

UNIVERZITET U BEOGRADU  
MATEMATIČKI FAKULTET



Ivan Drecun

ALGORITMI ZA ISPITIVANJE IZOMORFIZMA  
GRAFOVA

master rad

Beograd, 2021.

**Mentor:**

dr Filip MARIĆ, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

**Članovi komisije:**

dr Miodrag ŽIVKOVIĆ, redovan profesor  
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

dr Vesna MARNIKOVIĆ, docent  
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

**Datum odbrane:** \_\_\_\_\_

*Mami, tati i dedi*

**Naslov master rada:** Algoritmi za ispitivanje izomorfizma grafova

**Rezime:** Apstrakt rada.

**Ključne reči:** ključne, reči

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Opšti algoritam</b>	<b>2</b>
2.1	Osnovni pojmovi . . . . .	2
2.2	Stablo pretrage . . . . .	4
2.3	Invarijanta stabla . . . . .	6
2.4	Odsecanje pretrage . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Realizacija algoritma</b>	<b>11</b>
3.1	Reprezentacija podataka . . . . .	11
3.2	Funkcija profinjavanja . . . . .	12
3.3	Funkcija odabira ciljne ćelije . . . . .	18
3.4	Invarijanta stabla . . . . .	18
3.5	Automorfizmi . . . . .	21
3.6	Pretraga . . . . .	21
3.7	Invarijanta grafa . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Rezultati testiranja</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>Zaključak</b>	<b>23</b>
	<b>Bibliografija</b>	<b>24</b>

# Glava 1

## Uvod

# Glava 2

## Opšti algoritam

U ovoj glavi predstavljeni su osnovni matematički pojmovi neophodni za dalje razumevanje konstrukcije opšteg algoritma za određivanje kanonske forme grafa. Uvedeni su pojmovi *bojenja* i *obojenog grafa*, nakon čega je prikazana konstrukcija stabla pretrage koja leži u osnovi algoritma. Nad stablom pogodno je definisana invarijanta koja omogućava određivanje grupe automorfizama grafa i kanonske forme. Na kraju su prikazani i mehanizmi odsecanja pretrage koji omogućavaju praktično izvršavanje algoritma u razumnom vremenu.

### 2.1 Osnovni pojmovi

#### Obojen graf

Graf  $G = (V, E)$  je uređeni par konačnog skupa čvorova  $V$  i skupa grana  $E \subseteq \binom{V}{2}$ . U nastavku pretpostavljamo da je  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  za neki prirodan broj  $n > 0$ . Označimo skup svih grafova sa  $n$  čvorova sa  $\mathcal{G}_n$  (nadalje  $\mathcal{G}$ ).

Bojenje grafa  $G$  je surjekcija  $\pi : V \rightarrow \{1, 2, \dots, k\}$  za neki prirodan broj  $k > 0$ . Označimo skup svih bojenja grafa sa  $n$  čvorova sa  $\Pi_n$  (nadalje  $\Pi$ ).

Broj  $k$  zovemo brojem boja i označavamo ga sa  $|\pi|$ . Čelija bojenja  $\pi$  boje  $c$  je skup svih čvorova te boje, odnosno  $\pi^{-1}(c)$  za  $c \in \{1, 2, \dots, k\}$ . Bojenje je diskretno ukoliko je  $|\pi| = n$  i tada je  $\pi$  permutacija skupa  $V$ .

Bojenje  $\pi_1$  je finije od bojenja  $\pi_2$  (u oznaci  $\pi_1 \leq \pi_2$ ) ukoliko za sve  $v, w \in V$  važi implikacija  $\pi_2(v) < \pi_2(w) \implies \pi_1(v) < \pi_1(w)$ .

Označimo sa  $\sim_\pi$  binarnu relaciju na skupu čvorova definisanu sa  $u \sim_\pi v \iff \pi(u) = \pi(v)$ . U pitanju je relacija ekvivalencije (particija) čije klase odgovaraju

upravo ćelijama bojenja  $\pi$ .

Particija  $\alpha$  je finija od particije  $\beta$  (u oznaci  $\alpha \leq \beta$ ) ukoliko za sve  $v, w \in V$  važi implikacija  $v\alpha w \implies v\beta w$ . Primetimo da za bojenja  $\pi_1$  i  $\pi_2$  važi  $\pi_1 \leq \pi_2 \implies \sim_{\pi_1} \leq \sim_{\pi_2}$ , ali ne i obrnuto.

Obojen graf je uređeni par  $(G, \pi)$  gde je  $\pi$  jedno bojenje grafa  $G$ .

## Dejstvo grupe

Neka je  $G$  grupa i  $S$  skup na kom je definisano dejstvo grupe  $G$  označeno sa  $s^g$  za  $s \in S$  i  $g \in G$ . Orbita elementa  $s$  je skup  $\Omega_s^G = \{s^g \mid g \in G\}$ . Stabilizator elementa  $s$  je skup  $\Sigma_s^G = \{g \in G \mid s^g = s\}$  koji čini jednu podgrupu od  $G$ .

Neka  $S_n$  označava simetričnu grupu stepena  $n$ . Na skupu čvorova  $V$  definisano je dejstvo grupe sa  $v^g = g(v)$  za  $v \in V$  i  $g \in S_n$ . Definiciju dejstva grupe permutacija možemo proširiti i na složenije strukture:

- $W^g = \{w^g \mid w \in W\}$  za skup  $W \subseteq V$
- $w^g = (v_1^g, v_2^g, \dots, v_k^g)$  za uređenu  $k$ -torku  $w$
- $G^g = (V, E')$  za graf  $G$  i  $E' = \{e^g \mid e \in E\}$
- Ako je  $\pi$  bojenje,  $\pi^g$  je bojenje za koje važi  $\pi^g(v^g) = \pi(v)$  odnosno  $\pi^g = \pi g^{-1}$
- $(G, \pi)^g = (G^g, \pi^g)$  za obojen graf  $(G, \pi)$

## Izomorfizam

Obojeni grafovi  $(G_1, \pi_1)$  i  $(G_2, \pi_2)$  su *izomorfni* (u oznaci  $(G_1, \pi_1) \cong (G_2, \pi_2)$ ) ukoliko postoji  $g \in S_n$  tako da je  $(G_1, \pi_1) = (G_2, \pi_2)^g$ . Takvo  $g$  zovemo *izomorfizam*.

*Automorfizam* obojenog grafa  $(G, \pi)$  je izomorfizam tog grafa sa samim sobom, odnosno  $g \in S_n$  za koje važi  $(G, \pi) = (G, \pi)^g$ . Skup automorfizama grafa  $(G, \pi)$  označavamo sa  $\text{Aut}(G, \pi)$ . Zajedno sa operacijom kompozicije preslikavanja skup  $\text{Aut}(G, \pi)$  čini grupu *automorfizama*.

## Kanonska forma

Neka je  $f : \mathcal{G} \times \Pi \rightarrow S$  preslikavanje iz skupa svih obojenih grafova u proizvoljan skup  $S$ . Kažemo da je  $f$  *funkcija invarijantna na imenovanje čvorova* ukoliko za svaki obojen graf  $(G, \pi)$  i svaku permutaciju  $g \in S_n$  važi  $f(G^g, \pi^g) = f(G, \pi)$ .



Neformalno, to znači da vrednost funkcije  $f$  ne zavisi od konkretnog imenovanja čvorova grafa, već samo od njegove unutrašnje strukture.

Ako na skupu  $S$  postoji definisano dejstvo grupe  $S_n$ , kažemo da je  $f$  *transformacija invarijantna na imenovanje čvorova* ukoliko za svaki obojen graf  $(G, \pi)$  i svaku permutaciju  $g \in S_n$  važi  $f(G^g, \pi^g) = f(G, \pi)^g$ .

**Definicija.** *Kanonska forma* je preslikavanje  $\mathcal{C} : \mathcal{G} \times \Pi \rightarrow \mathcal{G} \times \Pi$  koje ispunjava sledeće uslove:

(C1) Za svaki obojen graf  $(G, \pi)$  važi  $\mathcal{C}(G, \pi) \cong (G, \pi)$

(C2)  $\mathcal{C}$  je funkcija invarijantna na imenovanje čvorova

## 2.2 Stablo pretrage

Označimo sa  $V^*$  skup svih konačnih nizova elemenata skupa  $V$ . Ako je  $\nu \in V^*$  sa  $|\nu|$  označavamo dužinu niza  $\nu$ . Ako je  $\nu = (v_1, v_2, \dots, v_k) \in V^*$  i  $w \in V$ , onda  $\nu \| w$  označava niz  $(v_1, v_2, \dots, v_k, w)$ . Za  $0 \leq s \leq k$  prefiks niza  $\nu$  dužine  $s$  označavamo sa  $[\nu]_s = (v_1, v_2, \dots, v_s)$ . Uređenje  $\leq$  na skupu  $V^*$  predstavlja leksikografski poredak.

Čvorovi stabla pretrage predstavljani su nizovima elemenata skupa  $V$ , pri čemu korenu stabla odgovara prazan niz. U nastavku definišemo funkcije na osnovu kojih ćemo definisati pravila grananja u stablu.

**Definicija.** *Funkcija profinjavanja* je bilo koje preslikavanje  $R : \mathcal{G} \times \Pi \times V^* \rightarrow \Pi$  koje za svaki obojen graf  $(G, \pi)$  i svako  $\nu \in V^*$  zadovoljava sledeće uslove:

(R1)  $R(G, \pi, \nu) \leq \pi$

(R2) Ako je  $v \in \nu$ , onda je  $\{v\}$  ćelija bojenja  $R(G, \pi, \nu)$

(R3) Za svako  $g \in S_n$  važi  $R(G^g, \pi^g, \nu^g) = R(G, \pi, \nu)^g$

**Definicija.** *Funkcija odabira ciljne ćelije* je bilo koje preslikavanje  $T : \mathcal{G} \times \Pi \times V^* \rightarrow \mathcal{P}(V)$  koje za svaki obojen graf  $(G, \pi)$  i svako  $\nu \in V^*$  zadovoljava sledeće uslove:

(T1) Ako je  $R(G, \pi, \nu)$  diskretno, onda je  $T(G, \pi, \nu) = \emptyset$

(T2) Ako  $R(G, \pi, \nu)$  nije diskretno, onda je  $T(G, \pi, \nu)$  nejedinična ćelija od  $R(G, \pi, \nu)$

(T3) Za svako  $g \in S_n$  važi  $T(G^g, \pi^g, \nu^g) = T(G, \pi, \nu)^g$

Kako je graf fiksiran, ove funkcije možemo smatrati funkcijama čvorova stabla. Funkcija profinjavanja obezbeđuje postojanje bojenja pridruženog svakom čvoru stabla (koje postaje finije kako se spuštamo niz stablo). Funkcija odabira ciljne ćelije nam omogućava da odaberemo skup čvorova grafa koji nam služi za konstrukciju dece tog čvora u stablu. Treći uslov u obe definicije govori da su u pitanju transformacije invarijantne na imenovanje čvorova.

**Definicija.** *Stablo pretrage*  $\mathcal{T}(G, \pi)$  određeno je sledećim uslovima:

(T1) Koren stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  je prazan niz  $()$

(T2) Ako je  $\nu$  čvor stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$ , njegova deca u stablu su  $\{\nu \| w \mid w \in T(G, \pi, \nu)\}$

Dejstvo grupe  $S_n$  na stablo definiše se slično kao za bilo koju drugu strukturu. Naredna lema pokazuje da je ovako definisano stablo invarijantno na imenovanje čvorova grafa.

**Lema 1.** *Za svaki obojen graf  $(G, \pi)$  i svako  $g \in S_n$  važi  $\mathcal{T}(G^g, \pi^g) = \mathcal{T}(G, \pi)^g$ .*

*Dokaz.* Dokažimo da za svaki čvor  $\nu$  stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  važi da je  $\nu^g$  čvor stabla  $\mathcal{T}(G^g, \pi^g)$ . Dokaz izvodimo indukcijom po strukturi stabla.

**Baza indukcije** Prazan niz je koren stabla  $\mathcal{T}(G^g, \pi^g)$ , pa tvrđenje trivijalno važi.

**Induktivni korak** Pretpostavimo da tvrđenje važi za čvor  $\nu$ . Neka je  $\nu \| w$  dete čvora  $\nu$  za neko  $w \in T(G, \pi, \nu)$ . Tada je  $(\nu \| w)^g = \nu^g \| w^g$ , ali kako važi  $w^g \in T(G, \pi, \nu)^g =_{(T3)} T(G^g, \pi^g, \nu^g)$  to je  $\nu^g \| w^g$  dete čvora  $\nu^g$  u stablu  $\mathcal{T}(G^g, \pi^g)$ .

Time smo dokazali da je stablo  $\mathcal{T}(G, \pi)^g$  podstablo od  $\mathcal{T}(G^g, \pi^g)$  ( $\mathcal{T}(G, \pi)^g \subseteq \mathcal{T}(G^g, \pi^g)$ ). Prema prethodno dokazanom važi  $\mathcal{T}(G^g, \pi^g)^{g^{-1}} \subseteq \mathcal{T}(G, \pi)$ , pa primenom  $g$  na obe strane konačno dobijamo  $\mathcal{T}(G^g, \pi^g) \subseteq \mathcal{T}(G, \pi)^g$ .  $\square$

**Posledica 1.** *Neka je  $\nu$  čvor stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  i neka  $\mathcal{T}(G, \pi, \nu)$  označava njegovo podstablo sa korenom u  $\nu$ . Ako je  $g \in \text{Aut}(G, \pi)$ , onda je  $\nu^g$  čvor stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  i važi  $\mathcal{T}(G, \pi, \nu^g) = \mathcal{T}(G, \pi, \nu)^g$ .*

**Lema 2.** *Neka je  $\nu$  čvor stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  i  $\pi_\nu = R(G, \pi, \nu)$ . Tada je  $\text{Aut}(G, \pi_\nu) = \Sigma_\nu^{\text{Aut}(G, \pi)}$ .*

*Dokaz.* Na osnovu uslova (R2) bilo koji automorfizam obojenog grafa  $(G, \pi_\nu)$  stabilizuje  $\nu$ . Sa druge strane, neka  $g \in \text{Aut}(G, \pi)$  stabilizuje  $\nu$ . Tada po (R3) važi  $\pi_\nu^g = R(G, \pi, \nu)^g = R(G, \pi, \nu) = \pi_\nu$ , pa je  $g \in \text{Aut}(G, \pi_\nu)$ .  $\square$

## 2.3 Invarijanta stabla

**Definicija.** *Invarijanta stabla* je preslikavanje  $\phi : \mathcal{G} \times \Pi \times V^* \rightarrow F$  za neki potpuno uređen skup  $F$  koje za sve obojene grafove  $(G, \pi)$  i različite čvorove  $\nu_1, \nu_2 \in \mathcal{T}(G, \pi)$  ispunjava sledeće uslove:

- ( $\phi 1$ ) Ako su  $\nu_1, \nu_2 \in \mathcal{T}(G, \pi)$  takvi da je  $|\nu_1| = |\nu_2|$  i  $\phi(G, \pi, \nu_1) < \phi(G, \pi, \nu_2)$ , onda za sve  $\omega_1 \in \mathcal{T}(G, \pi, \nu_1)$  i  $\omega_2 \in \mathcal{T}(G, \pi, \nu_2)$  važi  $\phi(G, \pi, \omega_1) < \phi(G, \pi, \omega_2)$
- ( $\phi 2$ ) Ako su  $\nu_1, \nu_2 \in \mathcal{T}(G, \pi)$  takvi da su  $\pi_1 = R(G, \pi, \nu_1)$  i  $\pi_2 = R(G, \pi, \nu_2)$  diskretna bojenja, onda je  $\phi(G, \pi, \nu_1) = \phi(G, \pi, \nu_2) \implies G^{\pi_1} = G^{\pi_2}$
- ( $\phi 3$ )  $\phi$  je funkcija invarijantna na imenovanje čvorova grafa

Listovi  $\nu_1$  i  $\nu_2$  su *ekvivalentni* ako i samo ako  $\phi(G, \pi, \nu_1) = \phi(G, \pi, \nu_2)$ .

U nastavku ćemo kroz dve teoreme prikazati značaj ovako definisane invarijante stabla. Označimo za proizvoljan čvor stabla  $\nu$  njegovo bojenje dobijeno funkcijom profinjavanja sa  $\pi_\nu = R(G, \pi, \nu)$ .

**Lema 3.** *Neka je  $g \in \text{Aut}(G, \pi)$  i listovi  $\nu_1$  i  $\nu_2$  takvi da je  $\nu_1^g = \nu_2$ . Tada su  $\nu_1$  i  $\nu_2$  ekvivalentni i  $g = \pi_{\nu_2}^{-1} \pi_{\nu_1}$ .*

*Dokaz.* Na osnovu svojstva ( $\phi 3$ ) invarijante stabla i činjenice da je  $g$  automorfizam sledi  $\phi(G, \pi, \nu_1) =_{(\phi 3)} \phi(G^g, \pi^g, \nu_1^g) =_{g \in \text{Aut}(G, \pi)} \phi(G, \pi, \nu_1^g) = \phi(G, \pi, \nu_2)$ , odnosno  $\nu_1$  i  $\nu_2$  su ekvivalentni. Dalje, važi  $\pi_{\nu_2}^{-1} \pi_{\nu_1} = \pi_{\nu_1^g}^{-1} \pi_{\nu_1} =_{(R3)} (\pi_{\nu_1}^g)^{-1} \pi_{\nu_1} = (\pi_{\nu_1} g^{-1})^{-1} \pi_{\nu_1} = g \pi_{\nu_1}^{-1} \pi_{\nu_1} = g$ .  $\square$

**Lema 4.** *Neka su  $\alpha$  i  $\beta$  diskretna bojenja finija od bojenja  $\pi$ . Tada je  $\pi^\alpha = \pi^\beta$ .*

*Dokaz.* Dokaz izvodimo nizom sitnih tvrđenja.

1.  $\text{id} \leq \pi^\alpha$

Neka su  $x$  i  $y$  proizvoljni. Važi  $\pi^\alpha(x) < \pi^\alpha(y) \iff \pi(\alpha^{-1}(x)) < \pi(\alpha^{-1}(y))$ , pa kako je  $\alpha \leq \pi$  sledi  $\alpha(\alpha^{-1}(x)) < \alpha(\alpha^{-1}(y))$  odnosno  $x < y$ . Kontrapozicijom dobijamo i  $x \leq y \implies \pi^\alpha(x) \leq \pi^\alpha(y)$ .

2.  $(\pi^\alpha)^{-1}(c) = [n, m]$  za neko  $n, m \in \mathbb{N}$  gde je  $[n, m] = \{k \in \mathbb{N} \mid n \leq k \leq m\}$

Za svako  $x, y, z$  važi  $x \leq y \leq z \implies \pi^\alpha(x) \leq \pi^\alpha(y) \leq \pi^\alpha(z)$ , pa ako je  $\pi^\alpha(x) = \pi^\alpha(z) = c$ , onda je i  $\pi^\alpha(y) = c$ .

3.  $\pi^\alpha(n+1) = \pi^\alpha(n)$  ili  $\pi^\alpha(n+1) = \pi^\alpha(n) + 1$

Neka je  $\pi^\alpha(n+1) \neq \pi^\alpha(n)$ . Tada je  $n+1 \geq n \implies \pi^\alpha(n+1) \geq \pi^\alpha(n)$ , pa je  $\pi^\alpha(n+1) > \pi^\alpha(n)$  jer su po pretpostavci različiti. Pretpostavimo da je  $\pi^\alpha(n+1) > \pi^\alpha(n) + 1$ . Tada postoji  $m$  takvo da je  $\pi^\alpha(m) = \pi^\alpha(n) + 1$ , ali iz  $\pi^\alpha(n) < \pi^\alpha(m) < \pi^\alpha(n+1) \implies n < m < n+1$  sledi kontradikcija.

4.  $|(\pi^\alpha)^{-1}(c)| = |\pi^{-1}(c)|$

Važi da je  $(\pi^\alpha)^{-1}(c) = \{m \mid \pi^\alpha(m) = c\} = \{m^\alpha \mid \pi^\alpha(m^\alpha) = c\} = \{m^\alpha \mid \pi(m) = c\} = \pi^{-1}(c)^\alpha$ . Odatle je  $|(\pi^\alpha)^{-1}(c)| = |\pi^{-1}(c)^\alpha| = |\pi^{-1}(c)|$ .

5.  $(\pi^\alpha)^{-1}(c) = (\pi^\beta)^{-1}(c)$

Dokaz izvodimo indukcijom po  $c$ .

**Baza indukcije** Kako je  $1 \leq x$  za sve  $x$ , onda iz  $id \leq \pi^\alpha$  sledi  $\pi^\alpha(1) \leq \pi^\alpha(x)$  za sve  $x$  pa je  $\pi^\alpha(1) = 1$ . Dalje, kako je  $|(\pi^\alpha)^{-1}(1)| = |\pi^{-1}(1)|$ , mora važiti  $(\pi^\alpha)^{-1}(1) = [1, |\pi^{-1}(1)|]$ . Analogno se pokazuje i za  $\beta$ .

**Induktivni korak** Neka je po induktivnoj pretpostavci  $(\pi^\alpha)^{-1}(c) = (\pi^\beta)^{-1}(c) = [n, m]$ . Tada je  $\pi^\alpha(m+1) \neq \pi^\alpha(m)$ , pa je  $\pi^\alpha(m+1) = \pi^\alpha(m) + 1$  i  $m+1$  je najmanje u  $(\pi^\alpha)^{-1}(c+1)$ . Odatle važi  $(\pi^\alpha)^{-1}(c+1) = [m+1, m+|\pi^{-1}(c+1)|]$ . Analogno se pokazuje i za  $\beta$ .

□

**Teorema 1.** Za svaki list  $\nu$  važi  $Aut(G, \pi) = \{\pi_\omega^{-1}\pi_\nu \mid \nu \text{ i } \omega \text{ su ekvivalentni}\}$ .

*Dokaz.* Neka je  $g \in Aut(G, \pi)$ . Tada je po posledici 1  $\nu^g$  list stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$ . Po prethodno dokazanoj lemi 3 su  $\nu$  i  $\nu^g$  ekvivalentni i  $g = \pi_{\nu^g}^{-1}\pi_\nu$  što je element skupa sa desne strane jednakosti. Sa druge strane, ako su  $\nu$  i  $\omega$  ekvivalentni, onda je  $G^{\pi_\nu} = G^{\pi_\omega}$ , pa je  $\pi_\omega^{-1}\pi_\nu \in Aut(G, \pi)$ . □

Prethodna teorema pokazuje da je otkrivanjem svih čvorova ekvivalentnih jednom čvoru moguće odrediti grupu automorfizama datog grafa. Naravno, ovakav način određivanja grupe automorfizama nije veoma efikasan pošto se grupa generiše

član po član. Ovo se može poboljšati odsecanjem pretrage o čemu će biti reči u narednom odeljku.

**Definicija.** Neka je  $\nu^*$  list stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  u kom invarijanta  $\phi(G, \pi, \nu)$  dostiže maksimum. *Kanonska forma* obojenog grafa  $(G, \pi)$  je funkcija  $\mathcal{C}(G, \pi) = (G, \pi)^{\pi_{\nu^*}}$ .

Primetimo da zbog uslova ( $\phi 2$ ) definicija ne zavisi od izbora lista  $\nu^*$ . Naredna teorema opravdava naziv i oznaku funkcije.

**Teorema 2.** *Funkcija  $\mathcal{C}(G, \pi)$  je kanonska forma.*

*Dokaz.* Dokazujemo da ovako definisana funkcija ispunjava uslove kanonske forme za svaki obojen graf  $(G, \pi)$ .

- (C1) Kako je  $\mathcal{C}(G, \pi) = (G, \pi)^{\pi_{\nu^*}}$  to je  $\mathcal{C}(G, \pi) \cong (G, \pi)$  za izomorfizam  $\pi_{\nu^*}$ .
- (C2) Za svako  $g \in S_n$  i svako  $\nu \in \mathcal{T}(G, \pi)$  važi  $\nu^g \in \mathcal{T}(G, \pi)^g = \mathcal{T}(G^g, \pi^g)$  kao i  $\phi(G^g, \pi^g, \nu^g) = \phi(G, \pi, \nu)$ , pa je  $\nu^{*g}$  list u kom invarijanta stabla  $\mathcal{T}(G^g, \pi^g)$  dostiže maksimalnu vrednost. Odatle sledi  $\mathcal{C}(G^g, \pi^g) = (G^g, \pi^g)^{R(G^g, \pi^g, \nu^{*g})} = (G^g, \pi^g)^{\pi_{\nu^*}^g} = (G, \pi)^{\pi_{\nu^*}} = \mathcal{C}(G, \pi)$  pa je  $\mathcal{C}$  funkcija invarijantna na imenovanje čvorova.

□

## 2.4 Odsecanje pretrage

Stablo pretrage može biti veoma veliko, pa pretraga kompletnog stabla nije poželjna. To možemo rešiti uvođenjem tri različite operacije odsecanja.

- Neka su  $\nu_1$  i  $\nu_2$  različiti čvorovi stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  takvi da je  $|\nu_1| = |\nu_2|$  i  $\phi(G, \pi, \nu_1) > \phi(G, \pi, \nu_2)$ . Operacija  $P_A(\nu_1, \nu_2)$  podrazumeva odsecanje podstabla  $\mathcal{T}(G, \pi, \nu_2)$ .
- Neka su  $\nu_1$  i  $\nu_2$  različiti čvorovi stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  takvi da je  $|\nu_1| = |\nu_2|$  i  $\phi(G, \pi, \nu_1) \neq \phi(G, \pi, \nu_2)$ . Operacija  $P_B(\nu_1, \nu_2)$  podrazumeva odsecanje podstabla  $\mathcal{T}(G, \pi, \nu_2)$ .
- Neka su  $\nu_1$  i  $\nu_2$  različiti čvorovi stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  takvi da je  $\nu_1 < \nu_2$  i  $\nu_1^g = \nu_2$  za neko  $g \in \text{Aut}(G, \pi)$ . Operacija  $P_C(\nu_1, g)$  podrazumeva odsecanje podstabla  $\mathcal{T}(G, \pi, \nu_2)$ .

Naredna teorema opravdava uvođenje ovih operacija odsecanja i pokazuje da one ne narušavaju rezultate teorema o određivanju grupe automorfizama i kanonske forme iz prethodnog odeljka.

**Teorema 3.** *Neka je  $(G, \pi)$  obojen graf.*

1. *Neka je nad stablom  $\mathcal{T}(G, \pi)$  izvršen proizvoljan niz operacija  $P_A$  i  $P_C$ . Tada u dobijenom stablu postoji bar jedan list  $\nu$  takav da je  $\phi(G, \pi, \nu) = \phi(G, \pi, \nu^*)$ .*
2. *Neka je  $\nu_0$  list stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$  i neka je nad stablom izvršen proizvoljan niz operacija  $P_B(\nu_1, \nu_2)$  i  $P_C$  gde je  $|\nu_2| > |\nu_0|$  ili  $\phi(G, \pi, \nu_2) \neq \phi(G, \pi, [\nu_0]_{|\nu_2|})$  i neka su  $g_1, \dots, g_k$  svi automorfizmi korišćeni u izvršenim operacijama  $P_C$ . Tada je grupa automorfizama  $\text{Aut}(G, \pi)$  generisana skupom  $\{g_1, \dots, g_k\} \cup \{g \in \text{Aut}(G, \pi) \mid \nu_0^g \text{ nije uklonjen}\}$ .*

*Dokaz.* Dokažimo za početak nekoliko pomoćnih tvrđenja.

Nijedna operacija  $P_A$  ne uklanja listove u kojima je vrednost invarijante maksimalna. Pretpostavimo suprotno. Neka je  $\nu_1$  list u kom invarijanta stabla dostiže maksimum i neka je  $\nu'_1$  predak od  $\nu_1$ . Operacija  $P_A(\nu'_2, \nu'_1)$  uklanja  $\nu'_1$  ako je  $\phi(G, \pi, \nu'_1) < \phi(G, \pi, \nu'_2)$ , pa po svojstvu ( $\phi 1$ ) za proizvoljan list  $\nu_2$  u  $\mathcal{T}(G, \pi, \nu'_2)$  važi  $\phi(G, \pi, \nu_1) < \phi(G, \pi, \nu_2)$ , što je u kontradikciji sa pretpostavkom da je vrednost invarijante maksimalna u  $\nu_1$ .

Nijedna operacija  $P_B$  ne uklanja nijedan list  $\nu$  ekvivalentan listu  $\nu_0$  (iz drugog dela teoreme). Iz pretpostavke teoreme nijedna operacija  $P_B(\nu_1, \nu_2)$  ne uklanja čvor  $\nu_2$  takav da je  $\phi(G, \pi, [\nu_0]_{|\nu_2|}) = \phi(G, \pi, \nu_2)$ , pa samim tim ne uklanja nijedan čvor  $[\nu]_s$  za  $0 \leq s \leq |\nu|$ .

Nijedna operacija  $P_C$  ne uklanja leksikografski najmanji među ekvivalentnim listovima. Štaviše, nijedna operacija  $P_C$  ne uklanja leksikografski najmanji list iz  $\Omega_{\nu}^{<g_1, \dots, g_k>}$  za bilo koje  $\nu$ . Neka je bez umanjenja opštosti  $\nu$  leksikografski najmanji list u svojoj orbiti. Operacija  $P_C(\omega, g)$  uklanja čvor  $\omega^g$  ako je  $\omega < \omega^g$ , pa je  $[\nu]_{|\omega|} \neq \omega^g$  pošto je ili  $[\nu]_{|\omega|} < \omega$  ili su  $\omega$  i  $[\nu]_{|\omega|}$  iz različitih orbita.

1. Na osnovu dokazanih svojstava operacija  $P_A$  i  $P_C$  iz stabla se ne uklanja leksikografski najmanji list  $\nu$  ekvivalentan listu  $\nu^*$ .
2. Ako je  $g \in \text{Aut}(G, \pi)$ , onda na osnovu dokazanih svojstva operacija  $P_B$  i  $P_C$  važi da iz stabla nije uklonjen leksikografski najmanji list oblika  $\nu_0^{hg}$  za neko  $h \in <g_1, \dots, g_k>$ , izborom  $\omega = \nu_0^g$ . Odatle sledi da je  $hg \in <\{g_1, \dots, g_k\} \cup \{g \in \text{Aut}(G, \pi) \mid \nu_0^g \text{ nije uklonjen}\}>$ , pa je i  $g$  element generisane grupe.



# Glava 3

## Realizacija algoritma

### 3.1 Reprezentacija podataka

#### Permutacija

Permutacija  $p \in S_n$  predstavljena je pomoću dva vektora. Vektor **pi** je definisan tako da je  $\text{pi}[u] = v$  onda kada je  $p(u) = v$ . Vektor **ip** definisan je analogno za inverznu permutaciju, odnosno  $\text{ip}[u] = v$  onda kada je  $p^{-1}(u) = v$ . **Primer**

#### Bojenje

Bojenje  $\pi \in \Pi_n$  predstavljeno je permutacijom **pi** i vektorom **cells**. Permutacija **pi** predstavlja niz koji se dobija nadovezivanjem ćelija  $\pi^{-1}(1), \dots, \pi^{-1}(k)$  redom, pri čemu su elementi jedne ćelije uređeni rastuće. Preciznije, **pi** predstavlja permutaciju  $p$  takvu da je  $p(u) \in \pi^{-1}(c)$  ako i samo ako je  $\sum_{i=1}^{c-1} |\pi^{-1}(i)| \leq u < \sum_{i=1}^c |\pi^{-1}(i)|$  i da ako važi  $\pi(u) = \pi(v)$  onda je  $u < v \iff p^{-1}(u) < p^{-1}(v)$ .

Vektor **cells** predstavlja niz vrednosti *cells* dužine  $n$  koji upotpunjava permutaciju  $p$  podacima o granicama ćelija bojenja  $\pi$ . Ako pozicija  $u$  predstavlja početak nove ćelije, tada je  $\text{cells}_u$  takvo da ta ćelija obuhvata tačno pozicije  $[u, \text{cells}_u)$  permutacije  $p$ . Formalno,

$$\text{cells}_u = \begin{cases} u + |\pi^{-1}(\pi(p(u)))|, & \text{ako je } u = 1 \text{ ili } \pi(p(u)) \neq \pi(p(u-1)) \\ -1, & \text{inače.} \end{cases}$$

#### **Primer**

Primetimo da je u slučaju diskretnog bojenja  $\pi$  permutacija  $p$  predstavljena sa **pi** inverz permutacije  $\pi$ . **Primer**



Jedna od ključnih operacija nad bojenjem je profinjavanje jedne ćelije. Neka je  $\pi^{-1}(c)$  jedna ćelija bojenja  $\pi$  i neka je svakom čvoru  $v$  te ćelije dodeljena vrednost  $t_v$ . Profinjavanje ćelije podrazumeva formiranje bojenja  $\pi' \leq \pi$  takvog da za  $u$  i  $v$  iz  $\pi^{-1}(c)$  važi  $\pi'(u) < \pi'(v) \iff t_u < t_v$ , dok za sve ostale parove  $u$  i  $v$  važi  $\pi'(u) = \pi'(v) \iff \pi(u) = \pi(v)$ .

---

**Algoritam 1** Profinjavanje ćelije

---

```

procedure REFINE_CELL( $G, \pi, c, t$ )
     $\pi' \leftarrow \pi$ 
     $k \leftarrow 1$ 
    for  $t' \in \text{sorted}(\{t_v \mid v \in \pi^{-1}(c)\})$  do
         $C_k \leftarrow \{v \in \pi^{-1}(c) \mid t_v = t'\}$ 
         $\pi'(v) \leftarrow c + k - 1$  za sve  $v \in C_k$ 
         $k \leftarrow k + 1$ 
     $\pi'(v) \leftarrow \pi(v) + k - 1$  za sve  $v$  takve da  $\pi(v) > c$ 
     $s \leftarrow$  indeks prvog najvećeg skupa među  $C_{i, 1 \leq i \leq k}$ 
    return  $\pi', C_1, \dots, C_k, s$ 

```

---

Primetimo da je složenost ovog algoritma  $O(|C| \log |C|)$  gde je  $C = \pi^{-1}(c)$  zbog sortiranja čvorova na osnovu vrednosti  $t_v$ .

## Graf

Dodati u implementaciji podršku za obojen graf, pa dati opis.

## 3.2 Funkcija profinjavanja

**Lema 5.** Neka je preslikavanje  $I : \Pi \times V \rightarrow \Pi$  definisano sa

$$I(\pi, v)(w) = \begin{cases} \pi(w), & \text{ako je } \pi(w) < \pi(v) \text{ ili } w = v \\ \pi(w) + 1, & \text{inače} \end{cases}$$

i neka je  $F : \mathcal{G} \times \Pi \times V^* \rightarrow \Pi$  transformacija invarijantna na imenovanje čvorova takva da je  $F(G, \pi, \nu) \leq \pi$ . Tada je preslikavanje definisano sa

$$R(G, \pi, ()) = F(G, \pi, ())$$

$$R(G, \pi, \nu \| w) = F(G, I(R(G, \pi, \nu), w), \nu \| w)$$

funkcija profinjavanja.

*Dokaz.* Pokažimo prvo nekoliko svojstava ovako definisanog preslikavanja  $I$ .

(I1) Za proizvoljno bojenje  $\pi$  i čvor  $u$  važi da je  $I(\pi, u) \leq \pi$ . To važi zato što ako je  $\pi(v) < \pi(w)$  onda nije istovremeno  $I(\pi, u)(v) = \pi(v) + 1$  i  $I(\pi, u)(w) = \pi(w)$  jer to povlači da je  $\pi(v) \geq \pi(u)$  i  $\pi(w) \leq \pi(u)$ , odnosno da je  $\pi(w) \leq \pi(v)$  što je kontradikcija. U svim ostalim slučajevima iz pretpostavke sledi  $I(\pi, u)(v) < I(\pi, u)(w)$ .

(I2)  $\{v\}$  je ćelija bojenja  $I(\pi, v)$ . Ako je  $\pi(w) = \pi(v)$  i  $w \neq v$  onda je  $I(\pi, v)(w) = I(\pi, v)(v) + 1$ , a kako je  $I(\pi, v) \leq \pi$  onda je  $\pi(v) \neq \pi(w) \iff I(\pi, v)(v) \neq I(\pi, v)(w)$  pa je  $I(\pi, v)(v) \neq I(\pi, v)(w)$  za sve  $w \neq v$ .

(I3)  $I$  je transformacija invarijantna na imenovanje čvorova. Neka je  $g \in S_n$  proizvoljno. Tada je  $I(\pi^g, v^g)(w^g) = \pi(w) \iff I(\pi^g, v^g)(w^g) = \pi^g(w^g) \iff \pi^g(w^g) < \pi^g(v^g) \vee w^g = v^g \iff \pi(w) < \pi(v) \vee w = v \iff I(\pi, v)(w) = \pi(w)$ . Slično je i  $I(\pi^g, v^g)(w^g) = \pi(w) + 1 \iff I(\pi, v)(w) = \pi(w) + 1$ , odnosno  $I(\pi^g, v^g)(w^g) = I(\pi, v)(w) = I(\pi, v)^g(w^g)$ .

Dokažimo sada indukcijom da ovako definisana funkcija  $R$  ispunjava uslove funkcije profinjavanja.

### Baza indukcije

$$(R1) \quad R(G, \pi, ()) = F(G, \pi, ()) \leq \pi$$

(R2) Tvđenje trivijalno važi zato što je  $()$  prazan niz

$$(R3) \quad \text{Za svako } g \in S_n \text{ važi } R(G^g, \pi^g, ())^g = F(G^g, \pi^g, ())^g = F(G, \pi, ())^g = R(G, \pi, ())^g$$

**Induktivni korak** Pretpostavimo da tvrđenje važi za  $\nu$ .

$$(R1) \quad R(G, \pi, \nu \| w) = F(G, I(R(G, \pi, \nu), w), \nu \| w) \leq I(R(G, \pi, \nu), w) \leq R(G, \pi, \nu) \leq \pi$$

(R2)  $R(G, \pi, \nu \| w) \leq I(R(G, \pi, \nu), w)$  pa je  $w$  ćelija bojenja  $R(G, \pi, \nu \| w)$ . Ako je  $v \in \nu$ , onda je  $v$  ćelija  $R(G, \pi, \nu)$ , pa je ćelija i bojenja  $R(G, \pi, \nu \| w)$  jer je  $R(G, \pi, \nu \| w) \leq R(G, \pi, \nu)$ .

$$(R3) \quad \text{Za svako } g \in S_n \text{ važi } R(G^g, \pi^g, (\nu \| w)^g) = F(G^g, I(R(G^g, \pi^g, \nu^g), w^g), (\nu \| w)^g) = F(G^g, I(R(G, \pi, \nu)^g, w^g), (\nu \| w)^g) = F(G^g, I(R(G, \pi, \nu), w)^g, (\nu \| w)^g) = F(G, I(R(G, \pi, \nu), w), (\nu \| w))^g = R(G, \pi, \nu \| w)^g.$$

□

Funkcija  $I$  definisana u prethodnoj lemi naziva se funkcijom *individualizacije*. Primetimo da je za funkciju  $I$  moguće uzeti bilo koje preslikavanje koje ispunjava pokazana svojstva (I1-3).

Kako bismo definisali konkretnu funkciju profinjavanja, potrebno je još da odaberemo preslikavanje  $F$ . U tu svrhu uvodimo pojam *ekvitabilnog bojenja*.

**Definicija.** Označimo sa  $\psi(G, u, W) = \sum_{w \in W} \psi(G, u, w)$  broj grana grafa  $G$  koje povezuju čvor  $u$  i skup čvorova  $W$ . Particija  $\sim$  skupa čvorova  $V$  je *ekvitabilna* ako za svaki par čvorova  $u$  i  $v$  takvih da je  $u \sim v$  i svaku klasu  $C$  particije  $\sim$  važi  $\psi(G, u, C) = \psi(G, v, C)$ . Bojenje  $\pi$  je *ekvitabilno* ako je particija  $\sim_\pi$  ekvitabilna.

**Lema 6.** Za proizvoljno bojenje  $\pi$  grafa  $G$  postoji jedinstvena najgrublja particija  $\sim_\gamma$  koja je ekvitabilna i finija od  $\sim_\pi$ .

*Dokaz.* Očigledno postoji bar jedna ekvitabilna particija finija od  $\sim_\pi$ ; diskretna particija ispunjava te uslove.

Neka su  $\sim_\alpha$  i  $\sim_\beta$  dve takve particije. Definišimo  $\sim_\gamma$  kao tranzitivno zatvorenje unije particija  $\sim_\alpha$  i  $\sim_\beta$ , odnosno  $u \sim_\gamma v \iff x_1 \sim_\alpha x_2 \sim_\alpha \dots \sim_\alpha x_k$  za neke  $u = x_1, x_2, \dots, x_k = v$  pri čemu je  $u \sim_\alpha v \iff u \sim_\alpha v \vee u \sim_\beta v$ .

Ovako definisano  $\sim_\gamma$  je relacija ekvivalencije grublja od  $\sim_\alpha$  i  $\sim_\beta$ . Pokažimo da je i ekvitabilna.

Neka je  $u \sim_\alpha v$  i neka je  $C$  proizvoljna klasa iz  $\sim_\gamma$ . Kako je  $\sim_\alpha$  finije od  $\sim_\gamma$ , to je  $C = \bigcup_{i=1}^n A_i$  za neke klase  $A_1, \dots, A_n$  particije  $\sim_\alpha$ , pa je  $\psi(G, u, C) = \sum_{i=1}^n \psi(G, u, A_i)$ . Kako je  $\alpha$  ekvitabilno, to je dalje jednako  $\sum_{i=1}^n \psi(G, v, A_i) = \psi(G, v, C)$ . Analogno se pokazuje i za  $\sim_\beta$ , pa važi  $u \sim_\alpha v \implies \psi(G, u, C) = \psi(G, v, C)$ . Konačno, ako je  $u \sim_\gamma v$ , onda je  $u = x_1 \sim_\alpha x_2 \sim_\alpha \dots \sim_\alpha x_n = v$ , pa je  $\psi(G, u, C) = \psi(G, x_1, C) = \psi(G, x_2, C) = \dots = \psi(G, x_n, C) = \psi(G, v, C)$ .  $\square$

Ovim smo pokazali da postoji najgrublje ekvitabilno bojenje finije od  $\pi$  određeno do na raspored ćelija. Definišimo onda funkciju  $F(G, \pi, \nu)$  kao rezultat izvršavanja algoritma određivanja jednog takvog bojenja.

---

**Algoritam 2** Profinjavanje bojenja

---

```

1: procedure REFINE( $G, \pi, \nu$ )
2:    $\alpha \leftarrow \emptyset$ 
3:   if  $\nu = \nu' \parallel w$  then
4:     push( $\alpha, \{w\}$ )
5:   else
6:     push( $\alpha, C$ ) za sve  $C \in \pi$ 
7:   while  $\alpha \neq \emptyset$  do
8:      $W \leftarrow \text{pop}(\alpha)$ 
9:     for  $C \in \pi$  do
10:       $\pi, C_1, \dots, C_k, s \leftarrow \text{Refine\_cell}(G, \pi, \pi(C), t_v = \psi(G, v, W))$ 
11:      if  $C \in \alpha$  then
12:        remove( $\alpha, C$ )
13:        push( $\alpha, C_i$ ) za sve  $1 \leq i \leq k$ 
14:      else
15:        push( $\alpha, C_i$ ) za sve  $1 \leq i \leq k, i \neq s$ 
16:   return  $\pi$ 

```

---

Potrebno je da procedure koje modifikuju strukturu  $\alpha$  budu implementirane na način koji garantuje invarijantnost na imenovanje čvorova. Ovo se jednostavno postiže bilo kojom implementacijom koja ne zavisi od sadržaja elemenata unutar skupa  $\alpha$  poput steka ili reda, ili opštije implementacijom koja zavisi jedino od svojstava elemenata invarijantnih na imenovanje čvorova.

**Teorema 4.** *Neka je  $\gamma = F(G, \pi, \nu)$  rezultujuće bojenje izvršavanja algoritma profinjavanja za ulaz  $(G, \pi, \nu)$ . Tada  $\gamma$  ispunjava uslove leme 6 i  $F$  je transformacija invarijantna na imenovanje čvorova, odnosno  $F(G^g, \pi^g, \nu^g) = F(G, \pi, \nu)^g$  za proizvoljno  $g \in S_n$ .*

*Dokaz.* Označimo sa  $\xi$  particiju koja ispunjava uslove leme 6. Dokažimo indukcijom po  $i$  da je  $\xi \leq \sim_{\pi_i}$  gde  $\pi_i$  predstavlja bojenje  $\pi$  nakon  $i$  izvršenih koraka spoljne petlje algoritma.

**Baza indukcije** Po definiciji  $\xi$  je  $\xi \leq \sim_{\pi}$ .

**Induktivni korak** Neka je  $\xi \leq \sim_{\pi_i}$ . Tada je svaka ćelija  $C$  bojenja  $\pi_i$  unija nekih klasa particije  $\xi$ , pa to važi i za ćeliju  $W$  odabranu u liniji 8. Za proizvoljne  $x$  i  $y$  takve da je  $\pi_{i+1}(x) = \pi_{i+1}(y)$  mora važiti  $\psi(G, x, W) = \psi(G, y, W)$  ...

Neka je  $C$  ćelija nekog bojenja i neka su  $C_1, C_2, \dots, C_k$  ćelije dobijene netrivialnim profinjavanjem  $C$  u odnosu na neku ćeliju  $W$  ili individualizacijom ćelije  $C$ . Možemo formirati šumu (skup stabala) čiji su čvorovi ćelije na sledeći način:

1. Koren svakog stabla šume je jedna ćelija bojenja  $R(G, \pi, ())$ .
2. Deca čvora  $C$  su  $\{C_1, \dots, C_k\}$ .

Pokažimo da je  $F(G, \pi, \nu)$  ekvitalno. Obradimo prvo slučaj  $\nu = ()$ .

Dokaz izvodimo iz dva dela. Prvo, pokažimo da važi sledeće tvrđenje. Ako je ćelija  $C$  prilikom izvršavanja algoritma dodata u  $\alpha$  u liniji 4, 6, 13 ili 15 (u oznaci  $C \in \alpha$ ), tada se ona može predstaviti kao disjunktna unija nekih ćelija  $W_1, \dots, W_m \in \mathcal{W}$  gde  $W$  predstavlja skup svih ćelija uklonjenih iz  $\alpha$  linijom 8 algoritma. Dokaz izvodimo indukcijom po strukturi stabla, odozdo naviše.

**Baza indukcije** Ukoliko je  $C \in \mathcal{W}$ , tvrđenje važi trivijalno.

**Induktivni korak** Kako je po završetku izvršavanja algoritma  $\alpha$  prazan skup,  $C$  je moralo biti uklonjeno. Kako  $C$  nije uklonjeno linijom 8, moralo je biti uklonjeno linijom 12. U tom slučaju je  $C = C_1 \sqcup \dots \sqcup C_k$  i  $C_1, \dots, C_k$  su dodate u  $\alpha$  linijom 13. Po induktivnoj hipotezi se svaki od  $C_1, \dots, C_k$  može predstaviti kao disjunktna unija skupova iz  $\mathcal{W}$ , pa to važi i za  $C$ .

Sada, definišimo  $\beta = \{C \in \mathcal{P}(V) \mid \forall x, y \gamma(x) = \gamma(y) \implies \psi(x, C) = \psi(y, C)\}$ . Jasno je da je  $\mathcal{W} \subseteq \beta$ . Prema prethodno pokazanom je takođe i  $\alpha \subseteq \beta$ . Pokažimo da za svaku ćeliju  $C$  u stablu važi da je  $C \in \beta$ . Dokaz izvodimo indukcijom po strukturi stabla, odozgo naniže.

**Baza indukcije** Ako je  $C$  koren nekog stabla šume, onda je  $C \in \beta$  jer je dodato u  $\alpha$  u liniji 6 algoritma.

**Induktivni korak** Neka je  $C \in \beta$  i  $C = C_1 \sqcup \dots \sqcup C_k$ .

1° Ako je  $C \in \alpha$ , onda su i  $C_1, \dots, C_k \in \alpha \subseteq \beta$ .

2° Ako je  $C \notin \alpha$ , onda su  $C_1, \dots, C_{s-1}, C_{s+1}, \dots, C_k \in \alpha \subseteq \beta$ . Tada je  $\psi(G, x, C_s) = \psi(G, x, C) - \sum_{1 \leq i \leq k, i \neq s} \psi(G, x, C_i)$ , pa je i  $C_s \in \beta$ .

Kako su sve ćelije šume u  $\beta$ , to su i sve ćelije bojenja  $F(G, \pi, \nu)$ , pa je bojenje  $F(G, \pi, \nu)$  ekvitalno. Posmatrajmo još slučaj kada je  $\nu \neq ()$ .

Dokaz...

□

**Teorema 5.** *Neka je  $\nu$  list stabla  $\mathcal{T}(G, \pi)$ . Tada je ukupna vremenska složenost određivanja svih  $R(G, \pi, [\nu]_i)$  u klasi  $O(n^2 \log n)$ , pri čemu je  $n$  broj čvorova grafa.*

*Dokaz.* Pretpostavimo da su operacije **push**, **pop** i **remove** složenosti  $O(1)$ . Za fiksno  $W$  i  $C$  broj koraka jedne iteracije unutrašnje petlje je  $|C||W| + |C| \log |C| + k \leq |C||W| + |C|(1 + \log |C|)$  za određivanje vrednosti  $t_v$  za svaki čvor ćelije  $C$ , izvršavanje profinjavanja ćelije  $C$  i dodavanje svih potrebnih  $C_i$  u  $\alpha$ . Dakle, za fiksno  $W$  je broj koraka unutrašnje petlje manji ili jednak  $\sum_{C \in \pi} (|C||W| + |C|(1 + \log |C|)) \leq \sum_{C \in \pi} (|C||W| + |C|(1 + \log n)) = n|W| + n(1 + \log n)$ . Odatle je broj koraka za određivanje  $R(G, \pi, [\nu]_i)$  najviše  $\sum_{W \in \mathcal{W}_i} (n|W| + n(1 + \log n)) = n \sum_{W \in \mathcal{W}_i} |W| + |\mathcal{W}_i|n(1 + \log n)$  gde je  $\mathcal{W}_i$  skup svih ćelija na osnovu kojih je vršeno profinjavanje prilikom određivanja  $R(G, \pi, [\nu]_i)$ , odnosno svih ćelija  $W$  iz linije 8 algoritma. Ukupna složenost svih profinjavanja je onda  $\sum_{i=1}^{|\nu|} (n \sum_{W \in \mathcal{W}_i} |W| + |\mathcal{W}_i|n(1 + \log n)) = O(n \sum_{W \in \mathcal{W}} |W| + |\mathcal{W}|n \log n)$  pri čemu je  $\mathcal{W} = \bigcup_{i=1}^{|\nu|} \mathcal{W}_i$ .

Neka je  $C$  ćelija nekog bojenja i neka su  $C_1, C_2, \dots, C_k$  ćelije dobijene netrivialnim profinjavanjem  $C$  u odnosu na neku ćeliju  $W$  ili individualizacijom ćelije  $C$ . Možemo formirati šumu (skup stabala) čiji su čvorovi ćelije na sledeći način:

1. Koren svakog stabla šume je jedna ćelija bojenja  $R(G, \pi, ())$ .
2. Deca čvora  $C$  su  $\{C_1, \dots, C_k\}$ .

Kako su ćelije u listovima šume sve različite jedinične ćelije (jer je bojenje  $R(G, \pi, \nu)$  diskretno), ima ih tačno  $n$ . Kako svaka ćelija šume ima bar dva deteta, broj ćelija u šumi je manji od  $2n$ , a pošto ona mora sadržati i sve ćelije iz  $\mathcal{W}$ , to je  $|\mathcal{W}| < 2n$ .

Neka je  $v$  čvor grafa. Posmatrajmo niz ćelija  $\{v\} = C_m \subseteq C_{m-1} \subseteq \dots \subseteq C_1$  koje čine put od lista  $\{v\}$  do korena odgovarajućeg stabla. Neka je ćelija  $C_i$  jedna od ćelija dodatih u  $\alpha$  u liniji 4, 6, ili 15 algoritma. Tada je  $|C_i| \leq \frac{|C_{i-1}|}{2}$  ako je  $i > 1$ , odnosno nakon individualizacije ili profinjavanja. Označimo broj ovakvih ćelija sa  $k_v$ . Očigledno je  $k_v \leq 1 + \log_2 |C_1| \leq 1 + \log_2 n$ .

Primetimo da su u svakom koraku algoritma ćelije koje se nalaze u  $\alpha$  međusobno disjunktne. Odavde sledi da se istovremeno u  $\alpha$  ne mogu naći dve različite ćelije  $C_i$  i  $C_j$ . Prisetimo, takođe, da jedino linije 4, 6, 8 i 15 algoritma mogu da promene tačnost rečenice  $\exists i C_i \in \alpha$  (12 i 13 ne mogu ukoliko se posmatraju zajedno). Kako

je na početku i na kraju izvršavanja algoritma  $\alpha = \emptyset$ , mora važiti da je broj  $k_v$  dodavanja ćelija  $C_i$  u  $\alpha$  jednak broju uklanjanja ćelija  $C_i$  iz  $\alpha$ , odnosno broju onih ćelija za koje važi  $C_i \in \mathcal{W}$ .

Konačno,

$$\begin{aligned} \sum_{W \in \mathcal{W}} |W| &= \sum_{W \in \mathcal{W}} \sum_{v \in W} 1 \\ &= \sum_{W \in \mathcal{W}} \sum_{v \in V} \chi_W(v) \\ &= \sum_{v \in V} \sum_{W \in \mathcal{W}} \chi_W(v) \\ &= \sum_{v \in V} k_v \\ &\leq \sum_{v \in V} (1 + \log_2 n) \\ &= n(1 + \log_2 n) \end{aligned}$$

□

### 3.3 Funkcija odabira ciljne ćelije

### 3.4 Invarijanta stabla

**Lema 7.** *Neka je  $f : \mathcal{G} \times \Pi \times V^* \rightarrow F$  funkcija invarijantna na imenovanje čvorova, pri čemu je  $F$  neki potpuno uređen skup i neka je  $\text{bin}(G)$  binarna reprezentacija gornjeg trougla matrice povezanosti grafa  $G$ . Tada je funkcija definisana sa*

$$\phi(G, \pi, \nu) = \begin{cases} (f(G, \pi, [\nu]_0), \dots, f(G, \pi, [\nu]_{|\nu|})), & \text{ako } \pi_\nu \text{ nije diskretno} \\ (f(G, \pi, [\nu]_0), \dots, f(G, \pi, [\nu]_{|\nu|}), \text{bin}(G^{\pi_\nu})), & \text{inače} \end{cases}$$

*invarijanta stabla pri leksikografskom poretku.*

*Dokaz.* Dokažimo da tako definisana funkcija  $\phi$  ispunjava uslove invarijante stabla.

( $\phi 1$ ) Za svaki čvor  $\omega$  podstabla  $\mathcal{T}(G, \pi, \nu)$  važi da je  $\phi(G, \pi, \nu) = [\phi(G, \pi, \omega)]_{|\nu|}$ . Neka su  $\nu_1$  i  $\nu_2$  čvorovi stabla takvi da je  $|\nu_1| = |\nu_2|$  i  $\phi(G, \pi, \nu_1) < \phi(G, \pi, \nu_2)$ . Tada za čvorove  $\omega_1 \in \mathcal{T}(G, \pi, \nu_1)$  i  $\omega_2 \in \mathcal{T}(G, \pi, \nu_2)$  važi  $[\phi(G, \pi, \omega_1)]_{|\nu_1|} < [\phi(G, \pi, \omega_2)]_{|\nu_2|}$  pa je po leksikografskom poretku i  $\phi(G, \pi, \omega_1) < \phi(G, \pi, \omega_2)$ .

( $\phi 2$ ) Ako za listove  $\nu_1$  i  $\nu_2$  važi  $\phi(G, \pi, \nu_1) = \phi(G, \pi, \nu_2)$ , onda je  $\text{bin}(G^{\pi_1}) = \text{bin}(G^{\pi_2})$ , pa je  $G^{\pi_1} = G^{\pi_2}$ .

( $\phi 3$ ) Neka je  $g \in \text{Aut}(G, \pi)$  i  $\nu$  čvor stabla. Tada je  $f(G^g, \pi^g, [\nu^g]_i) = f(G^g, \pi^g, [\nu]_i^g) = f(G, \pi, [\nu]_i)$ , kao i  $\text{bin}((G^g)^{R(G^g, \pi^g, \nu^g)}) = \text{bin}((G^g)^{\pi_\nu^g}) = \text{bin}(G^{\pi_\nu})$ , pa su nizovi  $\phi(G^g, \pi^g, \nu^g)$  i  $\phi(G, \pi, \nu)$  jednaki.

□

Još je potrebno odabrati konkretnu funkciju  $f$ . Uvedimo za početak pojam *količničkog grafa*.

**Definicija.** Neka je  $(G, \pi)$  obojen graf i  $\pi$  ekvitabilno. *Količnički graf*  $Q(G, \pi) = (V_Q, d_Q, \psi_Q)$  je struktura takva da je  $V_Q$  skup od  $|\pi|$  čvorova,  $d_Q : V_Q \rightarrow \mathbb{N}$  preslikavanje takvo da je  $d_Q(c) = |\pi^{-1}(c)|$  i  $\psi_Q : V_Q^2 \rightarrow \mathbb{N}$  preslikavanje takvo da važi  $\psi_Q(c_1, c_2) = \psi(G, v, \pi^{-1}(c_2))$  za bilo koje  $v \in \pi^{-1}(c_1)$ .

Primetimo da je definicija dobra zbog ekvitabilnosti bojenja  $\pi$ . Sledeća lema pokazuje značaj uvedenog pojma.

**Lema 8.** Neka je  $Q : \mathcal{G}_{eq} \rightarrow \mathcal{Q}$  prethodno definisano preslikavanje iz skupa obojenih grafova sa ekvitabilnim bojenjem u skup količničkih grafova.  $Q$  je funkcija invarijantna na imenovanje čvorova.

*Dokaz.* Neka je  $g \in S_n$  proizvoljno. Pokažimo da je  $Q(G^g, \pi^g) = Q(G, \pi)$ . Kako je  $|\pi^g| = |\pi|$  to su skupovi čvorova količničkih grafova jednaki. Dalje, važi  $d_{Q(G^g, \pi^g)}(c) = |(\pi^g)^{-1}(c)| = |\pi^{-1}(c)| = d_{Q(G, \pi)}(c)$ . Konačno, neka je  $u' \in (\pi^g)^{-1}(c_1)$ . Tada važi

$$\begin{aligned}
 \psi_{Q(G^g, \pi^g)}(c_1, c_2) &= \psi(G^g, u', (\pi^g)^{-1}(c_2)) \\
 &= \sum_{v' \in (\pi^g)^{-1}(c_2)} \psi(G^g, u', v') \\
 &= \sum_{v^g \in (\pi^g)^{-1}(c_2)} \psi(G^g, u^g, v^g) && \text{smena } u' = u^g, v' = v^g \\
 &= \sum_{v \in \pi^{-1}(c_2)} \psi(G^g, u^g, v^g) && (\pi^g)^{-1}(c_2) = \pi^{-1}(c_2)^g \\
 &= \sum_{v \in \pi^{-1}(c_2)} \psi(G, u, v) && \psi \text{ je invarijantno} \\
 &= \psi(G, u, \pi^{-1}(c_2)) \\
 &= \psi_{Q(G, \pi)}(c_1, c_2) && (\pi^g)^{-1}(c_1) = \pi^{-1}(c_1)^g
 \end{aligned}$$



Uvedi dekompoziciju za psi, pokaži da je psi invarijantno i dokaži pi na -1 na g je pi na g na -1 (svojstva za psi kod grafa, a ovo kod bojenja i dejstva na bojenje)  $\square$

**Posledica 2.** Preslikavanje  $f_Q : \mathcal{G} \times \Pi \times V^* \rightarrow \mathcal{Q}$  dato sa  $f_Q(G, \pi, \nu) = Q(G, R(G, \pi, \nu))$  je funkcija invarijantna na imenovanje čvorova.

Jasno je da za preslikavanje  $f$  možemo uzeti upravo ceo količnički graf, pri čemu je uređenje količničkih grafova moguće realizovati uređivanjem njihovih binarnih reprezentacija. Ovakva definicija preslikavanja  $f$  u praksi nije korisna zbog velike složenosti neophodne za njeno izračunavanje - potrebno je realizovati ceo količnički graf. Ovo je moguće rešiti posmatranjem manjeg dela količničkog grafa i to bez gubitka korisnih informacija.

**Lema 9.** Neka je  $(G, \pi)$  obojen graf i  $\nu = \nu' \| w$  čvor stabla različit od korena. Uvedimo oznake  $\pi_1 = R(G, \pi, \nu')$  i  $\pi_2 = R(G, \pi, \nu)$ . Neka su  $c_1, \dots, c_k$  boje takve da za sve  $1 \leq i \leq k$  važi da  $\pi_2^{-1}(c_i)$  nije ćelija bojenja  $\pi_1$ . Označimo sa  $f_i$  niz vrednosti  $(c_i, d_{Q(G, \pi_2)}(c_i), \psi_{Q(G, \pi_2)}(c_i, c_1), \dots, \psi_{Q(G, \pi_2)}(c_i, c_k))$ . Tada je preslikavanje  $f(G, \pi, \nu)$  čija je vrednost prazan niz  $()$  u slučaju korena  $\nu$ , odnosno dobijena nadovezivanjem nizova  $f_1, \dots, f_k$  u suprotnom, funkcija invarijantna na imenovanje čvorova.

*Dokaz.* Pretpostavimo da za neko  $g \in S_n$  i neke boje  $c$  i  $d$  važi  $\pi_2^{-1}(c) = \pi_1^{-1}(d)$ , odnosno da je  $\pi_2^{-1}(c)$  ćelija bojenja  $\pi_1$ . Tada je  $R(G^g, \pi^g, \nu^g)^{-1}(c) = (\pi_2^g)^{-1}(c) = \pi_2^{-1}(c)^g = \pi_1^{-1}(d)^g = (\pi_1^g)^{-1}(d) = R(G^g, \pi^g, \nu^g)^{-1}(d)$ . Analogno se pokazuje i obrnuta implikacija. Ovim smo pokazali da je niz boja  $c_1, \dots, c_k$  jednak za  $f(G^g, \pi^g, \nu^g)$  i  $f(G, \pi, \nu)$ . Tvđenje onda jednostavno važi pošto je količnički graf funkcija invarijantna na imenovanje čvorova.  $\square$

**Lema 10.** Neka je  $(G, \pi)$  obojen graf i  $\nu \| w_1$  i  $\nu \| w_2$  različiti čvorovi stabla. Tada je  $f(G, \pi, \nu \| w_1) = f(G, \pi, \nu \| w_2)$  ako i samo ako  $f_Q(G, \pi, \nu \| w_1) = f_Q(G, \pi, \nu \| w_2)$ .

*Dokaz.* Dokaz implikacije ulevo je trivijalan. Za smer udesno dokazaćemo kontrapoziciju tvđenja.

Označimo  $\pi_i = R(G, \pi, \nu \| w_i)$  i  $\pi_2 = R(G, \pi, \nu \| w_2)$ . Pretpostavimo da je  $Q(G, \pi_1) \neq Q(G, \pi_2)$ . Ako je  $V_{Q(G, \pi_1)} \neq V_{Q(G, \pi_2)}$  ili  $d_{Q(G, \pi_1)} \neq d_{Q(G, \pi_2)}$  onda je skup ćelija bojenja  $\pi_1$  i  $\pi_2$  koje nisu ćelije u  $\pi_\nu$  različit, pa je  $f(G, \pi, \nu \| w_1) \neq f(G, \pi, \nu \| w_2)$ . Ako je  $\psi_{Q(G, \pi_1)}(c_1, c_2) \neq \psi_{Q(G, \pi_2)}(c_1, c_2)$  za neke  $c_1$  i  $c_2$  čije odgovarajuće ćelije iz  $\pi_1$  i  $\pi_2$  nisu ćelije bojenja  $\pi_\nu$ , očigledno je  $f(G, \pi, \nu \| w_1) \neq f(G, \pi, \nu \| w_2)$ .

Pretpostavimo da je  $\pi_1^{-1}(c_2)$  ćelija bojenja  $\pi_\nu$ . Tada zbog ekvitabilnosti bojenja  $\pi_\nu$  za proizvoljno  $c_1$  važi  $\psi_{Q(G, \pi_1)}(c_1, c_2) = \psi_{Q(G, \pi_\nu)}(d_1, d_2)$  gde je  $d_1$  takvo da

je  $\pi_1^{-1}(c_1) \subseteq \pi_\nu^{-1}(d_1)$ , a  $d_2$  takvo da je  $\pi_1^{-1}(c_2) = \pi_\nu^{-1}(d_2)$ . Odatle sledi da ne važi  $\psi_{Q(G,\pi_1)}(c_1, c_2) \neq \psi_{Q(G,\pi_2)}(c_1, c_2)$  jer je  $\psi_{Q(G,\pi_1)}(c_1, c_2) = \psi_{Q(G,\pi_\nu)}(d_1, d_2) = \psi_{Q(G,\pi_2)}(c_1, c_2)$ , a znamo da su u obe jednakosti isti  $d_1$  i  $d_2$  u pitanju jer su  $\pi_1, \pi_2 \leq \pi_\nu$ .

Pretpostavimo da je  $\pi_1^{-1}(c_1)$  ćelija bojenja  $\pi_\nu$ . Tada nije  $\psi_{Q(G,\pi_1)}(c_1, c_2) \neq \psi_{Q(G,\pi_2)}(c_1, c_2)$  zato što po prethodno pokazanom važi  $|\pi_1^{-1}(c_1)|\psi_{Q(G,\pi_1)}(c_1, c_2) = |\pi_1^{-1}(c_2)|\psi_{Q(G,\pi_1)}(c_2, c_1) = |\pi_2^{-1}(c_2)|\psi_{Q(G,\pi_2)}(c_2, c_1) = |\pi_2^{-1}(c_1)|\psi_{Q(G,\pi_2)}(c_1, c_2)$ .

Dokazati svojstvo  $|C_1|\psi(c_1, c_2) = |C_2|\psi(c_2, c_1)$  □

### 3.5 Automorfizmi

Prilikom pretrage otkrivaju se automorfizmi koji se dalje koriste za odsecanje. Ako je poznat skup automorfizama  $\{g_1, \dots, g_n\}$ , u operaciji odsecanja  $P_C$  moguće je primeniti ne samo neki od tih automorfizama, već i proizvoljan automorfizam iz grupe generisane tim skupom.

Operacija odsecanja  $P_C$  se primenjuje što je pliće u stablu moguće. Konkretno, neka je  $\nu = (v_1, \dots, v_{|\nu|})$  i neka je  $k$  dužina najdužeg zajedničkog prefiksa nizova  $\nu$  i  $\nu^g$  za neki automorfizam  $g$ . Tada je moguće primeniti operaciju odsecanja  $P_C([\nu]_{k+1}, g)$ . Primetimo da  $g$  stabilizuje niz  $[\nu]_k$ , odnosno  $g \in \Sigma_{[\nu]_k}$  i da stoga  $v_{k+1}$  i  $v_{k+1}^g$  pripadaju istoj orbiti tog stabilizatora.

Zbog ovoga je korisno na efikasan način realizovati određivanje stabilizatora (ili nekog njegovog podskupa) i određivanje orbita nekog skupa automorfizama. Pored samog skupa automorfizama čuvaju se podaci koji ovo i omogućavaju.

Neka su  $\{g_1, \dots, g_n\}$  elementi skupa automorfizama. Definišimo  $stab(v) = \{i \mid v^{g_i} = v\}$  predstavljen vektorom **stab**. Grupa automorfizama generisana skupom  $\{g_i \mid i \in \bigcap_{1 \leq j \leq k} stab(v_j)\}$  je podgrupa stabilizatora niza  $\nu = (v_1, \dots, v_k)$ .

Definišimo  $mcr(v) = \min \Omega_v^{<g_1, \dots, g_n>}$  predstavljen vektorom **orbit**. Kako je prema prethodno pokazanom  $P_C$  moguće primenjivati za bilo koja dva čvora iz iste orbite, možemo odseći pretragu u bilo kom čvoru za koji važi  $v \neq mcr(v)$ .

### 3.6 Pretraga

### 3.7 Invarijanta grafa

## Glava 4

### Rezultati testiranja

Glava 5

Zaključak

# Bibliografija

- [1] Yuri Gurevich and Saharon Shelah. Expected computation time for Hamiltonian path problem. *SIAM Journal on Computing*, 16:486–502, 1987.
- [2] Petar Petrović and Mika Mikić. Naučni rad. In Miloje Milojević, editor, *Konferencija iz matematike i računarstva*, 2015.

# Biografija autora

Biografija.