

Αυτόματη Μελωδική Ανάλυση με Υπολογιστικές Μεθόδους

Αιμίλιος Καμπουρόπουλος

Αυστριακό Ερευνητικό Ινστιτούτο Τεχνητής Νοημοσύνης

Βιέννη, Αυστρία

emilios@ai.univie.ac.at

http://www.ai.univie.ac.at/~emilios

Περίληψη

Στο παρόν άρθρο, θα γίνει μία γενική επισκόπηση σειράς υπολογιστικών προτύπων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν, κατά κύριο λόγο, για αυτόματη μελωδική ανάλυση. Τα πρότυπα αυτά αναπτύχθηκαν κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών από τον γράφοντα, και στηρίζονται σε αρχές και συμπεράσματα που προέρχονται κυρίως από τους χώρους της μουσικής θεωρίας, της γνωστικής ψυχολογίας και της τεχνητής νοημοσύνης. Θα παρουσιαστούν υπολογιστικές μέθοδοι για τις εξής μουσικές διεργασίες: τεμαχισμός της μελωδικής επιφάνειας σε στοιχειώδη μέρη βασισμένος σε γνωστικές αρχές Gestalt και αρχές μουσικής ομοιότητας, εύρεση μετρικής δομής και τέλος οργάνωση των στοιχειωδών μελωδικών μερών σε μουσικές κατηγορίες (π.χ. μοτίβα, θέματα κλπ) με χρήση ενός νέου μοντέλου κατηγοριοποίησης. Μία σειρά από μουσικά παραδείγματα θα παρουσιαστούν για να καταδείξουν την αποτελεσματικότητα των ανωτέρω προτύπων.

Εισαγωγή

Η 'κατανόηση' ενός μουσικού έργου εξυπακούεται, σε ένα πρώτο επίπεδο, την ικανότητα (συνειδητή ή ασυνειδητή) ενός ακροατή να το ανάγει σε στοιχειώδη μέρη και να κάνει συσχετισμούς μεταξύ αυτών των επιμέρους μουσικών υπομονάδων (Minsky 1993). Η οργάνωση της μουσικής επιφάνειας, όσον αφορά συστατικά της μέρη και σχέσεις μεταξύ τους, αποτελεί την μουσική δομή ενός έργου. Η μουσική ανάλυση έχει στόχο της τον καθορισμό της μουσικής δομής, ακολουθώντας συχνά προσέγγισεις που προέρχονται από τον χώρο της μουσικής αντίληψης και της γνωστικής ψυχολογίας (Bent 1980).

Υπολογιστικές μεθοδολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη πολλών μουσικών φαινομένων. Ίσως το πιο ενδιαφέρον στοιχείο που παρουσιάζει η εισαγωγή και χρήση υπολογιστικών μοντέλων στον χώρο της μουσικολογίας είναι ότι τέτοιες μέθοδοι υποχρεώνουν τον ερευνητή να διατυπώσει με απόλυτα συστηματικό τρόπο μουσικές θεωρίες οι οποίες στην συνέχεια μπορούν να διερευνηθούν με την χρήση υπολογιστών. Ο κύριος στόχος δημιουργίας υπολογιστικών μοντέλων δεν είναι τόσο να δοθούν λύσεις σε μουσικά προβλήματα αλλά πολύ περισσότερο να οδηγήσουν σε μια λεπτομερέστερη και πιο συστηματική εξέταση και κατανόηση των μουσικών φαινομένων.

Σε πιο πρακτικό επίπεδο, η διατύπωση υπολογιστικών μουσικών θεωριών, κυρίως σε σχέση με την περιγραφή της μουσικής δομής, είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη 'ευφύστερου' μουσικού λογισμικού. Αν θέλει κανείς ένα μουσικό πρόγραμμα να ανταποκρίνεται με 'μουσικό' τρόπο σε ένα μουσικό χρήστη, τότε θα πρέπει και ο υπολογιστής να 'αντιλαμβάνεται' όσο το δυνατόν περισσότερα δομικά στοιχεία. Υπολογιστικά μοντέλα διαφόρων μουσικών διεργασιών είναι αναγκαία για την ανάπτυξη εξελιγμένων μουσικών συστημάτων, π.χ. για λογισμικό μουσικής σημειογραφίας, εκπαιδευτικών προγραμμάτων,

διαδραστικών συστημάτων για μουσικές παραστάσεις, συστημάτων αποθήκευσης και ανάλυσης πληροφοριών από βάσεις μουσικών δεδομένων, προγραμμάτων που επιχειρούν να εκτελέσουν μουσική εκφραστικά, συστημάτων που διευκολύνουν την μουσική δημιουργία για άτομα με ειδικές κινησιακές ανάγκες κ.ο.κ.

Στην παρούσα μελέτη θα παρουσιαστούν μια σειρά από υπολογιστικά πρότυπα, που έχει αναπτύξει ο γράφων κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών, κατάλληλα για την δομική ανάλυση μίας μελωδικής επιφάνειας. Υποθέτοντας ότι μία μελωδία αναπαρίσταται, σ'ένα πρώτο επίπεδο, ως μία στοιχειώδη αλληλουχία μεμονομένων μουσικών φθόγγων, τα προτεινόμενα υπολογιστικά πρότυπα επιχειρούν να δώσουν απαντήσεις στα εξής ερωτήματα:

1. Με ποιό τρόπο γίνεται να προσδιοριστούν τοπικά όρια τα οποία να επιτρέπουν τον τεμαχισμό μίας μελωδικής επιφάνειας σε στοιχειώδη μέρη;
2. Πώς μπορεί να οριστεί η μετρική δομή μιας μελωδίας;
3. Πώς μπορούν να ξεχωριστούν και να επιλεγούν σημαντικά μελωδικά σχήματα (patterns);
4. Πώς επηρεάζει η μουσική 'ομοιότητα' τον τεμαχισμό μιας μελωδίας;
5. Με ποιόν τρόπο μπορούν να οργανωθούν στοιχειώδη μελωδικά τμήματα σε κατηγορίες όπως μοτίβα, θέματα κλπ;

Η κατωτέρω παρουσίαση θα επικεντρωθεί περισσότερο στην ανάδειξη βασικών αρχών και μεθόδων που είναι αναγκαία για την πραγμάτωση μελωδικών αναλυτικών διεργασιών παρά στην λεπτομερή περιγραφή συγκεκριμένων αλγόριθμων κατάλληλων για ανάπτυξη σχετικού μουσικού λογισμικού (για τους ενδιαφερόμενους παρατίθενται παραπομπές σε σχετικές εργασίες). Για λόγους ευκρίνειας, θα γίνει χρήση ενός μόνο 'απλού' μελωδικού παραδείγματος, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στα διάφορα στάδια της παρουσίασης για την ανάδειξη των μελωδικών προβλημάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου επιτευχθεί μία 'αποδεκτή' δομική περιγραφή.

Τοπικά όρια μεταξύ μελωδικών τμημάτων

Οι αρχές αντίληψης Gestalt είναι ένα σύνολο από πρακτικούς κανόνες που καταγράφουν διάφορους προτιμητέους τρόπους οργάνωσης στοιχειωδών αντιληπτικών ερεθισμάτων σε ευρύτερες ομάδες (κυρίως οπτικών ερεθισμάτων). Δύο απ' τις πιο θεμελιώδεις αρχές αναφέρουν ότι αντικείμενα που βρίσκονται πλησιέστερα το ένα στο άλλο (αρχή Εγγύτητας) ή είναι πιο όμοια μεταξύ τους (αρχή Ομοιότητας) τείνουν να γίνουν αντιληπτά ως μέλη της ίδιας ομάδας. Αυτές οι αρχές έχουν αποτελέσει το υπόβαθρο για την ανάπτυξη σύγχρονων μοντέλων που επιχειρούν να εντοπίσουν τοπικά όρια κατάλληλα για τον τεμαχισμό μελωδιών σε στοιχειώδη τμήματα.

Για παράδειγμα, στο μοντέλο των Tenney and Polanski (1980) οι αρχές Εγγύτητας και Ομοιότητας ερμηνεύονται ως διαφορετικές εκφάνσεις του ίδιου φαινομένου: ένα τοπικό μέγιστο στις αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών μουσικών φθόγγων για οιαδήποτε μουσική παράμετρο (π.χ. τονικά ύψη και διάρκειες). Μία μελωδία αναπαρίσταται ως μια σειρά μελωδικών διαστημάτων (σε ημιτόνια) και ως μια σειρά χρονικών διαστημάτων ανάμεσα στις αρχές διαδοχικών φθόγγων (σε πολλαπλάσια μιας ελάχιστης μονάδας χρονικής διάρκειας, π.χ. αξία δεκάτου έκτου). Στην συνέχεια, οι αντίστοιχοι αριθμοί των δύο σειρών αθροίζονται ανά δύο (π.χ. ο πρώτος αριθμός στην σειρά του Παραδείγματος 1β είναι το άθροισμα 4 ημιτονίων και 4 δεκάτων έκτων) και τα τοπικά μέγιστα στην τελική σειρά εκλαμβάνονται ως τα πιο πιθανά σημεία που ορίζουν τοπικά μελωδικά όρια (Παράδειγμα 1β).

Το πρότυπο προσδιορισμού τοπικών ορίων των Lerdahl and Jackendoff (1983) προτείνει ένα σύνολο πρακτικών κανόνων οι οποίοι εντοπίζουν τα πιο πιθανά σημεία τεμαχισμού μίας

μελωδικής επιφάνειας. Αυτοί οι κανόνες είτε ισχύουν είτε όχι (δεν έχουν διαβαθμίσεις) και γενικώς εντοπίζουν τοπικά μέγιστα για διάφορες μουσικές παραμέτρους. Για παράδειγμα:

GPR2b: Ένα χρονικό διάστημα μεταξύ δύο μουσικών φθόγγων μπορεί να εκληφθεί ως τοπικό όριο εάν είναι μεγαλύτερο από το προηγούμενο και το επόμενο χρονικό διάστημα.

GPR3a: Ένα μελωδικό διάστημα μπορεί να εκληφθεί ως τοπικό όριο εάν είναι μεγαλύτερο από το προηγούμενο και το επόμενο μελωδικό διάστημα.

GPR3d: Σε μία διαδοχή τεσσάρων φθόγγων, τοπικό όριο μπορεί να γίνει αντιληπτό μεταξύ των δύο μεσαίων φθόγγων εάν οι δύο πρώτοι και οι δύο τελευταίοι φθόγγοι έχουν ίδιες χρονικές διάρκειες και οι δύο μεσαίοι διαφορετικές.

Ένας επιπρόσθετος ενισχυτικός κανόνας ορίζει ότι αν περισσότεροι του ενός κανόνες τοπικών ορίων ισχύουν για το ίδιο σημείο, τότε το συγκεκριμένο όριο θεωρείται ως πιο ισχυρό. Η εφαρμογή των ανωτέρω τριών κανόνων παρουσιάζεται στο Παράδειγμα 1α. Αυτό το πρότυπο έχει αποτελέσει βάση για πληθώρα υπολογιστικών εφαρμογών και επίσης εμπειρικές μελέτες έχουν πιστοποιήσει την εγγυρότητα του (Deliège 1987).



<i>L&J</i>		3d	3a	3d	3d	3a	3d	3d	2b	3d	2b	3d	3d	3d	3d	3d	3d	2b	...														
<i>T&P</i>		8	3	4	11	9	4	4	13	11	4	3	5	8	2	2	6	4	4	4	6	4	3	4	5	3	3	4	5	3	3	9	...
<i>LDBM</i>		26	17	22	52	43	22	26	61	52	22	9	35	100	17	9	35	9	9	22	17	9	9	22	17	9	9	22	17	9	22	39	...

Παράδειγμα 1 Τρία πρότυπα καθορισμού τοπικών ορίων εφαρμοζόμενα σε μία μελωδία από το *Valse, Op. 18* του Chopin. i) Πρότυπο των Lerdahl και Jackendoff (χρησιμοποιούνται οι τρεις κανόνες που παρουσιάζονται στο κείμενο), ii) Πρότυπο των Tenney και Polanski, και iii) Πρότυπο LDBM. Οι υπογραμμισμένες αξίες υποδεικνύουν πιθανά τοπικά μελωδικά όρια.

Έχει υποστηριχθεί από τον γράφοντα (Cambouropoulos 1996, 1997) ότι, μολονότι οι ανωτέρω φορμαλισμοί των αρχών Gestalt (που βασίζονται στον εντοπισμό ενός μεγαλύτερου διαστήματος ανάμεσα σε μικρότερα) προσφέρουν έναν βασικό παράγοντα για τον καθορισμό τοπικών ορίων, μια πιο γενική προσέγγιση θα έπρεπε να λαμβάνει υπ' όψιν της την οιαδήποτε αλλαγή στο μέγεθος των διαστημάτων. Για παράδειγμα, παρ' όλο που στην ακολουθία χρονικών διαρκειών: ♪ ♪ ♪ ♪ ♪ ♪ ένας ακροατής εύκολα αντιλαμβάνεται ένα τοπικό όριο, κανένα από τα δύο ανωτέρω πρότυπα δεν προτείνει κάποιο όριο.

Το προτεινόμενο πρότυπο (Local Boundary Detection Model – LDBM) βασίζεται σε δύο κανόνες: τον κανόνα Ταυτοσημίας-Αλλαγής και τον κανόνα Εγγύτητας. Ο κανόνας Ταυτοσημίας-Αλλαγής είναι πιο στοιχειώδης από τις αρχές Gestalt καθώς μπορεί να εφαρμοστεί για δύο μόνο αντικείμενα (τα οποία είναι ταυτόσημα ή όχι), ενώ οι κανόνες Εγγύτητας και Ομοιότητας απαιτούν τουλάχιστον τρία αντικείμενα (δυο εκ των οποίων είναι πιο κοντά ή πιο όμοια σε σχέση με το τρίτο). Ο όρος διάστημα σημαίνει, σε αυτό το κείμενο, την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αντικειμένων ως προς κάποια παράμετρο (π.χ. μελωδικό διάστημα, χρονικό διαστημα κ.ο.κ).

Κανόνας Ταυτοσημίας-Αλλαγής: Ένα όριο μπορεί να εισαχθεί εάν δύο διαδοχικά διαστήματα είναι διαφορετικά. Αν δύο διαστήματα είναι ίδια κανένα όριο δεν εισάγεται.

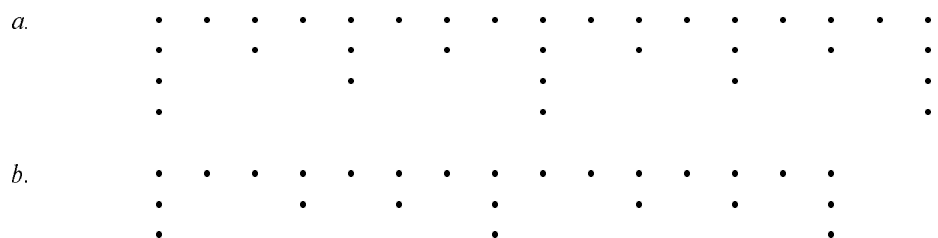
Κανόνας Εγγύτητας: Αν δύο διαδοχικά διαστήματα είναι διαφορετικά, τότε το εισαγόμενο όριο κατά προτίμηση τοποθετείται στο μεγαλύτερο διάστημα.

Στηριζόμενο στους ανωτέρω κανόνες, μία εξειδικευμένη μορφή του πρότυπου αυτού δίνει ένα ‘προφίλ’ από αριθμητικές τιμές (από 0 – 100) για κάθε διάστημα μιας μελωδίας ανάλογα με την ισχύ του ως όριο – τα τοπικά μέγιστα υποδεικνύουν τα σημεία τα οποία είναι πιο πιθανόν να εκληφθούν ως τοπικά όρια (Παράδειγμα 1γ). Το πρότυπο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί πολύ πρόσφατα με επιτυχία σε κάποιες υπολογιστικές εφαρμογές (Melucci and Origo 2000) και επίσης μια πρόσφατη εμπειρική έρευνα σύγκρισης του με άλλα μοντέλα έχει δώσει πολύ καλά αποτελέσματα (Battel and Fimbiani, 1998).

Ο προσδιορισμός τοπικών ορίων δεν είναι αρκετός για τον τεμαχισμό μιας μελωδικής επιφάνειας (βλ. ενότητα Μουσικά Σχήματα). Παρ’ όλα αυτά, ο εντοπισμός τοπικών ορίων παίζει σημαντικό ρόλο σε διαδικασίες τεμαχισμού μουσικών επιφανειών καθώς επίσης και στον προσδιορισμό της μετρικής δομής (βλ. επόμενη ενότητα).

Μετρική Δομή

Νότες οι οποίες έχουν, για παράδειγμα, σχετικά μεγαλύτερες χρονικές διάρκειες, ακραία τονικά ύψη, μεγαλύτερη αρμονική σταθερότητα κλπ., εκλαμβάνονται από έναν ακροατή ως σημαντικότερες ή πιο τονισμένες σχετικά με τις νότες στον άμεσο περίγυρό τους. Το μουσικό μέτρο είναι μία αφηρημένη δομή (αποτελούμενη από διάφορα επίπεδα έκαστο εκ των οποίων ορίζεται ως μια περιοδική σημειοσειρά - Παράδειγμα 2) η οποία συνταιριάζεται με την μουσική επιφάνεια έτσι ώστε οι πιο τονισμένες μουσικές νότες να ταυτίζονται με τις σχετικά ισχυρότερες μετρικές θέσεις. Υπάρχουν διάφορα υπολογιστικά πρότυπα καθορισμού της μετρικής και ρυθμικής δομής (βλ. Lee 1991; Longuet-Higgins and Lee 1984; Povel and Essens 1985; Rosenthal 1992).



Παράδειγμα 2 Μετρικές δομές για μέτρα 4/4 και 7/8 αντίστοιχα.

Η υπόθεση ότι νότες οι οποίες συνορεύουν με ένα σημαντικό τοπικό όριο τείνουν να εκλαμβάνονται ως τοπικά πιο τονισμένες, αποτελεί αφετηρία για την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου που υπολογίζει την πιο πιθανή μετρική δομή. Ένα τοπικό όριο εξυπακούεται την ύπαρξη τονισμένων μουσικών φθόγγων οι οποίοι το ορίζουν. Ο Epstein (1995) υποστηρίζει ότι: ‘οριοθέτηση σημαίνει στην ουσία έμφαση – σημαίνει την απαραίτητη έμφαση την συγκεκριμένη στιγμή κατά την οποία το όριο ενός μελωδικού τμήματος καθορίζεται.’ (σελ. 24).

Για παράδειγμα, αν οι τιμές ισχύος των τοπικών ορίων που δίνονται απ’ το πρότυπο *LBDM* αθροιστούν ανά δύο, τότε προκύπτουν νέες τιμές που προσδιορίζουν την σχετική έμφαση με την οποία γίνεται αντιληπτή η κάθε νότα (Παράδειγμα 3).



LDBM 26 17 22 52 43 22 26 61 52 22 9 35 100 17 9 35 9 9 22 17 9 9 22 17 9 9 22 17 9 22 39 ...
 Τονισμός 43 39 74 95 65 26 87 113 79 31 44 135 117 26 44 44 18 31 39 36 18 31 39 26 18 31 39 26 31 61

Παράδειγμα 3 Τιμές που προσδιορίζουν τον σχετικό τονισμό κάθε φθόγγου της μελωδίας (Chopin, *Valse, Op. 18*).

Η στενή σχέση ανάμεσα στα τοπικά όρια και στον τονισμό των μελωδικών φθόγγων είναι σημαντική γιατί επιτρέπει την ανάπτυξη πιο λιτών υπολογιστικών προτύπων τα οποία δεν προαπαιτούν δύο ανεξάρτητες υπομονάδες προσδιορισμού τοπικών ορίων και σχετικού τονισμού αντιστοίχως. Σε αντιπαράθεση με την θεωρία των Lerdahl και Jackendoff (Παράδειγμα 4α) η οποία απαιτεί δύο ανεξάρτητα σύνολα κανόνων για τον προσδιορισμό των τοπικών ορίων και του μελωδικού τονισμού (ο οποίος είναι απαραίτητος για τον καθορισμό της μετρικής δομής), το προτεινόμενο μοντέλο απαιτεί μόνο τον προσδιορισμό τοπικών ορίων απ' τον οποίο αυτόματα μπορεί να καθοριστεί η σχετική έμφαση με την οποία γίνονται αντιληπτοί οι μελωδικοί φθόγγοι (Παράδειγμα 4β).

α.	Δομή Ορίων	Μετρική Δομή Μουσικός Τονισμός
β.	Δομή Ορίων Μουσικός Τονισμός ↔ Μετρική Δομή	

Παράδειγμα 4α. Θεωρία ρυθμού των Lerdahl και Jackendoff
β. Προτεινόμενη θεωρία μουσικού ρυθμού.

Αφού προσδιοριστούν τιμές οι οποίες υποδηλώνουν τον σχετικό 'τονισμό' κάθε νότας μιας μελωδίας, μπορεί να γίνει μία προσπάθεια να βρεθεί η πιο ταιριαστή μετρική δομή (Parncutt 1994). Αυτό μπορεί να καταστεί δυνατό είτε για όλα τα μετρικά επίπεδα, είτε μόνο για ένα, είτε ακόμη και για κανένα, ανάλογα με το είδος της μουσικής.

Για κάθε μετρικό επίπεδο μπορεί να υπολογιστεί μία τιμή η οποία υποδηλώνει το πόσο καλά ταιριάζει αυτή η σημειοσειρά στην συγκεκριμένη μελωδία. Ο πιο απλός τρόπος είναι να υπολογίσει κανείς το άθροισμα των τιμών τονισμού όλων των φθόγγων που ταυτίζονται με τα σημεία μιας συγκεκριμένης 'μετατόπισης' μιας σημειοσειράς. Η μετατόπιση για την σημειοσειρά με την μεγαλύτερη τιμή εκλαμβάνεται ως η πιο πιθανή για το συγκεκριμένο μετρικό επίπεδο. Επανερχόμενοι στο μελωδικό μας παράδειγμα, από τις διάφορες μετατοπίσεις για τις σημειοσειρές των 2/4 και 3/4 (Πίνακας 1) η καλύτερη τιμή ταύτισης προκύπτει για το μετρικό επίπεδο των 3/4 το οποίο αρχίζει στην πρώτη νότα της μελωδίας – αυτό άλλωστε είναι και το μέτρο το οποίο εμφανίζεται στην παρτιτούρα της συγκεκριμένης μελωδίας.

Μετρικό επίπεδο	2/4		3/4		
Μετατόπιση	0	1/4	0	1/4	2/4
Συνολική τιμή	419	577	639	304	550

Πίνακας 1

Η μετρική δομή μπορεί να εξαχθεί από την δομή του σχετικού τονισμού των επιμέρους φθόγγων, ταυτοχρόνως όμως αυτή επηρεάζει καθ'εαυτή την δομή ορίων και τονισμού

(Clarke 1985). Όταν καθοριστεί η μετρική δομή ενός μουσικού κομματιού σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία, μπορούν να ενισχυθούν οι τιμές τονισμού των φθόγγων ανάλογα με την ισχύ της μετρικής τους θέσης.

Η ανωτέρω υπόθεση λαμβάνει υπ' όψιν της κυρίως μικροδομικά χαρακτηριστικά της δομής ορίων και του τονισμού των φθόγγων. Είναι πιθανό αυτές οι δομές σε υψηλότερα επιπέδα οργάνωσης να είναι μερικώς ανεξάρτητες ή ακόμη και ανταγωνιστικές. Παρ' όλα αυτά, είναι σημαντικό το ότι μπορούν να εξαχθούν η τοπική δομή μουσικού τονισμού και το μέτρο από την δομή τοπικών μελωδικών ορίων.

Μουσικά Σχήματα και Μελωδικός Τεμαχισμός

Η επανάληψη μουσικών σχημάτων (patterns) - με ή χωρίς παραλλαγές - είναι ένας βασικός μηχανισμός παραγωγής μουσικών 'νοημάτων'. Η επανάληψη μουσικών σχημάτων όχι μόνο επιτρέπει τον σχηματισμό μουσικών 'κατηγοριών' όπως, για παράδειγμα, μουσικά μοτίβα, θέματα με παραλλαγές, κατηγορίες αρμονικών διαδοχών κλπ. (βλ. επόμενη ενότητα), αλλά επίσης είναι καθοριστική για τον αρχικό τεμαχισμό ενός έργου σε επιμέρους τμήματα. Ο τεμαχισμός μιας μελωδικής επιφάνειας επηρεάζεται αφ' ενός από τοπικές ασυνέχειες/όρια (βλ. προηγούμενες ενότητες) και αφ' ετέρου από μακροδομικούς μηχανισμούς όπως είναι η μουσική ομοιότητα. Όμοια μουσικά σχήματα τείνουν να γίνονται αντιληπτά ως ενιαίες αυτόνομες ενότητες των οποίων η αφετηρία και το τέλος συμβάλλει στον τεμαχισμό μιας μουσικής επιφάνειας. Για παράδειγμα, η επανάληψη του ίδιου μελωδικού σχήματος (τετράκις) στο δεύτερο μισό της εξεταζόμενης μελωδίας καθορίζει σημεία τεμαχισμού (βλ. αστερίσκους στο Παράδειγμα 6) στα οποία τοπικά όρια είναι σχεδόν ανύπαρκτα.

Υπάρχουν ελάχιστα υπολογιστικά πρότυπα που να βασίζονται σε αρχές μουσικής ομοιότητας (Baker 1989). Εδώ θα γίνει μια σύντομη περιγραφή της μεθόδου που έχει αναπτύξει ο γράφων (Cambouropoulos 1998). Αυτή η μέθοδος στηρίζεται σ' έναν αλγόριθμο ο οποίος καθιστά δυνατό τον εντοπισμό όλων των επαναλήψεων σε μια αλληλουχία συμβόλων (Chrochemore 1981). Αφού εντοπιστούν όλες οι επαναλήψεις, για παράδειγμα, μελωδικών διαστημάτων ή χρονικών διαρκειών, υπολογίζεται μια τιμή για κάθε σχήμα σε σχέση α) με την συχνότητα με την οποία παρουσιάζεται το σχήμα αυτό στην συγκεκριμένη σειρά, β) με το μέγεθος του σχήματος, και γ) με το ποσοστό αλληλεπικάλυψης που παρουσιάζει το σχήμα αυτό ανάμεσα στις διάφορες επαναλήψεις του. Όσο πιο μεγάλη η τιμή αυτή, τόσο πιο σημαντικό είναι το συγκεκριμένο σχήμα. Κατ'αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να ταξινομηθούν τα χιλιάδες σχήματα που εντοπίζονται ανάλογα με την σπουδαιότητά τους. (Σημείωση: ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο σε μουσικές παραμέτρους της μελωδικής επιφάνειας αλλά και σε διάφορες αφαιρετικές μορφές της που αποτελούνται, για παράδειγμα, από μετρικά ισχυρές νότες ή τονισμένες νότες κ.ο.κ.).

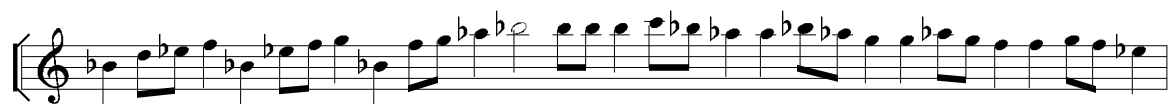
Για την τελική επιλογή των σχημάτων τα οποία περιγράφουν κατά καλύτερο τρόπο μια μελωδία, δεν αρκεί απλώς η τιμή που υπολογίζεται για κάθε σχήμα σύμφωνα με τα ανωτέρω κριτήρια, καθώς ο συνδυασμός σχημάτων με χαμηλότερες τιμές μπορεί να δίνει μια καλύτερη συνολική αναλυτική περιγραφή. Το προτεινόμενο υπολογιστικό μοντέλο αντί να επιλέξει μερικά μόνο απ' τα 'κορυφαία' σχήματα, χρησιμοποιεί όλα τα σχήματα για τον υπολογισμό ενός αθροιστικού 'προφίλ' στο οποίο συμμετέχει κάθε σχήμα ανάλογα με την σχετική σπουδαιότητά του. Τα τοπικά μέγιστα στο προφίλ καταδεικνύουν τα πιο πιθανά σημεία τεμαχισμού μιας μελωδίας σύμφωνα με την επανάληψη μουσικών σχημάτων. Το προφίλ αυτό μπορεί να συνδυαστεί με το προφίλ τοπικών ορίων για την δημιουργία ενός συνολικού προφίλ ορίων (Παράδειγμα 5).



Όρια A	26	17	22	52	43	22	26	61	52	22	9	35	100	17	9	35	9	9	22	17	9	9	22	17	9	9	22	17	9	22	39...
Όρια B	21	15	17	45	35	25	26	44	24	15	15	25	10	46	51	42	40	83	100	61	54	90	94	60	58	88	93	47	35	53	57...
Σύνολο	40	27	33	82	66	40	44	89	65	32	20	51	97	52	49	65	40	75	100	64	51	80	95	63	55	79	94	53	36	62	80...

Παράδειγμα 5 Τιμές τοπικών ορίων (όρια A), τιμές ορίων που προέρχονται από την εύρεση επαναλαμβανόμενων σχημάτων (όρια B) και συνολικές τιμές (Σύνολο) για την μελωδία από το *Valse*, *Op. 18* του Chopin.

Από το συνολικό προφίλ ορίων μπορούν να επιλεγούν ένας ή περισσότεροι τεμαχισμοί της μελωδικής επιφάνειας. Για το παράδειγμα μας έχουμε επιλέξει όλα τα τοπικά μέγιστα (Παράδειγμα 6α). Επιπροσθέτως ένας δεύτερος τεμαχισμός θα γίνει αποδεκτός, βασισμένος στο γεγονός ότι συχνά ένας τεμαχισμός είναι 'παράλληλος' προς την μετρική δομή (εντός ή εκτός φάσης). Για το συγκεκριμένο παράδειγμα ένας τεμαχισμός που ταυτίζεται με το μέτρο των 3/4 είναι κατάλληλος (Παράδειγμα 6β).



τεμαχ. A	^			^				^					^					^						^							^
τεμαχ. B		^			^				^			^			^				^				^				^				^

Παράδειγμα 6 Δύο δυνατοί τεμαχισμοί της μελωδικής επιφάνειας: Ο τεμαχισμός A προκύπτει από τις τιμές της τελευταίας σειράς του Παραδείγματος 5 αν επιλεγούν όλα τα τοπικά μέγιστα. Ο τεμαχισμός B είναι σύμφωνος με την μετρική δομή των 3/4.

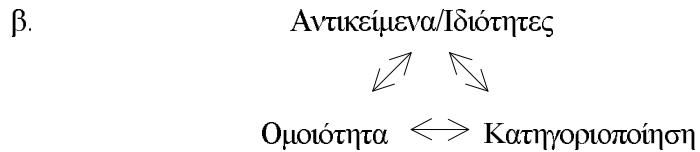
Πώς μπορούν να οργανωθούν τα μελωδικά τμήματα τα οποία προκύπτουν από τον μελωδικό τεμαχισμό σε χρήσιμες κατηγορίες όπως μοτίβα και θέματα; Αυτή η ερώτηση αποτελεί το κυρίως θέμα της επομένης ενότητας.

Μουσική ομοιότητα και κατηγοριοποίηση

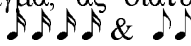
Η μουσική ομοιότητα είναι μια έννοια που είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί συστηματικά. Υπό ποιές προϋποθέσεις είναι δύο μουσικά αποσπάσματα όμοια; Πότε είναι αρκούντως διαφορετικά ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ανόμοια; Ποιά μουσικά τμήματα είναι επαρκώς όμοια ώστε να ανήκουν στην ίδια μοτιβική ή θεματική κατηγορία; Τι συμβαίνει με ασαφή/διφορούμενα τμήματα;

Η έννοια της ομοιότητας είναι στενά συνδεδεμένη με τις διαδικασίες κατηγοριοποίησης. Μία ευρέως αποδεκτή υπόθεση είναι ότι όμοια αντικείμενα τείνουν να εκληφθούν ως μέλη μιας κοινής κατηγορίας. Ένας μεγάλος αριθμός υπολογιστικών μοντέλων κατηγοριοποίησης ακολουθούν την διαδικασία που περιγράφεται στο Παράδειγμα 7α. Αντιθέτως, ο αλγόριθμος που έχει προταθεί από τον γράφοντα συνδέει άρρηκτα τις έννοιες ομοιότητας και κατηγοριοποίησης (καθώς και την περιγραφή των αντικειμένων) έτσι ώστε να είναι αδύνατο να προσδιοριστεί η μία ανεξάρτητα από την άλλη (Παράδειγμα 7β). Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι έννοιες της ομοιότητας και της κατηγοριοποίησης δεν είναι απόλυτες και εξαρτώνται πάντα από τα συγκεκριμένα εν μέσω των οποίων αποκτούν συγκεκριμένο νόημα και υπόσταση.

α. Αντικείμενα/Ιδιότητες → Ομοιότητα → Κατηγοριοποίηση



Παράδειγμα 7 Σχέσεις ανάμεσα σε Αντικείμενα/Ιδιότητες, Ομοιότητα και διαδικασίες Κατηγοριοποίησης

Η στενή σχέση ανάμεσα στις έννοιες της ομοιότητας και της κατηγοριοποίησης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον χώρο της μουσικής στον οποίο συχνά ένα (ή περισσότερα) μουσικό κομμάτι εκλαμβάνεται ως ένα ιδιαίτερο πλαίσιο μέσα στο οποίο αναπτύσσονται συγκεκριμένες κατηγορίες όπως μοτίβα και θέματα (ή ευρύτερες στυλιστικές κατηγορίες που περιγράφουν περισσότερα του ενός κομμάτια). Για παράδειγμα, ας διατυπώσουμε την ακόλουθη απλή ερώτηση: είναι τα ακόλουθα ρυθμικά σχήματα  όμοια ή όχι; Κάποιοι μπορεί να απαντήσουν 'ναι', κάποιοι 'όχι' και κάποιοι μπορεί να αρνηθούν να εκφέρουν κρίση. Το κυρίως πρόβλημα με την ανωτέρω ερώτηση είναι ότι τα δύο αυτά ρυθμικά σχήματα βρίσκονται εκτός μουσικών συγκεκριμένων. Για παράδειγμα, στο ομοιογενές πλαίσιο ενός κομματιού, όπως το τελευταίο μέρος της σονάτας για σόλο βιολί σε Ντο μείζονα (BWV 1005) του Ι.Σ.Μπαχ, τα δύο αυτά ρυθμικά σχήματα εκλαμβάνονται ως ανόμοια καθώς αποτελούν ειδοποιό διαφορά ανάμεσα στα δύο βασικά μοτίβα του κομματιού, ενώ, αντιθέτως, στο πιο ανομοιογενές πλαίσιο ενός κομματιού το οποίο περιλαμβάνει τρίχα και άλλα ρυθμικά σχήματα, όπως το πρώτο μέρος της σονάτας σε Φα μείζονα (KV 280) του Μότσαρτ, αυτά τα σχήματα μπορούν να θεωρηθούν όμοια. Τα μουσικά συγκεκριμένα φαίνεται ότι παίζουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της μουσικής ομοιότητας - ο καθορισμός ενός γενικού απόλυτου κριτηρίου για το πότε διάφορα μουσικά αποσπάσματα είναι όμοια είναι ανέφικτος.

Με αφετηρία τις ανωτέρω παρατηρήσεις, ο γράφων έχει αναπτύξει ένα νέο υπολογιστικό μοντέλο κατηγοριοποίησης (*Unscramble clustering algorithm*) το οποίο, ξεκινώντας από μία αρχική περιγραφή ενός συνόλου αντικειμένων, προσδιορίζει έναν κατάλληλο αριθμό κατηγοριών για το συγκεκριμένο πλαίσιο αντικειμένων και παράλληλα καθορίζει ποιές ιδιότητες από το σύνολο των αρχικών ιδιοτήτων των αντικειμένων είναι πιο χαρακτηριστικές ή 'διαγνωστικές' για την συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση. Εκτενής συζήτηση για το θεωρητικό υπόβαθρο του συγκεκριμένου αλγορίθμου, λεπτομερής περιγραφή του αλγορίθμου, καθώς και πολλά μουσικά παραδείγματα εφαρμογής του αλγορίθμου παρουσιάζονται από τον γράφοντα σε μια σειρά από άρθρα (Cambouropoulos and Widmer 1999, 2000; Cambouropoulos 2001). Μια επισκόπηση και σύγκριση εφαρμογής μοντέλων κατηγοριοποίησης στην μουσική παρουσιάζεται στην εργασία των Höthker et al. (2000).

Στην παρόν άρθρο, θα περιοριστούμε στην εφαρμογή του ανωτέρω αλγορίθμου στα μελωδικά τμήματα που παρουσιάζονται στο Παράδειγμα 6. Οι κατωτέρω στοιχειώδεις μελωδικές και ρυθμικές ιδιότητες προσδιορίζονται για κάθε μελωδικό τμήμα:

- σχήμα μελωδικών διαστημάτων: χρωματικά διαστήματα σε ημιτόνια (M1), διατονικά διαστήματα (M2), μελωδικά Βήματα/Πηδήματα (M3), και κατεύθυνση διαστημάτων Πάνω/Κάτω/Ιδια (M4).
- ρυθμικό σχήμα: χρονικές διάρκειες (P1), αναλογίες διαδοχικών διαρκειών (P2) και σχέση με προηγούμενη διάρκεια ΜΕγαλύτερη/Μικρότερη/Ιση (P3).

Για παράδειγμα, το πρώτο μελωδικό τμήμα του Παραδείγματος 6 έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- μελωδικές ιδιότητες: M1: 4-1-2, M2: 2-1-1, M3: Π-B-B, M4: Π-Π-Π
- ρυθμικές ιδιότητες: P1: 1/4-1/8-1/8-1/4, P2: 1/2-0-2, P3: ΜΙ-Ι-ΜΕ

Ο αλγόριθμος κατηγοριοποίησης *Unscramble* χρησιμοποιείται δύο φορές για την οργάνωση των 7 μελωδικών τμημάτων του τεμαχισμού Α και των 8 τμημάτων του τεμαχισμού Β (Παράδειγμα 6). Τα αποτελέσματα της κατηγοριοποίησης παρατίθενται στο Παράδειγμα 8. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τα σχήματα ιδιοτήτων ‘ταυτίζονται’ εάν είναι ακριβώς ίδια ή αν το ένα περιέχεται από το άλλο. Ο αλγόριθμος όχι μόνο οργανώνει τα τμήματα σε κατηγορίες, αλλά, επιπροσθέτως, προσδιορίζει και ξεχωρίζει τις πλέον χαρακτηριστικές ιδιότητες κάθε κατηγορίας. Για παράδειγμα, οι πιο χαρακτηριστικές ιδιότητες του μοτίβου B₁ είναι οι μελωδικές ιδιότητες για τις παραμέτρους βημάτων/πηδημάτων και κατεύθυνση διαστημάτων, ενώ, αντιθέτως, οι ρυθμικές ιδιότητες είναι μη-διαγνωστικές καθώς είναι κοινές με τα μέλη του μοτίβου B₃.

Motif A₁ Motif A₂ Motif B₁ Motif B₂ Motif B₃

Κατηγοριοποίηση για τεμαχισμό Α

Κατηγοριοποίηση για τεμαχισμό Β

Παράδειγμα 8 Τα μοτίβα που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγόριθμου κατηγοριοποίησης για τους δύο τεμαχισμούς (Παράδειγμα 6) της μελωδίας από το *Valse, Op. 18* του F. Chopin (οι στήλες μελωδικών τμημάτων αναπαριστούν τις μελωδικές κατηγορίες).

Επίλογος

Στο παρόν κείμενο δόθηκε μια συνοπτική παρουσίαση μιας σειράς υπολογιστικών προτύπων τα οποία έχουν αναπτυχθεί με στόχο την δομική αναλυτική περιγραφή μουσικών κομματιών. Τα μοντέλα αυτά επιχειρούν τον τεμαχισμό μιας μελωδικής επιφάνειας σε στοιχειώδη μέρη (βασισμένο σε γνωστικές αρχές Gestalt και αρχές μουσικής ομοιότητας), την εύρεση μετρικής δομής και την οργάνωση των στοιχειωδών μελωδικών μερών σε μοτίβα με χρήση ενός νέου μοντέλου κατηγοριοποίησης. Στο κείμενο αυτό χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα πολύ απλό μουσικό μελωδικό παράδειγμα έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία των επιμέρους προτύπων. Υπάρχει, όμως, μια πληθώρα παραδειγμάτων και πειραμάτων που δείχνουν ότι οι ανωτέρω τεχνικές δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα από μουσικολογικής, γνωστικής και υπολογιστικής άποψης, και ότι διαθέτουν όλα τα εχέγγυα για μια δυναμική περαιτέρω ανάπτυξη. Εκτός από την βελτίωση και την περαιτέρω αξιολόγηση των παρόντων προτύπων είναι αναγκαία η ενσωμάτωση νέων μοντέλων τα οποία μπορούν να καταστήσουν

δυνατή την ανάλυση πολυφωνικής μουσικής (π.χ. πρότυπο διαχωρισμού φωνών, πρότυπο αρμονικής ανάλυσης κ.ο.κ.). Τέλος, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η χρήση τέτοιων μοντέλων σε μουσικά ιδιώματα τα οποία δεν εντάσσονται στο Δυτικό συγκερασμένο τονικό μουσικό σύστημα όπως η ελληνική παραδοσιακή και η βυζαντινή μουσική.

Βιβλιογραφία

- Baker, M. (1989) An Artificial Intelligence Approach to Musical Grouping Analysis. *Contemporary Music Review*, 3:43-68.
- Bent, I.D. (1980) Analysis. In *The New Grove Dictionary of Music and Musicians, Vol.1*. Macmillan, London.
- Cambouropoulos, E. (1996) A Formal Theory for the Discovery of Local Boundaries in a Melodic Surface. In *Proceedings of the III Journees d' Informatique Musicale*, Caen, France.
- Cambouropoulos, E. (1997) Musical Rhythm: Inferring Accentuation and Metrical Structure from Grouping Structure. In *Music, Gestalt and Computing - Studies in Systematic and Cognitive Musicology*. M. Leman (ed.), Springer-Verlag, Berlin.
- Cambouropoulos, E. (1998) Musical Parallelism and Melodic Segmentation. In *Proceedings of the XII Colloquium of Musical Informatics*, Gorizia, Italy.
- Cambouropoulos, E. (1998) Towards a General Computational Theory of Musical Structure. PhD Thesis, Faculty of Music and Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh.
- Cambouropoulos E. (2000) From MIDI to Traditional Musical Notation. In *Proceedings of the AAAI Workshop on Artificial Intelligence and Music: 30 July - 3 Aug 2000*, Austin, Texas.
- Cambouropoulos, E., Crawford, T. and Iliopoulos, C.S. (2000) Pattern Processing in Melodic Sequences: Challenges, Caveats and Prospects. *Computers and the Humanities*, 34(4), forthcoming.
- Cambouropoulos, E. and Widmer, G. (2000) Automated Motivic Analysis Via Melodic Clustering. *Journal of New Music Research* 29(4), forthcoming.
- Cambouropoulos, E. (2001) Melodic Cue Abstraction, Similarity and Category Formation: A Formal Model. *Music Perception* 18(3), forthcoming.
- Clarke, E.F. (1985) Structure and Expression in Rhythmic Performance. In *Musical Structure and Cognition*, P. Howell et al. (eds), Academic Press, London.
- Crochemore, M. (1981) An Optimal Algorithm for Computing the Repetitions in a Word. *Information Processing Letters*, 12(5):244-250.
- Deliège, I. (1987) Grouping Conditions in Listening to Music: An Approach to Lerdahl and Jackendoff's Grouping Preference Rules. *Music Perception*, 4:325-360.
- Epstein, D. (1995) *Shaping Time: Music, the Mind and Performance*. Schirmer books, New York.
- Höthker, K., Hörnel, D. and Anagnostopoulou C. (2000). Investigating the Influence of Representations and Algorithms in Music Classification. *Computing in the Humanities*, 34(4) (forthcoming).
- Lee, C. S. (1991) The Perception of Metrical Structure: Experimental Evidence and a Model. In *Representing Musical Structure*, P. Howell et al. (eds), Academic Press, London.
- Lerdahl, F. and Jackendoff, R. (1983) *A generative Theory of Tonal Music*, The MIT Press, Cambridge (Ma).
- Longuet-Higgins, H. C. and Lee, C. S. (1984) The Rhythmic Interpretation of Monophonic Music. *Music Perception*, 1:424-441.
- Melucci, M. and Orio N. (2000). A Novel Methodology for Music Information Retrieval. In *Proceedings of the XIII Colloquium on Musical Informatics*, L'Aquila, Italy.
- Minsky, M. (1993) Music, Mind and Meaning. Reprint in *Machine Models of Music*, S.M. Schwanauer and D.A. Levitt (eds), The MIT Press, Cambridge (Ma).
- Parncutt, R. (1994) Template-Matching Models of Musical Pitch and Rhythm Perception. *Journal of New Music Research*, 23:145-167.
- Povel, D. J. and Essens, P. (1985) Perception of Temporal Patterns. *Music Perception*, 2:411-440.
- Rosenthal, D. (1992) Emulation of Human Rhythm Perception. *Computer Music Journal*, 16(10):64-76.
- Tenney, J. and Polansky L. (1980) Temporal Gestalt Perception in Music. *Journal of Music Theory*, 24: 205-241.