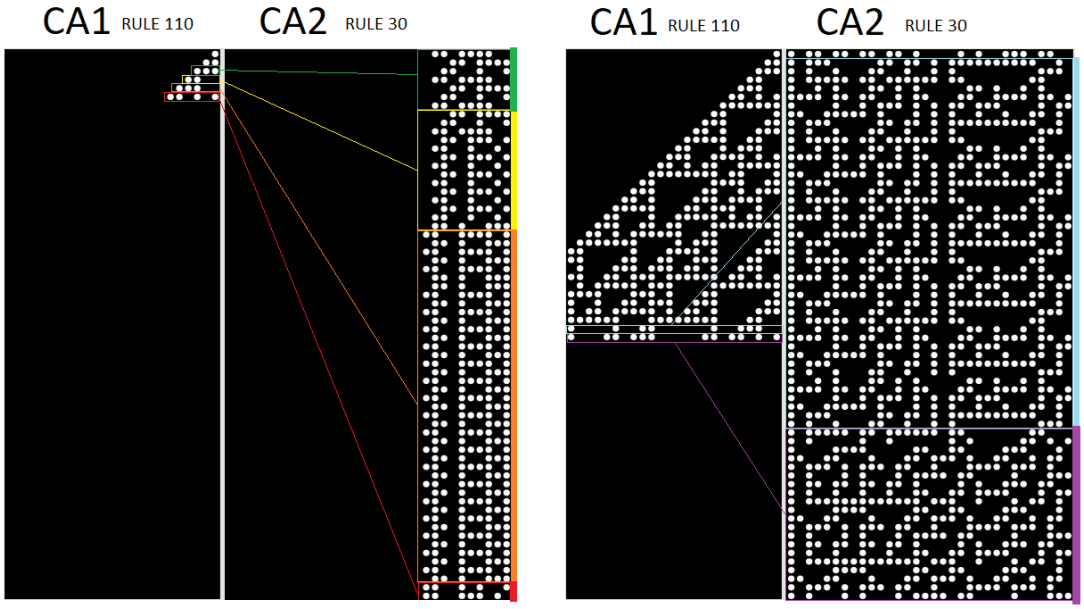
2η: κλάση: κατά τις μεταβολές της αρχικής κατάστασης, τα χαρακτηριστικά της αρχικής δομής διατηρούνται παρότι δεν επικοινωνούν με απομακρυσμένα σημεία του πλέγματος.

3η κλάση: κατά τις μεταβολές της αρχικής κατάστασης, οι διαφορές στη δομή διατηρούνται με συνεχή αλληλεπίδραση σε όλο το εύρος του πλέγματος.

4η κλάση: κατά τις μεταβολές της αρχικής κατάστασης, εμφανίζεται συμπεριφορά μεταξύ 2η και 3ης κλάσης που εξαρτάται από την αλληλεπίδραση ή όχι σταθερών δομών με κινούμενες στο πλέγμα δομές.

. Από τα πειράματα του Wolfram σε κανόνες κλάσσης 3, φαίνεται πως ορισμένοι κανόνες παρουσιάζουν μια εγγενή τυχαιότητα που επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από τη μεταβολή των αρχικών καταστάσεων. Γενικότερα οι κανόνες ακολουθούν απλή προβλέψιμη συμπεριφορά από απλές καταστάσεις όπως αριστερά της εικόνας (εικόνα 1) και βαθμιαία πολυπλοκότερη όσο οι αρχικές καταστάσεις γίνονται πιο σύνθετες όπως στα αριστερά της εικόνας. Η επιλογή του κανόνα του 2ου πλέγματος είναι ένα ενδιαφέρον αντικείμενο πειραματισμού για το συνθέτη και αφορά στην ένταση των μεταβολών που επιθυμεί να προκαλούνται για κάθε ανατροφοδότηση απο το 1ο πλέγμα (Wolfram 2002: 261-273). Γενικότερα φάνηκε σκόπιμο να χρησιμοποιούνται οι κανόνες με γνώμονα τη συμπεριφορά τους και τον τρόπο που εξυπηρετεί τη δομή του έργου. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η χρήση δύο πλεγμάτων με τον ίδιο αλγόριθμο που λειτουργούν παράλληλα με διαφορετικούς κανόνες. Το πρώτο πλέγμα (CA1) ακολουθεί και στα δύο κομμάτια τον κανόνα 110 λόγω του fractal χαρακτήρα που αναπτύσσουν τα μοτίβα του και του ενδιαφέρον αποτέλεσμα στις τονικές και φασματικές σειρές που προκύπτουν ανά το χρόνο. Για το δεύτερο πλέγμα (CA2) επιλέχθηκαν δύο κανόνες τέταρτης κλάσσης (30 και 90) μιάς και τα μοτίβα που δημιουργούσαν ήταν περισσότερο απρόβλεπτα και παρουσίασαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη χρήση τους στη δημιουργία εξελισσόμενων wavetables, ταχύτερων

ρυθμικών μοτίβων και ηχητικών χειρονομιών / υφών που θα παρουσιάσουμε παρακάτω. Για το δεύτερο πλέγμα επιλέχθηκε αυτό να ανατροφοδοτείται με αρχικές καταστάσεις του πρώτου έτσι ώστε να υπάρχει αλληλεπίδραση και συνάφεια κατά την ανάπτυξή τους (βλ. “Δεύτερο πλέγμα”).



Εικόνα 1. Τα αποτελέσματα της ανατροφοδότησης του 2ου πλέγματος (κανόνας 30) με αρχικές καταστάσεις του 1ου (κανόνας 110)

4.3 Ο Λευκός Θόρυβος ώς πρώτη ύλη και η αξιοποίησή του συνθετικά

4.3.1 FFT για τη διαμόρφωση βασικών φασμάτων ήχου (spectra).

Χρησιμοποιώντας το noise~ τοποθετούνται δύο πηγές λευκού θορύβου μοιρασμένες σε 24 κανάλια με διαφορετικό amplitude modulation και στερεοφωνική διάχυση στην αρχή του patch. Το σήμα των δύο αυτών πηγών περνά από αντίστοιχα FFT φίλτρα (pfft~) τα οποία έχουν σχεδιαστεί με τη στόχο την προσέγγιση ενός band-pass φίλτρου εύρους ½ της οκτάβας. Για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα επιλέχθηκε ως μέγεθος του FFT τα 4096 bins ωστε να έχουμε συχνοτικό εύρος κάθε FFT bin ισο με sample rate συστήματος / fft size = 44.100 / 2048 = 10.766602Hz, τιμή που είναι μικρότερη από αυτή της μιας πρώτης συχνοτικής μπάντας ½ οκτάβας στο πεδίο του ακουστικού φάσματος (περίπου 12Hz). Ο λόγος που επιλέχθηκε ο διαμοιρασμός αυτός είναι ότι οι 21 μπάντες του συχνοτικού φάσματος βρίσκονται αριθμητικά κοντά σε 24 μπάντες απο FFT bins τα οποία ελέγχονται από τα κυτταρικά αυτόματα. Επίσης

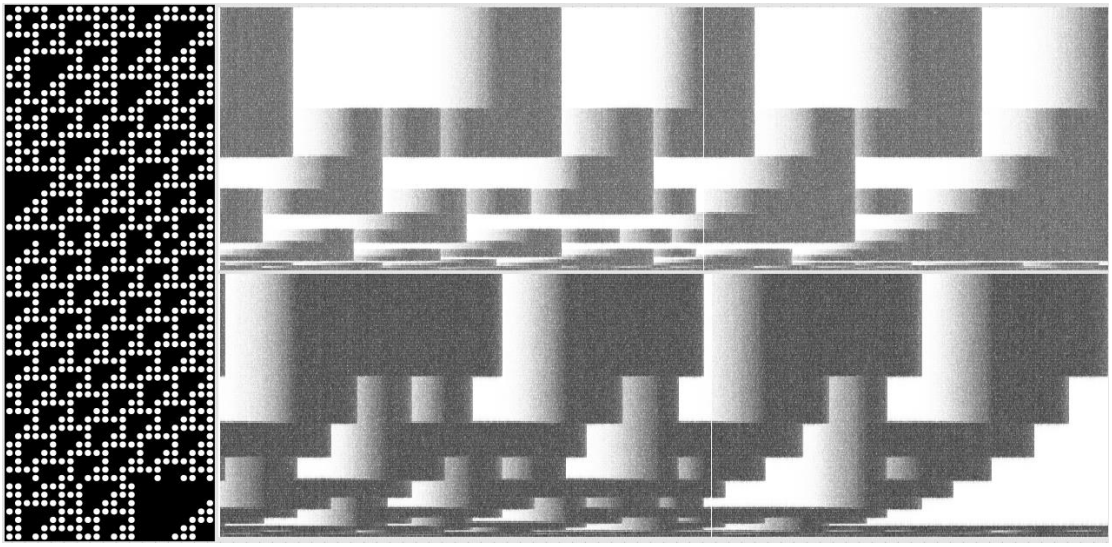
λόγω της γραμμικής φύσης των fft bin έναντι της λογαριθμικής των οκτάβων, οι συνδυασμοί των FFT γίνονται με την κοντινότερη δυνατή προσέγγιση, ενώ αναγκαία επιπλέον τέσσερις μπάντες έχουν καταλάβει την περιοχή (300-3000 Hz) που παρουσιάζει ψυχοακουστικά μεγαλύτερη ευαισθησία το ανθρώπινο αυτί, ώστε να είναι, κατά το δυνατότερο βαθμό, διακριτές οι όποιες μεταβολές προκύπτουν από γενιά σε γενιά.

Από το παραπάνω σύστημα γίνεται δυνατή η παραμετροποίηση του ηχοχρώματος του θορύβου σε αντιστοιχία με την εκάστοτε κατάσταση γενιάς των κυτταρικών αυτομάτων. Για παράδειγμα μια κατάσταση τύπου 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 1 θα έχει ως αποτέλεσμα το άνοιγμα (1) ή κλείσιμο (0) των αντίστοιχων μπαντών των FFT ανα το συχνοτικό φάσμα. Από τη φόρμουλα αθροίσματος δυνάμεων του 2, ($\sum_{□=0}^{□} 2□ = 2^{□-1} - 1$) προκύπτει ότι δύνανται να προκύψουν 16777215 μοναδικοί συνδυασμοί FFT φιλτραρίσματος που αποδίδει, θεωρητικά τουλάχιστον, ίσο αριθμό "μοναδικών" χρωματισμών στο λευκό θόρυβο (όσες και οι δυνατές διαφορετικές καταστάσεις των αυτομάτων σε πλέγμα πλάτους 32). Το FFT της πρώτης πηγής θορύβου καθορίζεται από τα κελιά με τιμή 0 ενώ του δεύτερου από αυτά με τιμή 1.

Η πρακτική αυτή προέκυψε σε αρχικούς πειραματισμούς με τετραφωνία όπου αποφεύγεται η αλληλοκάλυψη των συχνοτήτων σε ένα ζεύγος ηχείων αλλά και οι εναλλαγές των καταστάσεων των αυτομάτων να προκαλούν την αίσθηση κίνησης των διαφορετικών ηχητικών υφών μεταξύ του εμπρός και πίσω χώρου. Επίσης η αρχική παραμετροποίηση του θορύβου με amplitude modulation προκαλεί γίνεται σε πολυκάναλο επίπεδο. Το σημαντικότερο όμως είναι πως τα FFT δημιουργούν συγκεκριμένα spectra, δηλαδή σχήματα στο φασματικό χώρο στην πάροδο του χρόνου, αυτό που ο Smalley ονομάζει *spectral spaces*. Όπως θα δούμε και παρακάτω, τα FFT αυτά καθορίζουν και τους φασματικούς χώρους όπου δρουν τα περισσότερα ηχητικά αντικείμενα που δημιουργούνται στο έργο.

Ο Θόρυβος μοιράζεται σε 24 κανάλια τα στα οποία γίνεται AM, με απόκλιση για κάθε κανάλι στην ταχύτητα του modulation. Η μεταβολές αυτές στην απόκλιση προκαλούν την αίσθηση μιας μάζας ηχητικών κόκκων με συνεχείς, αν και μετριοπαθείς αυξομειώσεις της πυκνότητας. Ο βαθμός της απόκλισης καθορίζεται σε αναλογία με τον αριθμό ενεργών κελιών κάθε γενιάς. Γενικότερα υπήρχε η ανάγκη το

σύστημα να θα οργανώνει - παραμετροποιεί το θόρυβο έτσι ώστε να το ηχητικό αποτέλεσμα να μπορεί πλανάται μεταξύ ενός σαφούς τονικού ύψους και της μερικής απροσδιοριστίας τονικού κέντρου (οπου συχνά οι συνθέτες αλλά και οι ακροατές εντοπίζουν ενδιαφέρουσες ισορροπίες) εξερευνώντας τις δυνατότητες του χρωματισμού και δημιουργώντας συνθετότερες συνηχήσεις (Roads, 2015 σ. 14-15, 98-100).



Εικόνα 2. Τα spectrograms των χρωματισμένων και "κοκκοποιημένων" (μέσω AM) θορύβων

4.3.2 Η επιλογή της τεχνικής σύνθεσης Karplus - Strong: waveguide resonators και η αισθητική λειτουργία τους

Η τεχνική σύνθεσης Karplus - Strong είναι πλέον ευρέως διαδεδομένη καθώς αποτελεί μια απλή μέθοδο για την προσομοίωση του ήχου της νύξης μιας χορδής. Στην πλειονότητα των εφαρμοσμένων περιπτώσεων ο ήχος του λευκού θορύβου οδηγείται στο feedback loop του αλγορίθμου αυτούσιος δηλαδή ομοιογενή κατανομή επί το πλήρες εύρος του συχνοτικού φάσματος. Ο πειραματισμός με τον αφαιρετικό χρωματισμό του θορύβου όπως περιγράφηκε παραπάνω ήταν ένας βασικός παράγοντας για την επιλογή της τεχνικής Karplus - Strong, στη συγκεκριμένη περίπτωση με τη δοκιμές διέγερσης του feedback για περισσότερο από το συνηθισμένο εξαιρετικά σύντομο χρόνο, με το πλήρες φάσμα του λευκού θορύβου. Η σταδιακή αύξηση του χρόνου της διέγερσης επιτρέπει μεγαλύτερο χρόνο παρουσίας των επιλεγμένων από το FFT συχνοτήτων στο feedback loop μέχρι τη σταδιακή τους φθορά από το low-pass φίλτρο karplus-strong, άρα και επέκταση του sonification των

αυτομάτων από το στο ηχόχρωμα τού θορύβου σε αυτό των waveguide resonators (των μονάδων Karplus - Strong σύνθεσης). Η επιλογή του Amplitude Modulation στο θόρυβο δίνει μια ενδιαφέρουσα εξελικτικά χροιά στην περίπτωση της διέγερσης του waveguide resonator με συνεχές σήμα. Είναι μια πρακτική παρόμοια με αυτή που ο Barry Truax ακολουθεί κατά περιπτώσεις συνδυαστικά με granular πηγές ήχου ώστε όπως αναφέρει να "δώσει έμφαση" και να "παρατείνει" χρονικά τα φασματικά χαρακτηριστικά του ήχου (Truax, 1994 και 1996). Η δε πρακτική του συχνοτικού φιλτραρίσματος του σήματος του θορύβου που χρησιμοποιείται συχνά για να χρωματίσει την αρχική φασματική χροιά του, πρίν ακόμα περάσει στο φίλτρο του. Μαζί οι δύο πρακτικές μπορούν να συσχετιστούν με τις ιδέες του Russolo και τα Intonarumori, τα όργανα δηλαδή που χρησιμοποιούσε για να δημιουργεί αυτό που ονόμαζε *δονήσεις θορύβου* (Russolo & Brown, 1987 σ. 39 - 40) με συγκεκριμένα τονικά ύψη. Φυσικά η μηχανική πίσω από αυτά τα όργανα δεν έχει καμία σχέση με τις τεχνικές AM, FFT και Karplus - Strong. Παρόλα αυτά, αν κανείς ακούσει δείγματα από τον ήχο που παράγουν σύγχρονες ρέπλικες των Intonarumori, μπορεί να παρατηρήσει μια σχετική συνάφεια των δύο ως ηχητικών υφών (στην περίπτωση δηλαδη που ο θόρυβος εισάγεται στο waveguide με σταθερό πλάτος ως συνεχές σημα).

Από μια γενικότερη θεώρηση της αισθητικής του έργου ως αυτό το σημείο, οι παραπάνω τεχνικές με τον τρόπο που αξιοποιούνται, εκτελούν μια αρχική και αρκετά απλή ηχοποίηση της εξέλιξης των γενεών των κυτταρικών αυτομάτων. Εδώ, η μετάβαση από το ψηφιακό - τεχνητό πεδίο των δεδομένων, στο αναλογικό - ήχο με γίνεται με μια άμεση παραμετροποίηση του θορύβου. Η επιλογή του θορύβου ως πρώτης ύλης υπαγορεύεται εκτός από τους λόγους που αναφέραμε παραπάνω, και από την ερμηνεία του ως μιας ουδέτερης συνθήκης απουσίας πληροφορίας. Ο Luigi Nono παρουσιάζει τον αέναο θόρυβο αισθητικά ως ισοδύναμο της σιωπής (Broglia, 2020). Άλλωστε και από την οπτική της αισθητικής πληροφορίας, ο θόρυβος αποτελεί έναν πληροφοριακό όγκο που δε μπορεί να αναγνωσθεί στο πλήρες της μέγεθος και να αφομοιωθεί. Η σταδιακή διαμόρφωση λοιπόν ενός ηλεκτροακουστικού ηχοτοπίου από ορισμένους "οργανισμούς" όπως τα αυτόματα στο έργο αυτό έχει ένα στοιχείο αυτοαναφορικότητας καθώς η αφετηρία σε ένα ηχητικό περιβάλλον θορύβου ισοδυναμεί με έναν περιβάλλον χωρίς αντιληπτή μορφή ζωής και χωρίς αφομοιώσιμη μετάδοση πληροφορίας, όπως συμβαίνει στον ξένο

πλανήτη που αναφέραμε παραπάνω. Ο θόρυβος στο έργο αυτό είναι μια προυπάρχουσα ατμόσφαιρα , ένα ηχοτοπίο ανέμων και εδάφους - σαθρών ιζημάτων που μετασχηματίζονται σταδιακά με την αλληλεπίδραση με οργανικά στοιχεία της ύλης (waveguides). Τη δραστηριότητα των αυτομάτων ο ακροατής την αντιλαμβάνεται με τη σταδιακή εμφάνιση τονικών και αρμονικών στοιχείων με συγκεκριμένο για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου ηχόχρωμα. Η παρουσία των μετασχηματισμών αυτών είναι ιδιαίτερα αισθητή στο πρώτο κομμάτι της εργασίας. Εδώ μαζί με το μετασχηματισμό του θορύβου, γίνεται μια αργή ανάπτυξη των συγχορδιών που προκύπτουν.

4.4 Πρώτο πλέγμα

4.4.1 Οργάνωση του πρωταρχικού ηχητικού υλικού σε μικροεπίπεδο και μακροεπίπεδο

Μια βασική κοινή αφετηρία στο επίπεδο μικροδομής και μακροδομής είναι η ιδέα της τυχαιότητας, και την ιδέα των ίσων πιθανοτήτων. Έτσι από τη μια πλευρά έχουμε το λευκό θόρυβο και από την άλλη πλευρά έχουμε μια τυχαία αλληλουχία 24 φθόγγων. Από αρχική κατάσταση από την οποία όπως αναφέραμε παραπάνω ξεκινούν τα κυτταρικά αυτόματα να δομούν επιλεκτικά και για την ακρίβεια αφαιρετικά, ως οργανισμοί που δίνουν μορφή στο υλικό το οποίο τους δίνεται. Διαλέγοντας λοιπόν παράλληλα συχνότητες και φθόγγους, δημιουργούν αντίστοιχα τα ηχητικά αντικείμενα τις μέσο/μακρο-δομές στις οποίες αυτά οργανώνονται. Όπως φαίνεται στην εικόνα νο.3, μια μεσοδομη μπορεί να δημιουργηθεί απο μια εκάστοτε γενιά (σειρά) αυτομάτων ενώ η εξέλιξή πολλών γενιών στο πέρασμα του χρόνου δημιουργεί μια μακρο-δομή η οποία εκφράζει ηχητικά το χαρακτήρα του κανόνα αυτομάτων που χρησιμοποιούμε. Ανάλογα με τη γεωμετρική ανάπτυξη των αυτομάτων δηλαδή, έχουμε και τις αντίστοιχες εμφανίσεις ή αποκρύψεις των φθόγγων και την αντίστοιχη χρονική τους μετάθεση. Η παραλληλία με τους χρωματισμούς του θορύβου θα μπορούσε να πεί κανείς ότι έχει ένα χαρακτήρα μονοσήμαντο. Κάθε μουσική φράση δηλαδη αντιστοιχεί σε ένα συνδυασμό FFT και τα δύο αυτά είναι αλληλένδετα για πάντα. Για τον ίδιο λόγο όμως, ισχύει και κάτι που ίσως αντισταθμίζει τον περιορισμό αυτόν: κάθε ηχητικό αντικείμενο (νότα) έχει τη δική της χροιά για κάθε διαφορετική μουσική φράση. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι

κάθε μεσοδομή που προκύπτει από τα πρώτα κυψελικά αυτόματα, έχει μία ταυτότητα στη χροιά και στην τονικότητά της.

Στο σημείο αυτό μπορούμε να μιλήσουμε για την σειρών 24 φθόγγων, στην ουσία 12φθογγικών σειρών δύο οκτάβων. Όσον αφορά στα στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα, είναι κοινή πρακτική στο μήκος του πλέγματος να ανατίθενται φθόγγοι κατα αύξοντα αριθμό συχνότητας. Με την πρακτική όμως της οριζόντιας ανάγνωσης κάθε νέου πλέγματος ώς μιας μουσικής φράσης, απορρίφθηκε η ιδέα της παράταξης των φθόγγων στο πλέγμα ώς μιας ανιούσας / κατιούσας κλίμακας λόγω της αναπόφευκτης επαναληπτικότητας που θα προέκυπτε. Επιλέχθηκε λοιπον η επιλογή μιας τυχαίας σειράς νοτών μέσα από ένα δωσμένο σύνολο. Η επιλογή του συγκερασμού σε ημιτόνια έγινε λόγω της οικειότητας του ακούσματος που καθιστά ευκολότερη την απομνημόνευση των 12φθογγικών σειρών. Αυτό έχει σαν πλεονέκτημα, κατά τις δοκιμές διαφορετικών κανόνων και αρχικών καταστάσεων, να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο εντοπίσημες μουσικά οι διαφορές των σειρών από γενιά σε γενιά.

Τα waveguide resonators εκτός από το ηχόχρωμα που διαμορφώνουν όπως περιγράφηκε, είναι και οι βασικές πηγές ήχου που εκτελούν αλληλουχίες νοτών και συγχορδίες που δημιουργούνται απο τα κυτταρικά αυτόματα με τον εξής τρόπο: Έστω ότι έχουμε μια γενιά που δίνει την κατάσταση 100110100110111010101001. Σε κάθε κελί από αυτά ανατίθεται και μια αλεατορική σειρά εικοσιτεσσάρων αντίστοιχα φθόγγων (σε midi notes), για παράδειγμα:

1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
69	65	72	77	61	71	79	66	73	78	60	70	83	67	74	81	62	75	80	68	76	64	82	63

Βλέπουμε πως δημιουργούνται με αυτό τον τρόπο δύο συμπληρωματικές σειρές νοτών με από το σύνολο των εικοσιτεσσάρων midi νοτών μία για τα ενεργά και μία για τα ανενεργά κελια: μια σειρά των ανενεργών με τη midi σειρά 65, 72, 71, 66, 73, 70, 81, 75, 68, 64, 82 και μια των ενεργών με τη midi σειρά 69, 77, 61, 79, 78, 60, 83, 67, 74, 62, 80, 76, 63. Μια εκάστοτε κατάσταση καθορίζει επίσης και το χρονικό σημείο στο οποίο θα εκτελείται κάθε νότα, λειτουργώντας η κάθε γενιά σαν step-sequence είκοσιτεσσάρων βημάτων. Η χρονική διάρκεια κάθε βήματος επομένως

είναι ίση με 1/24 του χρόνου μετάβασης. Η γενική συνθήκη που ορίζει το χρόνο μετάβασης των κυτταρικών αυτομάτων, δηλαδή το χρονικό διάστημα από μία γενιά στην επόμενη, λειτουργεί ως εξής: ο χρόνος μετάβασης μεταξύ γενεών χρόνων t-1 και t είναι αντιστρόφως ανάλογο με τον αριθμό των κελιών κάθε γενιάς σε χρόνο t-1. Με αυτό τον τρόπο αισθητικά αποφεύγεται η μονοτονία και προβλεψιμότητα των χρονικών μοτίβων, ενώ παράλληλα γίνεται και mapping σε μια νέα παράμετρος των αυτομάτων (άθροισμα ενεργών κελιών). Ο λόγος που επιλέχθηκε η αντίστροφη αυτή αναλογία είναι πως όσες λιγότερες προκύπτουν οι νότες της βασικής σειράς (ενεργά κελιά) τόσο πιο επεξεργάσιμη και αναγνώσιμη πληροφοριακά είναι η μουσική πληροφορία που παράγουν, και αντίστοιχα ευκολότερη η αισθητική σύνδεση της εξελισσόμενης εικόνας των αυτομάτων στο πλέγμα, με τα παραγόμενα μουσικά μοτίβα. Στις δε περιπτώσεις πληθώρας ενεργών κελιών οι 24-φθογγικές σειρές αποκτούν πυκνότερο πληροφοριακό φορτίο αλλά και μεγαλύτερη ενέργεια από τη συγκέντρωση ανοιχτών FFT bins.

Οι δύο παραπάνω σειρές νοτών μπορούν να εκτελεστούν είτε μονοφωνικά, είτε παράλληλα από πολυφωνικούς waveguide resonators με διαφορετικούς τρόπους: 1. Ως στατική συγχορδία αποτελούμενη από το σύνολο νοτών της κάθε σειράς 2. Ως σειρά τρίφωνων συγχορδιών αποτελούμενες από διαδοχικές τριάδες του συνόλου των νοτών, οι οποίες εκτελούνται κυλιόμενα (τρίφωνες αναστροφές) 3. Ως αρπισμοί τριήχων επί του χρόνου κάθε βήματος της 1ης τριφωνης συγχορδίας που προκύπτει από τις 3 πρώτες νότες της σειράς 4. Ως αρπισμοί των τρίφωνων συγχορδιών που προκύπτουν στην περίπτωση νούμερο 2. Σημαντικά επηρεάζει την εκτελεστική έκφραση σε αυτό το μέρος η χρήση της περιβάλλουσας η οποία γίνεται από το χρήστη. Η πολυφωνική εκτέλεση των νοτών μπορεί να αξιοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε η διέγερση των waveguide resonators να μην είναι στιγμιαία (μεγαλύτερος χρόνος decay - μεγαλύτερο sustain) ώστε να τονίζονται τα φασματικά χαρακτηριστικά που δίνουν οι δέσμες του επεξεργασμένου από το FFT θορύβου. Όπως θα΄ταν αναμενόμενο, όσο οι τιμές αυτές τις περιβάλλουσας, μαζί με το release αυξάνονται, τόσο περισσότερο αποκτούν χαρακτηριστικά drone και λιγότερο sequenced συγχορδιών. Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο είναι πως τα FFT bins του θορύβου που δέχονται τα μονοφωνικά waveguides είναι πάντα συμπληρωματικά των FFT bins του θορύβου που δέχονται τα πολυφωνικά waveguides ώστε σε περίπτωση που θέλουμε να ακούγονται και τα δύο ταυτόχρονα (πχ. τα πολυφωνικά waveguide

ως συνοδεία των μονοφωνικών), να μην έχουν και τα δύο τα ίδια φασματικά χαρακτηριστικά αλλά η χροιά του ενός να συμπληρώνει αυτή του άλλου στο φασματικό χώρο.

Σχετικά λοιπόν με την παραλληλία μικροεπιπέδου και μακροεπιπέδου σύνθεσης, είναι οι ίδιες οι τιμές των γενεών των αυτομάτων που δίνουν μια "ταυτότητα" για το συνδυασμό του ηχοχρώματος με την ακολουθία νοτών που θα εκτελεστούν κατά το χρόνο μετάβασης. Για να χρησιμοποιήσουμε ξανά την ορολογία του Smalley, συνδέουν τον *τονικό* (*tonal space*) με το *φασματικό* (*spectral space*) χώρο.

4.5 Δεύτερο πλέγμα

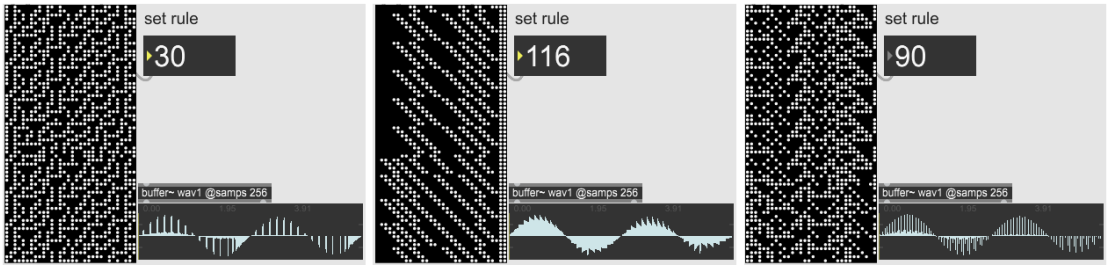
4.5.1 Waveshaping με παραμόρφωση ημιτονοειδούς κυματομορφής

Σε συνέχεια των waveguide resonators, χρησιμοποιείται το δεύτερο πλέγμα (CA2) αυτομάτων. Το πλέγμα αυτό ανανεώνεται ταχύτερα από το CA1, λειτουργεί δηλαδή με μικρότερο χρόνο μετάβασης. Ο χρόνος μετάβασης αυτός είναι ένα πολλαπλάσιο του αριθμού των ενεργών κελιών (1) κάθε γενιάς του CA1. Ο λόγος που ο χρόνος μετάβασης του δεύτερου πλέγματος επιλέχθηκε να είναι μικρότερος γίνεται κατανοητός από τις παρακάτω λειτουργίες που επιτελεί:

Η εξέλιξη του δεύτερου πλέγματος (CA2) λειτουργεί σε πολλαπλά επίπεδα: Αρχικά αξιοποιούνται οι δεκαδικοί αριθμοί των διαδοχικών καταστάσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελούν παράγοντα της δημιουργίας μιας εναλλασσόμενης κυματομορφής. Κάθε τέτοιος αριθμός προσαρμόζεται με scaling σε τιμές μεταξύ του 0 και 1 οι οποίες στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται με αυτές μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης. Οι πολλαπλασιασμοί αυτοί γίνονται για κάθε νέα γενιά του CA2 δημιουργώντας samples που αποθηκεύονται σε πραγματικό χρόνο σε ενα buffer ως εξελισσόμενο wavetable. Το wavetable αυτό χρησιμοποιείται σε ένα δεύτερο τύπο πηγής ήχου που αναπαράγει το wavetable σε συνδυασμό με μια μίξη του wavetable και του fft θορύβου μεσα απο waveguides. Χρησιμοποιούνται τρία όργανα στα οποία ανατίθενται νότες της 24φθογγικής σειράς των ενεργών αυτομάτων του 1ου πλέγματος οι οποίες μοιράζονται σε τρεις λίστες αντίστοιχα. Το τρίτο όργανο λειτουργεί με μια μίξη FM synthesis που πραγματοποιείται με χρήση των wavetable που προκύπτουν από το waveshaping ως carrier και modulator με waveguide resonators που λαμβάνουν ως σήμα διέγερσης την έξοδο του FM. Η η διαφοροποίηση

αυτή στο τρίτο όργανο έγινε αφού προέκυψε η ανάγκη ενός επιπλέον οργάνου, με δυναμικότερη εξέλιξη της χροιάς του. Η χρήση FM synthesis εδώ γίνεται με σκοπό τη δυναμικότητα αυτή, αφού καθιστά εντονότερη την αίσθηση της μορφοποίησης του wavetable.

Η παραμόρφωση της ημιτονοειδούς κυματομορφής χρησιμοποιώντας τους δεκαδικούς αριθμούς των καταστάσεων είναι μια πρακτική που θα μπορούσε να ενταχτεί στις τεχνικές waveshaping (Roads 1996, 252 - 261) και εδώ λειτουργεί με σκοπό τη συνεχή μεταβολή της βασικής χροιάς της του wavetable κατά την εξέλιξη του δεύτερου πλέγματος. Αυτό σημαίνει πως όσο μεγαλύτερη είναι διαφορά των δεκαδικων αριθμων που εκφράζουν διαδοχικές καταστάσεις κατα την εξέλιξή τους, τόσο μεγαλύτερος και ο βαθμός παραμόρφωσης της ημιτονοειδούς κυματομορφής Για το λόγο αυτό, πολύ σημαντική είναι η εύρεση της κατάλληλης της τιμής του εκθέτη στο εκθετικό scaling όλων των δυνατών δεκαδικών αριθμών των καταστάσεων των αυτομάτων, σε τιμές μεταξύ 0 και 1. Αυτό συμβαίνει επειδή η κατάσταση στο πλέγμα μιας γενιάς αντιστοιχεί όπως είπαμε σε ένα δυαδικό αριθμό τύπου και στη συνέχεια μετατρέπεται σε δεκαδικό. Για παράδειγμα μία αλλαγή του πρώτου από αριστερά κελιού από κατάσταση 0 σε 1, μεταφρασμένη σε δεκαδικό είναι εκθετικά μικρότερη από την ίδια αλλαγή στην άλλη άκρη του πλέγματος. Από τη σωστή αυτή ρύθμιση εξαρτάται η δυναμικότητα της παραμόρφωσης της ημιτονοειδούς κυματομορφής. Αυτό που φάνηκε ώς αδυναμία της συγκεκριμένης πρακτικής είναι ότι οι αισθητές διαφοροποιήσεις στο ηχόχρωμα των κυματομορφών που προκύπτουν από κανόνα σε κανόνα δεν είναι τόσο δυναμική ώστε να γίνεται πάντα αντιληπτή ούτε διακρίνεται πάντα από την παρατήρηση των γενεών των αυτομάτων του δεύτερου πλέγματος.



Εικόνα 3. Wavetables μεγέθους 256 samples που προκυπτουν απο 256 γενεές διάφορων κανόνων

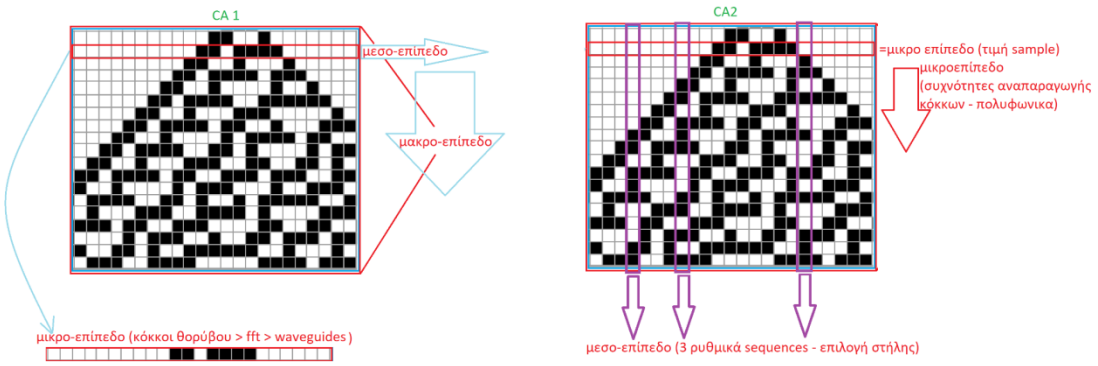
4.5.2 Ρυθμικά Μοτίβα

Τα όργανα αυτά αναπαράγουν τις νότες που τους ανατίθενται σε χρόνους που καθορίζονται από την κατακόρυφη εξέλιξη του πλέγματος CA2. Εδώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την ανάγνωση (scanning) σε τρεις από τις 32 στήλες του δεύτερου πλέγματος καθώς αντιστοιχεί μια για κάθε όργανο από τα τρία που αναφέρθηκαν παραπάνω. Καθένα από τα τρία αυτά όργανα εκτελούν τις νότες κάθε φορά που εντοπίζονται ενεργά κελιά στην επιλεγμένη στήλη κατά την ανάγνωση. Όταν ή ανάγνωση φτάσει την τελευταία γραμμή του πλέγματος, τότε ξεκινά εκ νέου από την πρώτη κοκ. Η ταχύτητα της ανάγνωσης του CA2 είναι κοινή και για τις τρείς στήλες και ίση με την ταχύτητα ανανέωσης του πλέγματος. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται νέα δυναμικότερα ρυθμικά μοτίβα τα οποία μπορεί ο συνθέτης να εντοπίζει και να ακούει παρατηρώντας την εξέλιξη του πλέγματος και τη γενικότερη συμπεριφορά κάθε κανόνα. Ρυθμικά αυτό σημαίνει πως αυτά τα όργανα λειτουργούν όπως θα διαβάζονταν οι νότες σε ένα μουσικό κουτί. Με μια τέτοια ανάγνωση του CA2 λοιπόν μπορούμε να δημιουργήσουμε διάφορα πολυρυθμικού χαρακτήρα μοτίβα μεταξύ των χρόνων εκτέλεσης των νοτών που εκτελούν τα όργανα (εικόνα 4 δεξί σχήμα).

4.5.3 Αισθητική λειτουργία - συνάφεια μικροδομών με μακροδομές

Αυτή η αύξηση της δυναμικότητας σε επίπεδο παραμετροποίησης ηχου αλλά και σε επίπεδο δημιουργίας μουσικών χειρονομιών μεταξύ του 2nd και 3rd order surrogacy που δημιουργούνται από το CA2 είναι διακριτή στο δεύτερο κομμάτι της εργασίας. Εδώ δίνεται περισσότερη σημασία στην έντονη κινητικότητα, στην αντίστιξη μελωδιών και ρυθμών αλλά ιδιαίτερα στη συνεχή δημιουργία ηχητικών μορφών. Στο 2ο μέρος του 1ου κομματιού ξεκινά μία μελωδική γραμμή που αποτελείται από όλα τα ανενεργά κελιά εκτός από ένα ενεργό στην άκρη του πλέγματος. Έτσι λοιπόν ακούμε τα ανενεργά κελιά να εκτελούν τη μελωδική γραμμή, σταδιακά όμως η συνέχεια των νοτών αυτών διασπώνται και αρχίζουμε να ακούμε χρονικές μεταθέσεις και μεταθέσεις σειράς σε μοτίβα που ορίζει ο κανόνας 110 στο CA1. Απο την αλληλουχία αυτών των μεταθέσεων και με την αισθητική σύνδεσή κάθε κατάστασης δηλαδή σειράς νοτών με ένα ηχόχρωμα (λόγω FFT κλπ που εξηγούνται παραπάνω) οι καταστάσεις δημιουργούν μια μακροδομή (αλληλουχία ρυθμικών μοτίβων -

κλιμάκων - συγχορδιών - χροιών) που ακολουθεί τα μοτίβα των τριγωνικων μορφών που δημιουργεί ο κανόνας.



Εικόνα 4. Μικρο / μεσο / μακρο-επίπεδο στα δύο κυτταρικά αυτόματα του συστήματος

Μια ακόμη λειτουργία τού δεύτερου πλέγματος είναι αυτή της κατακόρυφης ανάγνωσης όλων των ενεργών κελιών κάθε γενιάς ταυτόχρονα, η οποία χρησιμοποιείται για την αναπαραγωγή των κυματομορφών μιας μονάδας που που εκτελεί sampling σε granular επίπεδο με αναπαραγωγή των κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο. Για τη λειτουργία αυτή θα μιλήσουμε αμέσως παρακάτω.

4.6 Granular sampling και MC *όργανα* - Χρήση του Game of Life

Σε ένα τέτοιο μουσικό σύστημα που θεωρείται ώς ένα τεχνητό οικοσύστημα εύκολα κανείς μπορεί να σκεφτεί την παράμετρο της αποσύνθεσης ηχητικών αντικειμένων και την επανασύνθεση μερών τους με βάση τους κανόνες ενός διαφορετικού συστήματος από αυτό των δύο πλεγμάτων που προαναφέραμε (CA1, CA2), για τη δημιουργία ακόμη πιό πολύπλοκών μορφών. Η γενικότερη ιδέα της αποσύνθεσης μιας μονάδας (όπως το ηχητικό αντικείμενο) παραπέμπει σε βιολογικές διαδικασίες σε επίπεδο μορίων της ύλης. Όσον αφορά τον ήχο, η διαδικασία της αποσύνθεσής του παραπέμπει άμεσα στη δημιουργία των *ακουστικών κβάντα* (*wavelets*) του Gabor και την κοκκοποίηση (granulation) του ήχου (Nunn & Pervis, 1996 σ. 52-54). Μετά από πειραματισμό πάνω σε μία μέθοδο waveshaping (https://youtu.be/GqCArreZEwI) για το Max/MSP με χρήση του jit.peek, διαμόρφωσαμε μια παραλλαγή της η οποία κάνει sampling και αναπαραγωγή ενός εισερχόμενου σήματος σε πραγματικο χρόνο. Με τη μέθοδο αυτή δημιουργείται ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο wavetable που μπορούμε να το θεωρήσουμε και ως grain, ανάλογα με τον εκάστοτε χρόνο της

περιβάλλουσας του. Αυτό το wavetable (που θα ονομάσουμε «wavetable / grain» για αποφυγή σύγχυσης με αυτό που προκύπτει από το waveshaping του ημιτόνου) προκύπτει με δειγματοληψία του εισερχόμενου σήματος με ένα μεταβαλλόμενο ρυθμό που καθορίζεται από τον αριθμό των ενεργών κελιών του CA1. Σε δοκιμές με δειγματοληψία σχετικά απλών δηλαδή σχετικά αρμονικών κυματομορφών (νότες πιάνου) παρατηρείται πώς όταν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι ίδια με αυτή του θεμέλιου αρμονικού της νότας του πιάνου προκύπτει "πιστότερη" αναπαραγωγή από του εισερχόμενου σήματος. Σε περιπτώσεις που βέβαια που το εισερχόμενο σήμα έχει πολλά transients (πχ drum loops) τότε ένας σχετικά υψηλότερος ρυθμός δειγματοληψίας αποτύπωνε "πιστότερα" τις χαρακτηριστικές χροιές του αρχικού σήματος. Αυτές οι παράμετροι παραπέμπουν ίσως περισσότερο στην τεχνική ανάλυσης και ανασύνθεσης με wavelets (Roads, 2011 σ. 581-588). Βέβαια η διαδικασία της ανάλυσης των wavelets είναι κατά πολύ συνθετότερη και χρησιμοποιείται για διαφορετικούς σκοπούς. Η μέθοδος αυτή αναπαραγωγής σε πραγματικό χρόνο του συνεχώς μεταβαλλόμενου wavetable, χρησιμοποιήθηκε στην εργασία ως ένα εργαλείο για κοκκοποίηση του εισερχόμενου σήματος σε πραγματικό χρόνο. Η μεταβολή της συχνότητας δειγματοληψίας από το CA1 αποτελεί μια "zoom-in / zoom - out" διαδικασία στο πεδίο του χρόνου και δημιουργεί δυναμικά ακουστικά φαινόμενα κατά την αναπαραγωγή. Όσον αφορά στη διαδικασία αναπαραγωγής αυτών των wavetable/grains, χρησιμοποιούνται το δεύτερο πλέγμα των κυτταρικών αυτομάτων (CA2) και το Game of Life μέσω του object jit.conway.

4.6.1. Αναπαραγωγή από το CA2 και Game of Life

Το CA2 χρησιμοποιείται με κάθετη ανάγνωση του πλέγματος, ακριβώς στον ίδιο χρόνο που διαβάζονται οι τρείς στήλες για τα ρυθμικά μοτίβα που αναφέραμε παραπάνω. Στην περίπτωση αυτή των wavetable / grains που προκύπτουν από το sampling του εισερχόμενου σήματος, αυτά αναπαράγονται από ένα αντικείμενο mc.wave 32 καναλιών που αναπαράγει τα ενεργά κελιά του πλέγματος πολυφωνικά με βάση συγκερασμένες κλίμακες, η απόκλιση των οποίων είναι λογαριθμική και ανάλογη με το άθροισμα των κελιών κάθε γενιάς. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε όσο περισσότερα είναι τα ενεργά κελιά (άρα οι νότες πολυφωνίας) κάθε γενιάς, τόσο μεγαλύτερη απόκλιση να έχουν οι φθόγγοι (ως συχνότητες αναπαραγωγής) της κλίμακας που προκύπτει. Το sampling από το οποίο προκύπτουν αυτά τα wavetable /

grains γίνεται από πηγές που επιλέγονται από το χρήστη. Τις πηγές αυτές αποτελούν όλα τα όργανα που προαναφέραμε, η ένταση του εισερχόμενου σήματος των οποίων ελέγχεται από το χρήστη με τη λογική μιας auxiliary εξόδου μιας κονσόλας. Το αισθητικό αποτέλεσμα της αναπαραγωγής αυτού του wavetable / grain είναι ένα είδος granular αντήχησης των ηχητικών αντικειμένων που χρησιμοποιούνται ως πηγές. Ιδίως όταν τα ηχητικά αντικείμενα αυτά έχουν δυναμικές αυξομειώσεις στην περιβάλλουσα, τότε προκαλούνται ενδιαφέρουσες χειρονομίες στο επίπεδο του 3rd order surrogacy (πρόκληση εκρήξεων, whoosh κλπ).

Το Game of Life (GoL) χρησιμοποιείται για την granular αναπαραγωγή του ίδιου wavetable. Ο ήχος του κάθε ενεργού κελιού αναπαράγεται επίσης από δύο mc.wave objects σαράντα καναλιών, ένα δηλαδή για κάθε τα pixel - κελί στον οριζόντιο κατακόρυφο άξονα αντίστοιχα. Τα mc.wave objects αυτά στη συνέχεια ελέγχονται από mcs.matrix objects τα οποία είναι υπεύθυνα για την αναπαραγωγή ως και σαράντα αντιγράφων για κάθε κανάλι του mc.wave στον οριζόντιο και κατακόρυφα άξονα (40 pixel) έτσι ώστε να μπορούμε να ακούσουμε και το πλήθος των ενεργών κελιών μέσα στο πλέγμα (40 κανάλια x 40 αντίγραφα). Η βασική ιδέα του mapping του GoL είναι αρκετά απλή: οι συχνότητες αναπαραγωγής (συγκερασμένες κλίμακες με λογαριθμική απόκλιση όμοια με την περίπτωση του CA2) αντιστοιχούν στη θέση των κελιών στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα. Η στερεοφωνική τοποθέτηση για λόγους οπτικής συνάφειας ανατέθηκε στη θέση των κελιών στον οριζόντιο άξονα.

4.6.2 Spectrograms για ανατροφοδότηση του Game of Life

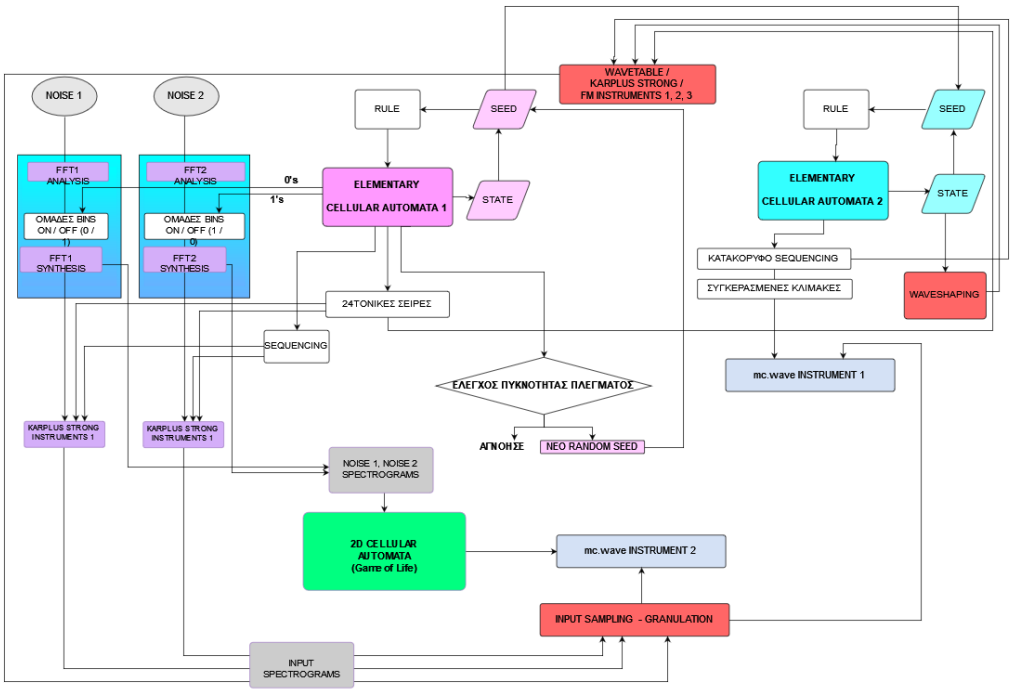
Το ζητούμενο στο σημείο αυτό είναι ένας τρόπος τροφοδότησης με αρχικές καταστάσεις του πλέγματος του GoL που να συνδέεται με κάποιο τρόπο με τα CA1 και CA2, ώστε να υπάρχει μια αλληλεπίδραση των 3 βασικών στοιχείων αυτού του "οικοσυστήματος". Εδώ λοιπόν χρησιμοποιούμε το FFT του θορύβου που αναφέραμε στην αρχή, για να δημιουργήσουμε ένα κυλιόμενο spectrogram του θορύβου που χρωματίζεται από τα ενεργά κελιά του CA1. Από αυτό το spectrogram δίνουμε τις αρχικές καταστάσεις των αυτομάτων του GoL. Οι τροφοδότηση αυτή με αρχικές καταστάσεις γίνεται κάθε φορά που έχουμε καινούργια γενιά αυτομάτων στο CA1, όποτε δηλαδή και το spectrogram των αλλάζει, αποτυπώνοντας τα γεωμετρικά μοτίβα των αυτομάτων αυτών. Αυτοί λοιπόν ο "άνεμοι" των θορύβων που περιγράψαμε παραπάνω θέτουν ως *spectral spaces*, ως γεωμετρικά σχήματα επί του φάσματος, το

χώρο απ' όπου ξεκινούν να αναπτύσσονται αυτοί οι νέοι οργανισμοί (ως συστατικά των ηχητικών αντικειμένων που δίνονται για sampling). Επίσης το output των δύο mc object, περνά και αυτό από τα αντίθετα FFT του CA1 έτσι ώστε να μη βρίσκονται ποτέ στον ίδιο φασματικό χώρο και να αλληλοσυμπληρώνονται. Στο 2ο κομμάτι της εργασίας θεωρήθηκε ενδιαφέρουσα η οπτικοποίηση αυτού του spectrogram και του Game of Life με την υπερέκθεση ως ενός ταχύτερα κυλιόμενου spectrogram (ως zoom στην κλίμακα του χρόνου), των πηγών ήχου που στέλνουμε για sampling. Αυτή η συνθήκη ευνοεί αυτό που ο Smalley ονομάζει *source bonding* αιτίας και αποτελέσματος. Έτσι κάθε φορά που στέλνουμε ηχητικό σήμα για sampling, μπορούμε να παρακολουθήσουμε σε πραγματικό χρόνο το spectrogram και να ακούσουμε αναπαραγωγή των αυτών κοκκοποιημένων ήχων από τα CA2 και το Game of Life. Μία τελευταία πρακτική ανατροφοδότησης είναι να μειώνονται τα pixels του spectrogram όσο αυξάνονται τα ενεργά κελιά του GoL ώστε να αποφεύγεται ο "υπερπληθυσμός" και η απότομη εξαφάνιση - αποσιώπηση των ηχητικών μας αντικειμένων.

Η αισθητική διαφορά στο αποτέλεσμα μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων αναπαραγωγής του wavetable γίνεται εύκολα διακριτή από τις τροχιές των ηχητικών αντικειμένων που δημιουργούνται στην κάθε περίπτωση. Στην περίπτωση του Game of Life, οι τροχιές αυτές είναι πολύ πιο πολύπλοκες - απρόβλεπτες από αυτές του CA2, όπως είναι αναμενόμενο (το Game of Life θεωρείται σύστημα αυτόματων κλάσης 4 βάσει Wolfram). Οι χειρονομίες που προκύπτουν από το GoL είναι τοποθετούνται μεταξύ 3rd order και remote surrogacy. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ηχητικά αντικείμενα προς αποδόμηση επιλέγονται από το χρήστη, παρόλα αυτά η επανασύνθεσή τους γίνεται αποκλειστικά από το Game of Life και την εικόνα του spectrogram των θορύβων ως αρχική κατάσταση.

Οι υφές των granular ήχων που παράγονται από τις αρχικές καταστάσεις του GoL πριν ενεργοποιήσουμε τις μεταβάσεις προσομοιάζουν ήχους κίνησης υγρών σωμάτων. Αυτή την αίσθηση, για τη συγκεκριμένη κατάσταση αναμονής των αυτομάτων στην αρχική τους κατάσταση (που βρίσκονται κατά την είσοδο και έξοδό τους στο 2ο κομμάτι, θα μπορούσαμε εννοιολογικά να τη συνδέσουμε και με έναν όρο που χρησιμοποιείται και από την κοινότητα του Game of Life, το *primordial soup*. Δηλαδή μια πρωταρχική εκδοχή της εμφάνισης ζωής στη γη, κατά την οποία

ανόργανη ύλη μετατράπηκε σε νερό μέσα στο οποίο αναπτύχθηκε σύνθετη ενόργανη ύλη. Παρόμοια λοιπόν με το δυϊσμό ανόργανης - οργανικής ύλης που αποδίδεται με το δυϊσμό θορύβου - waveguide, έχουμε εδώ μια αντίστοιχη απόδοση με το δυισμό spectrogram θορύβου (ανόργανο) και granular αναπαραγωγής του wavetable (οργανικό).



Εικόνα 5. Το block diagram του συστήματος, όπως εφαρμόστηκε στο Max/MSP

5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή προσπαθήσαμε όσο το δυνατόν πιο σφαιρικά να προσεγγίσουμε τα κυτταρικά αυτόματα στη μουσική δημιουργία μέσα από τη θεωρία υπολογιστών τη φιλοσοφία και τις φυσικές επιστήμες, όσο και από την επισκόπηση των συνθετικών πρακτικών και απόψεων και το σχολιασμό τους. Η πρακτική διερεύνηση των δυνατοτήτων των βασικών μορφών των κυτταρικών αυτομάτων (στοιχειώδη κυτταρικά αυτόματα και Game of Life) και ο μουσικός πειραματισμός αποτέλεσε το μέσο για να αξιολογήσουμε και εμπειρικά το μοντέλο αυτό ως βάση για ένα αλληλεπιδραστικό σύστημα στον τομέα της generative music. Μπορούμε να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα σε συνάρτηση με τις δυνατότητες των μέσων που χρησιμοποιήσαμε.

Ιδιαίτερα σημαντική φαίνεται η χρήση της ανατροφοδότησης μεταξύ των διαύλων χρήστη - συστήματος και συστήματος - συστήματος. Μέσω αυτών τον διαύλων καταφέραμε να επιτύχουμε ορισμένα ενδιαφέροντα μουσικά αποτελέσματα μέσω των οποίων μπορέσαμε σταδιακά να οδηγηθούμε στη διαμόρφωση ενός εννοιολογικού πλαισίου το οποίο κρίνεται απαραίτητο για τη δημιουργία έργων μέσω αφηρημένων υπολογιστικών μοντέλων. Όσον αφορά στον αλγόριθμο στοιχειωδών αυτομάτων που χρησιμοποιήσαμε, είδαμε πως ένα μικρού πλάτους πλέγμα δεν επιτρέπει πολύπλοκη συμπεριφορά στο χώρο κατά την πάροδο του χρόνου. Για το λόγο αυτό η πρακτική της ανατροφοδότησης των κατάλληλων κανόνων με απρόβλεπτες αρχικές συνθήκες παρουσιάζει ενδιαφέροντα αποτελέσματα για μικρά πλέγματα ιδιαίτερα μετά από μελέτη του τρόπου αντίδρασης του εκάστοτε κανόνα στη μεταβολή των αρχικών καταστάσεων. Επίσης απαραίτητη κρίνεται η κατάλληλη ανατροφοδότηση (σε αριθμό ενεργών κελιών, τοποθεσία τους και χρόνου ανατροφοδότησης) σε πλέγματα που αναπτύσσονται με μεγάλη ταχύτητα όπως το Game of Life στο συγκεκριμένο προκειμένου να επιτυγχάνεται μια ομαλή μετάβαση κατά την τροφοδότηση με νέες αρχικές καταστάσεις. Στην παρούσα εργασία αυτό πιστεύουμε πως δεν επιτεύχθηκε σε ικανοποιητικό βαθμό ώστε να είναι αξιοποιήσιμο για πολλών ειδών μουσικές χειρονομίες αλλά και υφές και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Στο επίπεδο της σύνθεσης ήχου φάνηκε πως το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην ηχοποίηση των θεμελιωδών αυτομάτων (CA1 και CA2) εμφανίζεται στη διαχείριση των φασματικών χαρακτηριστικών των ηχητικών αντικειμένων που δημιουργούμε λόγω της χωροχρονικής ανάπτυξης των μονοδιάστατων αυτων αυτομάτων. Τα πιό δυναμικά αποτελέσματα φυσικά φάνηκαν στη διαχείριση των granular δειγμάτων κυρίως από το Game of Life. Σε κάθε περίπτωση όμως ακόμα και αυτά τα δείγματα είναι εγγενώς δυναμικά αφού προκύπτουν από τα πρωτογενή αυτόματα. Ένα συμπέρασμα που προκύπτει εδώ λοιπόν είναι πως η διαβάθμιση των πλεγμάτων κατα αύξοντα βαθμό πολυπλοκότητας (πρωτογενή χωρις ανατροφοδότηση - CA1, πρωτογενή με ανατροφοδότηση - CA2, Game of Life) λειτούργησε θετικά παρέχοντας δυνατότητας μεταβάσεων στη συνολική δομή των κομματιών.

Συνολικά μπορούμε να πούμε πως ο πειραματισμός και η μελέτη των απλών αυτών μοντέλων αυτομάτων ήταν μια διαδικασία πού διατήρησε το ενδιαφέρον του για μεγάλο χρονικό διάστημα μέσω με την παλινδρόμηση μεταξύ του πειραματικού mapping, της μελέτης των αλγορίθμων των αυτομάτων αλλά και του συνεχούς

εννοιολογικού επαναπροσδιορισμού του παρόντος έργού. Μέσω αυτης της διαδικασίας έχουν δοθεί αρκετά στο γράφοντα κίνητρα για την εξέλιξη του παρόντος συστήματος με την ενσωμάτωση φυσικών περιβαλλοντικών ήχων ως βασικών πηγών αλλά και για την περαιτέρω μελέτη και πειραματισμό στον τομέα της ηλεκτροακουστικής σύνθεσης με κυτταρικά αυτόματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anderson, C. (2005). Dynamic Networks of Sonic Interactions: An interview with Agostino di Scipio. Computer Music Journal, 29(3), 11–28. https://doi.org/10.1162/0148926054798142

Ainsworth, T. (2020) "Form vs. Matter", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2020 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/form-matter/>.

Aristotle (2009). Metaphysics (Ross, W. D trans). NuVision Publications.

Beyls, P. (1989). The Musical Universe of Cellular Automata. International Conference on Mathematics and Computing.

Beyls, P. (1991). Self-organising control structures using multiple cellular automata, Proceedings of the International Computer Music Conference, Montreal 1991

Beyls, P. (2010). Cellular automata mapping procedures. International Computer Music Conference Proceedings. Retrieved March 9, 2023, from https://quod.lib.umich.edu/i/icmc/bbp2372.2004.008?rgn=main%3Bview

Beyls, P. (2012). Autonomy, influence and emergence in an audio-visual ecosystem, Proceedings of the Generative Arts Conference 2012, Lucca, Italy.

Broglia, S. (2020, November 2). The dialectic of noise. an aesthetic perspective • digicult: Digital Art, design and culture. Digicult. Retrieved March 10, 2023, from https://digicult.it/digimag/issue-065/the-dialectic-of-noise-an-aesthetic-perspective/

Brown, A. R. (2005). Exploring rhythmic automata. Lecture Notes in Computer Science, 551–556. https://doi.org/10.1007/978-3-540-32003-6_57

Burks, A. W. (1969). Von Neumann's self-reproducing automata. Defense Technical Information Center.

Burraston, D. M. (2006). Generative Music and Cellular Automata (dissertation). Creativity & Cognition Studios, Faculty of Information Technology, University of Technology, Sydney, Australia.

Burraston, D., Edmonds, E.A., Livingstone, D., & Miranda, E.R. (2004). Cellular Automata in MIDI based Computer Music. International Conference on Mathematics and Computing.

Burraston, D., & Edmonds, E. (2005). Cellular automata in Generative Electronic Music and sonic art: A historical and technical review. Digital Creativity, 16(3), 165–185. https://doi.org/10.1080/14626260500370882

Burt, W. (1996). Some parentheses around algorithmic composition. Organised Sound, 1(3), 167–172. https://doi.org/10.1017/s1355771896000234

Burt, W. (2007). Cellular automata as spectra: beyond sonification into composition.

Chalmers, D. J. (2008). Strong and weak emergence. The Re-Emergence of Emergence, 244–254. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199544318.003.0011

Chareyron, J. (1990). Digital synthesis of self-modifying waveforms by means of linear automata. Computer Music Journal, 14(4), 25. https://doi.org/10.2307/3680789

Chion, M. (2009). Chion Michel Guide to sound objects. Retrieved March 9, 2023, from https://monoskop.org/images/0/01/Chion_Michel_Guide_To_Sound_Objects_Pierre_Schaeffer_and_Musical_Research.pdf

Eno, B. (1996). Year with swollen appendices: Brian Eno's diary (1st ed.). Faber & Faber.

Epstein, J. M. (2012). Chapter 1. agent-based computational models and Generative Social Science. Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling, 4–46. https://doi.org/10.1515/9781400842872.4

Gardener, M. (1970). [PDF] mathematical games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "Life: Semantic scholar. [PDF] Mathematical games: the fantastic combinations of john conway's new solitaire game "life | Semantic

Scholar. Retrieved March 9, 2023, from https://www.semanticscholar.org/paper/Mathematical-games%3A-the-fantastic-combinations-of-Gardener/3ed968a5b77d486bffa494b67488a6f2583f0525

Ilachinski, A. (2002). Cellular automata: A discrete universe. World Scientific.

Hart, V. (2008). Using binary numbers in music. Retrieved March 9, 2023, from https://archive.bridgesmathart.org/2008/bridges2008-397.pdf

Heylighen, F. & Joslyn, C. (2001). Cybernetics and Second Order Cybernetics, in: R.A. Meyers (ed.), Encyclopedia of Physical Science & Technology (3rd ed.), (Academic Press, New York), p. 155-170.

Israeli, N., & Goldenfeld, N. (2004). Computational irreducibility and the predictability of complex physical systems. Physical Review Letters, 92(7). https://doi.org/10.1103/physrevlett.92.074105

Katok, A. B., & Hasselblatt, B. (1997). Introduction to the modern theory of Dynamical Systems. Cambridge University Press.

Kellert, S. H. (1993). In the wake of chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems. University of Chicago.

Kontogeorgakopoulos, A. & Klissouras, O. (2020). 01101110: An Audiovisual Installation Based on the Cellular Automaton Rule 110 - Proceedings of the International Conference on Sound and Music Computing Conference, Torino, June 24th – 26th 2020

Langton, C. G. (1986). Studying artificial life with cellular automata. Physica D: Nonlinear Phenomena, 22(1-3), 120–149. https://doi.org/10.1016/0167-2789(86)90237-x

Lennox, J. G. (2014). Aristotle on the emergence of material complexity:meteorologyIV and Aristotle's Biology. HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science, 4(2), 272–305. https://doi.org/10.1086/677568

Lindenmayer, A. (1968). Mathematical models for cellular interactions in Development I. Filaments with one-sided inputs. Journal of Theoretical Biology, 18(3), 280–299. https://doi.org/10.1016/0022-5193(68)90079-9

LuValle, B. J. (2019). The effects of boundary conditions on cellular automata. Complex Systems, 28(1), 97–124. https://doi.org/10.25088/complexsystems.28.1.97

McCormack, J. & Dorin, A. (2001) Art, Emergence and the Computational Sublime, Second Iteration. Proceedings of the Second International Conference on Generative Systems in the Electronic Arts, Victoria, Australia, 5-7 December 2001, Centre for Electronic Media Art, VIC, Australia, ISBN: 0-7326-2195-X, pp 67-81.

McLaughlin, S. & Tremblay, Pierre A. (2010) SpectralConway: Cellular Automata Off The Grid. International Computer Music Conference Proceedings, 2010. pp. 68-71. ISSN 2223-3881

Miranda, E. R. (1995). Granular synthesis of sounds by means of a cellular automaton. Leonardo, 28(4), 297. https://doi.org/10.2307/1576193

Miranda, E. R. (2007). Cellular automata music: From sound synthesis to musical forms. Evolutionary Computer Music, 170–193. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-600-1_8

Moles, A.(2016). Θεωρία της Πληροφορίας και Αισθητική Αντίληψη (Α. Καραστάθη μετ). Α’ ανατύπωση. Αθήνα: Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης.

JNeumann, V. J. (1966). Theory of self-reproducing automata. University of Illinois Press.

Nunn, D., Purvis, A., & Manning, P.D. (1996). Acoustic Quanta. International Conference on Mathematics and Computing.

O’Connor, T. (2020). "Emergent Properties", The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2021 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/win2021/entries/properties-emergent/>.

Orton, R., Hunt, A., & Kirk, R. (1991). Musical Applications of a Cellular Automata Workstation. International Conference on Mathematics and Computing.

Pickering, A. (2011). The cybernetic brain: Sketches of another future. University of Chicago Press.

Pickles, D. (2016). Cybernetics in Music (dissertation). Coventry University, Coventry.

Rasolonjanahary, M. I., & Vasiev, B. (2020). Formation of morphogenetic patterns in cellular automata. Lecture Notes in Computer Science, 359–373. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50433-5_28

Rayward-Smith, V. J., & Forrest, S. (1992). Emergent computation. The Journal of the Operational Research Society, 43(11), 1108. https://doi.org/10.2307/2584111

Roads, C., & Strawn, J. (2011). The Computer Music tutorial. MIT Press.

Roads, C. (2012). From Grains To Forms, in Makis Solomos, (ed.), Proceedings of the international Symposium Xenakis. La musique électroacoustique / Xenakis. The electroacoustic music (université Paris 8, May 2012)

Roads, C. (2015). Composing electronic music: A new aesthetic. Oxford University Press.

Russolo, L., & Brown, B. (1986). The art of noises (Ser. Monographs In Musicology). Pendragon Press, New York.

Smalley, D. (1997). Spectromorphology: explaining sound-shapes. Organised Sound, 2, 107 - 126.

Solomos, M. (2004). Xenakis' thought through his writings. Journal of New Music Research, 33(2), 125–136. https://doi.org/10.1080/0929821042000310603

Solomos, M. (2005). Cellular automata in Xenakis's music. Theory and Practice. International Symposium Iannis Xenakis (Athens, May 2005), 2005, Greece. 11 p. (hal-00770141)

Truax, B. (1994). Discovering inner complexity: Time shifting and transposition with a real-time granulation technique. Computer Music Journal, 18(2), 38. https://doi.org/10.2307/3680442

Truax, B. (1996). Time-Stretching of Hyper-Resonated Sound Using a Real-Time Granulation Technique. In Proceedings of the 1996 International Computer Music Conference, ICMC 1996, Hong Kong, August 19-24, 1996. Michigan Publishing, 1996.

Turing, A. (2004). The chemical basis of morphogenesis (1952). The Essential Turing. https://doi.org/10.1093/oso/9780198250791.003.0022

Turney, P. D. (2021). Evolution of autopoiesis and multicellularity in the game of life. Artificial Life, 27(1), 26–43. https://doi.org/10.1162/artl_a_00334

Vaidhyanathan, S. ,Minai, A. & Helmuth, P. (2000). ca: A System for Granular Processing of sound using Cellular Automata.

Wagner, B. (2009). Rhythmic patterns as binary numbers. Retrieved March 9, 2023, from http://bernhardwagner.net/musings/RPABN.html

Wahyudi, A., & Liu, Y. (2016). Cellular automata for Urban Growth Modelling: International Review for Spatial Planning and Sustainable Development, 4(2), 60–75. https://doi.org/10.14246/irspsd.4.2_60

Wiener, N. (1950). The human use of human beings, cybernetics and society (1st ed.). Houghton Mifflin Co.; Boston.

Wiener, N. (1961). On learning and self-reproducing machines. In N. Wiener, Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine (pp. 169–180). John Wiley & Sons, Inc.; Boston Review. https://doi.org/10.1037/13140-009

Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. Nature, 311(5985), 419–424. https://doi.org/10.1038/311419a0

Wolfram, S. (2002). A new kind of science. Wolfram.

Wolfram, S. (2011). Music, Mathematica, and the computational universe-stephen wolfram writings. Stephen Wolfram Writings RSS. (2011, June 17). Retrieved March 9, 2023, from https://writings.stephenwolfram.com/2011/06/music-mathematica-and-the-computational-universe/

Xenakis, I., & Kanach, S. (1992). Formalized music: Thought and mathematics in Composition. Pendragon.