

Υπολογιστική Μουσική Ανάλυση

Γεφυρώνοντας τη Μουσική Ανάλυση με υπολογιστικά εργαλεία
και γνωσιακές προσεγγίσεις

Χριστίνα Αναγνωστοπούλου

Τι θα συζητήσουμε σήμερα

- Τι είναι η υπολογιστική μουσική ανάλυση (Computational Music Analysis, CMA)
- Γιατί τη χρειαζόμαστε;
- Πώς σχετίζεται με την κλασική μουσική ανάλυση;
- Ποιος είναι ο γνωστικός της χαρακτήρας;

Η μουσική ανάλυση σήμερα

- Μελετά τα μουσικά χαρακτηριστικά και τη φόρμα με κάποιους τυποποιημένους τρόπους.
- Για παράδειγμα Αρμονική Ανάλυση, Σενκεριανή Ανάλυση, Μορφολογία, Μοτιβική Ανάλυση, Pitch Class Set Theory, κ.α.
- Παραδοσιακή δομική ανάλυση
- Μέρος της Συστηματικής Μουσικολογίας

Σύγχρονες προκλήσεις στη συστηματική μουσικολογία

- Μεγάλος όγκος δεδομένων
- Ανάλυση μουσικού στυλ
- Πολλά ψηφιακά αρχεία (βλ. Διάλεξη προηγούμενης εβδομάδας)
- Μουσική από διαφορετικές κουλτούρες
- Ανάγκη για διαφάνεια στην αναλυτική διαδικασία
- Ανάγκη για σύγκριση

Τα είδη και οι διαδικασίες της μουσικής ανάλυσης

- Όλες οι μέθοδοι μουσικής ανάλυσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη:
 - Ιεραρχικές μεθόδους
 - Μεθόδους που βασίζονται σε συσχετισμούς στο επιφανειακό επίπεδο (associations on the surface level)
- Όλες οι φορμαλιστικές μέθοδοι βασίζονται στη σύγκριση, δηλαδή σε δύο διαδικασίες:
 - Κατηγοριοποίηση βασισμένη σε σχέσεις ομοιότητας (categorisation)
 - Ανακάλυψη σημαντικών προτύπων (pattern discovery - significance) που συνήθως επαναλαμβάνονται

Το βασικό στοιχείο της μουσικής: Επανάληψη!

- Απαραίτητο για την αφομοίωση της μουσικής
- Σχεδόν όλες οι μουσικές έχουν επανάληψη
- Σκεφτείτε μουσική που δεν έχει επανάληψη. Π.χ. δωδεκαφθογγική. Γιατί συμβαίνει αυτό;
- Επίπεδα επανάληψης:
 - Μικρό: μοτίβο
 - Μεσαίο: φράση
 - Μακρο: Μορφή, θεματική δομή

Τι είναι η Υπολογιστική Μουσική Ανάλυση;

- Χρήση υπολογιστικών τρόπων σκέψεων ή/και εργαλείων για τη μοντελοποίηση και ποσοτικοποίηση της μουσικής ανάλυσης
- Όταν τυποποιείται η αναλυτική διαδικασία, δεν υπάρχουν μαγικά βήματα στην ανάλυση.
- Ο /Η αναλυτής/τρια είναι υποχρεωμένος να έχει αποσαφηνίσει τα κριτήρια για την ανάλυση. Αυτό δεν το πετυχαίνει πάντα χωρίς τον υπολογιστικό τρόπο σκέψης.
- Κατά τον Parncutt και τον Cross, συστηματική μουσικολογία είναι η ενοποίηση της μουσικής θεωρίας με υπολογιστικά μοντέλα και ψυχολογία (δείτε σχετικά άρθρα ανεβασμένα στο eclass)

1ο βήμα: Αναπαράσταση Γνώσης

- Συμβολική: Από MIDI, MusicXML, Humdrum, CHARM, feature vectors κ.α.
 - Ηχητική: spectrogram, MFCC, timbre
 - Υβριδική: συνδυασμός χαρακτηριστικών ήχου και συμβολικής δομής
 - Η αναπαράσταση καθορίζει τι μπορούμε να αναλύσουμε και πώς
-
- Multiple-Viewpoint Representation (Conklin & Anagnostopoulou)
 - Παράλληλα επίπεδα αναπαράστασης (pitch, interval, contour, duration, κα.)
 - Χρήσιμο για ανάλυση μοτίβων, πρόβλεψη, σύνθεση

Τι χρειαζόμαστε μετά;

- Έναν αλγόριθμο που θα τρέξει τη μουσική ανάλυση στην αναπαράσταση γνώσης
- Οι υπολογιστές είναι καλοί στο να κάνουν δύο πράγματα:
 - 1. Κατηγοριοποίηση βασισμένη σε ομοιότητες
 - 2. Εύρεση ή ανακάλυψη προτύπων
- Είμαστε τυχεροί γιατί ακριβώς αυτά τα δύο χρειαζόμαστε για τη μουσική ανάλυση

Κατηγοριοποίηση (Classification/Categorisation)

- Η κατηγοριοποίηση στην πληροφορική είναι η διαδικασία κατά την οποία ένας υπολογιστής μαθαίνει να αποδίδει μία κατηγορία (label) σε ένα αντικείμενο με βάση τα χαρακτηριστικά του.
- Δημιουργούμε ένα μοντέλο που, αφού εκπαιδευτεί σε πολλά παραδείγματα γνωστών κατηγοριών, μπορεί μετά να κατηγοριοποιήσει μόνο του νέα άγνωστα παραδείγματα.
- Παραδείγματα:
 - Input: Ηχητικό απόσπασμα, Output: Είδος μουσικής (τζαζ, ροκ, κλπ)
 - Input: Παρτιτούρα Output: Στυλ, συνθέτης
 - Input: Μουσική Φράση Output: Συναίσθημα (θετικό, αρνητικό)
 - Input: Ηχητικά Χαρακτηριστικά Output: Χροιά (όργανο)

Δομή ενός συστήματος κατηγοριοποίησης

- **Είσοδος - δεδομένα (Input):** Η μουσική ή κάποια αναπαράσταση γνώσης
- **Εξαγωγή Χαρακτηριστικών (Feature Extraction):** Κάποια χαρακτηριστικά όπως μελωδικό περίγραμμα, συγχορδίες, τέμπο, ρυθμικά μοτίβα, κλπ.
- **Εκπαίδευση (Training):** Ο αλγόριθμος βλέπει πολλά παραδείγματα και μαθαίνει να συσχετίζει δεδομένα με κάποιες κατηγορίες.
- **Ταξινόμηση (Classification):** Ο αλγόριθμος κατηγοριοποιεί νέα παραδείγματα.
- **Αξιολόγηση (Evaluation):** Πόσο σωστά κατηγοριοποιεί;

Κύριοι αλγόριθμοι κατηγοριοποίησης

- KNN (K-Nearest Neighbour): Βασίζεται στην «ομοιότητα». Κοιτάει τους k πιο κοντινούς γείτονες ενός νέου δείγματος και παίρνει την πιο συχνή κατηγορία. Πολύ κατανοητός και απλός, χωρίς εκπαίδευση με βάρη.
- Νευρωνικά Δίκτυα: Μαθαίνουν πολύπλοκες μη γραμμικές σχέσεις. Κάθε «νευρώνας» λαμβάνει και συνδυάζει πληροφορία από τους προηγούμενους. Οι πιο προηγμένες εκδοχές (π.χ. RNN) χρησιμοποιούνται σε MIR και deep learning μουσικής.
- Naive Bayes: Πιθανοτικός αλγόριθμος. Υπολογίζει την πιθανότητα ένα δείγμα να ανήκει σε κάθε κατηγορία με βάση τα χαρακτηριστικά του. Υποθέτει ανεξαρτησία μεταξύ χαρακτηριστικών (γι' αυτό «Naive»).
- SVM Support Vector Machines
- Decision Trees
- Στο επόμενο μάθημα οι αλγόριθμοι

Είδη κατηγοριοποίησης με αλγόριθμο

- Επιβλεπόμενη (Supervised): Έχουμε ετικέτες (labels) για κάθε δείγμα. Π.χ. Είδος μουσικής από ηχογράφηση
- Μη επιβλεπόμενη (Unsupervised). Δεν υπάρχουν ετικέτες – βρίσκουμε δομές μόνοι μας. Ομαδοποίηση (clustering) παρόμοιων τραγουδιών, ή παρόμοιων μοτίβων
- Ημι-επιβλεπόμενη (Semi-supervised): Λίγα δεδομένα με labels, τα υπόλοιπα χωρίς. Π.χ. MIR μεγάλων συλλογών
- Ενισχυτική (Reinforcement): Το σύστημα μαθαίνει από επιβράβευση/ποινή. Π.χ. Αυτοσχεδιασμός με ανατροφοδότηση

Υπολογιστική και μουσικολογική αξιολόγηση

- Το σύστημα μετράει από μόνο του: Συνήθεις μετρικές:
- **Accuracy (Ακρίβεια)** = σωστές ταξινομήσεις / συνολικές
- **Precision & Recall** = ισορροπία μεταξύ ψευδών και πραγματικών προβλέψεων
- **Confusion Matrix** = ποιο είδος μπερδεύεται με ποιο
- **Cross-validation** = έλεγχος σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων
- Μετά από αυτό έρχεται και η μουσικολογική αξιολόγηση από τον αναλυτή.
- Καμμία μουσική ανάλυση δεν είναι τελειωμένη εάν δεν έχει γίνει η μουσικολογική αξιολόγηση.
- <https://www.youtube.com/watch?v=4cxVDUybHrI>

Εύρεση και ανακάλυψη προτύπων (patterns)

Τι είναι ένα πρότυπο;

- Στην πληροφορική, ένα **πρότυπο** είναι μια **αναγνωρίσιμη, επαναλαμβανόμενη δομή** μέσα σε δεδομένα. Στη μουσική, είναι ένα **επαναλαμβανόμενο σχήμα** στη μελωδία, στον ρυθμό ή στην αρμονία.
- Παραδείγματα: Στην πληροφορική: επαναλαμβανόμενη λέξη σε ένα κείμενο, συχνό μοτίβο αγορών σε δεδομένα πελατών, σχήμα τιμών σε μια χρονοσειρά.
- Στη μουσική: μελωδικό μοτίβο, αρμονική ακολουθία, ρυθμική επανάληψη.
- Κοινή ιδέα:
👉 Ένα πρότυπο δείχνει **σχέση, ομοιότητα ή κανονικότητα** μέσα σε ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων.
- Γιατί Μας Ενδιαφέρουν τα Πρότυπα;
 - Δείχνουν **δομή** σε αυτό που φαίνεται χαοτικό.
 - Επιτρέπουν **σύνοψη** και **συμπύεση** πληροφορίας.
 - Βοηθούν στη **μάθηση και πρόβλεψη** (π.χ. ποιο γεγονός έρχεται μετά).
 - Στη μουσική, προσδίδουν **συνοχή, ταυτότητα και μνήμη**.

Εύρεση προτύπων (pattern finding)

- Η **εύρεση προτύπων** σημαίνει ότι γνωρίζουμε τι ψάχνουμε και θέλουμε να εντοπίσουμε **πού εμφανίζεται** αυτό το μοτίβο στα δεδομένα.
- Πληροφορική: Εύρεση μιας ακολουθίας χαρακτήρων (string search). Εντοπισμός γνωστού γονιδιακού μοτίβου σε DNA. Αναζήτηση λέξης σε έγγραφα (π.χ. “find in file”).
- Μουσική: Εύρεση συγκεκριμένου μελωδικού ή ρυθμικού μοτίβου μέσα σε μια παρτιτούρα. Αναζήτηση θέματος σε μια συμφωνία. Πρότυπο μπορεί να είναι μία ακολουθία τιμών σε ένα viewpoint, π.χ. contour [1,0,0,1], pitch [70, 72,74], κ.α.
- Ενδεικτικοί Αλγόριθμοι: Knuth–Morris–Pratt, Boyer–Moore, Rabin–Karp (αναζήτηση συμβολοσειρών). Regular Expressions (μοτίβα κειμένου). Template matching (σε ήχο ή εικόνα).

Ανακάλυψη προτύπων (Pattern discovery)

- Η **ανακάλυψη προτύπων** είναι πιο σύνθετη: ο υπολογιστής **δεν γνωρίζει εκ των προτέρων** τι πρότυπα υπάρχουν και **τα εντοπίζει αυτόματα**, αναζητώντας **κανονικότητες** και **επαναλήψεις**.
- Πληροφορική: Εξόρυξη δεδομένων (data mining). Εύρεση συχνών συνδυασμών (π.χ. «όσοι αγοράζουν ψωμί αγοράζουν και γάλα»). Επαναλαμβανόμενα σχήματα σε χρονοσειρές ή αισθητήρες.
- Μουσική: Ο υπολογιστής αναλύει μια μελωδία ή παρτιτούρα και **ανακαλύπτει επαναλαμβανόμενα μοτίβα** χωρίς να του τα έχουμε υποδείξει. Χρησιμοποιείται για μοτιβική, ταύτιση στυλ ή μοντελοποίηση αντίληψης, σύνθεση στο ίδιο στυλ, κλπ.
- Κριτήρια για να Θεωρηθεί Ένα Πρότυπο «Σημαντικό» (στατιστική σημαντικότητα / statistical significance):
 - **Συχνότητα:** Πόσες φορές εμφανίζεται;
 - **Μέγεθος:** Πόσο μεγάλο είναι το τμήμα που καλύπτει;
 - **Διακριτότητα:** Ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα δεδομένα;
 - **Ρόλος:** Έχει λειτουργική σημασία (π.χ. σε δομή, ύφος ή στυλ);
 - Μουσικολογική αξιολόγηση: Κάθε στατιστικά σημαντικό πρότυπο δεν είναι απαραίτητα και μουσικολογικά σημαντικό!

Υπολογιστική διαδικασία

- 1. **Αναπαράσταση** δεδομένων (π.χ. ακολουθίες, πίνακες, συμβολοσειρές).
- 2. Δημιουργία υποσυνόλων (segments). Χωρίζουμε τα δεδομένα σε **όλα τα πιθανά τμήματα** (υποακολουθίες).
Παράδειγμα: Ακολουθία: A B C D
Τμήματα: A, B, C, D, AB, AC, AD, BC, BD, ABC, BCD, ABCD
- 3. **Σύγκριση** όλων των πιθανών segments. Κάθε ζεύγος τμημάτων συγκρίνεται με βάση κάποιο **μέτρο ομοιότητας ή απόστασης**. Κοινές μετρικές: Ακρίβεια ταύτισης (exact match) — ίδιες τιμές/σύμβολα. **Levenshtein distance (edit distance)** — πόσες αλλαγές χρειάζονται για να μετατραπεί η μία ακολουθία στην άλλη. **Cosine similarity** — σύγκριση διανυσμάτων (σε χαρακτηριστικά ή συχνότητες). **Euclidean distance** — σύγκριση σε αριθμητικό χώρο. Παράδειγμα: Αν συγκρίνουμε το ABC και το ABD η διαφορά τους είναι 1.
- 4. **Ομαδοποίηση** παρόμοιων δομών. Δημιουργία πίνακα ομοιοτήτων (similarity matrix). Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων μπαίνουν σε έναν **πίνακα $N \times N$** , όπου κάθε κελί (i, j) δείχνει **πόσο όμοιο** είναι το τμήμα i με το τμήμα j. Αυτός ο πίνακας αποκαλείται **Self-Similarity Matrix (SSM)** και είναι θεμελιώδης στη μουσική και στα δεδομένα.
- 5. **Αξιολόγηση** σημαντικότητας. Χρησιμοποιούμε στατιστικά τεστ.
- 6. Ερμηνεία / Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων.
- <https://www.youtube.com/watch?v=4zpH3wyl5H8>

Κοινή λογική πληροφορικής και μουσικής ανάλυσης

- Η πληροφορική και η μουσική ανάλυση χρησιμοποιούν την ίδια γνωσιακή αρχή:
Ο εγκέφαλος, όπως και ο υπολογιστής, **αναζητά επαναλήψεις, συσχετίσεις και κανονικότητες.**
- Η υπολογιστική προσέγγιση μάς βοηθά να περιγράψουμε αυτό που ο αναλυτής βλέπει στην παρτιτούρα ή ο ακροατής αντιλαμβάνεται διαισθητικά.
- Πολύ σημαντικό σε μεγάλο όγκο δεδομένων, ή σε δεδομένα που δεν είναι προφανή τα επαναλαμβανόμενα μοτίβα.

Εργαλεία για συμβολικές αναπαραστάσεις

- Συμβολικά Εργαλεία (Symbolic Analysis): Αναλύουν δεδομένα σε μορφή παρτιτούρας ή MIDI.
- **Music21 (MIT)** – Βιβλιοθήκη Python για ανάλυση, αρμονία, μοτίβα, μετατροπή μορφών (MusicXML, MIDI). <https://www.music21.org/>
- **Humdrum Toolkit (Huron)** – Παλαιότερο αλλά ισχυρό εργαλείο για στατιστική και θεωρητική ανάλυση μουσικής με μορφή text. <https://www.humdrum.org/>
- **Melisma music analyser** – Εντοπίζει μουσικά μοτίβα και μορφές βασισμένες σε θεωρητικά κριτήρια (Temperley). <https://davidtemperley.com/research-projects/>
- **FMP Notebooks (M. Müller)** – Διαδραστικά Jupyter notebooks για εκπαιδευτική ανάλυση ρυθμού, μελωδίας και μορφής. <https://www.audiolabs-erlangen.de/FMP>
- **MIDI Toolbox (Toivainen & Eerola)** – Ανάλυση ρυθμικών και μελωδικών χαρακτηριστικών σε αρχεία MIDI. <https://www.jyu.fi/hytk/fi/laitokset/mutku/en/research/materials>
- **Pattern discovery in multiple viewpoint patterns (Conklin)** not available

Εργαλεία για ηχητικές αναπαραστάσεις

- Ηχητικά Εργαλεία (Audio Analysis / MIR)
- Επεξεργάζονται απευθείας ηχογραφήσεις (wav, mp3).
- **MIR Toolbox (Lartillot & Toivianen)** – MATLAB εργαλείο για εξαγωγή ρυθμού, τέμπο, φασματικών χαρακτηριστικών, timbre. <https://www.jyu.fi/hytk/fi/laitokset/mutku/en/research/materials>
- **Essentia (MTG Barcelona)** – Ανοιχτού κώδικα βιβλιοθήκη (C++/Python) για εξαγωγή χαρακτηριστικών, είδος, συναίσθημα, timbre. <https://essentia.upf.edu/>
- **Sonic Visualiser** – Εφαρμογή με γραφικό περιβάλλον για οπτικοποίηση spectrograms, beats, segmentation.
- **aubio** – Ελαφριά βιβλιοθήκη για pitch tracking, beat detection, onset detection.
- **Librosa (Python)** – Εύχρηστη βιβλιοθήκη για feature extraction, visualization και machine learning σε ήχο <https://librosa.org/>

Online course

- MIT course on computational music theory and analysis: <https://ocw.mit.edu/courses/21m-383-computational-music-theory-and-analysis-spring-2023/>

Στα επόμενα δύο μαθήματα

- Αλγόριθμοι και ειδικά νευρωνικά δίκτυα, γενετικοί αλγόριθμοι, κυτταρικά αυτόματα
- Άλλες αναλυτικές διαδικασίες, πιο συγκεκριμένες μικρότερες διαδικασίες (π.χ. εύρεση μέτρου, εναρμόνιση, κλπ)