

Računalniška analiza tem v glasbi

Matevž Jekovec¹, Janez Demšar¹, Andrej Brodnik^{1,2}

¹UL FRI

²UP FAMNIT

{matevz.jekovec, andrej.brodnik, janez.demsar}@fri.uni-lj.si

15. marec 2014

Johann Sebastian Bach (1685-1750)
Das Wohltemperierte Clavier I, Fuga I
BWV 846, Fuga à 4

The image displays a musical score for Johann Sebastian Bach's Fuga à 4, BWV 846, from The Well-Tempered Clavier I. The score is presented in two columns, each containing five systems of music. Each system consists of a grand staff with a treble clef on the upper staff and a bass clef on the lower staff. The music is written in G major and 3/4 time. The first system begins with a treble clef on the upper staff and a bass clef on the lower staff. The second system through the fifth system continue the piece, with the treble clef on the upper staff and the bass clef on the lower staff. The score is a four-part fugue, with each part represented by a different voice (Soprano, Alto, Tenor, and Bass) across the two staves of each system. The piece is characterized by its intricate counterpoint and rhythmic complexity.

Glavna tema 22x

Najpogostejša figura 24x

Skrčena glavna tema 2x

Johann Sebastian Bach (1685-1750)
Das Wohltemperierte Clavier I, Fuga I
BWV 846, Fuga à 4

The first system of the musical score for the fugue. It consists of five staves. The top staff is the treble clef, and the bottom four are bass clefs. A red box highlights the first two measures of the treble staff, labeled 'Glavna tema 22x'. A blue box highlights a specific rhythmic pattern in the second measure of the treble staff, labeled 'Najpogostejša figura 24x'. Several 'T' marks are placed above the notes in the treble staff, indicating the start of the main theme.

The second system of the musical score for the fugue, consisting of five staves. An orange box highlights a compressed version of the main theme in the treble staff, labeled 'Skrčena glavna tema 2x'. A green box highlights a long passage in the bass staff, labeled 'Dolga pasaža 4x'. 'T' marks are present throughout the system to indicate theme entries.

Dolga pasaža 4x

Cilj

Analiza melodičnih prvin glasbe je za muzikologe naporno in časovno potratno.

Cilj

Analiza melodičnih prvin glasbe je za muzikologe naporno in časovno potratno.

Cilj: Zasnova računalniško podprte analize, ki zgradi *zemljevid* po melodijah, podmelodijah in ostalih figurah po skladbi, ter prikaže informacije o njihovem številu pojavitev, dolžini in ritmično/melodični raznolikosti.

Cilj

Analiza melodičnih prvin glasbe je za muzikologe naporno in časovno potratno.

Cilj: Zasnova računalniško podprte analize, ki zgradi *zemljevid* po melodijah, podmelodijah in ostalih figurah po skladbi, ter prikaže informacije o njihovem številu pojavitev, dolžini in ritmično/melodični raznolikosti.

Na trgu nekaj rešitev za samodejno *harmonsko analizo*. Za melodično analizo zelo malo raziskav.

Danes bomo spoznali ...

Danes bomo spoznali ...

- podatkovno strukturo priponsko drevo in

Danes bomo spoznali ...

- podatkovno strukturo priponsko drevo in
- uporabo priponskega drevesa za analizo melodičnih prvin skladb.

Indeksiranje nestrukturiranih besedil

Indeksiranje nestrukturiranih besedil

Definicija problema

Za podano nestrukturirano besedilo T , sestavljeno iz N znakov abecede Σ , zgradi tako kazalo po besedilu, da za vzorec P lahko:

- učinkovito poiščemo vse pojavitve v besedilu,
- učinkovito poiščemo najdaljšo skupno predpono (*longest common prefix*) P in katerega koli podniza v T .

Indeksiranje nestrukturiranih besedil

Definicija problema

Za podano nestrukturirano besedilo T , sestavljeno iz N znakov abecede Σ , zgradi tako kazalo po besedilu, da za vzorec P lahko:

- učinkovito poiščemo vse pojavitve v besedilu,
- učinkovito poiščemo najdaljšo skupno predpono (*longest common prefix*) P in katerega koli podniza v T .

Rešitev

Priponsko drevo (suffix tree) in *priponsko polje (suffix array)* sta temeljni podatkovni strukturi za indeksiranje nestrukturiranega besedila.

Indeksiranje nestrukturiranih besedil

Definicija problema

Za podano nestrukturirano besedilo T , sestavljeno iz N znakov abecede Σ , zgradi tako kazalo po besedilu, da za vzorec P lahko:

- učinkovito poiščemo vse pojavitve v besedilu,
- učinkovito poiščemo najdaljšo skupno predpono (*longest common prefix*) P in katerega koli podniza v T .

Rešitev

Priponsko drevo (suffix tree) in *priponsko polje (suffix array)* sta temeljni podatkovni strukturi za indeksiranje nestrukturiranega besedila.

Praktična uporaba

Za iskanje vzorcev po DNK, proteinih, glasbi in po drugih obsežnih nestrukturiranih besedilih, ki ne poznajo koncepta *besede*.

Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključne in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključne in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključne in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključne in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

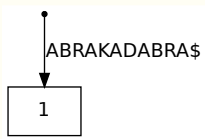
Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$



Gradnja priponskega drevesa

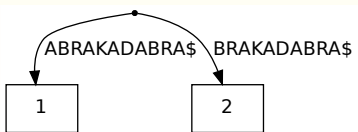
Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$

BRAKADABRA\$



Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

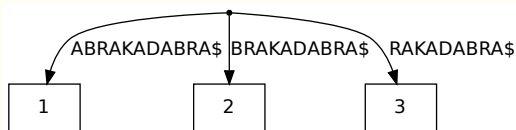
T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$

BRAKADABRA\$

RAKADABRA\$



Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

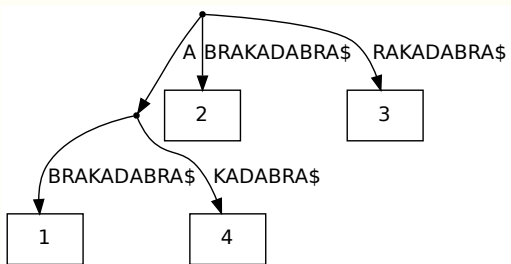
123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$

BRAKADABRA\$

RAKADABRA\$

AKADABRA\$



Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

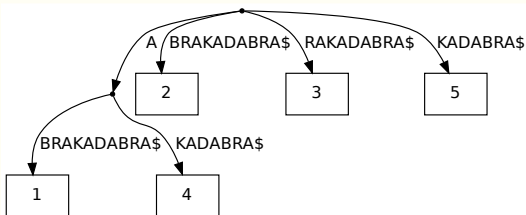
ABRAKADABRA\$

BRAKADABRA\$

RAKADABRA\$

AKADABRA\$

KADABRA\$



Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$

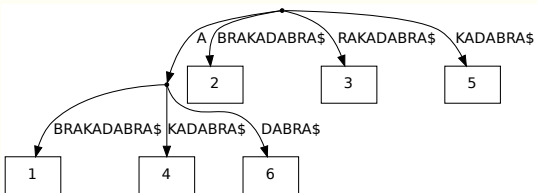
BRAKADABRA\$

RAKADABRA\$

AKADABRA\$

KADABRA\$

ADABRA\$



Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$

BRAKADABRA\$

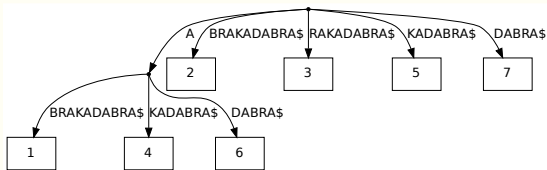
RAKADABRA\$

AKADABRA\$

KADABRA\$

ADABRA\$

DABRA\$



Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$

BRADKADABRA\$

RAKADABRA\$

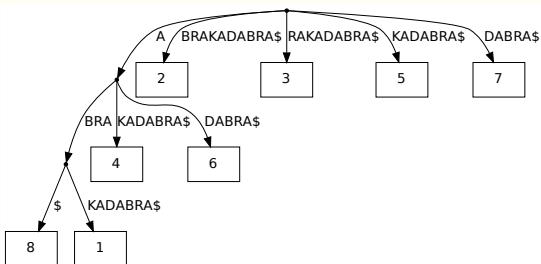
AKADABRA\$

KADABRA\$

ADABRA\$

DABRA\$

ABRA\$



Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$

BRAKADABRA\$

RAKADABRA\$

AKADABRA\$

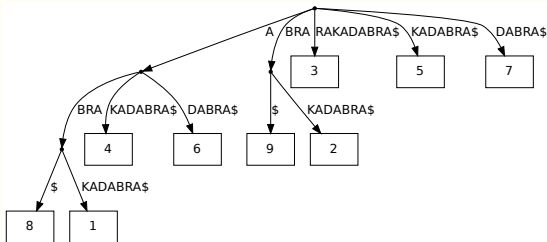
KADABRA\$

ADABRA\$

DABRA\$

ABRA\$

BRA\$



Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$

BRAKADABRA\$

RAKADABRA\$

AKADABRA\$

KADABRA\$

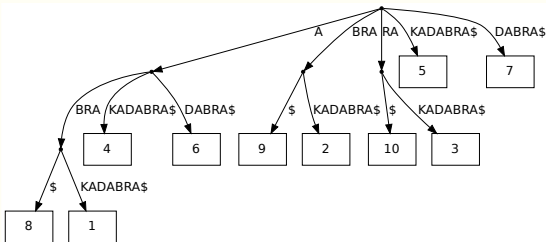
ADABRA\$

DABRA\$

ABRA\$

BRA\$

RA\$



Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$

123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$

BRAKADABRA\$

RAKADABRA\$

AKADABRA\$

KADABRA\$

ADABRA\$

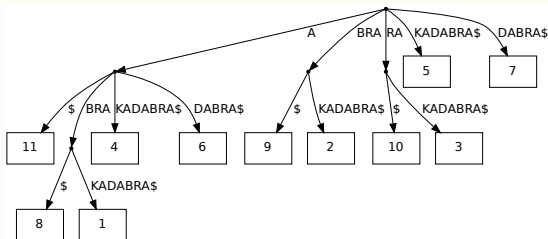
DABRA\$

ABRA\$

BRA\$

RA\$

A\$

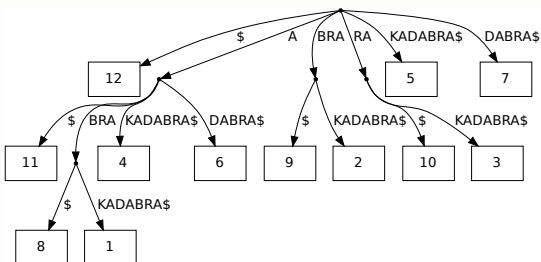


Gradnja priponskega drevesa

Drevo, ki vsebuje vse pripone podanega besedila za ključe in mesta pojavitev pripon v besedilu za vrednosti.

T=ABRAKADABRA\$
123456789₁₀₁₁₁₂

ABRAKADABRA\$
BRAKADABRA\$
RAKADABRA\$
AKADABRA\$
KADABRA\$
ADABRA\$
DABRA\$
ABRA\$
BRA\$
RA\$
A\$
\$



Pregled postopka

Pregled postopka

- 1 *Linearizacija* večglasne skladbe na posamezne glasove.

Pregled postopka

- 1 *Linearizacija* večglasne skladbe na posamezne glasove.
- 2 Pretvorba (parov) not posameznega glasu v znake.

Pregled postopka

- 1 *Linearizacija* večglasne skladbe na posamezne glasove.
- 2 Pretvorba (parov) not posameznega glasu v znake.
- 3 Gradnja priponskega drevesa za vse glasove.

Pregled postopka

- 1 *Linearizacija* večglasne skladbe na posamezne glasove.
- 2 Pretvorba (parov) not posameznega glasu v znake.
- 3 Gradnja priponskega drevesa za vse glasove.
- 4 Izračun ocene posameznih podnizov.

Pregled postopka

- 1 *Linearizacija* večglasne skladbe na posamezne glasove.
- 2 Pretvorba (parov) not posameznega glasu v znake.
- 3 Gradnja priponskega drevesa za vse glasove.
- 4 Izračun ocene posameznih podnizov.
- 5 Izpis najpomembnejših oz. najzanimivejših vzorcev (melodij).

Linearizacija

Linearizacija

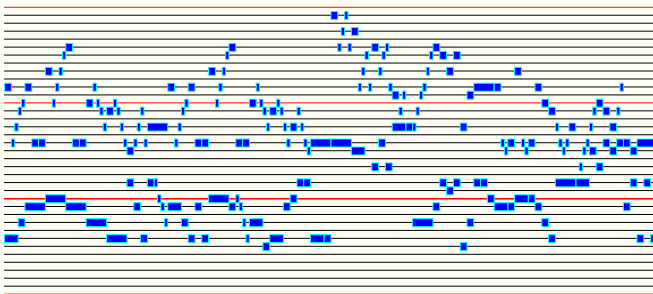
- Problem: Večina skladb je večglasnih.

Linearizacija

- Problem: Večina skladb je večglasnih.
- Ekstrakcija posameznih glasov in nizanje drugega za drugim.

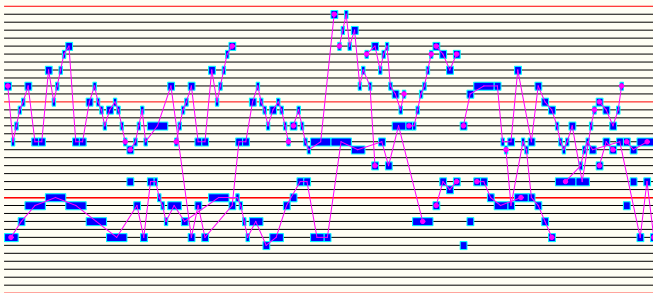
Linearizacija

- Problem: Večina skladb je večglasnih.
- Ekstrakcija posameznih glasov in nizanje drugega za drugim.



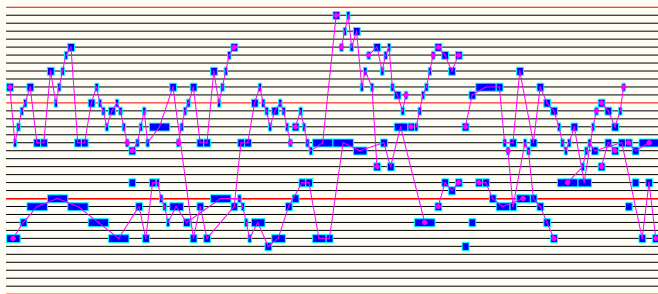
Linearizacija

- Problem: Večina skladb je večglasnih.
- Ekstrakcija posameznih glasov in nizanje drugega za drugim.



Linearizacija

- Problem: Večina skladb je večglasnih.
- Ekstrakcija posameznih glasov in nizanje drugega za drugim.



D256 g128 a128 b128 C128 D256 g256 g256 E256 C128
 D128 E128 FIS128 G256 g256 g256 | C512 D256 E768 F768
 E768 D768 C768 G256 E256 C256 D768...

Ponazoritev v znakih

Ponazoritev v znakih

- Za vsak glas: ponazori sosednje notne pare kot razliko v višini in razmerja v ritmu.

Ponazoritev v znakih

- Za vsak glas: ponazori sosednje notne pare kot razliko v višini in razmerja v ritmu.

D256 g128 a128 b128 C128 $\rightarrow (-5, 2) (2, 1) (2, 1) (2, 1)$

Ponazoritev v znakih

- Za vsak glas: ponazori sosednje notne pare kot razliko v višini in razmerja v ritmu.

D256 g128 a128 b128 C128 $\rightarrow (-5, 2) (2, 1) (2, 1) (2, 1)$

$$f : \langle p_1, d_1 \rangle \langle p_2, d_2 \rangle \rightarrow \langle p_1 - p_2, \frac{d_1}{d_2} \rangle$$

Ponazoritev v znakih

- Za vsak glas: ponazori sosednje notne pare kot razliko v višini in razmerja v ritmu.

D256 g128 a128 b128 C128 $\rightarrow (-5, 2) (2, 1) (2, 1) (2, 1)$

$$f : \langle p_1, d_1 \rangle \langle p_2, d_2 \rangle \rightarrow \langle p_1 - p_2, \frac{d_1}{d_2} \rangle$$

- Možni drugi zapisi: izvorna absolutna višina not, samo imena not, glasbeni intervali, izvirne ritmične dolžine namesto razmerja

Gradnja priponskega drevesa melodij

Gradnja priponskega drevesa melodij

- Za vsak glas vstavi vse notne pare v priponsko drevo.
- Zapomni si mesta pojavitev v izvorni skladbi.

Gradnja priponskega drevesa melodij

- Za vsak glas vstavi vse notne pare v priponsko drevo.
- Zapomni si mesta pojavitev v izvorni skladbi.



(-5, 2) (2, 1) (2, 1) (2, 1) (2, 0.5) (-5, 1) (1, 1)

Gradnja priponskega drevesa melodij

- Za vsak glas vstavi vse notne pare v priponsko drevo.
- Zapomni si mesta pojavitev v izvorni skladbi.



(-5,2) (2,1) (2,1) (2,1) (2,0.5) (-5,1) (1,1)

(-5,2) (2,1) (2,1) (2,1) (2,0.5) (-5,1) (1,1)

(2,1) (2,1) (2,1) (2,0.5) (-5,1) (1,1)

(2,1) (2,1) (2,0.5) (-5,1) (1,1)

(2,1) (2,0.5) (-5,1) (1,1)

(2,0.5) (-5,1) (1,1)

(-5,1) (1,1)

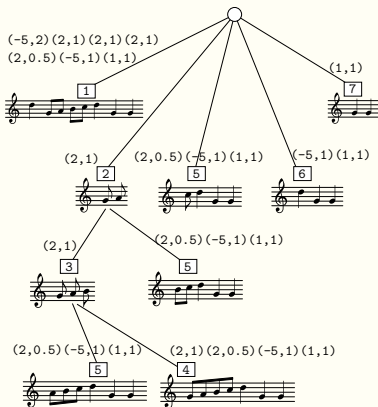
(1,1)

Gradnja priponskega drevesa melodij



1 2 3 4 5 6 7

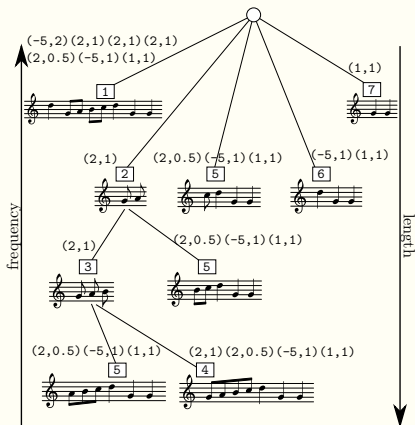
(-5, 2) (2, 1) (2, 1) (2, 1) (2, 0.5) (-5, 1) (1, 1)



Gradnja priponskega drevesa melodij



(-5,2) (2,1) (2,1) (2,1) (2,0.5) (-5,1) (1,1)



Ocenjevanje melodij

Ocenjevanje melodij

- Priponsko drevo melodij je obsežno!
≈ 1300 vozlišč za 2 strani dolgo klavirsko skladbo.

Ocenjevanje melodij

- Priponsko drevo melodij je obsežno!
≈ 1300 vozlišč za 2 strani dolgo klavirsko skladbo.
- Oceni melodije in izpiše le najpomembnejše.

Ocenjevanje melodij

- Priponsko drevo melodij je obsežno!
≈ 1300 vozlišč za 2 strani dolgo klavirsko skladbo.
- Oceni melodije in izpiše le najpomembnejše.
- Najpomembnejše melodije so dolge, pogoste in melodično-ritmično razgibane.

Ocenjevanje melodij

- Priponsko drevo melodij je obsežno!
≈ 1300 vozlišč za 2 strani dolgo klavirsko skladbo.
- Oceni melodije in izpiše le najpomembnejše.
- Najpomembnejše melodije so dolge, pogoste in melodično-ritmično razgibane.
- Funkcija za ocenjevanje posamezne melodije:

$$w_1 \log l \cdot \log f + w_2 H_0(\text{pitch}) + w_3 H_0(\text{rhythm}),$$

- l dolžina melodije,
- f število pojavitev v skladbi,
- H_0 normalizirana entropija višin in ritmičnih razmerij,
- $w_{1..3}$ uporabniško podane uteži.

Raziskovanje melodij

- *Harmonia*¹ — Uporabniška aplikacija za analizo melodičnih prvin podane skladbe

The screenshot displays the Harmonia application interface. At the top, a large red musical note 'H' is overlaid on the application window. The main window shows musical notation with red highlights on specific notes. Below the notation, there is a table of analysis results and a bar chart.

ID	Preview	Length	Occurrences	Weight	Mean	StdDev	Entropy	Entry
106		2	41	40.29	6.23	202.91	3.47	9
108		7	2	35.25	6.05	35.36	5.89	5.08
110		3	10	40.75	6.37	168.62	4.88	9
114		6	2	34.76	6.49	37.36	5.79	2.69
121		4	9	40.75	6.46	133	5.2	9
123		5	2	34.52	6.73	35.36	5.93	2.4
122		3	2	35.96	6.54	35.36	5.51	4.14
115		4	2	37.49	6.46	35.36	5.2	4.97
114		4	2	32.72	6.46	37.36	5.2	9
109		3	3	39.89	6.37	80	6.89	9
107		3	2	34.52	6.37	35.36	4.88	6.05
103		2	38	46.02	6.23	192.19	3.47	9
102		3	16	40.49	6.37	131.42	4.89	9
101		4	7	34.36	6.46	194.27	5.2	9
100		6	4	40.97	6.54	151.71	5.19	6.14
99		2	41.67	6.89	35.36	4.76	6.5	9
98		3	2	35.49	6.54	35.36	5.19	9

The bar chart shows the distribution of occurrences versus length. The x-axis is labeled 'length' and the y-axis is labeled 'occurrences'. The chart shows a few bars with high occurrences and a long tail of bars with low occurrences.

Summary statistics:

- MED notes per channel: 1.149
- Total: 2.298
- Total: 195
- MED steps per channel: 1.14
- Total: 2.28
- Total steps: 17

¹harmoniamusic.sf.net

Samodejno iskanje glavne teme skladbe

Samodejno iskanje glavne teme skladbe

- Preizkus cenilne funkcije na delih J. S. Bacha: 48 fug za inštrumente s tipkami. Preverjanje, če je najbolj ocenjena melodija glavna tema.

Samodejno iskanje glavne teme skladbe

- Preizkus cenilne funkcije na delih J. S. Bacha: 48 fug za inštrumente s tipkami. Preverjanje, če je najbolj ocenjena melodija glavna tema.
- 483 vozlišč povprečno v priponskem drevesu melodij.

Samodejno iskanje glavne teme skladbe

- Preizkus cenilne funkcije na delih J. S. Bacha: 48 fug za inštrumente s tipkami. Preverjanje, če je najbolj ocenjena melodija glavna tema.
- 483 vozlišč povprečno v priponskem drevesu melodij.
- Med 10 najbolj ocejnenimi melodijami je glavna tema 19/48 fug.

Nadaljnje delo

Nadaljnje delo

- Približno ujemanje: variacije na glavno temo bi morale biti ocenjene kot ista tema.

Nadaljnje delo

- Približno ujemanje: variacije na glavno temo bi morale biti ocenjene kot ista tema.
- Vzporedna gradnja priponskega drevesa melodij.
npr. analiza celotnega skladateljevega korpusa hkrati.

Nadaljnje delo

- Približno ujemanje: variacije na glavno temo bi morale biti ocenjene kot ista tema.
- Vzporedna gradnja priponskega drevesa melodij.
npr. analiza celotnega skladateljevega korpusa hkrati.
- Zmanjšanje parametrov pri postopku linearizacije in ocenjevanju melodij.

Sklepne misli

Sklepne misli

- Analiza melodičnih prvin skladbe je delno subjektiven postopek. Popolna avtomatizacija analize melodičnih vzorcev je praktično nemogoča.

Sklepne misli

- Analiza melodičnih prvin skladbe je delno subjektiven postopek. Popolna avtomatizacija analize melodičnih vzorcev je praktično nemogoča.
- V primerjavi s človekom pa je računalnik dober pri obdelavi velikih količin podatkov!

Hvala za posluh .-)



Matevž Jekovec

matevz.jekovec@fri.uni-lj.si



Janez Demšar

janez.demsar@fri.uni-lj.si



Andrej Brodnik

andrej.brodnik@fri.uni-lj.si



Univerza v Ljubljani
Fakulteta *za računalništvo
in informatiko*



Laboratorij za vseprisotne sisteme
Laboratory for Ubiquitous Systems

<http://lusy.fri.uni-lj.si>

