Ανάπτυξη Προσομοίωσης Ρύθμισης Τονικότητας Μουσικών Οργάνων

Φαίδων Στυλιανίδης
Μεταπτυχιακός Φοιτητής ΠΛΣ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ
std159300@ac.eap.gr

Βασίλειος Ζαφειρόπουλος
Μέλος ΣΕΠ, ΕΑΠ
zafeiropoulos.vasileios@ac.eap.gr

***Περίληψη* – Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται η ανάπτυξη μιας διαδραστικής τρισδιάστατης εφαρμογής προσομοίωσης κουρδίσματος μουσικών οργάνων, με στόχο την εξοικείωση του χρήστη με τις φυσικές αρχές και τις διαδικασίες ρύθμισης του τονικού τους ύψους. Η εφαρμογή υλοποιήθηκε στο περιβάλλον ανάπτυξης Unity, αξιοποιώντας την υφιστάμενη υποδομή του εικονικού εργαστηρίου Onlabs του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου. Η προσομοίωση περιλαμβάνει τρία μουσικά όργανα διαφορετικών κατηγοριών, το αρπιχόρδιο (έγχορδο), τη φλογέρα (πνευστό) και το ταμπούρο (κρουστό), για τα οποία αναπτύχθηκαν διακριτοί μηχανισμοί διαδραστικού κουρδίσματος. Η λειτουργία τους βασίζεται στη συσχέτιση των μηχανικών παρεμβάσεων του χρήστη με τη μεταβολή του παραγόμενου τονικού ύψους μέσω της εφαρμογής κατάλληλων φυσικών και υπολογιστικών μοντέλων. Ο συνδυασμός τρισδιάστατης απεικόνισης, διαδραστικού χειρισμού και ακουστικής ανατροφοδότησης διαμορφώνει ένα εικονικό περιβάλλον πρακτικής εξάσκησης, το οποίο επιτρέπει τη διερεύνηση των διαδικασιών κουρδίσματος χωρίς την ανάγκη χρήσης πραγματικών μουσικών οργάνων.**

Λέξεις-Κλειδιά: Εκπαιδευτική Προσομοίωση, Κούρδισμα Μουσικών Οργάνων, Τρισδιάστατη Αλληλεπίδραση, Unity, Onlabs.

I. Εισαγωγη

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των υπολογιστικών γραφικών και των διαδραστικών συστημάτων έχουν διευρύνει τις δυνατότητες αξιοποίησης των προσομοιώσεων στην εκπαιδευτική διαδικασία. Μέσω της αναπαράστασης φυσικών φαινομένων και μηχανικών διαδικασιών σε εικονικά περιβάλλοντα, παρέχεται η δυνατότητα πειραματισμού και πρακτικής εξάσκησης χωρίς τους περιορισμούς που ενδέχεται να συνεπάγεται η χρήση πραγματικού εξοπλισμού. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η δυνατότητα άμεσης παρατήρησης των αποτελεσμάτων των ενεργειών του χρήστη, η οποία μπορεί να διευκολύνει την κατανόηση των σχέσεων αιτίας και αποτελέσματος.

Το κούρδισμα των μουσικών οργάνων αποτελεί μια διαδικασία που συνδυάζει αρχές της ακουστικής φυσικής, της μουσικής θεωρίας και της μηχανικής. Η μεταβολή του τονικού ύψους εξαρτάται από διαφορετικές φυσικές παραμέτρους ανάλογα με τον μηχανισμό παραγωγής ήχου κάθε οργάνου, όπως η τάση μιας χορδής, το ενεργό μήκος μιας αέριας στήλης ή η τάση μιας μεμβράνης. Η αξιοποίηση διαδραστικών τρισδιάστατων προσομοιώσεων για την αναπαράσταση αυτών των διαδικασιών συνιστά ένα πεδίο εφαρμογής που προσφέρει δυνατότητες περαιτέρω διερεύνησης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη σύνδεση της θεωρητικής γνώσης με την πρακτική διαδικασία ρύθμισης των μουσικών οργάνων, μέσω της αλληλεπίδρασης με τους αντίστοιχους μηχανισμούς και της παρατήρησης των μεταβολών του παραγόμενου ήχου.

Το παρόν άρθρο βασίζεται στη διπλωματική εργασία με τίτλο «Ανάπτυξη προσομοίωσης ρύθμισης τονικότητας μουσικών οργάνων», η οποία εκπονήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Πληροφοριακά Συστήματα» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου το 2026. Σκοπός του άρθρου είναι η συνοπτική παρουσίαση της αρχιτεκτονικής της εφαρμογής, των μεθόδων υλοποίησης και των υπολογιστικών μηχανισμών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του κουρδίσματος των επιλεγμένων μουσικών οργάνων.

II. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το κούρδισμα των μουσικών οργάνων βασίζεται στη συσχέτιση των φυσικών παραμέτρων που διέπουν την παραγωγή του ήχου με τη συχνότητα ταλάντωσης. Η μαθηματική περιγραφή αυτής της σχέσης διαφοροποιείται ανάλογα με τον μηχανισμό παραγωγής ήχου κάθε οργάνου. Για την ανάπτυξη της προσομοίωσης αξιοποιήθηκαν βασικές αρχές της μουσικής ακουστικής και κατάλληλες υπολογιστικές προσεγγίσεις, οι οποίες επιτρέπουν τη μετατροπή των μηχανικών παρεμβάσεων του χρήστη σε αντίστοιχες μεταβολές της παραγόμενης συχνότητας.

A. Συχνότητα, τονικά συστήματα και μονάδες cents

Η συχνότητα αποτελεί το βασικό φυσικό μέγεθος για την περιγραφή του τονικού ύψους ενός περιοδικού ήχου και εκφράζεται σε Hertz (Hz). Η μουσική απόσταση μεταξύ δύο φθόγγων καθορίζεται από τον λόγο των συχνοτήτων τους και όχι από την απόλυτη διαφορά τους. Ειδικότερα, ο διπλασιασμός της συχνότητας αντιστοιχεί σε άνοδο κατά μία οκτάβα.

Τα τονικά συστήματα καθορίζουν τον τρόπο οργάνωσης των μουσικών φθόγγων και τις σχέσεις μεταξύ τους. Διαφορετικά συστήματα, όπως το πυθαγόρειο, ο φυσικός συγκερασμός και ο ισοσυγκερασμός, βασίζονται σε διαφορετικές αρχές προσδιορισμού των μουσικών διαστημάτων. Στα συστήματα αυτά, οι λόγοι συχνοτήτων που αντιστοιχούν στα επιμέρους διαστήματα δεν είναι

απαραίτητα ίδιοι, γεγονός που επηρεάζει τη διαδικασία κουρδίσματος.

Στο δωδεκάφθογγο ισοσυγκερασμένο τονικό σύστημα (12-ΤΕΤ), η οκτάβα διαιρείται σε δώδεκα ίσα ημιτόνια, με σταθερό λόγο συχνοτήτων μεταξύ διαδοχικών φθόγγων, ίσο με $2^{1/12}$. Η συχνότητα οποιουδήποτε φθόγγου μπορεί επομένως να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$f = f_0 \times 2^{n/12} \quad (1)$$

όπου f_0 είναι η συχνότητα αναφοράς, f η συχνότητα του ζητούμενου φθόγγου και n ο προσημασμένος αριθμός ημιτονίων που τον χωρίζουν από τη συχνότητα αναφοράς.

Για την ακριβέστερη αποτίμηση των μουσικών διαστημάτων και των αποκλίσεων κατά το κούρδισμα χρησιμοποιείται η λογαριθμική μονάδα cent. Στο δωδεκάφθογγο ισοσυγκερασμένο σύστημα, κάθε ημιτόνιο αντιστοιχεί σε 100 cents και κάθε οκτάβα σε 1200 cents. Η χρήση της συγκεκριμένης μονάδας επιτρέπει την έκφραση της συχνοτικής απόκλισης με βάση τη μουσική απόσταση μεταξύ δύο φθόγγων, ανεξάρτητα από την απόλυτη περιοχή συχνοτήτων στην οποία βρίσκονται. Η απόκλιση μιας τρέχουσας συχνότητας από τη συχνότητα αναφοράς υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c = 1200 \times log_2\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (2)$$

όπου c είναι η απόκλιση σε cents, f η τρέχουσα συχνότητα και f_0 η επιθυμητή συχνότητα αναφοράς. Θετικές τιμές του c υποδηλώνουν υψηλότερο τονικό ύψος από το επιθυμητό, αρνητικές τιμές υποδηλώνουν χαμηλότερο ενώ για $c = 0$, η τρέχουσα συχνότητα ταυτίζεται με τη συχνότητα αναφοράς.

Από την παραπάνω λογαριθμική σχέση προκύπτει και η αντίστροφη εξίσωση, μέσω της οποίας μπορεί να προσδιοριστεί η συχνότητα που αντιστοιχεί σε δεδομένη απόκλιση σε cents:

$$f = f_0 \times 2^{c/1200} \quad (3)$$

Οι παραπάνω σχέσεις αξιοποιούνται στην υλοποίηση της εφαρμογής για τον υπολογισμό της απόκλισης του παραγόμενου ήχου από την επιθυμητή συχνότητα και τον προσδιορισμό ορίων ρύθμισης στα οποία έχουμε ρεαλιστικά αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό, η μεταβολή του τονικού ύψους μπορεί να εκφράζεται με κοινή μονάδα μέτρησης, ανεξάρτητα από τον μηχανισμό παραγωγής ήχου κάθε μουσικού οργάνου.

B. Φυσικά μοντέλα κουρδίσματος.

Οι μηχανισμοί παραγωγής ήχου διαφέρουν ανάλογα με την κατηγορία του μουσικού οργάνου, με αποτέλεσμα το τονικό ύψος να εξαρτάται από διαφορετικές φυσικές παραμέτρους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές φυσικές σχέσεις και οι υπολογιστικές προσεγγίσεις που αξιοποιήθηκαν για την προσομοίωση του κουρδίσματος του αρπιχορδίου, της φλογέρας και του ταμπούρου.

Αρπιχόρδιο

Στο αρπιχόρδιο (harpsichord), το τονικό ύψος εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των χορδών και ειδικότερα από το ενεργό μήκος, την τάση και τη γραμμική πυκνότητά τους. Η θεμελιώδης συχνότητα ταλάντωσης μιας ιδανικής τεντωμένης χορδής περιγράφεται από τη σχέση:

$$f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (3)$$

όπου L είναι το ενεργό μήκος της χορδής, T η τάση και μ η γραμμική πυκνότητά της. Εφόσον το μήκος και η γραμμική πυκνότητα θεωρούνται σταθερά, η συχνότητα μεταβάλλεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της τάσης.

Στην προσομοίωση, η περιστροφή του πείρου κουρδίσματος συνδέεται με τη μεταβολή της τάσης μέσω μιας απλοποιημένης γραμμικής προσέγγισης:

$$T = T_0(1 + s\theta) \quad (4)$$

όπου T_0 είναι η αρχική τάση, θ η γωνία περιστροφής του πείρου και s ο συντελεστής ευαισθησίας κουρδίσματος. Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει:

$$f = f_0\sqrt{1 + s\theta} \quad (5)$$

Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της νέας συχνότητας με βάση την περιστροφή του πείρου και αποτελεί τη μαθηματική βάση του αντίστοιχου μηχανισμού κουρδίσματος.

Φλογέρα

Στη φλογέρα (recorder), η παραγωγή του ήχου βασίζεται στην ταλάντωση της αέριας στήλης στο εσωτερικό του οργάνου. Η συχνότητα εξαρτάται από το ενεργό μήκος της αέριας στήλης, το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανοικτές και κλειστές οπές, καθώς και από τη θέση της κεφαλής του οργάνου.

Για δεδομένη νότα, η προσομοίωση χρησιμοποιεί την προσεγγιστική αντίστροφη αναλογία μεταξύ συχνότητας και ενεργού μήκους:

$$f = f_0 \frac{L_0}{L} \quad (6)$$

όπου f_0 είναι η συχνότητα αναφοράς, L_0 το αντίστοιχο ενεργό μήκος και L το ενεργό μήκος μετά τη μετατόπιση της κεφαλής. Κατά συνέπεια, η αύξηση του ενεργού μήκους μειώνει τη συχνότητα, ενώ η μείωσή του την αυξάνει.

Ταμπούρο

Στο ταμπούρο (snare drum), ο ήχος παράγεται κυρίως από την ταλάντωση των τεντωμένων μεμβρανών. Σε αντίθεση με τις χορδές και τις αέριες στήλες, η κυκλική μεμβράνη παρουσιάζει πολλαπλούς τρόπους ταλάντωσης, των οποίων οι συχνότητες δεν σχηματίζουν γενικά αρμονική σειρά. Για σταθερές γεωμετρικές και υλικές παραμέτρους, οι χαρακτηριστικές συχνότητες μιας ιδανικής μεμβράνης είναι ανάλογες της τετραγωνικής ρίζας της τάσης της.

Η ρύθμιση πραγματοποιείται μέσω των περιμετρικών κοχλιών, των οποίων η περιστροφή προκαλεί αξονική μετατόπιση σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta x = p\frac{\Delta\theta}{360^o} \quad (7)$$

όπου p είναι το βήμα του σπειρώματος και $\Delta\theta$ η γωνία περιστροφής σε μοίρες. Στην προσομοίωση, η μετατόπιση συνδέεται με τη μεταβολή της τάσης μέσω μιας απλοποιημένης γραμμικής σχέσης:

$$\Delta T = k\Delta x \quad (8)$$

όπου k είναι ο συντελεστής μηχανικής απόκρισης. Η μεταβολή της τάσης επηρεάζει στη συνέχεια τις συχνότητες ταλάντωσης της μεμβράνης, επιτρέποντας την προσομοίωση του κουρδίσματος μέσω της περιστροφής των επιμέρους κοχλιών.

ΙΙΙ. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η ανάπτυξη της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε με τη μηχανή παιχνιδιών Unity, με στόχο τη δημιουργία ενός διαδραστικού τρισδιάστατου περιβάλλοντος προσομοίωσης του κουρδίσματος μουσικών οργάνων. Η υλοποίηση περιλαμβάνει την ενσωμάτωση τρισδιάστατων μοντέλων, τη διαχείριση της αλληλεπίδρασης του χρήστη με τα επιμέρους εξαρτήματα των οργάνων και τη σύνδεση των μηχανισμών ρύθμισης με την αναπαραγωγή και τη μεταβολή του ήχου. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε με αξιοποίηση της υφιστάμενης υποδομής του εικονικού εργαστηρίου Onlabs του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου.

Α. Τρισδιάστατη μοντελοποίηση και επιλογή ηχητικών δειγμάτων

Η επιλογή των τρισδιάστατων μοντέλων των μουσικών οργάνων βασίστηκε κυρίως στην καταλληλότητα της γεωμετρικής τους δομής για την αναπαράσταση των μηχανισμών κουρδίσματος, καθώς και στη δυνατότητα επεξεργασίας των επιμέρους εξαρτημάτων τους. Για τον σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν υφιστάμενα τρισδιάστατα μοντέλα, τα οποία επεξεργάστηκαν με το λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης Blender και στη συνέχεια ενσωματώθηκαν στη Unity.

Στην περίπτωση του αρπιχορδίου, καθοριστικό κριτήριο επιλογής αποτέλεσε η παρουσία εμφανών πείρων κουρδίσματος, απαραίτητων για την αναπαράσταση της περιστροφής τους και της αντίστοιχης μεταβολής της τάσης των χορδών. Το επιλεγμένο μοντέλο διαθέτει 60 πλήκτρα, με μουσική έκταση από τη νότα F1 έως E6, αλλά μόνο 54 πείρους κουρδίσματος. Λόγω της διαφοράς αυτής, έξι πλήκτρα (F1, F#1, C#6, D6, D#6 και E6) διατηρήθηκαν ως μη λειτουργικά, διακοσμητικά στοιχεία (dummy keys), χωρίς δυνατότητα παραγωγής ήχου ή κουρδίσματος. Για το ταμπούρο επιλέχθηκε μοντέλο που περιλαμβάνει δέκα περιμετρικούς κοχλίες σύσφιξης, επιτρέποντας την προσομοίωση της ρύθμισης της τάσης της μεμβράνης. Αντίστοιχα, η επιλογή του μοντέλου της φλογέρας βασίστηκε στην κατασκευή του από διακριτά τμήματα, τα οποία διευκολύνουν την αναπαράσταση της μετακίνησης της κεφαλής κατά τη διαδικασία κουρδίσματος.

Η επεξεργασία των μοντέλων στο Blender περιλάμβανε τον διαχωρισμό επιλεγμένων γεωμετρικών τμημάτων σε ανεξάρτητα αντικείμενα, καθώς και τις απαραίτητες προσαρμογές της δομής τους για την υποστήριξη διαδραστικών λειτουργιών. Στη συνέχεια, τα τροποποιημένα μοντέλα εισήχθησαν στο Unity, όπου τα επιμέρους εξαρτήματα συνδέθηκαν με τους αντίστοιχους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης και κουρδίσματος. Με τον τρόπο αυτό, η τρισδιάστατη αναπαράσταση των οργάνων αξιοποιήθηκε όχι μόνο για την οπτική τους απεικόνιση, αλλά και ως λειτουργικό μέρος της προσομοίωσης.

Για την ακουστική αναπαράσταση των μουσικών οργάνων επιλέχθηκαν προηχογραφημένα ηχητικά δείγματα, ώστε η παραγωγή του ήχου να βασίζεται σε πραγματικές ηχογραφήσεις και όχι σε εξ ολοκλήρου συνθετική παραγωγή. Συγκεκριμένα, για το αρπιχόρδιο χρησιμοποιήθηκαν 60 ηχητικά αρχεία μορφής WAV, που αντιστοιχούν στις νότες του εικονικού πληκτρολογίου, ενώ για τη φλογέρα επιλέχθηκαν ηχητικά δείγματα μορφής MP3, τα οποία καλύπτουν τις διαθέσιμες νότες από C4 έως D6. Για το ταμπούρο χρησιμοποιήθηκε ένα ηχητικό δείγμα κρούσης.

Τα ηχητικά αρχεία εισήχθησαν στη Unity ως AudioClip, δηλαδή ως ψηφιακά ηχητικά δεδομένα διαθέσιμα για αναπαραγωγή από την εφαρμογή. Η αναπαραγωγή τους πραγματοποιείται μέσω του στοιχείου AudioSource, το οποίο αποτελεί τον μηχανισμό διαχείρισης και εκπομπής ήχου της Unity. Κατά τη διαδικασία κουρδίσματος, η συχνότητα αναπαραγωγής των ηχητικών δειγμάτων μεταβάλλεται δυναμικά και σε πραγματικό χρόνο, μέσω της ιδιότητας AudioSource.pitch, σύμφωνα με τους υπολογισμούς του φυσικού μοντέλου κάθε οργάνου. Έτσι, οι μηχανικές παρεμβάσεις του χρήστη προκαλούν άμεση ακουστική μεταβολή του τονικού ύψους, χωρίς να απαιτούνται ξεχωριστές ηχογραφήσεις για κάθε δυνατή κατάσταση κουρδίσματος.

Β. Αρχιτεκτονική της εφαρμογής και διαχείριση της αλληλεπίδρασης

Η αρχιτεκτονική της εφαρμογής βασίζεται στην αξιοποίηση και επέκταση του υφιστάμενου κώδικα του εικονικού εργαστηρίου Onlabs, καθώς και στην ανάπτυξη νέων κλάσεων για την υποστήριξη των διαδραστικών μηχανισμών των μουσικών οργάνων. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στη Unity με τη γλώσσα προγραμματισμού C#, ακολουθώντας αντικειμενοστρεφή προσέγγιση, με διαχωρισμό των λειτουργιών πλοήγησης, αλληλεπίδρασης, διαχείρισης αντικειμένων και κουρδίσματος.

Γενικές κλάσεις της εφαρμογής

Το κοινό σύστημα πλοήγησης και αλληλεπίδρασης οργανώνεται γύρω από τις κλάσεις EgoController και MouseUI. Η EgoController διαχειρίζεται την κίνηση του χρήστη στο τρισδιάστατο περιβάλλον, την περιστροφή της κάμερας και τις λειτουργίες μεταφοράς αντικειμένων. Η MouseUI αναλαμβάνει τον εντοπισμό των διαδραστικών αντικειμένων μέσω του ποντικιού, την αναγνώριση των διαθέσιμων ενεργειών και τη μεταβίβασή τους στις αντίστοιχες κλάσεις. Με αυτόν τον διαχωρισμό, ο χειρισμός της εισόδου του χρήστη παραμένει ανεξάρτητος από την ειδική συμπεριφορά κάθε αντικειμένου.

Η βασική κλάση InteractableObject αποτελεί το κοινό επίπεδο της ιεραρχίας των διαδραστικών αντικειμένων και παρέχει τις μεθόδους που επιτρέπουν την επικοινωνία τους με τη MouseUI. Από αυτήν προκύπτουν οι γενικές κλάσεις RotatableObject, MovableObject και Key, οι οποίες εξειδικεύουν διαφορετικές μορφές αλληλεπίδρασης.

Η RotatableObject μετατρέπει την κίνηση του ποντικιού σε περιστροφή ενός αντικειμένου, λαμβάνοντας υπόψη τον επιλεγμένο άξονα, την ευαισθησία και τη φορά περιστροφής. Η LimitedRotatableObject επεκτείνει τη λειτουρ-

γικότητα αυτή, επιβάλλοντας περιορισμούς στη γωνία και στη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής. Η MovableObject υποστηρίζει τη συλλογή, μεταφορά, σύνδεση με άλλα αντικείμενα, απόθεση και επαναφορά μεταφερόμενων αντικειμένων, ενώ η Key υλοποιεί τη γενική συμπεριφορά πίεσης και απελευθέρωσης ενός πλήκτρου.

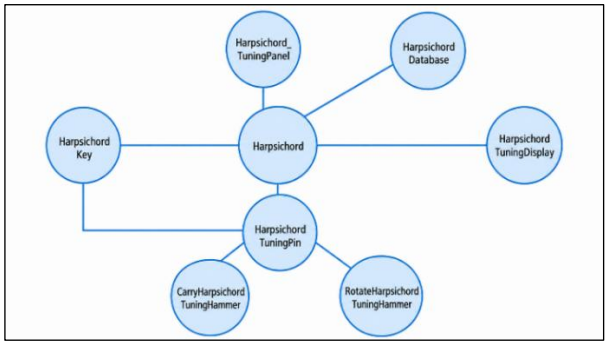
Για τη διαχείριση των μουσικών οργάνων χρησιμοποιείται η γενική κλάση Instrument, η οποία υποστηρίζει την εναλλαγή μεταξύ της κανονικής προβολής του εικονικού περιβάλλοντος και της ειδικής προβολής ενός οργάνου, διαχειριζόμενη τις αντίστοιχες κάμερες. Η Panel ενεργοποιεί τη μετάβαση στην ειδική προβολή μέσω του συστήματος αλληλεπίδρασης, ενώ η ExtraUI διαχειρίζεται την εμφάνιση και την απόκρυψη πρόσθετων στοιχείων της διεπαφής χρήστη.

Τέλος, η TuningToolMode υποστηρίζει την εναλλαγή της λειτουργίας των εργαλείων κουρδίσματος μεταξύ μεταφοράς και περιστροφής. Η κλάση αυτή επιτρέπει τη χρήση του ίδιου εργαλείου σε διαφορετικές καταστάσεις αλληλεπίδρασης, ανάλογα με το στάδιο της διαδικασίας κουρδίσματος.

Οι παραπάνω κλάσεις συγκροτούν ένα κοινό σύστημα λειτουργιών, το οποίο αξιοποιείται από τις εξειδικευμένες κλάσεις των τριών μουσικών οργάνων. Η χρήση γενικών κλάσεων και η εξειδίκευσή τους μέσω κληρονομικότητας επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των βασικών μηχανισμών αλληλεπίδρασης, περιορίζοντας την ανάγκη επανάληψης αντίστοιχου κώδικα για κάθε όργανο.

Αρχιτεκτονική αρπιχορδίου

Η λειτουργία του αρπιχορδίου οργανώνεται γύρω από την κλάση Harpsichord, η οποία συντονίζει τα επιμέρους αντικείμενα του οργάνου και τις διαδικασίες αναπαραγωγής ήχου και κουρδίσματος. Η HarpsichordDatabase αποτελεί το κεντρικό αποθετήριο δεδομένων, περιλαμβάνοντας τις μουσικές νότες, τις συχνότητες αναφοράς και τα αντίστοιχα ηχητικά δείγματα. Κάθε λειτουργικό πλήκτρο αναπαρίσταται από την HarpsichordKey, η οποία κληρονομεί από τη γενική κλάση Key και συνδέει την οπτική κίνηση του πλήκτρου με την αναπαραγωγή της αντίστοιχης νότας.



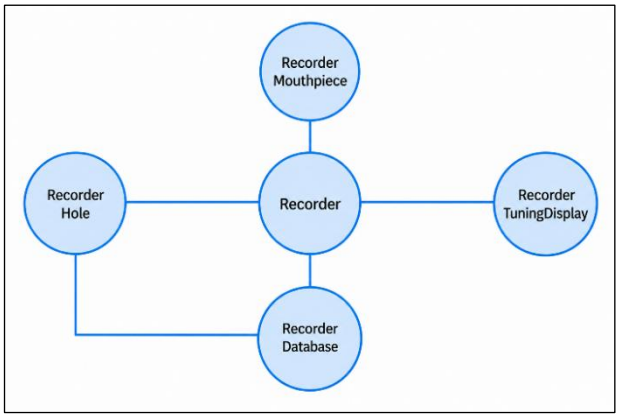
Εικόνα 1. Βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κλάσεων του αρπιχορδίου.

Η διαχείριση του εργαλείου κουρδίσματος πραγματοποιείται μέσω των κλάσεων CarryHarpsichordTuningHammer και RotateHarpsichordTuningHammer, οι οποίες αναλαμβάνουν τη μεταφορά και την περιστροφή του, αντίστοιχα. Η HarpsichordTuningPin συνδέει κάθε πείρο με την αντίστοιχη νότα και υπολογίζει τη μεταβολή της συχνότητάς της, ενώ η HarpsichordTuningDisplay παρουσιάζει τις ενδείξεις του ψηφιακού κουρδιστηρίου. Η Harpsichord_TuningPanel επιτρέπει τη μετάβαση στην ειδική προβολή κουρδίσματος. Οι βασικές σχέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κλάσεων του αρπιχορδίου παρουσιάζονται στην Εικ. 1.

Αρχιτεκτονική φλογέρας

Η κεντρική κλάση Recorder συντονίζει τη λειτουργία της φλογέρας, την αναγνώριση των νοτών, την αναπαραγωγή του ήχου και τον υπολογισμό της συχνότητας κατά το κούρδισμα. Η RecorderDatabase αποθηκεύει τις διαθέσιμες νότες, τις συχνότητες αναφοράς, τα αντίστοιχα δακτυλοθετήματα και τα ηχητικά δείγματα.

Κάθε οπή του οργάνου αναπαρίσταται από την RecorderHole, η οποία διαχειρίζεται την κατάστασή της ως ανοικτής, κλειστής ή μερικώς κλειστής. Η RecorderMouthpiece ενεργοποιεί και διακόπτει την αναπαραγωγή του ήχου, ενώ η RecorderTuningDisplay παρουσιάζει τη συχνότητα και την απόκλιση από την επιθυμητή νότα. Η μετακίνηση της κεφαλής επηρεάζει το ενεργό μήκος της αέριας στήλης, με τη Recorder να αναλαμβάνει τον αντίστοιχο υπολογισμό της συχνότητας. Η συνεργασία των βασικών κλάσεων που υλοποιούν τις παραπάνω λειτουργίες αποτυπώνεται στην Εικ. 2.



Εικόνα 2. Βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κλάσεων της φλογέρας.

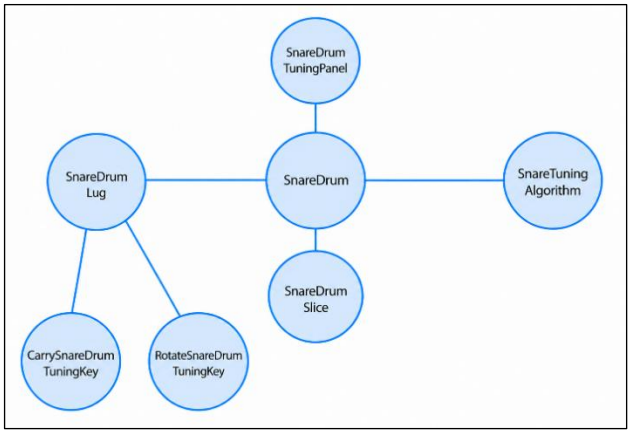
Αρχιτεκτονική ταμπούρου

Η αρχιτεκτονική του ταμπούρου βασίζεται στην κλάση SnareDrum, η οποία συντονίζει τη λειτουργία του οργάνου και τη διαδικασία κουρδίσματος. Οι δέκα περιμετρικοί κοχλίες αναπαρίστανται από αντικείμενα της κλάσης SnareDrumLug, καθένα από τα οποία συνδέεται με μια SnareDrumSlice. Η τελευταία αναπαριστά την αντίστοιχη περιοχή της μεμβράνης και διαχειρίζεται τον υπολογισμό της συχνότητας και την αναπαραγωγή του ήχου της.

Οι κλάσεις CarrySnareDrumTuningKey και RotateSnareDrumTuningKey διαχειρίζονται τη μεταφορά και την περιστροφή του κλειδιού κουρδίσματος, ενώ η SnareTuningAlgorithm καθορίζει την επιτρεπόμενη σειρά ρύθμισης των κοχλιών και ελέγχει την πρόοδο της διαδικασίας. Παράλληλα, η SnareDrumTuningPanel υποστηρίζει τη μετάβαση στην ειδική προβολή κουρδίσματος. Οι σχέσεις μεταξύ των σημαντικότερων κλάσεων της υλοποίησης του ταμπούρου παρουσιάζονται στην Εικ. 3.

Η οργάνωση αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση ενός κοινού συστήματος αλληλεπίδρασης για τρία όργανα με διαφορετικούς μηχανισμούς παραγωγής ήχου, διατη-

ρώντας παράλληλα ανεξάρτητες τις εξειδικευμένες λειτουργίες κάθε οργάνου.



Εικόνα 3. Βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κλάσεων του ταμπούρου.

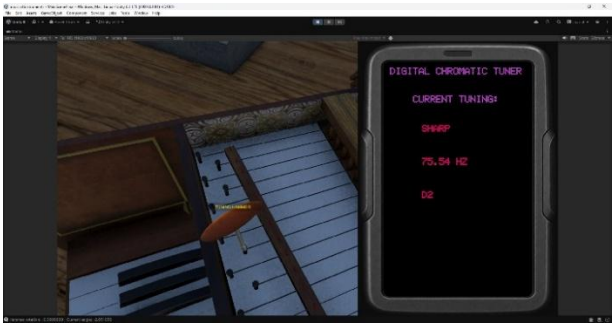
Γ. Υλοποίηση των μηχανισμών κουρδίσματος

Για την υλοποίηση των μηχανισμών κουρδίσματος αξιοποιήθηκαν οι φυσικές και μαθηματικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο θεωρητικό υπόβαθρο, οι οποίες μεταφέρθηκαν σε αλγορίθμους C# στο περιβάλλον της Unity. Οι αλγόριθμοι συνδέουν τις μεταβολές των τρισδιάστατων εξαρτημάτων με τις αντίστοιχες ακουστικές παραμέτρους, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή της συχνότητας κατά την αλληλεπίδραση του χρήστη με τα όργανα. Ο πλήρης πηγαίος κώδικας της εφαρμογής, καθώς και οι λεπτομέρειες υλοποίησης των επιμέρους μηχανισμών, είναι διαθέσιμα στο αποθετήριο GitHub της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και συγκεκριμένα στη διεύθυνση: https://github.com/FedonStylianidis/Musical-Instruments-3d-Tuning-Simulator.

IV. ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

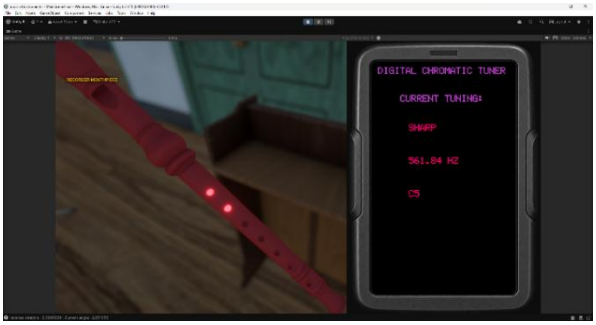
Η εφαρμογή εκτελείται σε τρισδιάστατο περιβάλλον μουσικού εργαστηρίου, στο οποίο ο χρήστης περιηγείται με οπτική πρώτου προσώπου, χρησιμοποιώντας πληκτρολόγιο και ποντίκι. Μπορεί να προσεγγίσει τα μουσικά όργανα, να αλληλεπιδράσει με τα επιμέρους εξαρτήματά τους και να μεταβεί σε ειδικές προβολές για την εκτέλεση των διαδικασιών κουρδίσματος.

Αρπιχόρδιο: Ο χρήστης μπορεί αρχικά να παίξει τις νότες πιέζοντας τα πλήκτρα του οργάνου. Για το κούρδισμα μεταβαίνει στην ειδική προβολή, παραλαμβάνει το εικονικό κλειδί κουρδίσματος και το προσαρτά στον επιθυμητό πείρο. Στη συνέχεια περιστρέφει το κλειδί με το ποντίκι, μεταβάλλοντας τη συχνότητα της αντίστοιχης χορδής. Πατώντας το πλήκτρο, ακούει το αποτέλεσμα και ελέγχει την απόκλιση μέσω του ψηφιακού κουρδιστηρίου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τους υπόλοιπους πείρους. Στην Εικ. 4 παρουσιάζεται στιγμιότυπο από τη λειτουργία κουρδίσματος του αρπιχορδίου.



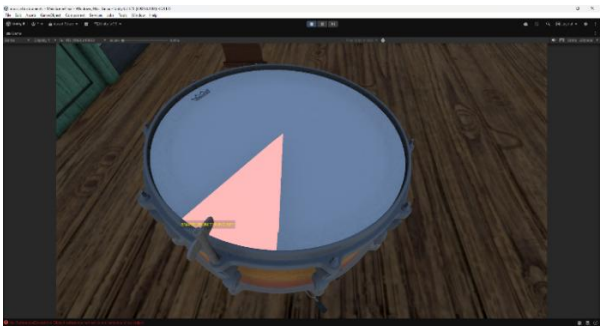
Εικόνα 4. Διαδικασία κουρδίσματος του αρπιχορδίου.

Φλογέρα: Ο χρήστης επιλέγει διαφορετικούς δακτυλισμούς, μεταβάλλοντας την κατάσταση των οπών, και αναπαράγει τις αντίστοιχες νότες μέσω του επιστομίου. Για το κούρδισμα μεταβαίνει στην ειδική προβολή και μετακινεί την κεφαλή του οργάνου σε σχέση με το κυρίως σώμα. Η μετακίνηση επηρεάζει το τονικό ύψος όλων των νοτών, επιτρέποντας στον χρήστη να ελέγχει το αποτέλεσμα μέσω της αναπαραγωγής ήχου και των ενδείξεων του κουρδιστηρίου. Η διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικ. 5.



Εικόνα 5. Η φλογέρα σε κατάσταση κουρδίσματος.

Ταμπούρο: Ο χρήστης μπορεί να χτυπά τη μεμβράνη σε διαφορετικά σημεία, ώστε να ακούει την απόκριση των αντίστοιχων περιοχών. Κατά το κούρδισμα παραλαμβάνει το εικονικό κλειδί, το τοποθετεί σε έναν από τους δέκα περιμετρικούς κοχλίες και το περιστρέφει για να ρυθμίσει την τάση της μεμβράνης. Το αποτέλεσμα ελέγχεται με χτύπημα κοντά στον αντίστοιχο κοχλία. Η εφαρμογή καθοδηγεί επίσης τον χρήστη ως προς τη σωστή σειρά ρύθμισης, με εναλλαγή μεταξύ απέναντι κοχλιών, μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Στην Εικ. 6 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση με τον μηχανισμό κουρδίσματος του ταμπούρου.



Εικόνα 6. Χτύπημα της μεμβράνης του ταμπούρου με το κλειδί τοποθετημένο στον αντίστοιχο κοχλία.

V. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια διαδραστική τρισδιάστατη εφαρμογή προσομοίωσης κουρδίσματος μουσικών οργάνων, με τη χρήση της μηχανής Unity και της γλώσσας C#. Η εφαρμογή συνδυάζει την περιήγηση σε εικονικό εργαστήριο, τον χειρισμό τρισδιάστατων αντικειμένων και την ακουστική αναπαράσταση της μεταβολής του τονικού ύψους. Μέσω της υλοποίησης του αρπιχορδίου, της φλογέρας και του ταμπούρου παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές διαδικασίες κουρδίσματος, οι οποίες βασίζονται αντίστοιχα στη μεταβολή της τάσης χορδής, του μήκους αέριας στήλης και της τάσης μεμβράνης.

Η ανάπτυξη κοινών μηχανισμών αλληλεπίδρασης και εξειδικευμένων κλάσεων για κάθε όργανο επέτρεψε τη σύνδεση των χειρισμών του χρήστη με τον υπολογισμό της συχνότητας και την προσαρμογή του αναπαραγόμενου ήχου. Η εφαρμογή αποτελεί μια βάση για την εξοικείωση με τις βασικές αρχές και διαδικασίες κουρδίσματος μέσα από ένα διαδραστικό περιβάλλον.

Ως μελλοντικές επεκτάσεις προτείνονται η ενσωμάτωση εργασιών συντήρησης και συναρμολόγησης, η υποστήριξη περισσότερων μουσικών οργάνων και συστημάτων κουρδίσματος, καθώς και η αξιοποίηση προηγμένων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας ήχου για ακριβέστερη ακουστική προσομοίωση. Επιπλέον, η μεταφορά της εφαρμογής σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας, με δυνατότητα χειρισμού των οργάνων μέσω ελεγκτών κίνησης και απτικής ανάδρασης, θα μπορούσε να ενισχύσει τη φυσικότητα της αλληλεπίδρασης και τις δυνατότητες πρακτικής εξάσκησης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ανάπτυξη της εφαρμογής αξιοποιήθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα των δημιουργών 3d_molier (αρπιχόρδιο), NRG_3D (ταμπούρο) και tgarch3d (φλογέρα), καθώς και υλικό του Gwangju Arts & Culture Humanities Story Platform για τη διαμόρφωση των εσωτερικών χώρων του εικονικού εργαστηρίου. Τα ηχητικά δείγματα προήλθαν από τον χρήστη pjcohen της πλατφόρμας Freesound (αρπιχόρδιο), την πλατφόρμα Tomplay (φλογέρα) και την πλατφόρμα Pixabay (ταμπούρο). Εκφράζονται ευχαριστίες στους αντίστοιχους δημιουργούς και παρόχους για τη διάθεση του υλικού τους.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Barbour, J. M. (2004). *Tuning and Temperament: A Historical Survey*. Dover Publications.

Benade, A. H. (1990). *Fundamentals of Musical Acoustics* (2nd revised ed.). Dover Publications.

Berg, R. E., & Stork, D. G. (2005). *The Physics of Sound* (3rd ed.). Pearson.

Denis, J. (1987). *Treatise on Harpsichord Tuning* (V. J. Panetta, Ed. & Trans.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511627286

Fletcher, N. H., & Rossing, T. D. (2008). *The Physics of Musical Instruments* (2nd ed.). Springer.

Howard, D. M., & Angus, J. (2017). *Acoustics and Psychoacoustics* (5th ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315716879

Toulson, R. (2021). *Drum Sound and Drum Tuning: Bridging Science and Creativity*. Focal Press. https://doi.org/10.4324/9781003104209

Goldstone, W. (2009). *Unity Game Development Essentials*. Packt Publishing.

Hocking, J. (2022). *Unity in Action: Multiplatform Game Development in C#* (3rd ed.). Manning Publications.

Zafeiropoulos, V., Kalles, D., & Sgourou, A. (2016). Learning by Playing: Development of an Interactive Biology Lab Simulation Platform for Educational Purposes. In I. Deliyannis, P. Kostagiolas, & C. Banou (Eds.), *Experimental Multimedia Systems for Interactivity and Strategic Innovation* (pp. 204–221). https://www.igi-global.com/chapter/learning-by-playing/135131

Zafeiropoulos, V., Kalles, D., & Sgourou, A. (2014). Adventure-Style Game-Based Learning for a Biology Lab. *2014 IEEE 14th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT) 7-10 July 2014, Athens, Greece*, 665–667. https://doi.org/10/gf8x7t