



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΦΙΛΟΣΟΦΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΜΟΥΣΙΚΟΛΟΓΙΑ»
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Temp.Tu.S. Σύστημα Προσομοίωσης Χορδίσματος και
Συγκερασμού του Πιάνου**

Παναγιώτης Γ. Τσίγκος

Επιβλέποντες: **Αναστασία Γεωργάκη**, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Χριστίνα Αναγνωστοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Αρετή Ανδρεοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ

Οκτώβριος 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Temp.Tu.S. Σύστημα Προσομοίωσης Χορδίσματος και Συγκερασμού του Πιάνου

Παναγιώτης Γ. Τσίγκος

A.M.: 160305

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: **Αναστασία Γεωργάκη**, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Χριστίνα Αναγνωστοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Αρετή Ανδρεοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκπαίδευση ενός χορδιστή πιάνων είναι μία μακροχρόνια διαδικασία. Το σύστημα της παρούσας εργασίας έχει σαν στόχο την υποβοήθηση της εκπαιδευτικής διαδικασίας, αλλά και την εξοικείωση κάθε ενδιαφερόμενου γύρω από τα θέματα του χορδίσματος του πιάνου και των διαφόρων συστημάτων συγκερασμού.

Στο πρώτο μέρος γίνεται ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου, και των διαφόρων σχετικών υλοποιήσεων από την βιβλιογραφία. Στο δεύτερο μέρος αναπτύσσεται η δομή και λειτουργία του πρωτότυπου συστήματος σε επίπεδο λογισμικού και υλισμικού. Το τελευταίο μέρος ασχολείται με κάποιες μελέτες περίπτωσης που έγιναν στα πλαίσια δοκιμών του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Χόρδισμα Πιάνου και Συστήματα Συγκερασμού

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: εκπαίδευση χορδιστών, προσομοίωση, χόρδισμα, συγκερασμός

ABSTRACT

The education of a piano technician can take years. The system presented here aims in aiding this educative process, but also is of interest to anyone who wants to explore in a practical way the piano tuning field as well as the temperament phenomena.

The first part contains a short introduction to the scientific and physical aspects of tuning and the state of the art in terms of hardware and software executions. The concept, the structure and the function of the system can be found in the second part. The last part consists of two case studies that served as the first test of the system under real conditions.

SUBJECT AREA: Piano Tuning and Temperaments

KEYWORDS: piano technician's education, simulation, tuning, temperament

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις επιβλέπουσες, καθηγήτρια Αναστασία Γεωργάκη και επίκουρη καθηγήτρια Αρετή Ανδρεοπούλου για τη συνεργασία, την έμπνευση, την καθοδήγηση και την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της. Ευχαριστούμε τον Αλέξανδρο Δρυμονίτη για τις συμβουλές του γύρω από την δημιουργία του συστήματος, με τις εξαιρετικές γνώσεις του πάνω στο Pure Data και το Arduino. Ευχαριστούμε τον Θεόδωρο Κοτεπάνο και την Μάρθα Παπαδόγιαννη που διέθεσαν τον χρόνο τους και την ενέργειά τους σαν μελέτες περίπτωσης. Ιδιαίτερως ευχαριστούμε την Σοφία Ρόδη και τον Γιώργο Τσίγκο για την αμέριστη συμπαράσταση. Τέλος, ευχαριστούμε το Piano Technicians Guild Foundation που στήριξε και χρηματοδότησε την έρευνα της οποίας κομμάτι αποτελεί το παρόν πόνημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	12
1.1 Ιστορική αναδρομή	12
1.2 Συστήματα Συγκερασμού	15
1.3 Το επάγγελμα του χορδιστή πιάνου	17
1.4 Μαθηματικά του χορδίσματος	19
1.4.1 Αρμονικές συχνότητες	19
1.4.2 Διακρότημα	20
1.4.3 Συμπίπτουσες Αρμονικές	21
1.4.4 Σύμφωνα και Διάφωνα Διαστήματα	22
1.4.5 Hertz, Διακρότημα και Cents	23
1.4.6 Ισοσυγκερασμός	24
1.4.7 Δυσαρμονικότητα – Επέκταση	25
1.5 Συνθετητές και Λογισμικό	25
1.6 Τεχνική χορδίσματος του πιάνου και ηλεκτρονικά βοηθήματα	29
1.7 Ηλεκτρονικές Συσκευές Χορδίσματος (ΗΣΧ)	30
2. ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	34
2.1 Σκοπός του συστήματος	34
2.2 Pure Data	34
2.3 Σχεδιασμός του συστήματος	36
2.4 Υλισμικό	40
3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ, ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	43
3.1 Πιανίστας – Χορδιστής	43

3.2	Καθηγήτρια μουσικής.....	48
3.3	Πρόταση για μελλοντική βελτίωση	50
3.4	Πρόταση για έρευνα.....	51
4.	ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	52
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	53
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	54
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	55
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	56
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.....	57
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	58

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Χαμηλότερες Συμπίπτουσες Αρμονικές και Ποιότητα Σύμφωνων Διαστημάτων του Ισοσυγκερασμού	24
--	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Korg ps3100	26
Εικόνα 2 Harmonic Intonation Trainer	28
Εικόνα 3 Beatings	29
Εικόνα 4 Veritune	32
Εικόνα 5 Κυρίως παράθυρο	36
Εικόνα 6 Δημιουργία αρμονικών.....	37
Εικόνα 7 Υποπρόγραμμα "deviations"	40
Εικόνα 8 Εξωτερικός ελεγκτής.....	41
Εικόνα 9 Εσωτερικό του ελεγκτή	41

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η γνώση χαρακτηρίζεται από μία ιδιαιτερότητα. Όσο περισσότερη αποκτά κανείς πάνω σε ένα αντικείμενο, τόσο μεγαλώνει αντίστοιχα και η ποσότητα γνώσης που περιμένει να αποκτηθεί. Ο μελετητής λοιπόν έχει την δύναμη της επιλογής να συνεχίσει και να εμβαθύνει με εργατικότητα και ταπεινότητα ή να αρκεστεί σε ένα επίπεδο και να προσπεράσει. Όταν ξεκίνησα την μελέτη μου πάνω στην τεχνολογία του πιάνου, υπέθεσα ότι είναι ένα απλό θέμα: χορδίζεις το πιάνο και το ρυθμίζεις έτσι ώστε να παίζει καλά. Σε αυτόν τον τομέα συναντιέται η τέχνη με την τεχνολογία. Το αντικειμενικό με το άρρητο. Η ιστορία με το μέλλον. Δεν αρκέστηκα σε μία επιφανειακή προσέγγιση, και ξεκίνησα ένα ταξίδι προς την εμβάθυνση, μέρος της οποίας αποτελεί και η παρούσα εργασία σαν επιστέγασμα της φοίτησής μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα του Τμήματος Μουσικών Σπουδών. Όντας επαγγελματίας τεχνικός πιάνου και ενεργό μέλος του Piano Technicians Guild, η έρευνα για τις ανάγκες του πονήματος είχε άμεση εφαρμογή και ανταπόκριση, δίνοντας έτσι ένα επιπλέον κίνητρο. Προσωπική φιλοδοξία είναι να μην σταματήσει η έρευνα με την περάτωση των σπουδών, αλλά να συνεχιστεί με βελτίωση του συστήματος που περιγράφεται παρακάτω, πειράματα, παρουσιάσεις, αλλά και ενσωμάτωση αυτού στην διδασκαλία περί χορδισμάτων σαν θεωρία και πρακτική.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ζήτημα του χορδίσματος και συγκεκριμένα η διαίρεση της οκτάβας έχει απασχολήσει τον μουσικό, επιστημονικό και φιλοσοφικό κόσμο από τα αρχαία χρόνια. Οι επιστήμονες χρησιμοποιούσαν τα μαθηματικά σε ένα θεωρητικό επίπεδο, οι κατασκευαστές οργάνων προσπαθούσαν να βρουν πρακτικές και ρεαλιστικές λύσεις, ενώ οι μουσικοί και συνθέτες απλά επιθυμούσαν εργαλεία στην υπηρεσία του αισθητικού τους οράματος. Η εφεύρεση του πιάνου και η δημιουργία του επαγγέλματος του τεχνικού αυτού, έθεσε το πρόβλημα σε εντελώς πραγματικές βάσεις. Στις αρχές του 20ού αιώνα παρατηρούμε μία σύγκλιση της θεωρίας με την πράξη και πλέον στην συζήτηση μπήκε και η νεοσύστατη επιστήμη της ψυχοακουστικής.

Το χόρδισμα του πιάνου είναι μια διαδικασία που απαιτεί αφοσίωση, εκπαίδευση και εξειδίκευση. Ο εκπαιδευόμενος καλείται να τιθασεύσει ακουστικά φαινόμενα ισορροπώντας μεταξύ επιστήμης και τέχνης. Υπάρχει η άποψη ότι κάποιος θεωρείται αρκετά καλός μόνο αφού έχει χορδίσει 1000 πιάνο. Σε αυτό το τόσο παραδοσιακό επάγγελμα, η ψηφιακή τεχνολογία φαίνεται να εισέρχεται με πολύ αργά αλλά σταθερά βήματα. Ιδίως στην εκπαίδευση, δεν έχουν αλλάξει πολλά από αρχής του επαγγέλματος.

Παρακάτω, αφού γίνει μια σύντομη αναδρομή, παρουσιάζεται ένα πρωτότυπο σύστημα που συνδυάζει λογισμικό και υλισμικό που στοχεύει στην πιο γρήγορη εξοικείωση των εκπαιδευόμενων με την διαδικασία του χορδίσματος και της έννοιας του συγκερασμού. Τέλος, παρατίθεται η περιγραφή δύο συναντήσεων με ανθρώπους που έκριναν το σύστημα βάσει της εμπειρίας τους.

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Τον Ιούλιο του 1799 ο Thomas Young εξέδωσε την διατριβή του “*Outlines of Experiments and Inquiries Respecting Sound and Light*” στην Royal Society. Εντός αυτής, ένα κεφάλαιο ονομαζόταν «Περί Συγκερασμού των Μουσικών Διαστημάτων». Μέσα στις πρώτες δύο προτάσεις, ο Young εξήγησε πως ο συγκερασμός είναι απαραίτητος. Έγραψε: “Θα ήταν εξαιρετικά βολικό για τους μουσικούς ...εάν τρεις φορές ο λόγος 4 προς 5, ή τέσσερις φορές ο λόγος 5 προς 6, ήταν ίσος με τον λόγο 1 προς 2. Καθώς συμβαίνει να ισχύει το αντίθετο, έχει υπάρξει πολλή συζήτηση γύρω από το σε ποια διαστήματα θα πρέπει αυτές οι ατέλειες να τοποθετηθούν.» Πώς θα μπορούσε κανείς να εξηγήσει την αναγκαιότητα του συγκερασμού πιο απλά; Η δεύτερη πρόταση του Young αποτελεί την βάση όλης της ιστορίας του συγκερασμού. (Jorgensen, 1991)

Το χόρδισμα των μουσικών οργάνων απασχολεί διαχρονικά τους θεωρητικούς της μουσικής από την αρχαιότητα. Είναι αποδεκτό να πούμε ότι κάθε περίοδος στην ιστορία της μουσικής είχε την δική της θεωρία χορδίσματος που εξυπηρετούσε της δικές της μουσικές ανάγκες. Ομοίως, και η ποσοτική γλώσσα που χρησιμοποιείται για να υπολογίζει και να αναπαριστά αυτά τα διάφορα συστήματα χορδίσματος έχει αλλάξει. Κατά την περίοδο του Μεσαίωνα και της Αναγέννησης, οι θεωρίες του χορδίσματος συνήθως διαμορφώνονταν με όρους σχετικών μηκών χορδής σε ένα μονόχορδο, και υπολογίζονταν με αριθμητικές μεθόδους. (Christensen, 2002)

Από το τέλος του 16ου αιώνα, μέχρι περίπου το 1800, τα μήκη χορδών παρέμειναν σε χρήση από τους θεωρητικούς, αλλά οι υπολογισμοί τους συνήθως βελτιώθηκαν σε ακρίβεια με την χρήση μαθηματικών εργαλείων όπως ο υπολογισμός της ρίζας. Με την βοήθεια της έννοιας της ρίζας, τα διάφορα συστήματα ίσου και άνισου συγκερασμού που κυριαρχούσαν στην θεωρία

και στην πράξη από τον 16^ο αιώνα και μετά μπορούσαν να περιγραφούν επαρκώς. Μουσικά, αυτό σήμαινε ότι κάθε διάστημα οποιουδήποτε μεγέθους μπορούσε να χωριστεί σε ίσα μέρη. (Με τις αριθμητικές μεθόδους, αυτό δεν είναι πάντα δυνατό.) Κάποια στιγμή κατά τον 17ο αιώνα, οι λογαριθμικές μετρήσεις του τονικού ύψους προστέθηκαν στις κοινές τιμές μηκών χορδής, και μέσω αυτών ήταν πλέον δυνατή μια πιο ρεαλιστική - από πλευράς φυσιολογίας - απεικόνιση των σχέσεων μεταξύ των τονικών υψών. Οι λογάριθμοι διευκόλυναν την περιγραφή και τον υπολογισμό πρακτικά οποιουδήποτε πιθανού συστήματος χορδίσματος. (Christensen, 2002)

Η θεωρία του χορδίσματος και του συγκερασμού αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό από τους Γερμανούς συγγραφείς του 18^{ου} αιώνα. Χρησιμοποίησαν μια ποικιλία μεθόδων για να περιγράψουν ένα μεγάλο πλήθος χορδισμάτων. Περίπου από το 1800, τα μήκη χορδών σταδιακά αντικαταστάθηκαν από της τιμές συχνότητας για να περιγράψουν τονικά ύψη, καθιστώντας δυνατή την εμπειρική συσχέτιση θεωρίας και πράξης. Κατά τον 19ο αιώνα, όταν ένα διευρημένο χρωματικό/εναρμόνιο τονικό σύστημα είχε γίνει το πλαίσιο αναφοράς για την μουσική σύνθεση, γενικευμένες θεωρίες περί μουσικών χορδισμάτων άρχισαν να αναπτύσσονται. Ο 20ός αιώνας, τελικά, παρακολούθησε την άνθηση της μελέτης του χορδίσματος σε ένα ιστορικό πλαίσιο, καθιστώντας δυνατούς τους συνδυασμούς διαφόρων ιστορικών χορδισμάτων και συστημάτων συγκερασμού. (Christensen, 2002)

Η βιβλιογραφία περί χορδίσματος – ιστορική και σύγχρονη – είναι τεράστια σε μέγεθος και τρομακτική σε ποικιλία. Υπάρχουν πρακτικές οδηγίες χορδίσματος χωρίς μία αναφορά σε τεχνικούς όρους, πίνακες ή σχήματα. Από την άλλη άκρη, έχουν γραφτεί μαθηματικές διατριβές που είναι ακατανόητες από κάποιον χωρίς κάποια σοβαρή μαθηματική κατάρτιση σε άλγεβρα και ανάλυση. Συγγράμματα με θέμα το χορδίσμα έχουν γραφεί από μία μεγάλη ποικιλία ανθρώπων: όχι μόνο μουσικοί και θεωρητικοί της μουσικής, αλλά και μαθηματικοί,

επιστήμονες, ακόμα και ενθουσιώδεις ερασιτέχνες. Ενώ τις περισσότερες φορές τα γραπτά ανήκουν ξεκάθαρα σε μία συγκεκριμένη παράδοση (όπως η θεωρία του Just Intonation της Αναγέννηση ή η Γερμανική θεωρία συγκερασμού του 18^{ου} αιώνα), σε άλλες περιπτώσεις παρατηρείται μία αλληλοεπικάλυψη στις παραδόσεις όσον αφορά στην ορολογία, τις αναπαραστάσεις και τους στόχους. (Christensen, 2002)

Το κυριότερο σύγχρονο κείμενο γύρω από το χόρδισμα και τον συγκερασμό, παρά τα πολλά (και κάποιες φορές σοβαρά) λάθη του, παραμένει το “Tuning and Temperament: A Historical Survey” του James Murray Barbour, γραμμένο το 1951. Αυτό το σύγγραμμα παρουσιάζει τα διάφορα προβλήματα του χορδίσματος και του συγκερασμού, χωρίζει τα συστήματα χορδίσματος που περιγράφονται στην βιβλιογραφία σε ένα μικρό πλήθος από καλά επιλεγμένες κατηγορίες, παρουσιάζει μία ενιαία μέθοδο σύγκρισης (έχοντας σαν στάθμη αναφοράς το σύστημα ισοσυγκερασμού) και δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στην σχέση μεταξύ θεωρίας και πράξης. Όλα τα ύστερα έργα επί του θέματος αναφέρονται στο αξιόλογο βιβλίο του Barbour. Πολλά βιβλία έχουν εμφανιστεί μετά από αυτό, αλλά φαίνεται πως έχουν καταφέρει να επεξεργαστούν και να εμβαθύνουν σε τμήματα εκείνου, και όχι να το αντικαταστήσουν σαν ολότητα. (Christensen, 2002)

Ο λογαριθμικός μετασχηματισμός των αριθμητικών τιμών που απαντώνται σε ένα σύστημα χορδίσματος εισάχθηκε στους μουσικούς υπολογισμούς κατά τον 17^ο αιώνα, πρώτα για να διευκολύνει τον υπολογισμό των μηκών της χορδής σε πολύπλοκες περιπτώσεις, και αργότερα για τον υπολογισμό οποιουδήποτε μήκους χορδής. Έχουν την ιδιότητα οι τιμές τους να ανταποκρίνονται καλύτερα στην ανθρώπινη αντίληψη του τονικού χώρου και των τονικών συστημάτων σε σχέση με τα μήκη χορδών και τις συχνότητες. Χάρη στους λογαριθμικούς υπολογισμούς, πολλές λεπτές αποχρώσεις του χορδίσματος μπορούν να υπολογιστούν με μεγάλη ταχύτητα. (Christensen, 2002)

Ένα σημαντικό εργαλείο συνεισέφεραν στον τομέα οι Andreas Werckmeister και Johann Georg Neidhardt: συνειδητοποίησαν ότι οι απώλειες ήταν ελάχιστες όταν περίπλοκοι γεωμετρικοί λόγοι διαστημάτων (όπως το κόμμα) αντικαθίσταται από αριθμητικούς λόγους. Αυτή η αντικατάσταση ήταν σημαντική όταν ο στόχος ήταν να αποδοθεί μία σειρά από σχήματα που περιγράφουν ένα χόρδισμα και όταν το χόρδισμα αυτό έπρεπε να σχεδιαστεί πάνω σε ένα μονόχορδο. (Christensen, 2002)

1.2 Συστήματα Συγκερασμού

Ο συγκερασμός αναφέρεται στην κατανομή των 12 χρωματικών νοτών μέσα στην οκτάβα. Οι νότες συνήθως αναπαριστώνται σαν κύκλος με τις πέμπτες, ξεκινώντας και τελειώνοντας στην ίδια νότα, το Α (Λα). (Ilgrec, 2013)

Εάν οι $5^{εξ}$, οι $4^{εξ}$ και κυρίως οι $M3$ ες δεν μπορούν να χορδιστούν καθαρές (χωρίς διακρότημα) όταν η οκτάβα είναι καθαρή, τι σύστημα συγκερασμού μπορούμε να εφαρμόσουμε; Οι χορδιστές βασανίζονταν με αυτό το ερώτημα για αιώνες. Ενώ η οκτάβα διατηρήθηκε καθαρή, τα υπόλοιπα σύμφωνα διαστήματα έλαβαν διαφορετικές προτεραιότητες ανάλογα την εποχή. Μέχρι τον Μεσαίωνα, το Πυθαγόρειο σύστημα διατήρησε καθαρές τις $5^{εξ}$ με κόστος τις $M3$ ες. Μία από τις $5^{εξ}$ αναλάμβανε να χρεωθεί το συσσωρευμένο σφάλμα και ήταν πολύ στενή (μικρότερη από καθαρή). Ονομάστηκε «λύκος» από τον ήχο που έκανε το έντονο διακρότημα που σχηματιζόταν.

Η μουσική της Αναγέννησης (1500) προώθησε την $M3$ σαν σύμφωνο διάστημα και ο μεσότονος συγκερασμός (mean tone temperament) επινοήθηκε ώστε να την κρατήσει καθαρή ή ελάχιστα ευρεία, με κόστος υπερβολικά στενές $5^{εξ}$. Αυτό το στυλ συγκερασμού επίσης συμπεριλάμβανε $5^{η}$ -«λύκο», που σε αυτή τη περίπτωση ήταν πολύ ευρεία. Το μεσότονο σύστημα ήταν χρηστικό μόνο σε τονικότητες με λίγους οπλισμούς (μαύρα πλήκτρα πιάνου), όπως C, G και F μείζονα, αλλά αυτό δεν αποτελούσε πρόβλημα, καθώς εκεί γράφόταν η

περισσότερη μουσική εκείνης της εποχής. Απόμακρες τονικότητες όπως η F# ή C# μείζονα ή οι αντίστοιχες ελάσσονες, ακούγονταν τόσο άσχημα που δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν.

Στην εποχή του Μπαρόκ (τέλη 1600), η μουσική έγινε αυξανόμενα χρωματική και χρησιμοποιούσε μετατροπίες σε πιο απομακρυσμένες τονικότητες. Το 1722, ο J.S. Bach εξέδωσε το πρώτο από τα δύο βιβλία του περίφημου «Καλώς Συγκερασμένου Κλειδοκύμβαλου», μία συλλογή από 24 πρελούδια και φούγκες σε όλες τις μείζονες και ελάσσονες τονικότητες, που επεδείκνυε τα πλεονεκτήματα του «καλού συγκερασμού» (well temperament). Αυτό το σύστημα καταργούσε τα διαστήματα-λύκους και έθετε όλες τις τονικότητες χρηστικές. Αυτό το χόρδισμα ήταν κοντά στον ισοσυγκερασμό, όπου όλες οι 12 νότες είναι ισοκατανεμημένες στην οκτάβα.

Ο ισοσυγκερασμός είχε τις ρίζες του στον 16^ο αιώνα, αλλά άρχισε να κερδίζει δημοτικότητα κατά τον 18^ο αιώνα καθώς οι συνθέτες συμπεριλάμβαναν μετατροπίες μεταξύ απόμακρων τονικοτήτων. Έγινε κανόνας στις αρχές του 20^{ού} αιώνα, αν όχι νωρίτερα. Σήμερα, το χόρδισμα ενός σύγχρονου πιάνου γίνεται σε ισοσυγκερασμό, αν και κάποιοι χορδιστές ακόμα υποστηρίζουν – και κάποιοι συνθέτες απαιτούν – άλλα συστήματα.

Τις τελευταίες δεκαετίες του 20ού αιώνα παρατηρήθηκε μία αναβίωση του ενδιαφέροντος περί των ιστορικών χορδισμάτων, κυρίως μέσα στο πλαίσιο της αναγεννησιακής και μπαρόκ μουσικής, αν και κάποιοι ισχυρίζονται ότι ακόμα και η μουσική των μέσων του 19^{ου} αιώνα είναι γραμμένη για μη ισοσυγκερασμένα χορδίσματα. Δυστυχώς, οι ιστορικές αναφορές γύρω από το συγκερασμένο χόρδισμα και την χρήση του είναι συνήθως διφορούμενες και ανοιχτές στην ερμηνεία τους.

Ένα διαρκώς αυξανόμενο πλήθος μουσικών και χορδιστών αντιμετωπίζουν τον συγκερασμό σαν ένα μέσο που προσδίδει ιδιαίτερη «υφή» στην μουσική και ξεπερνά την «άχρωμη ομοιογένεια του ισοσυγκερασμού». Αυτό έχει πυροδοτήσει μία έντονη διαμάχη μεταξύ

των υποστηρικτών των ιστορικών χορδισμάτων και του ισοσυγκερασμού που θυμίζει έντονα την διαμάχη περί συγκερασμού σχεδόν 300 χρόνια πριν, όταν ο Γερμανός συνθέτης, συγγραφέας και θεωρητικός της μουσικής Johann Mattheson έγραψε ότι «Όταν κανείς χορδίζει (πληκτροφόρα και άρπες) είναι αναγκασμένος να καταφύγει στον συγκερασμό, για τον οποίο έχουν γραφτεί τόσα πολλά βιβλία σαν η ισορροπία ολόκληρου του κόσμου να εξαρτάται από ένα μόνο πιάνο». Επικές είναι οι διαμάχες του Ραμό με τους σύγχρονούς του.

Ακόμη και μετά την εμφάνιση και καθιέρωση του ισοσυγκερασμού, πολλοί συνθέτες δημιούργησαν τα δικά τους συστήματα, στην υπηρεσία του αισθητικού τους οράματος.

1.3 Το επάγγελμα του χορδιστή πιάνου

Το χόρδισμα του πιάνου αναφέρεται στην ρύθμιση του τονικού ύψους των χορδών ώστε όλες οι νότες να ηχούν καλά όταν παίζονται μεμονωμένα ή σε διαστήματα και συγχορδίες. Για να χορδίσει κανείς, στρέφει μία καβίλια, μεταβάλλοντας την τάση της χορδής και αλλάζοντας έτσι το τονικό ύψος.

Στα χρόνια του J.S. Bach (αρχές 18^{ου} αιώνα), τα τσέμπαλα, τα κλαβίχορδα και τα πρώιμα πιάνα χορδίζονταν από τον εκτελεστή. Το χόρδισμα του πιάνου έγινε επάγγελμα τον 19^ο αιώνα, όταν η έκταση του οργάνου μεγάλωσε σε πάνω από έξι οκτάβες και άρχισαν να κατασκευάζονται όργανα που διέθεταν τρεις χορδές ανά νότα. Η αύξηση της τάσης της χορδής επέφερε αύξηση στην ροπή στρέψης που απαιτούσαν οι καβίλιες και στην τριβή των χορδών, απαιτώντας ειδική τεχνική χειρισμού του συστήματος χορδή-καβίλια. Ο ισοσυγκερασμός, που άρχισε να γίνεται δημοφιλής εκείνη την περίοδο, απαιτούσε μεγαλύτερη ακρίβεια, και συνεπώς πείρα και ικανότητα, σε σχέση με τα παλαιότερα συστήματα. (Igreg, 2013)

Η ανάπτυξη των τετράγωνων πιάνων (square pianos) και των πιάνων με ουρά αποθάρρυνε και τον πλέον τολμηρό ιδιοκτήτη πιάνου από ο να χορδίζει το ίδιο του το όργανο και το επάγγελμα του χορδιστή είχε μόλις δημιουργηθεί.

Την εποχή που λίγοι είχαν πιάνο, συνήθως οι μεγάλες κατασκευαστικές εταιρίες όπως η Broadwood και η Longman & Broderip έστελναν τεχνικούς από το δικό τους τμήμα χορδισμάτων. Καθώς ο αριθμός των ιδιοκτητών πιάνου συνέχιζε να αυξάνει, η ζήτηση για χορδιστές δεν μπορούσε να καλυφθεί από τις εταιρίες. Ο Arthur Loesser (Loesser, 2011) αναφέρει τις σημειώσεις του Γερμανού συγγραφέα Bartold Fritz, στο βιβλίο του “Anweisung wie man Claviere Clavecins and Orgeln...” που εξέδωσε το 1757 στην Λειψία το 1757: ...υπάρχουν άνθρωποι που ζούν στην επαρχία και δεν μπορούν εύκολα να αποκτήσουν τις υπηρεσίες ενός επαγγελματία χορδιστή. Υπάρχουν μουσικόφιλοι στις πόλεις που θα μπορούσαν να αναλάβουν αυτό το καθήκον ... υπάρχουν αρκετοί καθηγητές ... που ποτέ δεν είχαν σωστή εκπαίδευση γύρω από το χόρδισμα ... (Fritz, 1757). Συνεχίζει λέγοντας: «η τέχνη του χορδίσματος ποτέ δεν συμβάδισε με τις πωλήσεις οργάνων, ειδικά αφού το πιάνο έγινε πιο πολύπλοκο και αυξήθηκαν οι εσωτερικές τάσεις. Κανονικά, το χόρδισμα έγινε ξεχωριστή δεξιότητα μετά το μέσο του 18^{ου} αιώνα και χωριστό επάγγελμα τον 19^ο. (Green, 2004)

Αν και η τέχνη του χορδίσματος του πιάνου δεν είναι κάτι που μπορεί να κατακτηθεί μέσα σε ένα απόγευμα, οποιοσδήποτε με κανονική ακοή και συγχρονισμό, με βασικές γνώσεις θεωρίας και αρκετό φυσικό σθένος μπορεί να μάθει να χορδίζει πιάνο με αρκετή ακρίβεια, μέσα σε μερικούς μήνες. Η εκμάθηση του χορδίσματος είναι σαν την εκμάθηση του πιάνου – χρειάζεται πολλή εξάσκηση. Αν κανείς έχει στόχο να χορδίζει επαγγελματικά, πρέπει να είναι προετοιμασμένος για μία μεγάλη περίοδο εκπαίδευσης. (Igreg, 2013)

1.4 Μαθηματικά του χορδίσματος

1.4.1 Αρμονικές συχνότητες

Μία χορδή πάλλεται όχι μόνο καθ' όλο το μήκος της, αλλά και σε τμήματα που είναι υποδιαιρέσεις του συνολικού μήκους. Κάθε ένα από αυτά τα τμήματα παράγει έναν υπέρτονο με συχνότητα αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του. Οι υπέρτονοι αυτοί ονομάζονται και αρμονικοί ή αρμονικές και θεωρητικά, είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμέλιας συχνότητας.

Κατά το πλήρες μήκος της, η παλλόμενη χορδή παράγει την θεμέλια συχνότητα που καθορίζει το όνομα της νότας. Το μισό μήκος παράγει τον δεύτερο αρμονικό (η νέα συχνότητα είναι διπλάσια της θεμελίου), που βρίσκεται μία οκτάβα ψηλότερα. Το ένα τρίτο του μήκους παράγει τον τρίτο αρμονικό (θεμέλιος $\times 3$), μία οκτάβα και μία πέμπτη ψηλότερα. Το ένα τέταρτο του μήκους παράγει τον τέταρτο αρμονικό, δύο οκτάβες ψηλότερα (θεμέλιος $\times 4$) κ.ο.κ. Μία χορδή στην χαμηλή περιοχή του πιάνου μπορεί να παράγει πάνω από 30 διακριτούς αρμονικούς, ενώ στην υψηλή περιοχή μπορεί να παράγει μόνο τους πρώτους δύο ή τρεις.

Η παρουσία αυτών των αρμονικών καθορίζει την τονική ποιότητα ή το ηχόχρωμα του πιάνου. Οι ψηλές αρμονικές κάνουν το πιάνο να ακούγεται λαμπερό και καθαρό, αλλά όταν είναι υπερβολικά δυνατές, ο ήχος είναι μεταλλικός και οξύς. Οι χαμηλές αρμονικές προσδίδουν στο πιάνο μία τραγουδιστική ποιότητα.

Στα μπάσα, οι χαμηλές αρμονικές είναι ασθενείς ή εντελώς απύσες, ιδίως στα μικρά πιάννα, και οι ψηλότερες αρμονικές (έως την 20ή ή ακόμα περισσότερες) μπορεί να είναι πολύ έντονες. Η παρουσία των χαμηλών αρμονικών στα μεγάλα πιάννα είναι αυτή που κάνει τις μπάσες νότες τους να ακούγονται πιο ξεκάθαρες και ευκολότερες στο χόρδισμα. Ανεβαίνοντας προς την μεσαία περιοχή, οι χαμηλές αρμονικές αποκτούν ένταση και οι ψηλότερες την χάνουν. Οι νότες της τελευταίας οκτάβας έχουν μόλις δύο ή τρεις μετρήσιμες αρμονικές, με την θεμέλια

να κυριαρχεί. Σε αυτή την περιοχή επίσης υπάρχει και αυξημένος θόρυβος, από τον χαμηλής συχνότητας ήχο που κάνει το πλήκτρο όταν χτυπά την βάση, αλλά και τον θόρυβο του σφυριού που χτυπάει τις χορδές.

Όλες οι αρμονικές δημιουργούνται αμέσως αφού η χορδή ξεκινά να πάλλεται, αλλά οι εντάσεις τους διαφέρουν κατά την διάρκεια ήχησης της νότας. Συνήθως, οι υψηλές αρμονικές σβήνουν πιο γρήγορα – η χοιρά ξεκινά λαμπερή αλλά σκοτεινιάζει γρήγορα, καθώς μόνο οι χαμηλές αρμονικές παραμένουν. Κάποιες χαμηλές και μεσαίες αρμονικές μπορεί να σβήνουν γρήγορα, αλλά ξαναέρχονται στην επιφάνεια καθώς οι ψηλότερες σβήνουν. Αυτή η «άνθηση» (bloom) γίνεται αντιληπτή σαν φωνητική ποιότητα που δίνει στο πιάνο έναν τραγουδιστό χαρακτήρα.

1.4.2 Διακρότημα

Όταν δύο ημιτονοειδή ηχητικά κύματα ξεκινούν ταυτόχρονα και προς την ίδια κατεύθυνση, η συνδυασμένη τους ενέργεια αυξάνει και το πλάτος της ταλάντωσης μεγαλώνει – σε αυτή την περίπτωση έχουν ίδια φάση. Όταν είναι εκτός φάσης, το τελικό πλάτος ταλάντωσης μπορεί να γίνει έως και μηδενικό, ακυρώνοντας το ένα το άλλο. Διακρότημα εμφανίζεται όταν δύο ηχητικά κύματα έχουν διαφορετική συχνότητα και έτσι το τελικό αποτέλεσμα διακρίνεται από μια ταλάντωση μεταξύ μεγάλου πλάτους (σε φάση) και μικρού πλάτους (εκτός φάσης). Όταν αυτές οι ταλαντώσεις έχουν συχνότητα μεταξύ ενός κύκλου ανά 2 ή 3 δευτερόλεπτα και 10 κύκλων ανά δευτερόλεπτο, γίνονται αντιληπτές σαν διακρότημα. Η συχνότητα του διακροτήματος μπορεί να υπολογιστεί μέσω της αφαίρεσης της τιμής της μίας συχνότητας από την άλλη, και εκφράζεται σε «χτύπους ανά δευτερόλεπτο» (beats per second – bps). Ένα διακρότημα ρυθμού μικρότερου από 0.5 bps (ένας χτύπος κάθε 2 δευτερόλεπτα) γίνεται αντιληπτό σαν αργή κύλιση, ενώ διακροτήματα ταχύτερα των 10 bps γίνονται αντιληπτά σαν ήχοι με τονική υφή.

1.4.3 Συμπίπτουσες Αρμονικές

Οι πρώτες έξι αρμονικές είναι αρκετά εμφανείς στην μεσαία περιοχή του πιάνου, και μερικές από αυτές συμπίπτουν όταν δύο νότες ηχούν ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, εάν κανείς παίζει D2 και A2 μαζί, η τρίτη αρμονική του D2 και η δεύτερη αρμονική του A2 είναι η ίδια νότα, η A3. Τέτοιες συμπίπτουσες αρμονικές εκφράζονται σαν λόγος, στην συγκεκριμένη περίπτωση 3:2. Παρακάτω φαίνονται οι συμπίπτουσες αρμονικές για τα σύμφωνα διαστήματα (Πίνακας 1).

Οι συμπίπτουσες αρμονικές μπορούν εύκολα να ακουστούν σε ένα καλο-χορδισμένο πιάνο, πραγματοποιώντας τις παρακάτω δοκιμές. Πρώτα παίζουμε το A3, κατόπιν το αφήνουμε και παίζουμε το D2, αλλά επικεντρώνουμε την ακοή μας στο A3. Για να απομονώσουμε τον ήχο του A3, που είναι η τρίτη αρμονική του D2, πατάμε απαλά το D2 χωρίς να ακουστεί η νότα και παίζουμε δυνατά και κοφτά το A3. Εάν το πιάνο είναι χορδισμένο, η πρώτη αρμονική του A3 θα διεγείρει την τρίτη αρμονική του D2 συμπαθητικά και η A3 θα γίνει ξεκάθαρα ακουστή μέσα από την D2. Κατόπιν, μπορούμε να παίζουμε την A2 και να προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε την A3 μέσα στον ήχο. Παίζουμε κοφτά την A3 ενώ κρατάμε την A3, εάν είναι απαραίτητο. Μπορούμε επίσης να διεγείρουμε την τρίτη αρμονική του D2 με την συμπίπτουσα δεύτερη αρμονική του A2. Πιέζουμε άηχα την D2 και παίζουμε δυνατά την A2, απελευθερώνοντάς την μετά από 1 δευτερόλεπτο. Θα πρέπει να ακούσουμε την A3 ξεκάθαρα. Τέλος, παίζουμε τις D2 και A2 μαζί (όχι πολύ δυνατά) και συντονίζουμε την ακοή μας στην A3. Αν ακούσουμε προσεκτικά, θα διακρίνουμε ένα διακρότημα.

Παίζουμε την A4 και απελευθερώνουμε. Παίζουμε την D2 και εστιάζουμε στην συχνότητα του A4. Αν δεν μπορούμε να την ακούσουμε, πιέζουμε άηχα την D2 και παίζουμε την A4 δυνατά και κοφτά. Παίζουμε τις D2 και A2 μαζί και εστιάζουμε στην A4. Θα πρέπει να μπορούμε να διακρίνουμε το διακρότημα που δημιουργείται και ένα είναι πιο γρήγορο ή πιο

αργό από αυτό του A3. Εφόσον το A4 είναι η έκτη αρμονική του D2 και η τέταρτη αρμονική του A3, το διακρότημα που δημιουργούν οι δύο είναι τύπου 6:4 συμπιπτουσών αρμονικών.

Οι παραπάνω δοκιμές δείχνουν ότι η κάθε χορδή παράγει πολλαπλές αρμονικές. Όταν δύο νότες συνηχούν, οι αρμονικές τους αλληλεπιδρούν. Όταν οι συχνότητες των συμπιπτουσών αρμονικών είναι ελάχιστα διαφορετικές, εμφανίζεται διακρότημα μεταξύ τους.

Αυτές οι δοκιμές επίσης αποδεικνύουν ότι ένα διάστημα μπορεί να έχει παραπάνω από ένα ζεύγος συμπιπτουσών αρμονικών (3:2 και 6:4 στο παράδειγμά μας), και ότι αυτά τα ζεύγη μπορούν να δημιουργούν πολλαπλά διακροτήματα ταυτόχρονα. Ο λόγος για τον οποίο παρουσιάζονται αυτά τα διακροτήματα έχει να κάνει με το σύστημα του ισοσυγκερασμού. Αντίστοιχα, ο λόγος για τον οποίο τα διακροτήματα δεν είναι ίδιας συχνότητας σε διαφορετικούς συνδυασμούς αρμονικών καθορίζεται από την «επέκταση» (stretch) λόγω της δυσαρμονικότητας.

Το αυτί ξεχωρίζει το επικρατές ζεύγος συμπιπτουσών αρμονικών και το αντιλαμβάνεται σαν το «κυρίαρχο διακρότημα» του διαστήματος. Από την μεσαία περιοχή έως την υψηλή, η διαδικασία είναι ενστικτώδης. Στην χαμηλή περιοχή, όμως, περισσότερες από 20 αρμονικές μπορεί να είναι αρκετά ισχυρές, και πολλαπλά ζεύγη αρμονικών αντίστοιχα ισχυρά. Αυτό μπορεί να μπερδέψει το αυτί, και είναι ο λόγος που χρησιμοποιούμε διάφορα βοηθητικά διαστήματα για δοκιμές.

1.4.4 Σύμφωνα και Διάφωνα Διαστήματα

Αν και υπάρχουν πολλοί ορισμοί, για την παρούσα εργασία δεχόμαστε σαν σύμφωνα διαστήματα εκείνα που ο λόγος του χαμηλότερου ζεύγους συμπιπτουσών αρμονικών σχηματίζεται από χαμηλούς αριθμούς (Πίνακας 1). Είναι ενδιαφέρον ότι κατά τον Μεσαίωνα μόνο η καθαρή 8^η (οκτάβα), η 5^η και η 4^η (η 4^η είναι αναστροφή της 5^{ης}) θεωρούνταν σύμφωνες.

Κατά τον 16^ο αιώνα, η M3^η και μ3^η, καθώς και οι αναστροφές τους, μ6^η και M6^η, άρχισαν να θεωρούνται σύμφωνες επίσης.

Σήμερα, διάφωνα διαστήματα θεωρούνται τα εξής: μ2^η, M2^η, α4^η, ε5^η, μ7^η, M7^η. Η α4^η (αυξημένη 4^η) και η εναρμόνιά της, ε5^η (ελαττωμένη 5^η), ονομάζονται και «τρίτονο», και θεωρούνται το πλέον διάφωνο διάστημα.

1.4.5 Hertz, Διακρότημα και Cents

Το τονικό ύψος εκφράζεται ως το πλήθος των ταλαντώσεων στην μονάδα του χρόνου ή hertz (Hz). Ανεβαίνοντας οκτάβες, η συχνότητα διπλασιάζεται. Για παράδειγμα, εάν η πρώτη αρμονική της A4 πάλλεται στα 440 Hz, η πρώτη αρμονική της A5 βρίσκεται στα 880 Hz, της A6 στα 1760 Hz κ.ο.κ. Με κάθε μείωση οκτάβας, η συχνότητα υποδιπλασιάζεται: A3 στα 220 Hz και A2 στα 110 Hz.

Εάν η υψηλή νότα σε μία οκτάβα αποκλίνει από την διπλάσια τιμή της χαμηλής κατά 1 Hz προς τα πάνω ή προς τα κάτω – για παράδειγμα, εάν η A3 είναι στα 220 Hz και η A4 στα 441 ή 439 Hz – οι 2:1 αρμονικές δημιουργούν διακρότημα 1 bps. Εάν η υψηλή νότα αποκλίνει κατά 5 Hz, το διακρότημα θα είναι 5 bps. Επειδή ο αριθμός των χτύπων ανά δευτερόλεπτο συνδέεται με την συχνότητα, ίδιο ποσοστό απόκλισης σχετικά με τον λόγο του διαστήματος διπλασιάζεται σε bps με κάθε αύξηση της οκτάβας, και υποδιπλασιάζεται με κάθε μείωση αυτής. Για αυτόν τον λόγο, είναι πιο βολικό να εκφράζουμε το ποσοστό απόκλισης, για παράδειγμα όταν υπολογίζουμε αποκλίσεις συγκερασμών και χορδισμάτων, ως κλάσμα του διαστήματος, σε cents. Ένα cent είναι 1/100 του ημιτονίου του ισοσυγκερασμένου συστήματος. Έτσι, μία θεωρητική οκτάβα αποτελείται από 1200 cents. Στο παραπάνω παράδειγμα, μία απόκλιση 1 Hz, που προκαλεί διακρότημα 1 bps στα 440 Hz (A4), ισοδυναμεί με περίπου 4 cents. Στα 880 Hz (A5), 4 cents δημιουργούν διακρότημα 2 bps· στα 1760 Hz (A6), 4 bps· κ.ο.κ.

1.4.6 Ισοσυγκερασμός

Ο ισοσυγκερασμός διαιρεί την οκτάβα σε 12 «ίσα» διαστήματα, καθιστώντας τον λόγο των συχνοτήτων στα ημοτόνια (μικρή 2^η) πάντα ίδιο. Σε αυτή την συνθήκη, οι οκτάβες δεν παρουσιάζουν διακρότημα, αλλά όλα τα άλλα διαστήματα είναι αλλοιωμένα ως ένα βαθμό. Κάποια διαστήματα χορδίζονται μικρότερα («στενά») και κάποια μεγαλύτερα («ευρεία») της τιμής που προκύπτει από τον λόγο ακέραιων αριθμών. Στην μεσαία περιοχή, οι 5^{ες}, που χορδίζονται στενές και οι 4^{ες}, που χορδίζονται ευρείες, έχουν ένα αργό διακρότημα (μικρότερο από 1bps), ενώ οι M3^{ες} (ευρείες), οι μ6^{ες} (στενές), μ3^{ες} (στενές), και M6^{ες} (ευρείες) κτυπούν σε έναν ρυθμό αρκετών bps και ανοίκουν στην κατηγορία των “διαστημάτων μεγάλου διακροτήματος”.

Οι θεωρητικοί ρυθμοί διακροτήματος διπλασιάζονται με κάθε οκτάβα, κάνοντας τα ίδια διαστήματα να κτυπούν σε διαφορετικούς ρυθμούς σε διαφορετικές περιοχές. Ευτυχώς, ένας χορδιστής δεν απαιτείται να απομνημονεύσει και να μετράει διακροτήματα όταν χορδίζει ακουστικά («με το αυτί»). Αντί αυτού, χρησιμοποιεί διάφορα βοηθητικά διαστήματα.

Διάστημα	Συμπίπτουσες Αρμονικές	Ποιότητα	Διακρότημα
8 ^η	2:1	Απόλυτη	Καθόλου
5 ^η	3:2	Στενή	Αργό
4 ^η	4:3	Ευρεία	Αργό
M3 ^η	5:4	Ευρεία	Γρήγορο
μ3 ^η	6:5	Στενή	Γρήγορο
M6 ^η	5:3	Ευρεία	Γρήγορο
μ6 ^η	8:5	Στενή	Γρήγορο

Πίνακας 1 Χαμηλότερες Συμπίπτουσες Αρμονικές και Ποιότητα Σύμφωνων Διαστημάτων του Ισοσυγκερασμού

1.4.7 Δυσαρμονικότητα – Επέκταση

Η ιδανική παλλόμενη χορδή παράγει αρμονικές συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελίου. Στην πραγματικότητα όμως, οι συχνότητες αυτές έχουν μεγαλύτερο τονικό ύψος από τις θεωρητικές τους τιμές, που καθορίζεται από τον συντελεστή δυσαρμονικότητας. Κάθε χορδή του πιάνου έχει διαφορετικό συντελεστή, ο οποίος επηρεάζεται από το υλικό, την διάμετρο, το μήκος και την τάση αυτής. Ο σχεδιαστής ενός πιάνου έχει σαν στόχο να ταιριάζει αυτούς τους συντελεστές, προκειμένου να επιτύχει ομοιογένεια και ευκολία κατά το χόρδισμα.

Ο χορδιστής του πιάνου, μη μπορώντας να αγνοήσει το αποτέλεσμα της δυσαρμονικότητας στον ήχο, αναγκάζεται να επεκτείνει τα διαστήματα κατά ένα μικρό ποσοστό, εισάγοντας αυτό που διεθνώς αναφέρεται σαν stretch. Έτσι, η μόνη νότα που είναι απόλυτα χορδισμένη σύμφωνα με την θεωρητική της τιμή είναι το A4 (ή οποιαδήποτε άλλη νότα έχει επιλεγεί σαν διαπασών) και όλες οι νότες πάνω από αυτήν χορδίζονται σταδιακά πιο ψηλά, και αντίστοιχα προς τα μπάσα χορδίζονται πιο χαμηλά από τις ονομαστικές τους τιμές.

Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος του οργάνου, διότι οι σχεδιαστικές υποχωρήσεις ως προς τα χαρακτηριστικά των χορδών – και ιδιαίτερα των μπάσων – είναι εντονότερες. Εφόσον, κατά την δημιουργία του παρόντος συστήματος έγινε η παραδοχή μηδενικής δυσαρμονικότητας, δεν κρίνεται σκόπιμη η περεταίρω ανάλυση του φαινομένου.

1.5 Συνθετητές και Λογισμικό

Σε επίπεδο λογισμικού και υλισμικού έχουν γίνει πολλές υλοποιήσεις που στοχεύουν σε εκείνους που θέλουν να εξερενήσουν ένα πεδίο πέρα από τον ισοσυγκερασμό. Το Korg ps3100 ήταν ένας πολυφωνικός συνθετητής, που κατασκευάστηκε το 1977 και διέθετε - εκτός των

άλλων - 12 ποτενσιόμετρα, καθένα εκ των οποίων ρύθμιζε το τονικό ύψος της κάθε νότας (A, A#, B...), τοποθετημένα στο αριστερή περιοχή του πίνακα ελέγχου, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στον εκτελεστή να μεταβάλλει τα τονικά ύψη, σε επίπεδο μικροκουρδίσματος, κατά την διάρκεια της ερμηνείας. Το συγκεκριμένο όργανο έδωσε και την αρχική ιδέα για την δημιουργία του συστήματος της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 1 Korg ps3100

Ο μινιμαλιστής συνθέτης Terry Riley είχε τροποποιήσει το ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Yamaha YC45D ώστε να είναι κουρδισμένο σε Just Intonation, εμπνευσμένος από την ινδική μουσική παράδοση. Αργότερα, πειραματίστηκε με το Prophet 5 της Sequential Circuits, το οποίο διέθετε την δυνατότητα εναλλακτικών συστημάτων συγκερασμού. Πόλλοι άλλοι συνθέτες επίσης εξέφρασαν μία τάση απόσχισης από το σύστημα του Ισοσυγκερασμού με φυσικά όργανα και κυρίως το πιάνο, όπως οι: LaMonte Young, Lou Harrison, Julian Carrillo.

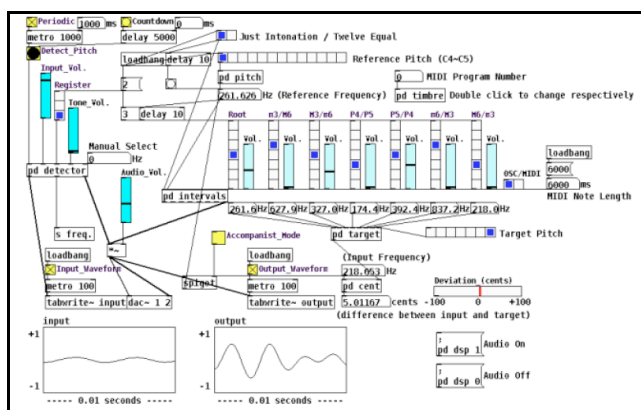
Η Wendy Carlos, μέσα από την ενασχόλησή της με τους υπολογιστές, εφάρμοσε στην μουσική της κλίμακες από το Μπαλί και Just Intonation, και επινόησε δικές τις όπως: Harmonic, Alpha, Beta, Gamma. (Carlos, 1987)

Ο συνθέτης Harry Partch στο βιβλίο του “Genesis Of A Music” περιγράφει το σύστημα Just Intonation που χρησιμοποίησε και τα όργανα που κατασκεύασε ειδικά για την ερμηνεία της μουσικής του. Θεωρεί τον J.S.Bach υπεύθυνο για το κατρακύλισμα της μουσικής σύνθεσης στον δυτικό κόσμο προς τον ισοσυγκερασμό. (Partch, 1949)

Το 2017, η Korg παρουσίασε το Monologue, ένα μονοφωνικό συνθετητή που είναι επίσης φιλικό προς τα εναλλακτικά χορδίσματα. Η Moog διαθέτει πλέον λογισμικό ώστε ο καθένας να μπορεί να εξοπλίζει το Moog συνθετητή του με εναλλακτικά χορδίσματα, αναθέτοντας μία τιμή pitch bend σε κάθε νότα από τις 12 της χρωματικής κλίμακας. Ο συνθετητής Virus της εταιρίας Access διαθέτει επιλογή Hermode Tuning, επινόηση του Werner Mohrlök, το οποίο απαντάται και στο πρόγραμμα Logic Pro της Apple. (Ευρεσιτεχνία Αρ. US5442129A , 1987). Αυτό είναι ένα σύστημα προσαρμοστικού χορδίσματος (adaptive tuning) που επιτρέπει σε ψηφιακά ελεγχόμενα όργανα, να είναι διαμορφώνουν το χόρδισμα των νοτών δυναμικά, ώστε κάθε στιγμή να επιτυγχάνεται ένα αποτέλεσμα κοντά στο JI, επιτρέποντας έτσι πολλαπλές αρμονικές μετατροπές. (Sethares, 2005)

Το 2002, ο David Loberg Code παρουσίασε το “Groven.Max”, ένα σύστημα που αποτελείται από έναν υπολογιστή που μέσω ενός προγράμματος ελέγχει τρία Yamaha Disklavier, χορδισμένα έτσι ώστε να δημιουργείται μία 36-τονη κλίμακα, αποδίδοντας φόρο τιμής στον συνθέτη Eivind Groven. (Code, 2002) Το λογισμικό BitKlavier, διευκολύνει την ερμηνεία και σύνθεση μουσικής σε ένα μικροτονικό περιβάλλον, με αφετηρία την έννοια του προετοιμασμένου πιάνου. Οι δημιουργοί του, Dan Trueman και Mike Mulshine είναι καθηγητές στο Princeton University. (Trueman, n.d.) Η εταιρία Kelfar Technologies εξειδικεύεται στην κατασκευή λογισμικού και συσκευών που υπηρετούν εκείνους που θέλουν να συνθέσουν ή να ερμηνεύσουν μουσική σε συστήματα διαφορετικά από τον ισοσυγκερασμό. Χαρακτηριστική είναι η εφαρμογή WorldScales. (El-Far, n.d.)

Το Scala είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο δωρεάν πρόγραμμα, δημιούργημα του Manuel Op de Coul, του ινστιτούτου Huygens-Fokker που βοηθά στην δημιουργία και επεξεργασία κλιμάκων και την σύγκριση, ανάλυση και αποθήκευση διαφόρων χορδισμάτων. Συνεργάζεται με τα περισσότερα λογισμικά και υλισμικά, ενώ η διαθέσιμη βιβλιοθήκη του είναι τεράστια. (Coul, n.d.) Το “Harmonic Intonation Trainer” είναι ένα πρόγραμμα κατασκευασμένο σε Pure Data, που στοχεύει στην εκπαίδευση των εκτελεστών πνευστών οργάνων. Το πρόγραμμα μπορεί να λειτουργήσει είτε σαν βοήθημα χορδίσματος είτε σαν μουσική συνοδεία. Η δημιουργία του σε Pd παρέχει εύκολη πρόσβαση και παραμετροποίηση. (Lin & Lin, 2015)

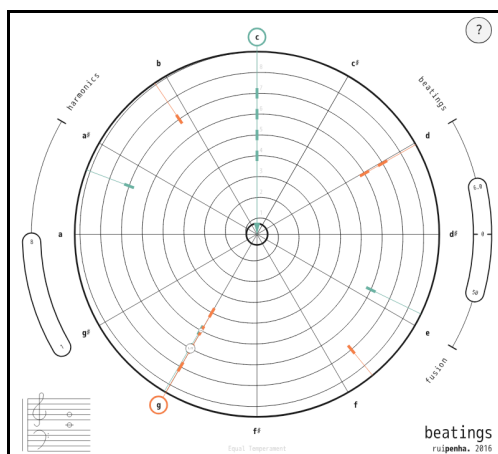


Εικόνα 2 Harmonic Intonation Trainer

Το 2015, οι Dallin S. Durfee και John S. Colton παρουσίασαν το Temperament Studio, μία δωρεάν εφαρμογή γραμμένη σε γλώσσα Java, όπου ο χρήστης μπορεί να ακούσει διαστήματα σε διάφορα χορδίσματα και να φορτώσει και μουσικά κομμάτια σε μορφή MIDI, ώστε να εκτελεστούν από το πρόγραμμα. (Durfee & Colton, 2015)

Στο συνέδριο SMC του 2016 ο Rui Penha παρουσίασε την εφαρμογή “Beatings”, φτιαγμένη σε p5.js που προσομοιάζει τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την συνήχηση νοτών διαφόρων συστημάτων, και μπορεί να τρέξει μέσα από τον περιηγητή διαδικτύου. Ο χρήστης

μπορεί να ενεργοποιήσει νότες και αρμονικές και να πειραματιστεί με διάφορα χορδίσματα, χωρίς κάποιον αντικειμενικό στόχο. (Penha & Bernardes)



Εικόνα 3 Beatings

Στο ίδιο συνέδριο, οι Μόσχος, Γεωργάκη, Κουρουπέτρογλου παρουσίασαν το «Φωνασκείν», μία ψηφιακή εφαρμογή σε περιβάλλον Max/MSP, που στοχεύει στην εξοικείωση και εκπαίδευση σπουδαστών φωνητικής με σύγχρονες και αρχαίες κλίμακες. (Moschos, Georgaki, & Kouroupetroglou, 2016)

1.6 Τεχνική χορδίσματος του πιάνου και ηλεκτρονικά βοηθήματα

Κατά το χόρδισμα μιας χορδής, ο τεχνικός πρέπει να μπορεί να κατέχει τρεις ικανότητες:

- Τεχνική φυσικού χειρισμού του συστήματος tuning hammer – pin – χορδή
- Γνώση του τονικού ύψους-στόχου
- Ακουστική ανάλυση των διακροτημάτων των διαστημάτων

Με την βοήθεια των ETDs, πλέον ο τεχνικός μπορεί να απομονώσει και να αναπτύξει την πρώτη τεχνική. Έχοντας οπτική απεικόνιση του τονικού ύψους ανά πάσα στιγμή, ο τεχνικός μπορεί να αξιολογήσει πόσο καλά χειρίζεται το μηχανικό μέρος της διαδικασίας. Έτσι

αναπτύσσει και ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της τεχνικής που είναι η σταθερότητα στον χρόνο. Οι τάση της χορδής είναι τόσο μεγάλη και τα σημεία τριβής τόσα πολλά, που δεν αρκεί να τοποθετηθεί η χορδή στο σωστό τονικό ύψος. Πρέπει και να γίνει βέβαιο ότι η τάση έχει ισοκατανεμηθεί σε όλα τα επιμέρους σημεία, ώστε να μην διατρέχει τον κίνδυνο να αποσταθεροποιηθεί και κατ'επέκταση να αποκλίνει από τον σωστό τόνο σε περίπτωση που δεχθεί πολλά δυνατά χτυπήματα από το σφυρί, όπως όταν ο εκτελεστής παίζει fortississimo.

Η δεύτερη ικανότητα αναπτύσσεται μέσω της μελέτης των μαθηματικών του συγκερασμού και των στρατηγικών βημάτων μέσω ακουστικών συγκρίσεων και ελέγχων μουσικών διαστημάτων. Υπάρχουν πολλές αλληλουχίες χορδίσματος, ξεκινώντας από το A4 και όλες χρησιμοποιούν διαστήματα χορδίσματος και διαστήματα ελέγχου. Πάντα, ο τεχνικός καλείται να μετράει και να συγκρίνει ρυθμούς διακροτημάτων.

Η τρίτη ικανότητα, το να μπορεί να καταλαβαίνει τι ακούει και να μπορεί να εστιάζει μόνο στις φασματικές περιοχές που ενδιαφέρουν είναι κάτι που μπορεί να καλλιεργηθεί μέσω της εξάσκησης με το λογισμικό της παρούσας εργασίας. Ο εκπαιδευόμενος μπορεί να ακούσει στο ιδανικό περιβάλλον του υπολογιστή το διακρότημα των διαστημάτων, να πειραματιστεί με διάφορες αλληλουχίες χορδίσματος, με εναλλακτικά χορδίσματα, και να καλλιεργήσει την ακοή του χωρίς να χρειαστεί να ασχοληθεί με την φυσική τεχνική της διαδικασίας.

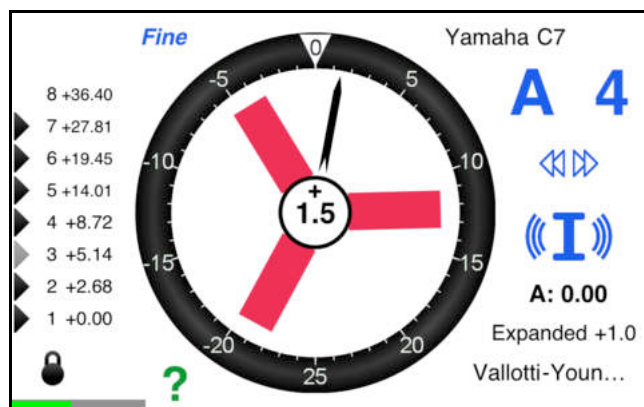
1.7 Ηλεκτρονικές Συσκευές Χορδίσματος (ΗΣΧ)

Οι απλές ΗΣΧ εμφανίστηκαν πριν μερικές δεκαετίες. Ογκώδεις και βαριές στροβοσκοπικές συσκευές, όπως το Conn Strobotuner, κυριάρχησαν στην αγορά μέχρι που την δεκαετία του 1970 πήραν τα νιά οι «χρωματικές συσκευές χορδίσματος» που διέθεταν ταλαντωτές με κρυστάλλους χαλαζία, με πρωτοπόρο την Korg. Όντας ελαφριές και με μπαταρία, σύντομα βρέθηκαν στο βαλιτσάκι σχεδόν κάθε τεχνικού πιάνου.

Στις αρχές του 1980 η εταιρία Inventronics παρουσίασε την πρώτη προηγμένη ΗΣΧ, με το όνομα Accu-Tuner[®]. Αυτή η συσκευή μπορούσε να μετρήσει την δυσαρμονικότητα και να δημιουργήσει ένα χόρδισμα που ταίριαζε στο εκάστοτε όργανο. Επέτρεπε επίσης στον τεχνικό να αποθηκεύσει και να αναπαράγει ολόκληρα χορδίσματα με απίστευτη ακρίβεια. Σύντομα το Σωματείο των Τεχνικών Πιάνου (PTG) άρχισε να χρησιμοποιεί το Accu-Tuner για την εξέταση χορδίσματος, όπου πλέον οι εξεταστές μπορούσαν να βαθμολογήσουν και να συγκρίνουν εύκολα το χόρδισμα του εξεταζόμενου με ένα άλλο (master tuning) που είχαν δημιουργήσει και αποθηκεύσει εκ των προτέρων.

Άλλες συσκευές ακολούθησαν, όπως το Reyburn CyberTuner[®], το Verituner[®], και το TuneLab, που όπως το Accu-Tuner έχουν την δυνατότητα να προσαρμόζουν αυτόματα το χόρδισμα στα χαρακτηριστικά του πιάνου και να αποθηκεύουν ολόκληρα χορδίσματα. Η τελευταίες υλοποιήσεις είναι σε μορφή λογισμικού για υπολογιστές, τηλέφωνα και φορητές συσκευές. Αυτές οι εφαρμογές, πολλές φορές είναι πιο αξιόπιστες από τις αντίστοιχες συσκευές που προηγήθηκαν.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην αγορά υπάρχει ένας πακτωλός απλών χρωματικών συσκευών, που όμως είναι εντελώς ακατάλληλες για το χόρδισμα του πιάνου, αφού υπολείπονται σε ακρίβεια και δεν επιτρέπουν την επεξεργασία αρμονικών συχνοτήτων. Όλες οι ΗΣΧ συγκρίνουν την συχνότητα ενός ήχου με μία εσωτερικά δημιουργούμενη συχνότητα-«στόχο» και απεικονίζουν την απόκλιση μέσω λυχνιών, βελόνης, οθόνης LCD ή την οθόνη μιας φορητής συσκευής. Μία ΗΣΧ για πιάνο πρέπει να έχει την δυνατότητα ανίχνευσης αποκλίσεων της τάξης τουλάχιστον του 0,5 cent.



Εικόνα 4 Veritune

Για παράδειγμα, το λογισμικό Veritune, (Εικόνα 4) καλεί αρχικά τον χρήστη να παίζει και να χορδίζει την A4 του πιάνου. Το λογισμικό συλλέγει και αποθηκεύει τις συχνότητες των πρώτων οκτώ (ανάλογα την περιοχή και τις παραμέτρους, αυτό ενδέχεται να αλλάζει) αρμονικών της συγκεκριμένης νότας. Ανάλογα με την ρύθμιση που έχει γίνει από τον χρήστη σχετικά με τον επιθυμητό βαθμό επέκτασης της οκτάβας, το λογισμικό υπολογίζει την συχνότητα στην οποία πρέπει να χορδιστεί το A3. Έτσι, σαν δεύτερο βήμα, ο χρήστης παίζει την A3 και την χορδίζει βάσει του στόχου που τέθηκε αμέσως προηγουμένως. Με χορδισμένες και δεδομένες τις νότες A3 και A4, το λογισμικό πλέον διαιρεί την κεντρική οκτάβα σε 12 ίσα μέρη (με δεδομένη την επιθυμία για ισοσυγκερασμό) και ο χρήστης αρχίζει να χορδίζει χρωματικά από το A#3 έως το G#4. Βάσει των τιμών που το λογισμικό έχει συλλέξει για όλες τις νότες της κεντρικής οκτάβας – που ονομάζεται και «οκτάβα του συγκερασμού» – θέτει τους στόχους για τις αμέσως επόμενες νότες. Ο χρήστης χορδίζει χρωματικά έως το C8 και κατόπιν από το G#3 επίσης χρωματικά αλλά καθοδικά μέχρι το A0. Μέσω της σύντομης αυτής περιγραφής γίνεται φανερό ότι το λογισμικό είναι πάντα ένα βήμα μπροστά, ακούγοντας κάθε νότα του οργάνου και στοχοθετεί την συχνότητα των επερχόμενων νοτών βάσει των δεδομένων που συλλέγει και των παραμέτρων που έχει θέσει ο χρήστης.

Μπορούν να ειπωθούν πολλά γύρω από την ολοένα και αυξανόμενη χρήση των ΗΣΧ από επαγγελματίες και ερασιτέχνες χορδιστές πιάνων. Κάποιοι υποστηρίζουν ότι αυτές οι συσκευές

αφενός δεν δίνουν καλαίσθητα αποτελέσματα (και συνεπώς θεωρούνται κακά χορδίσματα) και αφετέρου απομακρύνουν τον τεχνικό από το όργανο. Είναι ένα πεδίο το οποίο χρήζει επιστημονικής τεκμηρίωσης με πειραματικές διαδικασίες που θα συγκρίνουν τα αποτελέσματα χορδίσματος με και χωρίς ΗΣΧ.

Το σίγουρο είναι ότι οι συσκευές αυτές αποδεικνύονται σωτήριες σε περιπτώσεις οργάνων κακής ποιότητας, αλλά και σε συνθήκες αυξημένου θορύβου. Ένας τεχνικός που χορδίζει πολύ συχνά ένα όργανο, αφού καταστασταλάξει σε ένα χόρδισμα που θεωρεί καλό, μπορεί να το αποθηκεύσει και να το αναπαράγει εύκολα κάθε φορά, χωρίς να αναγκάζεται να «ξανα-ανακαλύπτει τον τροχό».

2. ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Σκοπός του συστήματος

Το σύστημα της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε με στόχο την ακουστική εξάσκηση των εκπαιδευόμενων χορδιστών πιάνου. Από τα πρώτα βήματα της παραδοσιακής εκπαίδευσης, ο μαθητευόμενος καλείται να εξασκήσει τις ακουστικές του ικανότητες ταυτόχρονα με τις φυσικές ικανότητες χειρισμού του μηχανικού μέρους του πιάνου. Είναι μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, που δυσκολεύει ακόμα περισσότερο όταν δεν υπάρχει στενή επιτήρηση και καθοδήγηση από κάποιον έμπειρο εκπαιδευτή. Ακόμη και εάν ο μαθητής έχει μουσικές γνώσεις, είναι σχεδόν αδύνατο να ξεχωρίσει το διακρότημα που κάνουν κάποιοι συγκεκριμένοι συνδυασμοί συμπιπτουσών αρμονικών, και τελικά να αξιολογήσει με ακρίβεια τις επιδόσεις του.

Την λύση στην ακριβή αξιολόγηση έχει δώσει η χρήση των ETDs, που με μεγάλη ακρίβεια ποσοτικοποιούν την απόκλιση του αποτελέσματος από το ιδανικό. Ο μαθητής πλέον βλέπει με νούμερα την πρόοδό του και έτσι δεν απαιτείται η συνεχής αξιολόγηση από κάποιον επιβλέποντα. Εναλλακτικά, με αυτόν τον τρόπο, ο μαθητής μπορεί να στρέψει την προσοχή του στην βελτίωση της τεχνικής του με το μηχανικό μέρος, αφού δεν χρειάζεται να ακούει, παρά μόνο βλέπει την κίνηση της βελόνας της συσκευής. Εδώ και πολλά χρόνια, τα ETDs χρησιμοποιούνται από τους εξεταστές για την βαθμολόγηση και πιστοποίηση των τεχνικών πιάνου για το Piano Technicians Guild στις ΗΠΑ.

Με το παρόν σύστημα, ο μαθητής μπορεί να αναπτύξει τις ακουστικές του δεξιότητες χωρίς να απασχολείται με την τεχνική, και το σημαντικότερο χωρίς να βρίσκεται μπροστά στο όργανο. Ο διδάσκων

2.2 Pure Data

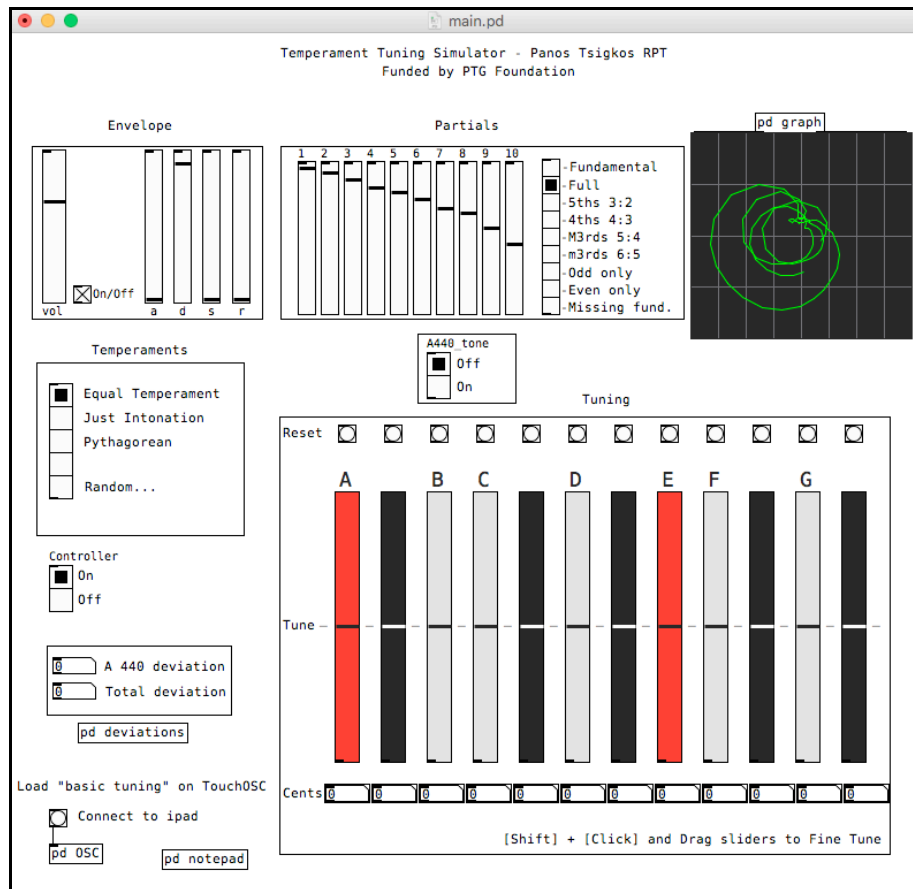
Το Pure Data (Pd) είναι μία οπτική γλώσσα προγραμματισμού και περιβάλλον για εφαρμογές ήχου και εικόνας. Είναι ανοικτού κώδικα και δημιουργήθηκε από τον Miller Puckette

την δεκαετία του 1990. Οπτική (ή γραφική) ονομάζεται μία γλώσσα που ο χρήστης αντί να συντάσσει κώδικα (μία σειρά από λέξεις και σύμβολα που έχουν ειδικό νόημα σε αυτήν την γλώσσα προγραμματισμού), χρησιμοποιεί ένα γραφικό περιβάλλον για να δημιουργήσει προγράμματα, όπου στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα «κουτί» αντιπροσωπεύει μία συγκεκριμένη διεργασία, και ενώνει αυτά τα κουτιά με γραμμές, που ομοιάζουν συνδετικά καλώδια αναλογικών συσκευών. Αυτό το είδος προγραμματισμού επίσης ονομάζεται προγραμματισμός ροής δεδομένων λόγω του τρόπου με τον οποίο συνδέονται τα κομμάτια του προγράμματος, δείχνοντας πώς ρέουν τα δεδομένα από το ένα μέρος του προγράμματος σε ένα άλλο.

Ο οπτικός προγραμματισμός μπορεί να έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τον προγραμματισμό κειμένου. Αρχικά, είναι πολύ ευέλικτος και γρήγορος για την κατασκευή πρωτοτύπων, ενώ σε πολλές γλώσσες κειμένου απαιτείται ένας αριθμός από γραμμές κώδικα για την δημιουργία έστω και μιας απλής κατασκευής. Επίσης, μπορεί να ειπωθεί ότι ο οπτικός προγραμματισμός είναι πιο απτός από τον κειμένου. Όταν μη-προγραμματιστές έρθουν σε επαφή με οπτικό κώδικα, είναι πολύ πιθανό ότι θα αποκτήσουν καλύτερη ιδέα του τι συμβαίνει σε σχέση με έναν αντίστοιχο κειμένου. Από την άλλη, υπάρχουν και μειονεκτήματα και περιορισμοί που έχουν να κάνουν με τις αλυσίδες του DSP, και την κατανάλωση επεξεργαστικής ισχύος από το γραφικό περιβάλλον. Παρόλα αυτά, το Pd είναι ένα πολύ ισχυρό και ευέλικτο εργαλείο προγραμματισμού και χρησιμοποιείται ευρέως από επαγγελματίες και ερασιτέχνες ανά τον κόσμο. (Drymonitis, 2015)

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του Pd είναι ότι μπορεί να εκτελεστεί σε οποιαδήποτε πλατφόρμα (Windows, Mac, Linux, Android) και συνεπώς σε συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα και embedded computers όπως το Raspberry Pi.

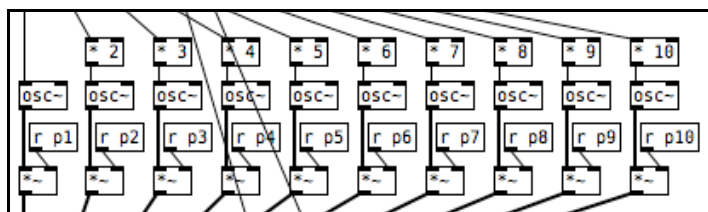
2.3 Σχεδιασμός του συστήματος



Εικόνα 5 Κυρίως παράθυρο

Το σύστημα χτίστηκε γύρω από την βασική μηχανή παραγωγής ήχου με την λογική του προσθετικού μοντέλου σύνθεσης (additive synthesis) και του χειρισμού παραμέτρων που έχουν να κάνουν με το τονικό ύψος κάθε νότας και το ηχόχρωμα.

Στο πεδίο “Envelope” ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει την συνολική ένταση του προγράμματος, να εκκινήσει την DSP μηχανή του Pd, και να διαμορφώσει την περιβάλλουσα του ήχου (attack, decay, sustain, release). Η αρχική ρύθμιση παράγει μια περιβάλλουσα όμοια με αυτή του φυσικού πιάνου, αλλά ο χρήστης μπορεί να επέμβει και να μεγαλώσει την διάρκεια ή να αλλάξει τον απόηχο. Στην Εικόνα 6 φαίνεται λεπτομέρεια από το υποπρόγραμμα που υπολογίζει και προσθέτει τις αρμονικές συχνότητες που διαμορφώνουν το τελικό ηχόχρωμα, σαν ακέραια πολλαπλάσια της θεμελίου.



Εικόνα 6 Δημιουργία αρμονικών

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί η παραδοχή σχετικά με την μηδενική τιμή δυσαρμονικότητας. Μία από τις μελλοντικές επεκτάσεις του προγράμματος είναι να ενσωματώσει συντελεστές που θα κάνουν τις αρμονικές να αποκλίνουν από ακέραια πολλαπλάσια της θεμελίου, με στόχο να προσομοιωθεί ακριβέστερα η φυσική της πραγματικής παλλόμενης χορδής.

Το πλάτος ταλάντωσης κάθε αρμονικής καθορίζεται από το πεδίο “Partials”. Εκτός από χωριστή ρύθμιση κάθε αρμονικής, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από μία σειρά προκαθορισμένων συνδυασμών. Στην θέση “Fundamental”, ηχεί μόνο η θεμέλιος κάθε νότας. Σε αυτήν την ρύθμιση, δεν ηχούν οι συμπίπτουσες αρμονικές και το μόνο διακρότημα που μπορεί να ηχήσει σε ένα διάστημα 5^{ης} για παράδειγμα, είναι εκείνο που προκαλείται όταν η φάση τους λαμβάνει κοινή τιμή, δηλαδή κάθε 2 κύκλους της χαμηλής και 3 κύκλους της υψηλής συχνότητας. Στην θέση “Full” – που είναι και η προεπιλεγμένη κατά την έναρξη του συστήματος – γίνεται μία μίξη που εμπεριέχει όλες τις αρμονικές, ώστε ο ήχος να έρθει πιο κοντά σε εκείνον του πιάνου. Οι επόμενες επιλογές βοηθούν τον χρήστη να εστιάσει την ακοή του στις συμπίπτουσες αρμονικές, απομονώνοντας όλες τις άλλες. Έτσι, εναλλάσσοντας μεταξύ πχ του “Full” και του “M3rds” μπορεί να εντοπίσει ακριβώς που δημιουργείται το διακρότημα και να μπορέσει να το αναγνωρίσει πιο εύκολα σε πραγματικές συνθήκες χορδίσματος.

Οι επιλογές “Odd only” και “Even only” εισάγουν πρακτικά τον χρήστη στο πόσο δραστικά αλλάζει το ηχόχρωμα βάσει της ύπαρξης ή μη κάποιων αρμονικών. Η επιλογή “Odd only” παράγει μία χροιά κοντά στο κλαρινέτο, ενώ η “Even only” ηχεί πιο κοντά σε

εκκλησιαστικό όργανο. Τέλος, η επιλογή “Missing fund.” συστήνει τον χρήστη σε ένα φαινόμενο της ψυχοακουστικής, κατά το οποίο, εάν ηχούν όλες οι υπόλοιπες αρμονικές, πλην της θεμελίου, ο ανθρώπινος εγκέφαλος συνεχίζει να αντιλαμβάνεται την ίδια νότα, με μία διαφορά μόνο στο ηχόχρωμα. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται σε κάθε πιάνο, περίπου στις 2 χαμηλές οκτάβες, καθώς ενώ η θεμέλια παράγεται από την χορδή, δεν μπορεί να αναπαραχθεί από το ηχείο λόγω περιορισμένων διαστάσεων αυτού. Το φαινόμενο αυτό γίνεται περισσότερο αντιληπτό σε όργανα που διαθέτουν μικρό ηχείο και προορίζονται για οικιακή χρήση.

Στο πεδίο “pd graph” φαίνεται μία γραφική αναπαράσταση του τελικού ήχου που παράγεται από το πρόγραμμα, κατά Hilbert. Μέσω του μετασχηματισμού Hilbert γίνεται ανάλυση του ηχητικού σήματος σε πραγματικό και φανταστικό μέρος και αυτά στην συνέχεια αντιστοιχίζονται στους άξονες x και y . Έτσι, ένα ημίτονο δημιουργεί έναν κύκλο στο γράφημα. Από την ένταση της κίνησης και την πολυπλοκότητα των σχημάτων, ο χρήστης λαμβάνει μία οπτική εικόνα του ακουστικού πεδίου που τον βοηθά να κατανοήσει τα φαινόμενα που δημιουργούνται κατά το χόρδισμα.

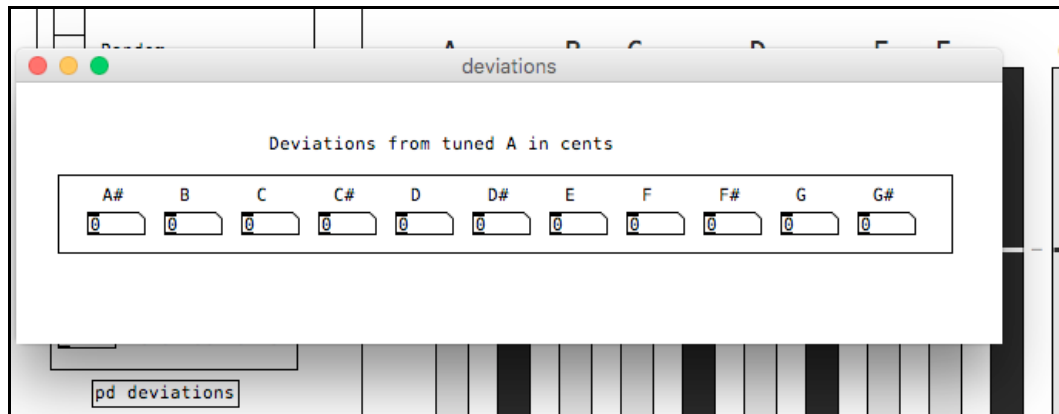
Στο πεδίο “Temperament” δίνεται η δυνατότητα επιλογής συστήματος συγκερασμού για γρήγορες συγκρίσεις (Equal Temperament, Just Intonation, Pythagorean). Σε αυτό το πεδίο υπάρχει κενός χώρος, ώστε κάποιος να προσθέσει κάποιο δικό του σύστημα. Εδώ βρίσκεται και η επιλογή “Random”, που επιδρά στο πεδίο “Tuning”, αλλοιώνοντας τις απεικονιζόμενες τιμές των ρυθμιστικών καθώς και το σημείο μηδενισμού των ποτενσιόμετρων της εξωτερικής συσκευής, στην περίπτωση που πραγματοποιείται ένα σενάριο “εξέτασης” μαθητού. Με αυτόν τον τρόπο, χάνεται η οπτική βοήθεια και πλέον ο χρήστης πρέπει να βασιστεί αποκλειστικά και μόνο στην ακοή του. Ακριβώς από κάτω, δίνεται η δυνατότητα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της εξωτερικής συσκευής. Δίπλα, υπάρχει το κουμπί που παράγει έναν

ημιτονοειδή ήχο στα 440 Hz, σαν προσομοίωση του φυσικού διαπασών, χρήσιμο κατά το πρώτο στάδιο του χορδίσματος.

Το πεδίο “Tuning” είναι το βασικότερο κομμάτι του συστήματος, γύρω από το οποίο αναπτύχθηκαν όλα τα υπόλοιπα. Δώδεκα εικονικά ποτενσιόμετρα, σε αντιστοιχία με τις νότες της χρωματικής κλίμακας επηρεάζουν το τονικό ύψος κατά ± 50 cents, μιμούμενο την διάταξη που απαντάται στο πραγματικό πιάνο. Στο πάνω μέρος του πεδίου, ο χρήστης μπορεί να επαναφέρει γρήγορα την τιμή στο μηδέν, και στο κάτω μέρος βλέπει την τιμή απόκλισης κάθε νότας. Αξίζει να σημειωθεί ότι σαν οπτικό εργονομικό χαρακτηριστικό, όταν ο χρήστης παίζει μια νότα, το αντίστοιχο ρυθμιστικό γίνεται κόκκινο.

Αριστερά αυτού, ο χρήστης μπορεί να πληροφορηθεί την απόκλιση του A που έχει χορδίσει από το 440 Hz, καθώς και την συνολική αθροιστική κατά απόλυτες τιμές απόκλιση του συνόλου των νοτών από τις τιμές του συστήματος ισοσυγκερασμού. Όλες οι τιμές υπολογίζονται σε cents.

Με διπλό κλικ στο εικονίδιο “pd deviations” εμφανίζεται ένα παράθυρο με τις αποκλίσεις κάθε νότας (από A#3 έως G#4), σταθμισμένες σε σχέση με το A. Αυτό γίνεται γιατί, όπως και στον πραγματικό κόσμο, αν υπάρχει μια μικρή απόκλιση από τα 440 Hz δεν είναι τόσο σημαντικό όσο να υπάρχει ελάχιστη σχετική απόκλιση μεταξύ των νοτών των ίδιων. Αυτό το πεδίο επιλέχθηκε να είναι κρυφό, έχοντας κατά νου ένα σενάριο εξάσκησης με την παρουσία διδάσκοντος ο οποίος κοιτάζει την οθόνη και συμβουλεύει τον μαθητευόμενο αντίστοιχα.



Εικόνα 7 Υποπρόγραμμα "deviations"

Τέλος, στην κάτω αριστερή γωνία, έχει προβλεφθεί η συνδεσιμότητα του προγράμματος με ένα αντίστοιχο πρόγραμμα που τρέχει σε TouchOSC σε φορητή συσκευή, σε περίπτωση που η εξωτερική συσκευή δεν είναι διαθέσιμη, καθώς και μια περιοχή “notepad”, για τυχόν σημειώσεις ή οδηγίες χρήσης του προγράμματος.

Έχει γίνει πρόβλεψη για την ύπαρξη ενός κουμπιού που πατώντας το ο χρήστης θα μπορεί να εξάγει σε μορφή λίστας τις αποκλίσεις ανά πάσα στιγμή θελήσει.

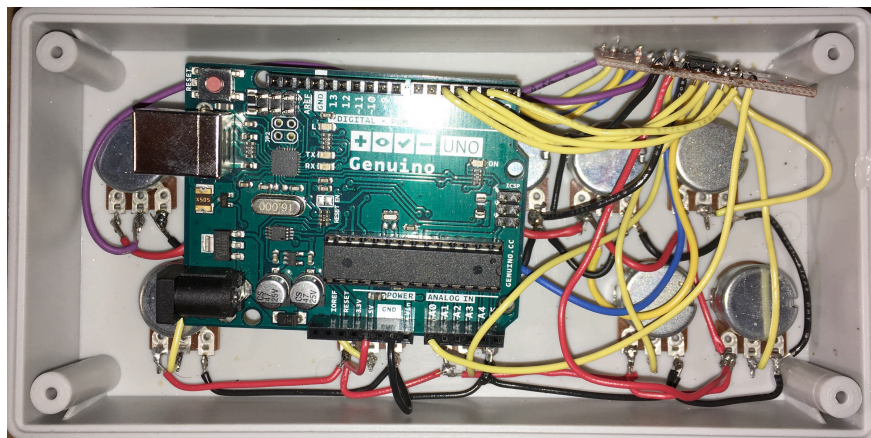
2.4 Υλισμικό

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, δημιουργήθηκε και προγραμματίστηκε εκ του μηδενός ένας εξωτερικός ελεγκτής. Η μορφή του μιμείται την διάταξη των λευκών και μαύρων πλήκτρων του πιάνου, ξεκινώντας από την νότα Α από αριστερά και φτάνοντας μέχρι το G#. Επελέγησαν περιστροφικά ποτενσιόμετρα, ώστε να ομοιάζουν με τα κλειδιά χορδίσματος του πιάνου, εξοικειώνοντας έτσι τον χρήστη με το περιβάλλον του πραγματικού οργάνου.



Εικόνα 8 Εξωτερικός ελεγκτής

Τα ποτενσιόμετρα συνδέθηκαν με ένα μικροελεγκτή τύπου Arduino, μέσω ενός πολυπλέκτη. Ο πολυπλέκτης επεκτείνει την συνδεσιμότητα του Arduino από 6 σε 16 αναλογικές εισόδους, αλλά απαιτεί επιπλέον προγραμματισμό. Το πρόγραμμα που φορτώθηκε στο Arduino φαίνεται στο Παράρτημα II. Η συσκευή επικοινωνεί μέσω Serial-Over-USB πρωτοκόλλου. Ένα θέμα που πρέπει να αντιμετωπιστεί στο άμεσο μέλλον είναι το φιλτράρισμα των τιμών ώστε να μην υπάρχουν μεταβολές, παρά μόνο όταν ο χρήστης το επιθυμεί.



Εικόνα 9 Εσωτερικό του ελεγκτή

Το σύστημα ολοκληρώνεται με την σύνδεση ενός οποιουδήποτε MIDI πληκτρολογίου της αγοράς. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να έχει μόνιμα το ένα χέρι στο πληκτρολόγιο και το άλλο στον ελεγκτή, όπως συμβαίνει και κατά την πραγματική διαδικασία χορδίσματος, συνηθίζοντας έτσι

το περιβάλλον εργασίας. Ίσως σε μια μελλοντική εκδοχή, θα μπορούσαν αυτές οι δύο συσκευές να ενσωματωθούν σε μία μεγαλύτερη συσκευασία, και ένας υπολογιστής τύπου Raspberry Pi να τρέχει το πρόγραμμα, δημιουργώντας έτσι ένα ανεξάρτητο σύστημα, πιο φιλικό στην διδασκαλία, χωρίς χρήση υπολογιστή.

3. Εφαρμογή, μελέτη περίπτωσης

3.1 Πιανίστας – Χορδιστής

Προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα, χρησιμότητα και χρηστικότητα του συστήματος, διενεργήθηκε μία μελέτη περίπτωσης. Ο συμμετέχων Θ.Κ. είναι επαγγελματίας πιανίστας, συνθέτης και ενορχηστρωτής, με εξαιρετική εξοικείωση με θέματα μουσικής τεχνολογίας και χορδίσματος του πιάνου. Έχει απόλυτη αίσθηση τονικού ύψους και συχνά χορδίζει πιάνο χωρίς χρήση ηλεκτρονικών συσκευών χορδίσματος.

Η συνάντηση έγινε στον προσωπικό του χώρο, σε συνθήκες ησυχίας και διήρκεσε περίπου τρεις ώρες. Στην αρχή, έγινε μία κουβέντα περί ιστορίας της μουσικής τεχνολογίας και την θέση που έχει αυτή στην δουλειά του. Συγκεκριμένα, σαν πιανίστας και ενορχηστρωτής, δεν χρησιμοποιεί ενεργά την τεχνολογία. Ωστόσο, έχει εξοικείωση με το περιβάλλον του max/msp από την πρώτη του έκδοση και ασχολείται με την ηλεκτρακουστική μουσική για πολλά χρόνια. Ενώ έχει κάνει πολλές σπουδές πάνω στην μουσική εκτέλεση και σύνθεση, δεν έχει διδαχθεί ποτέ σε επίσημο πλαίσιο την τεχνολογία του πιάνου και το χόρδισμα αυτού. Η τεχνική χορδίσματος του, έχει διαμορφωθεί μέσα από την προσωπική έρευνα και πρακτική πείρα χρόνων.

Κατόπιν, έγινε μια παρουσίαση του σκοπού δημιουργίας του συστήματος και του τρόπου λειτουργίας. Δόθηκαν περίπου 15 λεπτά για ελεύθερη εξοικείωση με το περιβάλλον και για την ρύθμιση της έντασης των ηχείων. Ακολούθησαν μερικές πλήρεις προσομοιώσεις χορδίσματος χωρίς την βοήθεια της προτεινόμενης ακολουθίας, διότι ο κάθε επαγγελματίας χορδιστής έχει την δική του. Παρατηρήθηκε ότι σε κάθε γύρο, ο χρόνος ολοκλήρωσης μειωνόταν, και η ακρίβεια βελτιωνόταν. Από την αρχή, χρειάστηκε να γίνει μετατροπή σε A4 442Hz, μιας και λόγω απόλυτης ακοής, ο ΘΚ δεν ένιωθε άνετα στα 440Hz.

Κατά το πρώτο σκέλος, το χόρδισμα του A4 σε σχέση με τον τόνο αναφοράς, παρατηρήθηκε ένα ενδιαφέρον φαινόμενο. Στις συγκεκριμένες εντάσεις, η σύγκριση του ημιτόνου της πηγής σε σχέση με τους αρμονικούς της χορδιζόμενης νότας ήταν αδύνατο να δώσει σωστό αποτέλεσμα. Ακόμη και όταν το διακρότημα εξαφανιζόταν, δηλαδή κατά το τέλειο χόρδισμα, το τελικό αποτέλεσμα δεν ήταν αποδεκτό από τα αυτιά του χειριστή. Η ασυμφωνία συχνοτικού περιεχομένου μεταξύ της πηγής και του οργάνου έδινε την ψευδή εντύπωση μη ταύτισης τονικού ύψους. Αυτό είναι ένα φαινόμενο που θα πρέπει να διερευνηθεί. Συγκεκριμένα, σε μία προσπάθεια, φάνηκε να θέλει να θέσει την νότα 40 cents πιο ψηλά από το σωστό τονικό ύψος, προσπαθώντας να αγνοήσει το διακρότημα και απλά να χορδίσει βάσει του τι του ακούγεται σωστό. Μία πρόταση που έγινε από τον ΘΚ ήταν να παύει ο ήχος της πηγής όταν ο χρήστης παίζει κάποια νότα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια, λαμβάνει πηγή A4 από μια κοινή ηλεκτρονική συσκευή χορδίσματος κιθάρας.

Το σύστημα έχει σαν παραδοχή την απόλυτα χορδισμένη οκτάβα (2:1), γεγονός το οποίο δυσκόλεψε τον ΘΚ που θα την προτιμούσε πιο πλατειά. Αυτό κρίνεται λογικό και αναμενόμενο, καθώς έχοντας χορδίσει πολλά πραγματικά πιάνο στην ζωή του, έχει μάθει να αναζητά την οκτάβα σε μια αναλογία μεγαλύτερη του 2:1, χωρίς απαραίτητα να γνωρίζει την θεωρία της δυσαρμονικότητας. Αυτό είναι και ένα πρώτο σημείο που δείχνει πόσο θα μπορούσε να δυσκολέψει έναν έμπειρο τεχνικό ή χρήση του παρόντος συστήματος. Η μνήμη είναι τόσο δυνατή που δύσκολα παραβλέπεται.

Το ηχόχρωμα που προέρχεται από ημίτονα, δυσκόλεψε την αναγνώριση του τονικού ύψους. Αυτό φάνηκε όταν, ειδικά με την ρύθμιση του ηχοχρώματος σε μόνο θεμέλιο, ο ΘΚ δυσκολευόταν πολύ να φτιάξει σωστά διαστήματα, αναζητώντας την μεγάλη τρίτη σε σημεία πάνω από τα 50 cents απόκλισης. Όταν άρχισε να συνηθίζει τον ήχο, επεσήμανε ότι δημιουργούνται «υποαρμονικοί» που τον αποσπούν. Αυτό αξίζει επίσης να διερευνηθεί, μιας και

είναι γεγονός ότι ένα διακρότημα αν ξεπεράσει μία τιμή, μπορεί να περάσει στο ακουστικό φάσμα και να θολώσει την αντίληψη του ηχητικού πεδίου.

Καθ'όλη την διάρκεια της συνάντησης, δεν χρειάστηκε να πειράξει τίποτα σε σχέση με το πεδίο «envelope», και φάνηκε ικανοποιημένος από την παραδοχή των ρυθμίσεων. Επίσης ελάχιστα ασχολήθηκε με την οπτική αναπαράσταση και τον περισσότερο χρόνο τον πέρασε χωρίς να κοιτάζει την οθόνη. Αυτό κρίνεται λογικό, καθότι με τα χρόνια έχει αποσυνδέσει την αίσθηση της όρασης από την διαδικασία του χορδίσματος. Υποστήριξε ότι, ενώ ίσως είναι βοηθητική η οπτική αναπαράσταση για κάποιον εντελώς αρχάριο, ο τελικός στόχος είναι η σωστή ακουστική απόδοση και φαντάζεται ότι μετά από μια αρχική εξοικείωση, ο χρήστης δεν χρειάζεται να κοιτάζει την οθόνη. Σε αυτό το πλαίσιο, πρότεινε την μετασκευή της συσκευής σε ένα αυτόνομο υλισμικό όπου μια οθόνη θα δείχνει μόνο τις βασικές αποκλίσεις και ίσως κάποιες άλλες βασικές παραμέτρους και όλα τα άλλα θα είναι σε υλική μορφή.

Όταν άρχισε να συνηθίζει το ηχόχρωμα και να ολοκληρώνει τα πρώτα του τεστ, δήλωσε ότι οι 5^{ες} και 4^{ες} που στο πραγματικό πιάνο είναι ανεκτές, στο σύστημα, αν και σωστές, δεν είναι ευχάριστες. Φαίνεται πως το ηχόχρωμα του συστήματος φέρνει στην επιφάνεια διακροτήματα που στο πιάνο καλύπτονται από το πλούσιο φάσμα αρμονικών. Ήταν φανερό ότι μετά τα πρώτα 15 λεπτά, ο ΘΚ είχε εξοικειωθεί με το σύστημα και δεν είχε καμία λειτουργική δυσκολία.

Στο τέλος, τέθηκαν στο ΘΚ κάποιες ερωτήσεις που απαντήθηκαν προφορικά. Ακολουθεί μία σύνοψη των απαντήσεων.

ΠΤ: Πιστεύετε στην χρήση τεχνολογίας για το χόρδισμα του πιάνου; Ποια η πείρα σας με Ηλεκτρονικές Συσκευές Χορδίσματος;

ΘΚ: Ναι, η τεχνολογία μπορεί να βοηθήσει υπό όρους. Δεν μπορεί κανείς να βασιστεί απόλυτα για ένα τελικό αποτέλεσμα. Σίγουρα, μπορεί να βοηθήσει στην μελέτη και κατανόηση κάποιων ακουστικών φαινομένων. Δεν έχω καμία προσωπική εμπειρία με ηλεκτρονικές συσκευές

χορδίσματος. Χρησιμοποιώ ένα συμβατικό κουρδιστήρι κιθάρας για να παίρνω το πρώτο Α, και για να εντοπίσω κάποια χοντρά λάθη σε ένα χόρδισμα. Τίποτα περισσότερο.

ΠΤ: Θεωρείτε ότι η ανάλυση και οπτικοποίηση ακουστικών φαινομένων σχετικά με το χόρδισμα βοηθάει την μελέτη και την εξοικείωση με αυτά;

ΘΚ: Σίγουρα η παρουσία της εικόνας αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Ωστόσο, η οπτικοποίηση μπορεί να βοηθήσει κατά τα πρώτα στάδια μελέτης. Εξάλλου, πολλές φορές ένα ακουστικό ερέθισμα μεταφράζεται σε μια νοητή εικόνα στην φαντασία μας. Από ένα επίπεδο και πάνω, κρίνω ότι επιβραδύνει την εξέλιξη της ακουστικής ικανότητας. Απαιτείται ισορροπία στην χρήση της εικόνας και φυσικά εξαρτάται και από το άτομο.

ΠΤ: Πώς κρίνετε την εμφάνιση (layout) του παρόντος συστήματος σε επίπεδο λογισμικού και υλισμικού;

ΘΚ: Η εμφάνιση του προγράμματος είναι κάπως πολύπλοκη, διαθέτοντας πολλές ρυθμίσεις. Πρέπει να γίνει πιο φιλικό στον χρήστη, με περισσότερα χρώματα και καλύτερα γραφικά. Το λευκό περιβάλλον του PD είναι απόμακρο. Θα πρότεινα να γίνει μια αυτόνομη κατασκευή, ίσως με ένα μικροϋπολογιστή. Παρ'ότι άνθρωπος της τεχνολογίας, για την συγκεκριμένη εφαρμογή θα ήθελα να μην αλληλοεπιδρώ με τον υπολογιστή.

ΠΤ: Πόσο εύκολη ήταν η εξοικείωση με το σύστημα;

ΘΚ: Η εξοικείωσή μου με την εμφάνιση, αλλά και την εσωτερική λειτουργία ήταν εύκολη, λόγω γνώσης του προγράμματος Max/MSP. Το υλισμικό έχει σαφή και ξεκάθαρη λειτουργία.

ΠΤ: Πώς κρίνετε την χρηστικότητα των πεδίων “Envelope”, “Partials”, “Graph”, “Temperaments”, “Tuning”;

ΘΚ: Δεν χρησιμοποίησα καθόλου το παράθυρο της γραφικής αναπαράστασης. Αντί για sliders, θα προτιμούσα ένα γραφικό ADSR παράθυρο. Θα ήθελα χρώματα στα διάφορα πεδία, ώστε να

διευκολύνεται η όραση, καθώς και πιο μεγάλα νούμερα στο πεδίο «Tuning». Ακόμη και με το υπάρχον περιβάλλον όμως, με λίγο παραπάνω χρόνο κάποιος μπορεί να νιώσει άνετα και να κάνει λειτουργικά την δουλειά του.

ΠΤ: Πώς κρίνετε τις απλοποιητικές παραδοχές του συστήματος; (Μηδενική δυσαρμονικότητα, απόλυτα χορδισμένες οκτάβες, ηχόχρωμα, περιβάλλουσα)

ΘΚ: Είναι πρωτόλειο ως προς τις παραμέτρους, αλλά καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της εκμάθησης. Σίγουρα υπάρχει πολύς χώρος για βελτίωση. Η πιο σημαντική έλλειψη είναι η δεδομένη οκτάβα. Τα υπόλοιπα είναι λιγότερο σημαντικά για την εκπαίδευση.

ΠΤ: Θα συστήνατε το παρόν σύστημα σε μουσικούς, εκπαιδευόμενους χορδιστές, έμπειρους χορδιστές, τεχνολόγους, ηχολήπτες, καθηγητές μουσικής ή άλλους;

ΘΚ: Δεν θα το σύστηνα σε έμπειρους χορδιστές πιάνων, γιατί οι απλοποιήσεις που έχουν γίνει, θα τους προκαλούσαν αμηχανία. Θα το σύστηνα σίγουρα σε όλους τους υπόλοιπους, που ενδιαφέρονται να ερευνήσουν πρακτικά τον μηχανισμό και τα φαινόμενα του χορδίσματος και της διαίρεσης της οκτάβας σε διαστήματα.

ΠΤ: Πώς κρίνετε στον σκοπό κατασκευής του συστήματος και κατά πόσο πιστεύετε ότι τον ικανοποιεί;

ΘΚ: Γενικά είμαι υπέρ της τεχνολογίας. Το παρόν σύστημα είναι πολύ καλό σε επίπεδο έρευνας και δημιουργίας μιας κοινής πλατφόρμας μεταξύ των ερευνητών. Βοηθά στην ποσοτικοποίηση και αντικειμενοποίηση διαφόρων εννοιών και ιδεών. Για να εξεταστεί η επιτυχία του, πρέπει να μπει σε χρήση και να πραγματοποιηθούν πειράματα με μετρήσεις.

ΠΤ: Τι θα προτείνατε σαν βελτίωση;

ΘΚ: Πέρα από όσα έχω αναφέρει παραπάνω, θα πρότεινα να γίνει συνδυασμός με δείγματα από ήχο πραγματικού πιάνου με ρυθμιζόμενες παραμέτρους, και επέκταση σε όλη την έκταση του

οργάνου. Ενδεχομένως μια γεννήτρια ήχων που θα χρησιμοποιεί την μέθοδο της φυσικής μοντελοποίησης να είναι η απάντηση.

3.2 Καθηγήτρια μουσικής

Σαν δεύτερη μελέτη περίπτωσης, το σύστημα δοκιμάστηκε από την Μ.Π., καθηγήτρια μουσικής στην πρωτοβάθμια εκπαίδευση, με σπουδές στο πιάνο και το τσέλο. Η ΜΠ δεν είχε καμία πείρα πάνω στο θέμα του χορδίσματος πιάνων. Αφού έγινε μια εισαγωγή στα φαινόμενα, την λογική και την προβληματική του χορδίσματος, παρουσιάστηκε το σύστημα και της δόθηκε χρόνος εξοικείωσης με καθοδήγηση από τον γράφοντα.

Σε μια πρώτη επαφή, η ΜΠ πρότεινε να μπουν χρώματα στα διάφορα πεδία ή να αποκτήσουν μεγαλύτερες αποστάσεις με στόχο την σαφέστερη τοποθέτησή τους στην οθόνη, ώστε να μην χάνεται η πληροφορία. Στην συνέχεια, χαρακτήρισε τον ήχο στην ρύθμιση «full» σαν αφύσικο και οξύ, που όμως βοηθά στην διάγνωση των διακροτημάτων. Θα προτιμούσε έναν ήχο πολύ πιο κοντά στον φυσικό ήχο του πιάνου. Υπέθεσε προβληματική την μετάβαση ενός μαθητευόμενου από τον ήχο του συστήματος στον ήχο ενός πραγματικού πιάνου. Γενικά δήλωσε ότι είναι ένα πολύ χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο για την θεωρία της μουσικής και σαν εισαγωγή στο χόρδισμα.

Κατά το πρώτο βήμα, διαπιστώθηκε πάλι το ψυχοακουστικό θέμα δυσκολίας αναγνώρισης του σωστού τονικού ύψους για τον συντονισμό της πρώτης νότας A4 με την πηγή. Ενώ η διαδικασία ήταν εύκολη με την ρύθμιση «fundamental», η αναγνώριση ήταν πιο δύσκολη στην ρύθμιση «full».

Αξιίζει να σημειωθεί ότι η ΜΠ προτιμούσε το άκουσμα των καθαρών 5^{ov} και 4^{ov} που δεν παρουσιάζουν διακρότημα. Ίσως σε αυτό να συντέλεσε η ενασχόληση με το τσέλο, ως

ασυγκέραστο όργανο. Ένιωθε χαρακτηριστική ικανοποίηση όταν τα διαστήματα αυτά δεν παρουσίαζαν διακρότημα. Μετά από μια σύντομη εξήγηση του λόγου που υπάρχουν τα διακροτήματα σε αυτά τα διαστήματα κατά τον ισοσυγκερασμό, ξεκίνησε η πρώτη πλήρης δοκιμή με καθοδήγηση από τον γράφοντα, σύμφωνα με την ακολουθία χορδίσματος της Steinway & Sons.

Μετά το πέρας της δοκιμής, η ΜΠ ήταν βαθύτερη γνώστρια των φαινομένων του χορδίσματος και του συγκερασμού. Φάνηκε να εξοικειώνεται γρήγορα με την μορφή και λειτουργία του συστήματος, ενώ θεώρησε αρκετά χρήσιμο για διδασκαλία και το πεδίο «envelope». Υπήρχε μια μικρή αρχική δυσκολία ως προς τον συντονισμό των πλήκτρων με τον χειρισμό των ποτενσιόμετρων, και το πόσο μικρές πρέπει να είναι οι κινήσεις, που όμως ξεπεράστηκε γρήγορα. Οι απαντήσεις της στο ερωτηματολόγιο, συνοψίζονται παρακάτω.

Θεωρεί ότι η οπτικοποίηση των φαινομένων είναι χρήσιμη αλλά μόνο σε ένα πρώιμο στάδιο της εκπαίδευσης. Δεν θεωρεί πρόβλημα το μαύρο/άσπρο θέμα του προγράμματος, αλλά θα ήθελε ένα καλύτερο σχεδιασμό, όπως χρωματιστά πεδία ή γράμματα. Έκρινε εύκολη την προσαρμογή της στην λειτουργία του συστήματος και μπόρεσε γρήγορα να κατανοήσει την φιλοσοφία σχεδιασμού. Όσο για το πεδίο «envelope», θα ήθελε να ήταν πιο επεξηγηματικό ώστε να δώσει την ευκαιρία στον χρήστη να πειραματιστεί και με αυτό. Το ηχόχρωμα χρήζει αλλαγής, αν και ίσως σε επίπεδο αρχικής εκπαίδευσης να μην είναι άσχημο. Παίζονται λίγο με τις ρυθμίσεις του «envelope», κανείς μπορεί να το κάνει λίγο πιο φιλικό. Σίγουρα πιστεύει ότι θα ήταν πολύ χρήσιμο σε καθηγητές μουσικής και σε όποιον ενδιαφέρεται για να υλοποιήσει και να μελετήσει τα θεωρητικά ζητήματα του συγκερασμού και του χορδίσματος. Γενικά, οι εντυπώσεις της ήταν πολύ θετικές και θεώρησε ότι η συνάντηση και η ενασχόληση την βοήθησε να κατανοήσει καλύτερα κάποια θεωρητικά θέματα που την απασχολούσαν για χρόνια.

3.3 Πρόταση για μελλοντική βελτίωση

Βάσει των δύο παραπάνω περιπτώσεων διαπιστώνεται μια αλληλοεπικάλυψη στις παρατηρήσεις. Τα δύο κυριότερα θέματα είναι η εμφάνιση, αλλά πολύ περισσότερο το ηχόχρωμα. Ως προς το πρώτο, δεν χρειάζεται να γίνουν πολλές αλλαγές, μιας και το κυρίως ζητούμενο είναι ο ήχος. Σχετικά με το ηχόχρωμα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια μηχανή σύνθεσης ήχων πιάνου που βασίζεται στην τεχνική της φυσικής μοντελοποίησης, όπως το εμπορικό πρόγραμμα Pianotek. Η περίπτωση χρήσης πραγματικών δειγμάτων ενέχει τον κίνδυνο εισαγωγής και άλλων φαινομένων που θα άρχιζαν να θολώνουν την επιστημονική ακρίβεια του συστήματος. Ως καλύτερη λύση φαίνεται η χρήση δειγμάτων που έχουν προέλθει από φυσική μοντελοποίηση, με παραμετροποίηση στην δυσαρμονικότητα για διαφορετικά σενάρια. Τα ποτενσιόμετρα θα ελέγχουν τότε την ταχύτητα αναπαραγωγής του κάθε δείγματος, αλλάζοντας έτσι το τονικό ύψος. Για την καλύτερη αναγνώριση των διακροτημάτων, θα μπορούσε να ενσωματωθεί ένα φίλτρο τύπου bandpass, η κεντρική συχνότητα του οποίου θα καθορίζεται μέσω αναγνώρισης του διαστήματος που εκτελείται εκείνη την στιγμή.

Η κατάργηση της απόλυτης 2:1 οκτάβας, συνεπάγεται και την δημιουργία ρυθμιστικών για παραπάνω από 12 νότες. Σε μια πρώτη προσέγγιση, θα μπορούσε ο ελεγκτής να εξοπλιστεί με 13 ακόμα ποτενσιόμετρα, ώστε να καλύπτει τις δύο κεντρικές οκτάβες. Εναλλακτικά, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν “rotary encoders”, που θα μπορούν με ένα πλήκτρο “shift” να αλλάζουν την οκτάβα στην οποία ανταποκρίνονται. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορούσε κανείς να προσομειώσει το χόρδισμα και των 88 νοτών ενός πραγματικού πιάνου.

Εφόσον δεν υπάρχει σοβαρή ανάγκη για οπτική απεικόνιση, το όλο σύστημα θα μπορούσε να μεταμορφωθεί σε ένα αυτόνομο μηχανήμα, που θα λειτουργεί με Raspberry Pi και μια μικρή οθόνη όπου θα φαίνονται μόνο οι απαραίτητες ενδείξεις. Έτσι, καταργείται η ανάγκη ύπαρξης υπολογιστή. Το μόνο που θα απαιτείται πλέον θα είναι ένα εξωτερικό midi πληκτρολόγιο και

ηχεία. Ένα αυτόνομο σύστημα ίσως είναι πιο ευνοϊκό για την συγκέντρωση και την μελέτη σε σχέση με έναν κοινό προσωπικό υπολογιστή.

3.4 Πρόταση για έρευνα

Ένα τέτοιο σύστημα, όπως περιγράφηκε πιο πάνω, θα έπρεπε να τεθεί σε πειράματα με υποκείμενα ώστε να δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητά του. Θα μπορούσε να διαμοιραστεί στους μισούς σπουδαστές μιας τάξης εκπαιδευόμενων χορδιστών, ως βοήθημα ταυτόχρονα με την παραδοσιακή μέθοδο εκμάθησης. Η πρόοδος όλων θα καταγραφόταν και θα γινόταν μία μελέτη ως προς το εάν οι σπουδαστές της μίας ομάδας είχαν καλύτερα αποτελέσματα στις εξετάσεις τους από την άλλη.

4. Επίλογος – Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή είχε σαν στόχο την δημιουργία ενός ελεύθερου και δωρεάν συστήματος που θα βοηθά στην ακουστική εξάσκηση των υπό εκπαίδευση τεχνικών πιάνου. Η ακουστική εκπαίδευση είναι απαραίτητο συστατικό του επαγγέλματος ακόμη και εάν τελικά ο τεχνικός επιλέξει να χρησιμοποιήσει κάποια Ηλεκτρονική Συσκευή Χορδίσματος. Μέσα από τις δοκιμές που έγιναν, τέθηκαν οι επόμενοι στόχοι σχετικά με την εξέλιξη του συστήματος προς μια κατεύθυνση που θα ανταποκρίνεται καλύτερα στο πραγματικό όργανο. Σίγουρα, η προσομοίωση των ακουστικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε ένα πιάνο αποτελεί μεγάλο κεφάλαιο, αλλά πάντα το ζήτημα είναι η επιλογή των απλουστευτικών παραδοχών.

Ο γράφων, έχοντας άμεσο επαγγελματικό ενδιαφέρον πάνω στο θέμα, σκοπεύει να βελτιώσει, να δοκιμάσει και να ενσωματώσει το παρόν σύστημα είτε προσπαθώντας να εκπαιδεύσει κάποιον για το επάγγελμα του χορδιστή, είτε σε κάποια περίπτωση παρουσίασης γύρω από την μουσική και μουσικολογική θεωρία πάνω στο χορδισμό και τον συγκερασμό.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Inharmonicity	Δυσαρμονικότητα
Equal Temperament	Ισοσυγκερασμός
Beats per second	Χτύποι ανά δευτερόλεπτο
Beating	Διακρότημα
Coincident Partial	Συμπίπτουσες Αρμονικές
Stretch	Επέκταση
Visual Programming Language	Οπτική Γλώσσα Προγραμματισμού
Data Flow Programming	Προγραμματισμός Ροής Δεδομένων
Synthesizer	Συνθετητής
Adaptive Tuning	Προσαρμοστικό Χόρδισμα
Web Browser	Περιηγητής Διαδικτύου
Electronic Tuning Device	Ηλεκτρονική Συσκευή Χορδίσματος
Piano Technicians Guild	Σωματείο των Τεχνικών Πιάνου

ΣΥΝΤΗΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

EQ	Equal Temperament
JI	Just Intonation
BPS	Beats Per Second
Hz	Hertz
DSP	Digital Signal Processing
ΗΣΧ	Ηλεκτρονική Συσκευή Χορδίσματος
PTG	Piano Technicians Guild

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Μέθοδος χορδίσματος “Worldwide Technical reference Guide – Steinway & Sons”

Αναφορά	Στόχος	Έλεγχος
A440	A	Σύγκριση με F2
A	E	Στενή 5 ^η
E	B	Ευρεία 4 ^η
B	F#	Στενή 5 ^η 6 ^η A-F#
F#	C#	Ευρεία 4 ^η 3 ^η A-C# < 6 ^η A-F#
C#	G#	Στενή 5 ^η 6 ^η A-F# < 6 ^η B-G# Προοδευτικά αυξανόμενο διακρότημα: 3 ^η A-C# < 6 ^η A-F# < 6 ^η B-G# < 3 ^η E-G#
G#	D#	Ευρεία 4 ^η 3 ^η A-C# < 3 ^η B-D#
D#	A#	Ευρεία 4 ^η
A#	F	Στενή 5 ^η 3 ^η A-C# < 3 ^η C#-F < 3 ^η F-A
F	C	Ευρεία 4 ^η 3 ^η C-E < 3 ^η C#-F 6 ^η B-G# < 6 ^η C-A
C	G	Στενή 5 ^η 6 ^η A-F# < 6 ^η A#-G < 6 ^η B-G# < 6 ^η C-A Συμφωνία με τις παραπάνω 3 ^{ες}
G	D	Ευρεία 4 ^η Συμφωνία με παραπάνω 3 ^{ες} και 6 ^{ες}
D	A	Ευρεία 5 ^η Κλείσιμο κύκλου και τελικός έλεγχος 3 ^{ες} , 4 ^{ες} , 5 ^{ες} , 6 ^{ες}

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

Κώδικας Arduino

```
// define a log base 2 function
#define LOG2(x) (log(x) / log(2))

// change this number if using more chips
const int num_of_chips = 1;
// set the number of channels of the multiplexer
const int num_of_channels = 16;
// get the number of control pins according to the number of channels
const int num_ctl_pins = LOG2(num_of_channels);
// set the total number of bytes to be transferred over serial
// * 2 to get 10bit resolution
// + 1 for start character
const int num_of_data = ((num_of_chips * num_of_channels) * 2) + 1;
// buffer to hold data to be transferred over serial
// with the start character set
byte transfer_array[num_of_data] = { 192 };

// create an array for the control pins
int control_pins[num_ctl_pins];
// create an array to hold the masking value to create binary numbers
// these values will be set in the setup function
int control_values[num_ctl_pins];

void setup() {
    // set the value masks, the control pins and their modes
    for(int i = 0; i < num_ctl_pins; i++){
        control_values[i] = pow(2,(i+1)) - 1;
        control_pins[i] = (num_ctl_pins - i) + 1;
        pinMode(control_pins[i], OUTPUT);
    }

    Serial.begin(115200);
}

void loop() {
    int index = 1;
    // loop to read all chips
    for(int i = 0; i < num_of_chips; i++){
        // this loop creates a 4bit binary number that goes through the multiplexer control pins
        for (int j = 0; j < num_of_channels; j++){
            for(int k = 0; k < num_ctl_pins; k++){
                // this line translates the decimal j to binary
                // and sets the corresponding control pin
                digitalWrite(control_pins[k], (j & control_values[k]) >> k);
            }
            int val = analogRead(i);
            transfer_array[index++] = val & 0x007f;
            transfer_array[index++] = val >> 7;
        }
    }
    Serial.write(transfer_array, num_of_data);
}
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

Ερωτηματολόγιο

1. Πιστεύετε στην χρήση τεχνολογίας για το χόρδισμα του πιάνου; Ποια η πείρα σας με Ηλεκτρονικές Συσκευές Χορδίσματος;
2. Θεωρείτε ότι η ανάλυση και οπτικοποίηση ακουστικών φαινομένων σχετικά με το χόρδισμα βοηθάει την μελέτη και την εξοικείωση με αυτά;
3. Πώς κρίνετε την εμφάνιση (layout) του παρόντος συστήματος σε επίπεδο λογισμικού και υλισμικού;
4. Πόσο εύκολη ήταν η εξοικείωση με το σύστημα;
5. Πώς κρίνετε την χρηστικότητα των πεδίων “Envelope”, “Partials”, “Graph”, “Temperaments”, “Tuning”;
6. Πώς κρίνετε τις απλοποιητικές παραδοχές του συστήματος; (Μηδενική δυσαρμονικότητα, απόλυτα χορδισμένες οκτάβες, ηχόχρωμα, περιβάλλουσα)
7. Θα συστήνατε το παρόν σύστημα σε μουσικούς, εκπαιδευόμενους χορδιστές, έμπειρους χορδιστές, τεχνολόγους, ηχολήπτες, καθηγητές μουσικής ή άλλους;
8. Πώς κρίνετε στον σκοπό κατασκευής του συστήματος και κατά πόσο πιστεύετε ότι τον ικανοποιεί;
9. Τι θα προτείνατε σαν βελτίωση;
10. Ελεύθερος σχολιασμός

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Carlos, W. (1987, Spring). Tuning: At The Crossroads. *Computer Music Journal*, 11(1), 29-43.
- Christensen, T. (2002). *The Cambridge History of Western Music Theory*. Cambridge University Press.
- Code, D. L. (2002, Summer). Groven.Max: An Adaptive Tuning System for MIDI Pianos. *Computer Music Journal*, 26(2), 50-61.
- Coul, M. O. (n.d.). *Scala*. Ανάκτηση από <http://www.huygens-fokker.org/scala/>
- Drymonitis, A. (2015). *Digital Electronics for Musicians*. New York, NY: Apress.
- Durfee, D. S., & Colton, J. S. (2015). The physics of musical scales: Theory and experiment. *American Journal of Physics*(83), 835-842.
- El-Far, K. (n.d.). *Kelfar Technologies*. Ανάκτηση από <http://kelfar.net/>
- Fritz, B. (1757). *Anweisung, wie man Claviere ... in allen zwölf Tönen gleich rein stiminen könne, etc.* Leipzig.
- Green, G. (2004). *History of Piano Tuning*. Ανάκτηση από <https://www.piano-tuners.org/history/piano-tuner-history.html>
- Igrec, M. (2013). *Pianos Inside Out*. Mandeville, LA, USA: In Tune Press.
- Jorgensen, O. (1991). *Tuning: Containing the Perfection of Eighteenth-Century Temperament, the Lost Art of Nineteenth-Century Temperament and the Science of Equal Temperament*. Michigan State University Press.
- Lin, H.-M., & Lin, C.-M. (2015). Harmonic Intonation Trainer: An Open Implementation in Pure Data. *International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, (σσ. 38, 39). Baton Rouge, LA, USA.
- Loesser, A. (2011). *Men, Women and Pianos*. New York: Dover Publications Inc.
- Mohrlock, W. (1987). *Ευρεσιτεχνία Αρ. US5442129A*.
- Moschos, F., Georgaki, A., & Kouroupetroglou, G. (2016). Fonaskein: An Interactive Software Application for the Practice of the Singing Voice. *SMC* (σσ. 326-331). Hamburg: Zentrum für Mikrotonale Musik und Multimediale Komposition.

- Partch, H. (1949). *Genesis of a Music: Monophony: the relation of its music to historic and contemporary trends; its philosophy, concepts, and principles; its relation to ... and its application to musical instruments*. Madison, WI: University of Wisconsin Press.
- Penha, R., & Bernardes, G. (2016). Beatings: a web application to foster the renaissance of the art of musical temperaments. *SMC*. Hamburg: Zentrum für Mikrotonale Musik und Multimediale Komposition.
- Sethares, W. (2005). *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale* (2nd Edition εκδ.). London: Springer Science & Business Media.
- Sturm, F. (2011, January). A Clear And Practical Introduction To Temperament History. *Piano Technicians Journal*.
- Trueman, D. (n.d.). *BitKlavier*. Ανάκτηση από <https://bitklavier.com/>