

Po sledih prstnih odtisov s teorijo grafov

Famnitovi izleti v matematično vesolje

dr. Kenny Bešter Štorgel

23. april 2025



Prstni odtisi skozi zgodovino

Analiza prstnih odtisov - zgodovina (1. del)

- Sir William Herschel je bil eden prvih, ki je zagovarjal uporabo prstnih odtisov pri identifikaciji kriminalnih osumljencev.
- Leta 1858, med delom v Indijski civilni službi, je začel uporabljati prstne odtise na dokumentih kot varnostni ukrep proti ponarejanju podpisov.
- Leta 1877 je uvedel uporabo prstnih odtisov na pogodbah in listinah ter registriral prstne odtise upokojenцев, da bi preprečil, da bi njihovi sorodniki pobirali denar po smrti upokojenca.
- Herschel je začel prstne odtise jemati tudi zapornikom ob obsodbi, da bi preprečil različne prevare, ki so jih poskušali storiti, da bi se izognili prestajanju zaporne kazni.

Analiza prstnih odtisov - zgodovina (2. del)

- Leta 1880 je dr. Henry Faulds, škotski kirurg v bolnišnici v Tokiju, objavil svoj prvi članek na temo uporabnosti prstnih odtisov za identifikacijo.
- Faulds je predlagal metodo za zajemanje prstnih odtisov z tiskarskim črnilom in uvedel prvo klasifikacijo prstnih odtisov.
- Faulds je bil prvi, ki je prepoznal prstne odtise na steklu (na steklenici).
- Leta 1886 se je vrnil v Združeno kraljestvo in predstavil koncept Londonski metropolitanski policiji, vendar je bil ta zavržen.

- Faulds je pisal Charlesu Darwinu z opisom svoje metode, vendar je bil Darwin prester in bolan, da bi sam delal na tem, zato je te informacije posredoval svojemu bratrancu, Francisu Galtonu, ki je bil navdušen nad antropologijo.
- Galton je deset let preučeval prstne odtise in v svoji knjigi *Finger Prints* objavil podroben statistični model analize in identifikacije prstnih odtisov.
- Galton je izračunal, da je verjetnost napačne identifikacije prstnih odtisov le 1 proti 64 milijardam.

- Juan Vucetich, argentinski policijski častnik, je ustvaril prvo metodo za zapisovanje prstnih odtisov ljudi v evidencah.
- Leta 1892 je Vucetich, po študiju Galtonovih vzorcev, ustanovil prvi svetovni biro za prstne odtise.
- V istem letu je bila Francisca Rojas iz Necochee obsojena za umor svojih dveh sinov, ko je bil njen prstni odtis v krvavem pečatu na vratih primerjan s tistim, ki je bil na njenem desnem palcu.
- Vucetich je dokazal njeno krivdo, saj je bil njen prstni odtis identičen tistemu na vratih.

- Leta 1897 je bil v Indiji (Kolkata) ustanovljen biro za prstne odtise, potem ko je Svet Generalnega guvernerja odobril poročilo komisije, ki je priporočala uporabo prstnih odtisov za klasifikacijo kazenskih zapisov.
- V biroju sta delala Azizul Haque in Hem Chandra Bose, ki sta bila ključna za razvoj prvega sistema klasifikacije prstnih odtisov imenovanega po njunem nadzorniku Sir Edward Richard Henryju.
- Henryjev klasifikacijski sistem so sprejeli v Združenem kraljestvu leta 1901, ko so ustanovili biro za prstne odtise v znanem Scotland Yardu.

- Henrijev klasifikacijski sistem danes predstavlja osnovo za prepoznavanje prstnih odtisov v veliko državah.
- Ta sistem je klasificiral vzorce grebenov v tri skupine: loke, zanke in spirale.
- O grebenih in njihovih vzorcih je sicer prvič poročal Marcello Malpighi že leta 1686, vendar prstni odtisi niso bili prepoznani kot sredstvo za osebno identifikacijo vse do leta 1880, ko je Henry Faulds prvič prepoznal njihov pomen.

Uvod v prstne odtise

Kaj so prstni odtisi?

- Prstni odtisi so vzorci na notranji strani in konicah prstov.
- Kožnati grebeni skupaj z dolinami med njimi tvorijo edinstvene vzorce na prstih.
- Edinstvenost odtisov temelji na dejstvu, da se ne spreminjajo skozi življenje posameznika.
- Edinstvenost odtisov je določena z majhnimi spremembami v lokalnem okolju že med fetalnim razvojem, zato je možno ločiti enojajčne dvojčke, ki jih DNK analiza ne more.

Prstni odtisi - kako nastanejo?

- Prisotnost pore na površini brazd prstov povzroči nabiranje znoja na konicah prstov.
- Ta vlaga ostane na površini predmeta, ki se ga oseba dotakne, pri čemer pusti prstne odtise.
- Glede na površino predmeta, ki je bila dotaknjena, so prstni odtisi lahko vidni s prostim očesom (npr. kovina, steklo, plastika) ali nevidni (papir, karton, les).
- Prstni odtisi, ki so puščeni na neporoznih površinah, kot je kovina, se lahko vizualizirajo z uporabo prahov in odstranijo s pomočjo traku.
- V nasprotju s tem so odtisi na poroznih površinah, kot so papir, karton ali les, zahtevajo posebno osvetlitev, kot so laserji ali rentgenski žarki.

- **Spremembe na prstnih odtisih (1):** čeprav vzorec prstnih odtisov ostaja enak, rast telesa povzroči povečanje vzorcev.
- **Spremembe na prstnih odtisih (2):** določene bolezni ali poškodbe prstov lahko vodijo do sprememb v vzorcu.
- **Nejasni odtisi:** delno ali popolnoma nejasni odtisi: zaradi površin, poškodb, umazanost prstov, slab odtis,....
- **Površinske napake:** neenakomerne ali umazane površine.
- **Pomanjkanje referenčnih podatkov:** premajhna baza podatkov.

Prepoznavanje prstnih odtisov

- Moderno prepoznavanje prstnih odtisov uporablja računalniške algoritme za določanje podobnosti.
- Analiza prstnih odtisov se običajno izvede na več ravneh:
 - Na najvišji ravni se najprej določi tip prstnega odtisa.
 - Nato se nadaljuje z določanjem podrobnosti.
- Računalniška analiza primerja lastnosti prstnega odtisa in njihovo relativno lego.
- Programska oprema običajno prepozna določen število točk podobnosti (običajno okvirno do 90 točk).
- Po identifikaciji določenega števila lastnosti se ustvari predloga skeniranega prstnega odtisa, ki se nato primerja z že shranjenimi predlogami v bazi.

Teorija grafov pri identifikaciji prstnih odtisov

- Prstni odtisi imajo različne vzorce.
- Za računalniško analizo teh vzorcev potrebujemo matematični model, ki lahko:
 - predstavi strukturo odtisa,
 - omogoča primerjavo med odtisi,
 - prenese rahle deformacije (rotacije, zamike, povečave).
- Teorija grafov nam omogoča modeliranje takšnih struktur:
 - Vzorci predstavljajo vozlišča grafa.
 - povezanost vzorcev predstavljajo povezave grafa.
- Prepoznavanje prstnih odtisov tako postane naloga iskanja izomorfizma dveh grafov.

Teorija grafov

- **Graf** $G = (V, E)$ je matematična struktura, sestavljena iz množice točk (vozlišč) V in množice povezav E med točkami.
- Dve točki $u, v \in V$ sta **sosednji**, če obstaja povezava $e \in E$ med njima ($e = \{u, v\}$). Pravimo tudi, da sta u in v **krajišči** povezave e .
- **Stopnja točke** $v \in V$ je število povezav s krajiščem v .
- Grafi so lahko **usmerjeni** ali **neusmerjeni**, odvisno od tega, ali imajo povezave med točkami smer.
- **Utežen graf** je graf, kjer je vsaki povezavi dodeljena neka številka vrednost, ki ji pravimo **utež**.

- **Pot** v grafu je izmenično zaporedje sosednjih točk in povezav med njimi, kjer so vse točke in povezave različne ter se začne in konča v neki točki grafa.
- Za dve točki u, v grafa pravimo, da sta **povezani**, če obstaja pot med njima (pot s krajišči u in v).
- Graf je **povezan**, če za vsak par točk $u, v \in V$ obstaja pot s krajišči u in v .
- Graf $H = (V', E')$ je **podgraf** grafa $G = (V, E)$, če je V' podmnožica množice V in E' podmnožica množice E , kjer za vsako povezavo $e = \{u, v\} \in E'$ velja $u, v \in V'$.
- **Povezana komponenta** grafa G je maksimalen povezan podgraf grafa G .

- **Izomorfizem grafov** $G = (V, E)$ in $G' = (V', E')$ je bijektivna preslikava f iz množice točk V v množico točk V' , ki ohranja povezave:

$$f : V \rightarrow V' \text{ tako, da } \{u, v\} \in E \Leftrightarrow \{f(u), f(v)\} \in E'$$

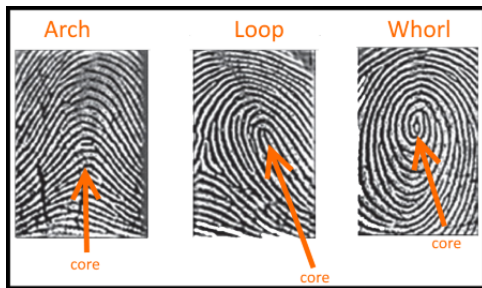
Dva grafa sta **izomorfna**, če obstaja izomorfizem med njima.

- V osnovi to pomeni, da imata grafa enako strukturo, le da so točke morda poimenovana drugače.
- Preverjanje izomorfizma je ključno pri prepoznavanju – če je graf prstnega odtisa iz baze izomorfen grafu zaznanega prstnega odtisa, imamo ujemanje.
- Majhne deformacije (npr. razteg, rotacija) lahko povzročijo, da graf ni popolnoma enak – zato se uporablja tudi preverjanje izomorfizma podgrafa.

Klasifikacija prstnih odtisov

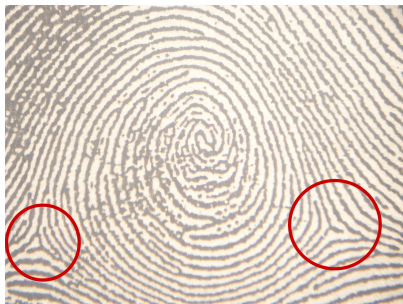
Jedro prstnega odtisa

- **Jedro** je osrednja točka vzorca prstnega odtisa.
- Pojavi se na območju, kjer se grebeni najbolj ukrivijo.
- Jedro se uporablja kot referenčna točka pri:
 - primerjanju odtisov,
 - poravnavi odtisov v avtomatskih sistemih,
 - klasifikaciji odtisov v bazah podatkov.



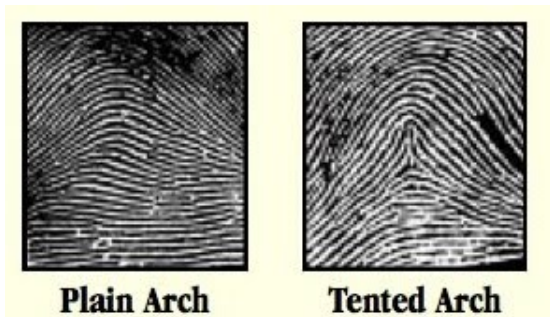
Delta prstnega odtisa

- **Delta** je značilna tristranska struktura v prstnem odtisu, kjer se grebeni razcepijo v tri različne smeri.
- Izgleda kot Y ali kot Δ (Grška črka Delta).
- Delte so ključne za klasifikacijo odtisov, saj njihovo število in položaj določata vrsto vzorca.



Vrste prstnih odtisov

- Tip odtisa: **Arch** - Lok
- Podtipi:
 - **Plain Arch (PA)** – preprosti lok (brez jedra, brez delte)
 - **Tented Arch (TA)** – šotorasti lok (vrh na sredini, videti je kot jedro, brez delte)



Vrste prstnih odtisov

- Tip odtisa: **Loop** - Zanka (eno jedro, en delta)
- Podtipi:
 - **Radial Loop (RL)** – nagib grebenov je usmerjen proti palcu roke
 - **Ulnar Loop (UL)** – nagib grebenov je usmerjen proti mezinцу roke



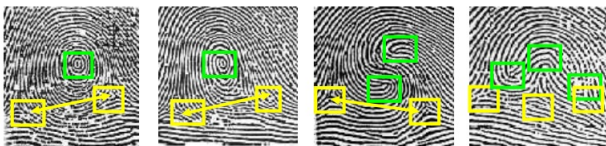
(a)
radial Loop



(b)
ulnar Loop

Vrste prstnih odtisov

- Tip odtisa: **Whorl** - Spirala (eno jedro, dve ali več delt, grebeni krožno ali spiralno obliko)
- Podtipi:
 - **Plain Whorl (PW)** - preprosta spirala (dve delti, grebeni tvorijo skoraj popoln krog ali spiralo)
 - **Central Pocket Whorl (CPW)** - spirala z žepom v središču (dve delti, grebeni ne tvorijo popolnega kroga, jedro je globlje, žepast videz)
 - **Double Loop (DL)** - dvojna zanka (dve delti, dve zanki, ki se prepletata kot S)
 - **Accidental Whorl (AW)** - naključna spirala (kombinacija različnih vzorcev; asimetrične in nepravilne oblike)



Plain

Central Pocket

Double Loop

Accidental



Delta



Core

Karakteristike prstnih odtisov

Minutiae

ridge ending

bifurcation

dot

island (short ridge)

lake (enclosure)

hook (spur)

Example



Basic and composite ridge characteristics (minutiae)

Minutiae

bridge

double bifurcation

trifurcation

opposed bifurcations

ridge crossing

opposed bifurcation/ridge ending

Example



Po vrsti: konec grebena (RE), razcep na dva grebena (BR), pika (RD), otok (SR), jezero (E), kljuka (S), most (B), dvojni razcep (DB), razcep na tri grebene (TR), nasprotna razcepa (OBB), križanje (RC), nasprotna razcep in konec (OBRE).

Potek identifikacije prstnih odtisov

Algoritem 1: Povezava grafa s prstnim odtisom

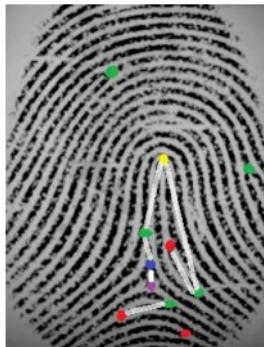
Namen: prstnemu odtisu pripišemo utežen graf z označenimi točkami.

- 1 Identificiramo vse karakteristike v odtisu.
- 2 Vsaki karakteristiki priredimo točko grafa.
- 3 Dodamo povezave med točkami, če se ustrezni karakteristiki pojavita zaporedoma na istem grebenu.
- 4 Vsaki povezavi priredimo utež enako razdalji med karakteristikama (v cm).
- 5 Vsaki točki priredimo par (m, n) , kjer je:
 - m - oznaka značilnosti (npr. B, RE, RC, itd.)
 - n - stopnja točke

Algoritem 1: Povezava grafa s prstnim odtisom



a)



b)

Algoritem 2: Klasifikacija prstnega odtisa (1. del)

Namen: določimo vrsto prstnega odtisa v treh nivojih klasifikacije.

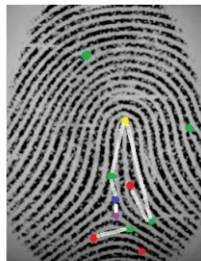
- 1 Ali ima jedro? Da (korak 3), Ne (korak 2)
- 2 **Plain Arch – PA** (korak 8)
- 3 Ali ima delto? Da (korak 5), Ne (korak 4)
- 4 **Tented Arch – TA** (korak 8)
- 5 Število delt? Ena (korak 6), Dve ali več (korak 7)
- 6 **Radial Loop (RL)** ali **Ulnar Loop (UL)** (korak 8)
- 7 **Whorl (W): Plain Whorl (PW), Central Pocket Whorl (CPW), Double Loop (DLW), Accidental Whorl (AW)**

Algoritem 2: Klasifikacija prstnega odtisa (2. del)

- 8 **Prvi nivo klasifikacije:** (Tip odtisa, podtip odtisa, število različnih karakteristik)
- 9 Ustvarimo graf karakteristik prstnega odtisa (Algoritem 1)
- 10 **Drugi nivo klasifikacije:** (Število točk, število povezav in število povezanih komponent pripadajočega grafa)
- 11 Vsako točko grafa dodatno označimo z utežmi povezav katerim pripada (po velikosti)
- 12 **Tretji nivo klasifikacije:**
vsaka točka je označeno z $(m, n, R_1, R_2, \dots, R_n)$, kjer je m oznaka karakteristike, n stopnja točke in R_i so uteži povezav



a)



b)

- Korak 1: Ima jedro? DA → Korak 3: Ima delto? NE → Korak 4: Tented Arch (TA) → Korak 8.
- Prvi nivo klasifikacije: tip Arch (A), podtip Tented Arch (TA), število različnih karakteristik 5.
- Drugi nivo klasifikacije: število točk 11, število povezav 6, število povezanih komponent 5.

Algoritem 3: Ujemanje z bazo prstnih odtisov

Namen: Ujemanje najdenega prstnega odtisa z zapisom iz baze podatkov.

- 1 Ujemanje na prvem nivoju.
- 2 Ujemanje na drugem nivoju.
- 3 Ujemanje na tretjem nivoju (izomorfizem uteženih grafov oz., zaradi možnih majhnih deformacij, preverjamo tudi izomorfizem uteženih podgrafov).
- 4 Če obstaja ujemanje, smo končali.

- **Povzeto po:**

[https://ccicada.org/wp-content/uploads/2015/06/
Karim-and-Violeta-Module-for-Reconnect-2014-FINAL-4.pdf](https://ccicada.org/wp-content/uploads/2015/06/Karim-and-Violeta-Module-for-Reconnect-2014-FINAL-4.pdf)

- **Galtonova knjiga Finger Prints:**

[https://galton.org/books/finger-prints/
galton-1892-fingerprints-1up.pdf](https://galton.org/books/finger-prints/galton-1892-fingerprints-1up.pdf)

Preiskava končana!

Hvala za pozornost!