



METÓDY EXTRAKCIE CHARAKTERISTICKÝCH ZNAKOV ODTLAČKOV PRSTOV A DLANÍ

Teória číslicového spracovania obrazov a metodológia jej
aplikácie v informatike

Skúšajúci: doc. Dr. Ing. Miloš Oravec

ABSTRAKT

Táto správa poskytuje krátky prehľad existujúcich softvérových techník extrakcie charakteristických informácií z odtlačkov prstov a dlaní. Špecifickým cieľom je poskytnúť vysvetlenie princípu techník, ktoré vychádzajú z analýzy rôznych reprezentácií odtlačku, v ktorých rozpoznávajú markanty papilárnych línií.

Ing. Pavol Marák

Školiteľ:

prof. RNDr. Otokar Grošek, PhD.

Obsah

Úvod.....	2
1 Biometrické systémy a odtlačky prstov.....	3
1. 1 Biometrické systémy v skratke.....	3
1. 2 Biometrický systém na báze odtlačkov	5
1. 3 Úrovne vlastností odtlačkov a ich extrakcia.....	7
1. 3. 1 Level-1 daktyloskopické vzory	8
1. 3. 2 Level-2 daktyloskopické vzory	9
1. 3. 3 Level-3 daktyloskopické vzory	9
1. 3. 4 Klasifikačná schéma daktyloskopických markantov.....	10
1. 4 Súčasný stav a otvorené otázky	11
2 Metódy extrakcie charakteristických znakov vo vzoroch odtlačkov.....	13
2. 1 Extrakcia Level-2 charakteristických znakov.....	13
2. 1. 1 Extrakcia markantov na základe štruktúrálnej analýzy kostry odtlačku.....	14
2. 1. 2 Extrakcia markantov technikou Crossing Number.....	19
2. 1. 3 Extrakcia markantov priamo v originálnom obraze	20
2. 1. 4 Extrakcia markantov prostredníctvom okrajových bodov papilárnych línií	25
2. 1. 5 „Run-length“ schéma extrakcie daktyloskopických markantov	29
3 Vlastný výskum: návrh, implementácia a testovanie vlastného riešenia.....	33
3. 1 Vlastná metóda extrakcie Level-2 markantov	34
Použitá literatúra.....	38

Úvod

Biometrická identifikácia a verifikácia prostredníctvom odtlačkov prstov a dlaní je v súčasnej dobe jednou z najdiskutovanejších tém v oblasti informačnej bezpečnosti. Výkonné výpočtové prostriedky a možnosti algoritmickej niektorých náročných úloh pri biometrickom skúmaní posunuli oblasť výskumu z manuálnych do automatizovaných metód rozpoznávania identity osoby. Je to rapidne sa rozvíjajúca technológia, ktorá nemá využitie už len v prostredí kriminalistiky, ale plní svoju bezpečnostnú funkciu vo vládnych a komerčných aplikáciách. Najaktuálnejším trendom je vývoj mobilných riešení identifikácie, postupné vytvárania vzájomného komunikačného rozhrania medzi databázami viacerých výrobcov, zahrnutie odtlačkov dlaní do automatizovaných systémov alebo tvorba základov pokročilých algoritmov, ktoré sú schopné spoľahlivej extrakcie charakteristických vlastností odtlačkov. Extrakcia vlastností je kritickým bodom pretože práve tu sa tvorí reprezentácia odtlačku, od ktorej sa očakáva, že bude verne zodpovedať pôvodnej biometrickej predlohe a bude obsahovať len tie vlastnosti, ktoré odlišujú odtlačok od všetkých iných odtlačkov v populácii. Cieľom tohto dokumentu je podať správu o súčasnom stave metód softvérovej extrakcie vlastností odtlačkov, ktoré označujeme ako Level-2 znaky a sú v súčasnosti jediným široko akceptovaným argumentom jedinečnosti každého odtlačku vo forenzej až po komerčnú sféru .

Level-2 vlastnosti nazývané aj ak daktyloskopické markanty sú lokálne tvarové nepravidelnosti alebo zvláštnosti papilárnych línií. Prejavujú sa predovšetkým v dvoch najčastejších podobách: rozdvojenie a ukončenie papilárnej línie. Ich odhalenie automatickým spôsobom je komplikované obrazovou kvalitou odtlačku, ktorá oveľa výraznejšie vplýva na presnosť extrakcie v porovnaní s extrakciou Level-1 vzorov. V Level-2 markantoch je možno rozlíšiť množstvo vzorov pričom niektoré sú tak zriedkavé v populácii alebo ich tvar je natoľko komplexný, že postačuje malé množstvo takýchto charakteristických znakov na identifikáciu jedinca. Avšak súčasné softvérové algoritmy nerozlišujú vo všeobecnosti viac ako 2 druhy markantov a porovnávacie moduly nerozlišujú ich vzácnosť, čo spôsobuje zlyhávajúce biometrického systému predovšetkým pri nekvalitných odtlačkoch. Level-2 markanty sú od zrodu daktyloskopiekej identifikácie v kriminalistickom prostredí chápané ako hlavný prvok jedinečnosti každého odtlačku a ich význam je doposiaľ nespochybný. Nová generácia algoritmov extrakcie musí spĺňať nároky akými sú spoľahlivosť pri odtlačkoch prstov nízkej kvality alebo hlbšie rozlišovanie premenlivosti vzorov na lokálnej úrovni. V literatúre sú prezentované riešenia využívajúce principiálne odlišné techniky rozpoznávania vzorov a takisto využívajúce rôzne techniky predspracovania. Výskum je v tomto smere skutočne aktívny vzhľadom na to, že dominantným spôsobom automatizovaného rozpoznávania osoby je porovnávanie Level-2 markantov.

Okrem prehľadu relevantných metód extrakcie charakteristických znakov v odtlačkoch, doplníme tento prehľad aj o vlastnú metódu extrakcie, ktorá rozpoznáva viaceré druhy daktyloskopických markantov, ktorých techniky neboli v dostupnej literatúre publikované. Extrakcia je založená na princípe analýzy geometrických atribútov papilárnych línií a vyhodnocovania ich rozmerov podľa vopred zadaných špecifikácií. Extrakcia je doplnená o algoritmus predspracovania a záverečnej validácie výstupov extrakcie, ktorá vylučuje falošné markanty z množiny odhalených markantov.

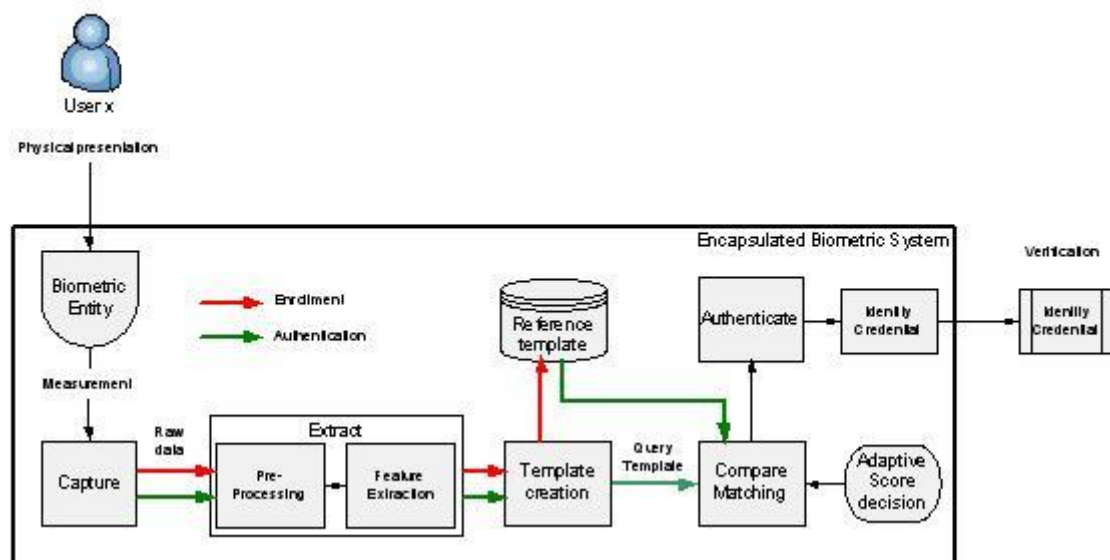
1 Biometrické systémy a odtlačky prstov

1. 1 Biometrické systémy v skratke

Biometria sa stáva neoddeliteľnou súčasťou moderných technológií autentizácie logického a fyzického prístupu. Využíva snímateľné znaky ľudského tela, od ktorých sa dá očakávať určitý stupeň jedinečnosti a univerzálnosti v populácii. Okrem fyziologických charakteristík, biometria poskytuje aj nástroje na kvantifikáciu užitočných informácií správania sa jedinca. Všetky tieto znaky slúžia na automatizované rozpoznávanie osôb, ktoré nachádza svoje využitie v širokej škále aplikácií.

Metódy snímania, spracovania a vyhodnocovania týchto nositeľov informácie o identite človeka sú implementované v biometrických systémoch, ktorých úlohou je zjednodušene povedané odpovedať na otázku „Kto je táto osoba?“ alebo „Je naozaj táto osoba osobou, za ktorú sa vydáva?“. Odpoveď na prvú otázku poskytuje biometrický systém operujúci v režime *identifikácie*. Na druhú otázku odpovedá biometrický systém, ktorý pracuje v režime *verifikácie* identity.

Identifikácia je proces, ktorý je návrhovo aj časovo zložitejší ako verifikácia. Biometrický systém pri identifikácii musí prehľadať celú databázu uložených biometrických znakov (odtlačok, tvár, DNA a iné) a nájsť vhodného kandidáta na zhodu s biometrickým znakom, ktorého pôvodcu nepoznáme. Verifikácia je naopak porovnanie 1:1, kde neznámu biometrickú vzorku porovnávame s jedinou biometrickou vzorkou uloženou v databáze. Vyhľadanie tejto vzorky v databáze je realizované prostredníctvom nejakej pomocnej informácie ako meno osoby, PIN alebo iný údaj, ktorý spája proklamovanú identitu so záznamom v databáze.



Obrázok 1 Zjednodušená schéma biometrického systému v režime verifikácie

Algoritmy, ktoré pracujú vo vnútri biometrického systému musia byť dostatočne presné, aby odlišili množstvo podobných údajov a zároveň musia byť aj dostatočne rýchle, aby prehľadávanie databázy prebehlo v prijateľnom čase. V databázach sa pri tom väčšinou neuchovávajú pôvodné zosnímané

biometrické znaky v nespracovanej forme, ale len ich určitá kompaktná reprezentácia. Požiadavkou tejto reprezentácie je, aby bola dostatočne charakteristická a aby redukovala množstvo potrebných údajov na hranicu, ktorá povoľuje prípustné časy identifikácie. Postup, pri ktorom dochádza k redukcii pôvodného objemu údajov biometrického znaku a selekcii konkrétnych vzorov, ktorých vlastnosti zaručujú nezameniteľnú reprezentáciu, sa nazýva *extrakcia* príznakov resp. charakteristických rysov.

Ďalšou dôležitou fázou práce biometrického systému je tvorba rozhodnutí v module *porovnávania* dvoch vzoriek. Zväčša sa porovnávajú údaje, ktoré sú výstupom z algoritmu extrakcie a hľadá sa medzi nimi určité mapovanie, ktoré spĺňa kritériá dostatočnej podobnosti medzi dvomi vzorkami. Porovnávacie algoritmy musia viesť dostatočne spoľahlivo odlišiť vnútro-triednu variabilitu od variability medzi triedami (jednotlivými osobami). Snímanie prebieha vždy pri odlišných podmienkach a preto aj biometrická reprezentácia jednej osoby je mierne odlišná. Z toho dôvodu je potrebné pracovať pri porovnávaní s takými vlastnosťami, ktoré sú snímacími podmienkami len minimálne ovplyvnené.

Na biometrický systém sa môžeme pozeráť ako na určitý mechanizmus, ktorý využíva svoje komponenty (subsystémy) v definovanom poradí. Toto poradie krokov resp. fázy činnosti majú za úlohu vstupný biometrický údaj transformovať do vhodnej podoby na extrakciu charakteristických vlastností. Následne sa tieto extrahované črty porovnávajú s uloženými črtami osôb registrovaných v databáze. Na základe výsledku porovnania je možné pomocou určitej prahovej hodnoty podobnosti stanoviť, či bola osoba rozpoznaná. Biometrický systém má dynamický a zároveň aj statický charakter. Dynamiku predstavuje reťaz subsystémov, ktoré postupne spracúvajú údaje a posúvajú ich na spracovanie ďalšiemu subsystému. Statickým atribútom biometrických systémov je databáza vzoriek, ktoré predstavujú identity ľudí, ktoré porovnávame s nejakou neznámou vzorkou vchádzajúcou do biometrického systému.

Celý biometrický systém s jeho hlavnými fázami činnosti je znázornený na obr.1. V prvom kroku sa sníma biometrická entita („capture“). Následne sa formou predspracovania obnoví kvalita a štruktúra zosnímanej entity. Potom sa transformuje do sady charakteristických znakov. Obidva kroky spoločne tvoria modul extrakcie („extract“). Následne sa extrahované údaje vložia do biometrickej šablóny („template creation“). V module porovnávania („compare matching“) sa porovnávajú dve biometrické šablóny: jedna je šablóna vytvorená zo zosnímaných údajov a druhá je šablóna z databázy. Na základe ich podobnosti systém vydáva rozhodnutie o autentizácii („authenticate“).

Na biometrický systém sa v dnešnej dobe nemôžeme pozeráť ako na nejaký izolovaný systém, ktorý využíva len svoju lokálnu databázu. Biometrické systémy predovšetkým v oblasti vládnej a forenznej tvoria veľké nadnárodné siete za účelom zvýšenia efektivity rozpoznávania a boja proti medzinárodnému zločinu. Na fungovanie takejto kooperácie je nutné, aby sa údaje uchovávané v lokálnych databázach pri prenose konvertovali do štandardizovaného údajového formátu a zabezpečili tak interoperabilitu. Nedostatok štandardizácie bráni v úspešnom nasadení tejto technológie v širšej škále. Štandardy špecifikujú technické zariadenia, dátové formáty, architektúru systémov a metodiku ich testovania. Hlavné štandardizačné orgány, ktoré definujú pravidlá pre výmenu údajov o odtlačkoch prstov sú NIST, INCITS, ISO JTC 1/SC 17, ISO JTC 1/SC 37 a BioAPI Consortium.

V rámci tohto dokumentu sa budeme zaoberať výlučne odtlačkami prstov a dlaní. Preto ak sa v nasledujúcom texte vyskytne termín biometrický systém, budeme vždy hovoriť o biometrickom systéme, ktorý rozpoznáva osoby podľa odtlačkov prstov alebo dlaní.

1. 2 Biometrický systém na báze odtlačkov

Odtlačky prstov sú jedným z fyziologických znakov človeka, ktoré majú svoje uplatnenie v biometrii už niekoľko desiatok rokov odkedy sa objavili prvé automatizované systémy a prvé snímače, ktoré boli schopné elektronicky zaznamenať obrazovú informáciu vzoru odtlačku. Odtlačky prstov obsahujú rôzne daktyloskopické vzory tvorené *papilárnymi líniami*. Papilárne línie sú na obrazoch odtlačkov vnímané ako paralelné tmavé pruhy, ktoré menia svoj smer a v lokálnom meradle menia aj svoj tvar. Každý daktyloskopický vzor prítomný na dlani alebo prste je tvorený dvomi základnými topologickými útvarmi: rozdvojenie (z angl. bifurcation) a ukončenie (z angl. ridge ending) papilárnej línie.



Obrázok 2 Obrazec odtlačku s vyznačením niektorých daktyloskopických markantov

Tieto útvary sa v odbornej literatúre zvyknú označovať ako *daktyloskopické markanty*. Avšak v odtlačkoch prstov je množstvo iných, komplexnejších markantov, ktoré sú tvorené kombináciami základných markantov. Automatizované biometrické systémy však v drivej väčšine identifikujú alebo verifikujú osoby prostredníctvom kvantifikovania zhody dvoch odtlačkov v bodoch rozdvojenia a ukončenia. Doposiaľ nebola navrhnutá spoľahlivá metóda, ktorá by umožňovala v automatizovanej podobe pracovať aj s komplexnejšími útvarmi. No na druhej strane sa vyvinulo niekoľko principiálne odlišných metód, ktoré sú schopné rozpoznávať základné daktyloskopické markanty. Týmto metódam sa budeme venovať v kapitole 2.

Keďže biometrické systémy pracujúce s odtlačkami prstov nerozpoznávajú prirodzenú biologickú variabilitu, nie je možné od nich očakávať spoľahlivé rozhodnutia v niektorých kritických situáciách. Medzi kritické situácie resp. hlavné problémy výskumu týchto systémov patrí rozpoznávanie osôb pomocou kvalitatívne znehodnotených odtlačkov. Nakoľko je jedinečnosť odtlačkov skrytá v detailoch a vzácnych vzoroch vytvorených z papilárnych línií, je nutné aby sme rozlišovali medzi tvarovými typmi markantov a pridelovali im pri porovnávaní odtlačkov a formovaní konečného rozhodnutia dôležitosť, ktorá rastie spoločne so vzácnosťou výskytu. Rôzne štúdie ukázali, že takmer vo všetkých skúmaných populáciách sú tvarovo komplexné markanty menej frekventované ako základné markanty (ukončenie a rozdvojenie). Degradované alebo nekompletné vzory odtlačkov neobsahujú vždy dostatočné množstvo biometrickej informácie v podobe ukončení a rozdvojení a tým pádom nemusí systém dva odtlačky pochádzajúce z rovnakého prsta vyhodnotiť za totožné. Avšak ak by systém rozlišoval aj komplexnejšie útvary, pracoval by s podstatne charakteristickejšími údajmi a identifikácia by mohla byť úspešná aj v prípade, že sa nenašla dostatočná podobnosť základných markantov.



Obrázok 3 Fázy obrazového predspracovania daktyloskopického vzoru

Medzi najčastejšie zdroje degradácie obrazovej kvality papilárnych línií patrí nevhodná snímacia technológia, znečistený povrch snímača alebo prsta, nesprávna intenzita prítlaku prsta na senzor, vlhkosť pokožky alebo deformácia kože. Všetky tieto faktory negatívne prispievajú k vnútro-triednej variabilite odtlačkov a spôsobujú tak chybné rozhodnutia biometrických systémov. Protipatrením, ktoré je určené na zvýšenie kvality vstupného obrazu je obrazové predspracovanie. Obrazové predspracovanie je sekvenciou algoritmov, ktorých cieľom je odstrániť všetky známe zdroje degradácie a zvýrazniť štruktúru papilárneho terénu tak, aby vynikla pôvodná štruktúra odtlačku. Posledným krokom algoritmu predspracovania v prípade odtlačkov prstov býva transformácia odtlačku do takej formy, aby následná extrakcia vychádzala z podoby odtlačku, v ktorej je jednoduché odhaľovať daktyloskopické markanty. Obr. 3 ukazuje vzorovú sekvenciu algoritmov predspracovania spoločne s vizualizáciou výstupov z jednotlivých krokov.

Forenzní experti z prostredia kriminalistiky v SR využívajú pri identifikácii metodiku, ktorá je len z veľmi malej časti implementovaná v automatizovaných systémoch. Expert pri identifikácii lokalizuje v odtlačku polohy markantov, pričom rozlišuje až medzi 13 tvarovými typmi markantov. Komparácia dvoch odtlačkov potom prebieha analýzou zhody tvaru, polohy a orientácie všetkých dostupných markantov. V tomto prípade sa jedná o plnohodnotné rozlišovanie variability odtlačkov na lokálnej úrovni, ktorá individualizuje každého jedinca. Manuálny spôsob daktyloskopickkej identifikácie nebol doposiaľ prekonaný žiadnym softvérom a výstup automatizovaných systémov v oblastiach akou je kriminalistika je vždy verifikovaný znalcom. Inými slovami spoľahlivosť automatizovaných systémov,

od ktorých sa očakáva práca v režime identifikácie ešte neprekročila úroveň, ktorá by im dovolila fungovať v plne automatizovanej prevádzke. Výskum na tieto problémy neustále pružne reaguje a sme svedkami veľkého množstva inovatívnych prístupov ku spoľahlivej extrakcii daktyloskopických markantov, od ktorej sa odvíja činnosť biometrického systému.



Obrázok 4 Bloková schéma navrhnutého systému extrakcie daktyloskopických markantov

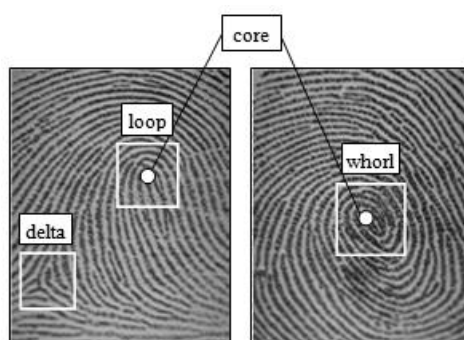
My sme takisto navrhli metódu extrakcie, ktorá rozširuje možnosti konvenčných prístupov tým, že je schopná rozpoznávať nielen základné tvary markantov, ale aj komplexnejšie útvary s vyššou vzácnosťou. Náš algoritmus pri tom využíva niektoré originálne prístupy akými sú „sledovanie“ papilárnych línií (z angl. ridge line tracking) alebo analýza ich rozmerov. Algoritmus v súčasnom stave rozpoznáva 5 najfrekvencovanejších tvarových typov markantov, avšak zvolený klasifikačný systém umožňuje definovať pravidlá extrakcie ďalších typov markantov. Náš algoritmus extrakcie je doplnený o predspracovací modul, v ktorom sme navrhli niekoľko techník, ktoré adaptívne obnovujú kvalitu odtlačku a o modul záverečnej validácie výstupov, ktorého úlohou je na základe niektorých vlastností štruktúry odtlačkov a štatistických ukazovateľov vylúčiť falošné daktyloskopické markanty. Obr. 4 ilustruje blokovú schému nášho systému extrakcie daktyloskopických markantov. Bližšiemu opisu nášho systému extrakcie sa venujeme v kapitole 3.

1. 3 Úrovne vlastností odtlačkov a ich extrakcia

Špecifikácia vzorov, ktoré tvoria odtlačok je prvotným aspektom, ktorý musí každý návrh biometrického systému zohľadniť. Hrebene papilárnych línií sú na zosnímaných digitálnych obrázkoch zastúpené tmavou farbou a priehlbiny medzi nimi sú zasa svetlé oblasti medzi nimi. Priemerná šírka dvojice hrebeň-priehlbina je odhadovaná na hodnotu 500 μm . Priemerná šírka papilárnej línie sa pohybuje od 100 μm až po 300 μm . Usporiadanie hrebeňov a priehlbín sa zvykne nazývať aj papilárny terén. Rozlišujeme 3 úrovne daktyloskopických vzorov, pričom každá úroveň sa odlišuje množstvom charakteristickej informácie a teda má rôznu schopnosť rozlíšiť dva odtlačky.

1. 3. 1 Level-1 daktyloskopické vzory

Daktyloskopické vzory 1. úrovne vypovedajú o globálnej štruktúre celého obrazca odtlačku. Globálna štruktúra odtlačku je daná rozmiestnením tzv. singularít. Singulárne body predstavujú také miesta v odtlačkoch, v ktorých dochádza k významnej zmene smeru veľkého počtu papilárnych línií. Level-1 vzory klasifikujeme do niekoľkých kategórií a nemožno prostredníctvom nich identifikovať osobu. Prvotný dojem pri pohľade na vzhľad odtlačku zdôrazňuje súbežný tok papilárnych línií, ktorý je v niektorých miestach prerušený nadmerným zakrivením väčšieho počtu línií, chaotickou orientáciou alebo náhlým ukončením línií. Práve tak sa prejavujú singulárne body. Medzi singulárne body patrí vrchol ohybu slučky (z angl. loop), delta a vírová formácia papilárnych línií (z angl. whorl). Delta je miesto v papilárnom teréne, kde sa zbiehajú papilárne línie z troch smerov do jedného bodu. Ďalším významným miestom v odtlačku je jadro (z angl. core). Je to stred odtlačkového vzoru, ktorý je často spojený so stredom singulárneho bodu.



Obrázok 5 Singulárne body daktyloskopického vzoru

Na najvyššej úrovni grafickej informácie môžeme odtlačky klasifikovať do základných vzorových tried. Zvyknú sa označovať ako základný daktyloskopický vzor. Každý z týchto vzorov je definovaný špecifickou polohou singulárnych bodov. Existujú rôzne klasifikácie, ale klasifikácia do troch vzorov je najčastejšia. Medzi tieto vzory patrí slučka, oblúk a vír. Slučka je vzor, kde z jednej strany odtlačku vbiehajú papilárne línie do stredu odtlačku otáčajú sa okolo jadra a vracajú sa späť. Oblúk je tvar, v ktorom línie vchádzajú z jednej strany do centra obrazca, v ktorom sa oblúkovito ohýbajú a vychádzajú z obrazca na protiľahlej strane. Obyčajný oblúk neobsahuje žiadne delty. Vír je formácia papilárnych línií, ktoré sa vo víre alebo špirále točia v smere od jadra k okrajom odtlačku. Vír zvykne mať po oboch stranách deltu.



Obrázok 6 Základné Level-1 vzory (v poradí zľava oblúk, slučka a vír)

1. 3. 2 Level-2 daktyloskopické vzory

Sú v súčasnosti považované za najdôležitejšie vlastnosti odtlačkov a sú stavebným prvkom jedinečnosti každého odtlačku. Ich rozmiestnenie v odtlačku je neopakovateľné. Sú bežne označované ako daktyloskopické markanty. Takmer všetky automatizované systémy vykonávajú rozpoznávanie osôb pomocou daktyloskopických markantov. Aktívny výskum sa zaoberá metódami extrakcie markantov z rôznych reprezentácií odtlačku, návrhom spoľahlivých techník extrakcie pri znehodnotených odtlačkoch a koncepciou algoritmov, ktoré umožňujú klasifikáciu markantov do viacerých tried.



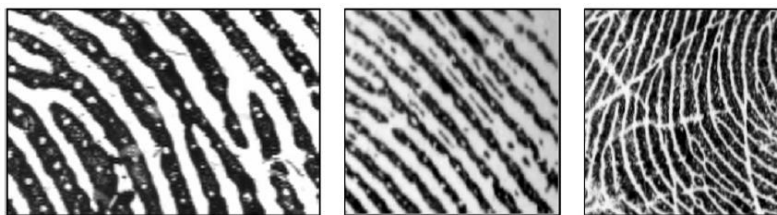
Obrázok 7 Daktyloskopický markant (rozdvajenie)

Markanty sú vlastnosti odtlačkov, ktoré sa prejavujú na lokálnej úrovni. Najfrekvencovanejšie markanty sú rozdvajenia a ukončenia papilárnej línie. Fragmenty odtlačkov, ktoré neobsahujú dostatočný počet týchto markantov nemôžu byť na identifikáciu použité. V biometrických systémoch sú odtlačky klasifikované podľa Level-1 daktyloskopických vzorov do niekoľkých tried. Táto klasifikácia urýchľuje proces identifikácie nakoľko znižuje počet kandidátov, ktorí sa musia porovnať s neznámym odtlačkom. Samotný základný vzor odtlačku však nie je postačujúci na identifikáciu, ale je dostatočne postačujúci na vylúčenie zhody. Ak sa pozrieme hlbšie do štruktúry obrazcov odtlačku, objavíme prítomnosť malých nepravidelností v papilárnych líniách, ktorých distribúcia a poloha sú jedinečnou charakteristikou pre každého jedinca. Existuje mnoho metód ako sa tieto kritické údaje dajú hľadať resp. extrahovať.

Každý odtlačok obsahuje iný počet markantov a nedá sa stanoviť konštanta, ktorá by platila všeobecne. Odtlačky, ktoré máme v digitálnej forme zo zbierky KEÚ PZ a použili sme ich na testovanie navrhnutého softvéru na extrakciu markantov obsahovali v priemere 90-100 markantov na odtlačok. Množstvo odtlačkov bolo snímaných odvalením a tak sa v nich nachádzalo viac markantov ako pri klasických kontaktných odtlačkoch. Priemerná hustota markantov v okolí singulárnych bodov je 0,49 markantu na 1 mm² a v oblastiach mimo singulárnych bodov je to 0,18 markantu na 1 mm²

1. 3. 3 Level-3 daktyloskopické vzory

Sú to rozmerovo ešte menšie charakteristické zvláštnosti ako markanty. Vzhľadom na ich variabilitu sú vo všeobecnosti najviac charakteristické vlastnosti odtlačku. Najväčšia bariéra, ktorá bráni v ich širšom použití v automatizovaných systémoch je požiadavka na vysoké rozlíšenie obrazov, aby ich bolo možné rozpoznať. Druhý negatívny faktor je ich závislosť od kvality štruktúry odtlačku. Pri menšom znehodnotení odtlačku sa môže stať, že informácie tejto úrovne úplne zaniknú. Tieto detaily zahŕňajú hlavne geometrické vlastnosti papilárnych línií ako sú jej hrúbka a obrysy, rozmiestnenie potných pórov, jazvy, škrabance a malé vmedzerené papilárne línie (z angl. incipient ridges).







Obrázok 8 Level-3 detaily papilárnych línií










V oblasti kriminalistiky sú vyvinuté dve analytické disciplíny, ktoré skúmajú Level-3 vzory: poroskopia a obrysoskopia. Poroskopia skúma využitie pórov na identifikáciu a obrysoskopia zasa hľadá možnosti uplatnenia geometrických vlastností obrysov papilárnych línií. Rozmer pórov sa pohybuje v rozsahu od 60 μm až po 250 μm . Zistilo sa, že priemerný počet pórov pripadajúcich na 1 cm dĺžky papilárnej línie je v intervale 9 až 18. Niektoré literárne zdroje hovoria, že na určenie identity postačuje 20 – 40 zhodných pórov. Znak tejto úrovne sú veľmi malé a na ich zachytenie je treba senzory s vysokým rozlíšením (1 000 dpi a viac). Bežné senzory nespĺňajú toto kritérium a takisto chýbajú presné automatizované algoritmy na identifikáciu pórmí. Póry a geometrické atribúty papilárnych línií sú nádejnou technológiou biometrie a ich využitie v AFIS systémoch by malo byť jedným zo smerov ich rozvoja.

1. 3. 4 Klasifikačná schéma daktyloskopických markantov

V tejto časti definujeme klasifikačný systém, ktorý obsahuje všetky známe daktyloskopické markanty, ktoré sú využívané na identifikáciu spolu so špecifikáciou vlastností každého typu markantu kvôli jednoznačnému odlíšeniu od iných typov. Taxonómia v tab. 1 je špecifická pre SR. Jednotlivé markanty sú usporiadané podľa frekvencie výskytu v populácii SR.

Tabuľka 1 Klasifikačná schéma daktyloskopických markantov

Tvar markantu	Názov markantu	Relatívna frekvencia	Špecifikácia tvaru
Rozdvojenie		43,02	Jedna papilárna línia sa v jednom bode rozdelí na dve samostatné línie.
Ukončenie		35,94	Prirodzené ukončenie papilárnej línie.
Fragment		6,94	Izolovaná papilárna línia s dĺžkou v rozsahu od 2 do 10 pórov.
Jazero		3,67	Papilárna línia sa rozdvíja a maximálne do vzdialenosti 10 pórov sa opäť spojí.

Prekrytie		3,29	Prekrývanie papilárnych línií maximálne do dĺžky 10 pórov.
Izolovaný bod		2,84	Papilárna línia obsahujúca 1 pór.
„Break“		2,76	Konce papilárnych línií blízko oproti sebe (max. 5 pórov). Nie je to spôsobené jazvou.
Premostenie		0,84	Veľmi krátka papilárna línia (cca. 1 pór), ktorá spája dve priľahlé línie.
„Crossbar“		0,78	Dve papilárne línie prerušené treťou, ktorá prechádza krížom medzi nimi.
Protiľahlé vidlice		0,17	Dve opačne orientované vidlice, ktoré majú počiatok v jednom bode.
Ukotvenie		0,13	Ukončenie papilárnej línie medzi dvomi líniami zasahujúce maximálne do hĺbky 10 pórov.
Trifurkácia		0,07	Dve rovnako orientované vidlice majúce spoločný počiatok.
Otočenie		0,00	Otočenie a ukončenie papilárnej línie, ktoré nie je súčasťou stredu vzoru odtlačku.

1. 4 Súčasný stav a otvorené otázky

Hlavnou otvorenou otázkou resp. nevyriešeným problémom biometrických systémov je absencia spoľahlivých metód extrakcie dôležitých charakteristických znakov v odtlačkoch, ktoré by umožnili nasadenie biometrických systémov v plne automatizovanej podobe aj v takých oblastiach akými sú vládny alebo forenzný sektor. Manuálny spôsob daktyloskopiekej identifikácie je stále považovaný za najspoľahlivejší, pretože softvérové algoritmy stále nedokážu rozlišovať biologickú variabilitu vzorov v odtlačku. Modelovanie metodiky analýzy odtlačkov pri forenznom skúmaní a špecifikácia parametrov charakteristických znakov, ktoré by slúžili pri softvérovom rozpoznávaní sú nevyhnutným krokom pre ďalšie zvyšovanie úspešnosti a akceptovateľnosti biometrických systémov.

Ďalším problémovým miestom je jedinečnosť odtlačkov. Jedinečnosť odtlačku vychádza z určitých štatistických predpokladov, ktoré hovoria, že je extrémne nízka pravdepodobnosť toho, že sa v populácii vyskytnú odtlačky prstov, ktoré by boli úplne zhodné v rozmiestnení Level-2 znakov. Avšak tento

predpoklad potrebuje seriózný vedecký podklad. Chýbajú modely štatistických vlastností odtlačkov ako napríklad:

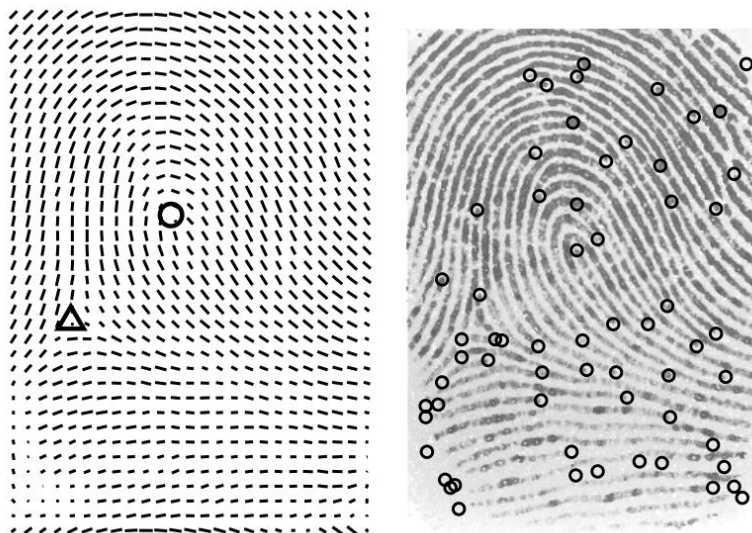
- priestorová distribúcia Level-2 znakov na ploche odtlačku
- distribúcia orientácie papilárnych línií v závislosti od druhu Level-1 vzoru, polohy v odtlačku alebo prsta, z ktorého bol odtlačok získaný
- distribúcia relatívnych frekvencií jednotlivých Level-2 znakov v závislosti od polohy, orientácie alebo ďalších špecifických faktorov
- zhuková analýza parametrov Level-1 a Level-2 znakov, ktorá by odhalila skryté väzby

Systém určenia hodnôt vzácnosti pre jednotlivé Level-2 znaky, ktorý by vychádzal zo získaných štatistických údajov by predstavoval nové možnosti identifikácie, pri ktorej by sa pristupovalo osobitne ku každému odtlačku a adaptívne by sa nastavili podmienky pre identifikáciu na základe celkovej hodnoty prítomných Level-2 znakov v odtlačku. Takýto prístup sa nazýva kvalitatívny model daktyloskopiekej identifikácie. Tento prístup identifikácie je protipólom kvantitatívneho modelu, ktorý umožňuje identifikáciu vykonať len v prípade ak odtlačok obsahuje stanovený minimálny počet zhodných znakov bez akéhokoľvek rozlíšenia ich tvaru alebo stupňa vzácnosti.

Na to, aby sa dali vykonávať štatistické analýzy tohto charakteru, je potrebné automatizovaným spôsobom zozbierať Level-1 a Level-2 znaky z dostatočne veľkej databázy a rozlišovať ich tvary, zaznamenávať súradnice, orientácie papilárnych línií a ďalšie atribúty, ktoré pomáhajú vytvárať profil jedinečnosti každého odtlačku. Kvalitatívny prístup k daktyloskopiekej identifikácii je skúmaný aj v rámci výskumného projektu Centrum excelentnosti bezpečnostného výskumu na KEÚ PZ. Je vidno, že softvérová extrakcia vlastností odtlačkov nachádza svoje využitie nielen v samotných biometrických systémoch, ale je žiadaná aj pri štatistickej analýze odtlačkov.

2 Metódy extrakcie charakteristických znakov vo vzoroch odtlačkov

V tejto časti opisujeme vybrané techniky extrakcie Level-2 vzorov. Tieto kategórie techník sa líšia predovšetkým návrhovou zložitosťou. Rozpoznanie Level-1 vzoru odtlačku je možné prostredníctvom globálneho smeru papilárnych línií alebo rozmiestnením singulárnych bodov. Tieto algoritmy sú zvyčajne presné aj pri nízkej kvalite odtlačkov.



Obrázok 9 Extrakcia charakteristických znakov na rôznych úrovniach rozlíšenia detailov
(vľavo je vyznačená poloha singulárnych bodov patriacich do úrovne Level-1 a vpravo sú lokalizované daktyloskopické markanty úrovne Level-2)

Kategória algoritmov, ktoré skúmame v tejto správe sú techniky extrakcie Level-2 vzorov, kde sa skúmajú lokálne charakteristiky papilárnych línií, ktoré sú ovplyvňované do významnej miery podmienkami snímania a kvalitou štruktúry odtlačku. Level-1 znaky pomáhajú zrýchliť proces identifikácie tým, že sa databáza možných kandidátov na zhodu zúži len na priestor tých odtlačkov, ktoré majú rovnaký Level-1 vzor ako skúmaný neznámy odtlačok. Level-2 sú v podstate vyjadrením identity osoby a sú využité pri porovnávaní odtlačkov. Podobnosť dvoch odtlačkov v Level-2 vzoroch je hlavný faktor, ktorý ovplyvňuje rozhodnutie biometrického systému. Vizualizácia extrakcie Level-1 a Level-2 vzorov je na obr. 9.

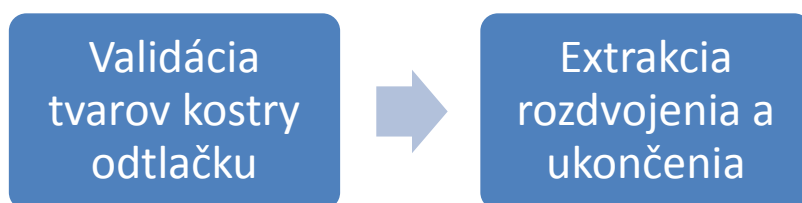
2. 1 Extrakcia Level-2 charakteristických znakov

Techniky extrakcie Level-2 vzorov sa líšia tým, že vychádzajú z rôznych reprezentácií odtlačku a logika ich činnosti sa líši výpočtovou zložitosťou. Opísané techniky v tejto kapitole dokumentujú dominujúce koncepty extrakcie pričom každý z nich využíva iné lokálne atribúty papilárnych línií. Tieto metódy ukazujú architektúru extrakčných metód s využitím topológie kostry odtlačku, susedných obrazových bodov papilárnych línií, smerových máp odtlačkov, projekcií intenzity obrazových bodov, okrajov papilárnych línií až po kontinuálne analyzovanie prierezov papilárnych línií.

2. 1. 1 Extrakcia markantov na základe štruktúrálnej analýzy kostry odtlačku

Zdroj: [4] FARINA, A. et al. *Fingerprint minutiae extraction from skeletonized binary images*.

Autori prezentujú sadu algoritmov na extrakciu rozdvojení a ukončení papilárnych línií z kostry daktyloskopického vzoru. Ich cieľom bolo vyvinúť metódu extrakcie, ktorá bude schopná extrahovať reálne markanty v počte 40-60, ktoré obsahuje priemerný odtlačok prsta. Kostra vzniká morfológickým procesom, ktorý generuje veľké množstvo falošných útvarov, ktorých počet v prípade absencie obrazového predspracovania môže dosahovať rozpätie 2000-3000. Navrhnutá bola technika filtrovania niektorých atypických a neprirodzených štruktúr daktyloskopického vzoru, ktoré obsahujú umelo vytvorené markanty. Rovnako boli formulované dve kritériá na odhaľovanie ukončenia a rozdvojenia papilárnej línie, ktoré zohľadňujú ich topologické vlastnosti. Štatistická analýza dosiahnutých výsledkov preukázala efektivitu redukcie falošných markantov. Miera chýb FMR a FNMR pri spracovaní odtlačkov s prítomnosťou špiny alebo zachytením nehomogénneho snímacieho pozadia bola natoľko uspokojivá, že použitie výpočtovo náročnej techniky segmentácie odtlačku bolo nepotrebné.



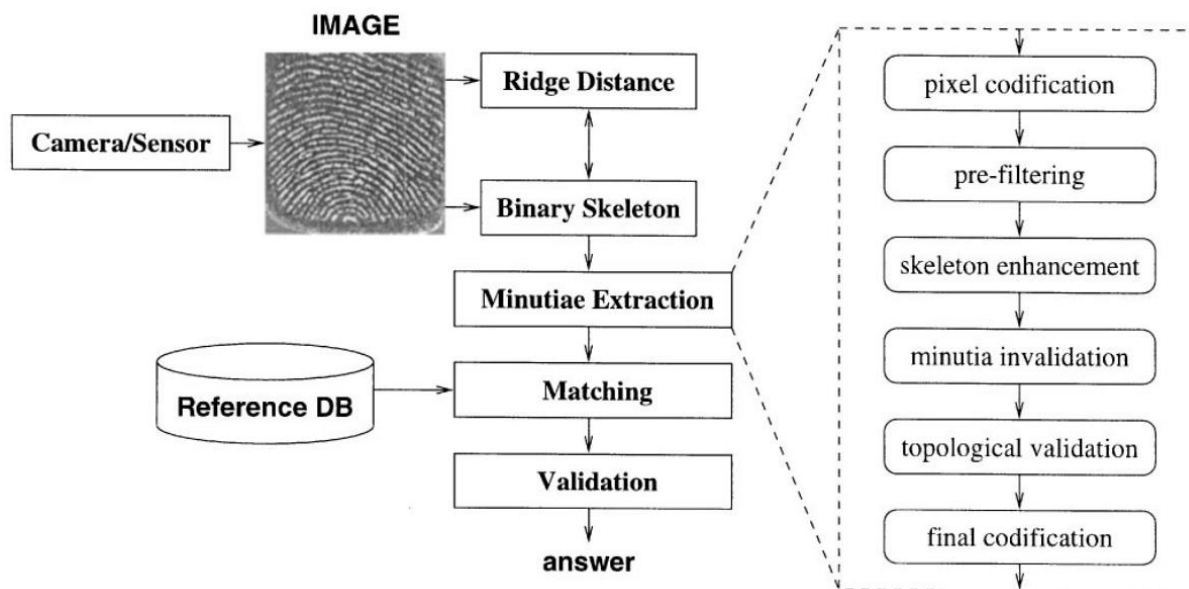
Obrázok 10 Dvojstupňový systém extrakcie markantov opísaný autormi Farina, A. et al.

Podľa autorov existuje zopár vlastností topológie papilárneho terénu, ktoré sú využiteľné na porovnávanie odtlačkov. Americká štandardizačná inštitúcia ANSI navrhla klasifikáciu týchto markantov do 4 skupín: ukončenia, rozdvojenia, prechody a nešpecifikované tvary. Najdôležitejšie vzhľadom na početnosť ich výskytu sú ukončenia a rozdvojenia. Existujú v podstate dve základné reprezentácie odtlačku, v ktorých sa dajú markanty extrahovať: „gray-scale“ a binárne obrazy. Pri navrhovanej metóde sa vychádza z predpokladu, že odtlačok prevedený do binárnej formy a papilárne línie boli zúžené na hrúbku 1 obrazového bodu. Problémom tejto metodiky je, že nie všetky markanty kostry korešpondujú reálnym markantom v pôvodnom obraze. Z dôvodu chýb pri predspracovaní, nadmerného tlaku na senzor, jaziev alebo zdravotného stavu pokožky vznikajú zdanlivé papilárne línie. Na zachovanie dostatočnej miery spoľahlivosti biometrického systému je potrebné okrem extrakcie zaviesť aj techniku validácie tvarov v kostre, ktorá predchádza extrakciu.

Štruktúra navrhnutého algoritmu

Predpokladom je, že máme k dispozícii vypočítanú mapu vzdialeností papilárnych línií. Je to matica, ktorá pre každé miesto v odtlačku určuje priemernú vzdialenosť medzi dvomi susednými líniami. Algoritmus začína odstraňovaním veľmi blízkych markantov v oblastiach s prítomným šumom. Nasleduje proces obnovy štruktúry odtlačku, kde sa prepájajú umelo rozdelené línie na základe smerov vzniknutých segmentov a ich vzájomnej vzdialenosti. Táto fáza je nasledovaná procesom eliminácie falošných premostení, krátkych fragmentov a očiek. Na záver dva algoritmy topologickej validácie

slúžia na klasifikáciu ukončení a rozdvojení. Táto validácia pracuje v dvoch úrovniach spoľahlivosti a rozdeľuje extrahované body na menej a viac vierohodné. Schéma biometrického systému, v ktorom by celý algoritmus extrakcie mohol pracovať je na obr. 11.



Obrázok 11 Integrácia navrhnutého algoritmu extrakcie do všeobecného modelu biometrického systému

1. Pixel codification

V tejto fáze sa postupne každému bodu papilárnej línie priradí číslo hovoriace o počte vychádzajúcich línií z daného bodu.

2. Pre-filtering

Algoritmus binarizácie a zúženia hrúbky papilárnych línií produkuje množstvo umelých útvarov, ktoré sa zoskupujú vo veľkých počtoch na malých plochách. Úlohou tohto kroku je odstrániť, čo najviac týchto nepotrebných štruktúr. Postupne sa prechádza označený obraz z fázy 1 a odstraňujú sa jednobodové útvary, veľmi blízke ukončenia, rozdvojenia a prepojenia línií.

3. Skeleton enhancement

Tu sa prepájajú umelo rozseknuté papilárne línie. Postup opravy týchto línie pozostáva z troch krokov:

- vyhľadanie blízkyh ukončení s rovnakou orientáciou
- výber vhodných ukončení
- rekonštrukcia chýbajúcej línie

4. Minutia invalidation

Zmyslom tohto kroku je odstránenie niektorých komplexnejších umelých štruktúr v kostre ako sú premostenia a výbežky. Obidva tieto umelé tvary sa prejavujú anomáliami v tvare rozdvojenia a preto na ich odstránenie stačí vyšetrit' len množinu rozdvojení.

Algoritmus odstránenia umelého premostenia a výbežku línie z kostry:

Pre každé rozdvojenie je potrebné urobiť nasledovné:

1. Ak každá vetva rozdvojenia obsahuje najmenej λ bodov, kde λ predstavuje lokálnu vzdialenosť dvoch papilárnych línií:
 - a) odhadnúť smer každej vetvy prostredníctvom lineárnej regresie λ bodov
 - b) ak sú dve vetvy rozdvojenia zarovnané a tretia je kolmá na ich smer: treba hľadať ďalší markant pozdĺž kolmej vetvy v prvých $5\lambda/6$ bodoch
 - c) ak sa nájde ďalší markant, treba odstrániť premostenie alebo výbežok
 - d) ak sú dve vetvy rozdvojenia zarovnané a tretia nie je kolmá na ich smer: treba hľadať ukončenie v prvých $3\lambda/2$ bodoch vetvy
 - e) ak sa nájde bod ukončenia, treba vymazať výbežok
2. Ak len dve vetvy obsahujú minimálne λ bodov:
 - a) Ak sú tieto vetvy zarovnané, treba pozdĺž tretej hľadať markant a vymazať výbežok

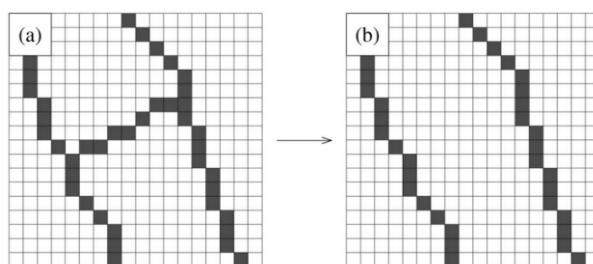


Fig. 2. Bridge and processed slide.

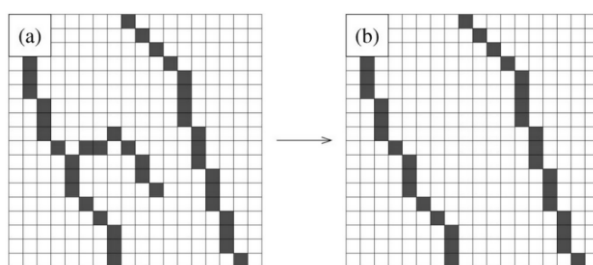


Fig. 3. Spur and processed slide.

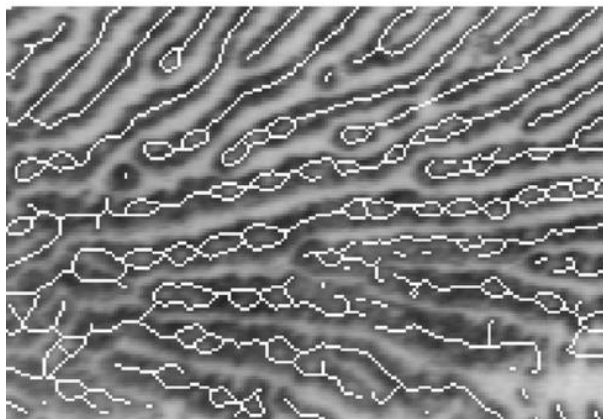
Obrázok 12 Eliminácia premostenia a výbežku

Algoritmus odstránenia blízkych markantov:

Algoritmus postupne vyšetruje kosť odtlačku v blokoch so stranou dlhou $\lambda+1$, kde λ predstavuje lokálnu vzdialenosť papilárnych línií. Ak sa v danom bloku nájdu dve ukončenia, ktorých vzdialenosť je menšia ako $\lambda/2$, tak sa vymažú.

5. Topological validation

Topologická validácia vykonáva odstránenie umelých očiek a poskytuje pravidlá na overenie platného ukončenia a rozdvojenia papilárnej línie. Umelé oká sú vnímané ako body rozdvojenia, ktoré patria malému uzatvorenému kruhu. Vznikajú v miestach s prítomnosťou šumu, kde sú zužované hrubé a nepravidelné papilárne línie.



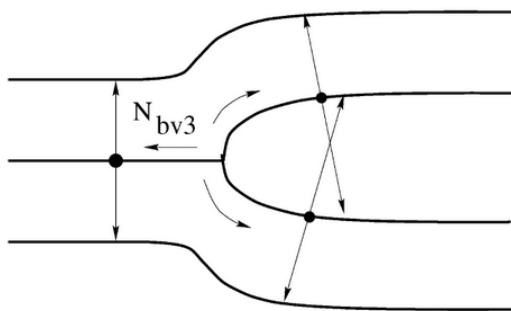
Obrázok 13 Umelé oká v kostre ako dôsledok nekvalitnej štruktúry odtlačku

Bežný tvar rozdvojenia papilárnej línie je charakteristický okolitými líniami, ktoré sú takmer súbežné a „obmývajú“ skúmané rozdvojenie. Táto vlastnosť sa využíva v algoritme overenia platného ukončenia alebo rozdvojenia.

Algoritmus overenia platného rozdvojenia:

Pre každé rozdvojenie je potrebné urobiť nasledovné:

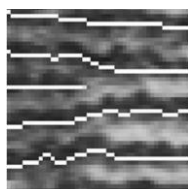
1. Vypočítať smery všetkých troch vetiev do vzdialenosti $3\lambda/2$
2. Ak sa nájde v niektorej z vetiev markant vo vzdialenosti λ bodov, odhalilo sa falošné rozdvojenie
3. Na každej vetve sa treba posunúť o $N_{bv3} = \lambda/2$ bodov a v každom z týchto bodov treba overiť či sa v smere kolmom na papilárnu líniu nachádza ďalšia papilárna línia vo vzdialenosti $3\lambda/2$ (ukážka na obr. 14). Ak sa toto kritérium splní odhalili sme platné rozdvojenie.



Obrázok 14 Overenie platného rozdvojenia papilárnej línie

Algoritmus overenia platného ukončenia:

Vychádza sa z predpokladu, že vzdialenosť medzi papilárnymi líniami je vo vzore odtlačku takmer konštantná. Táto pravidelnosť je narušená prítomnosťou ukončenia papilárnej línie.



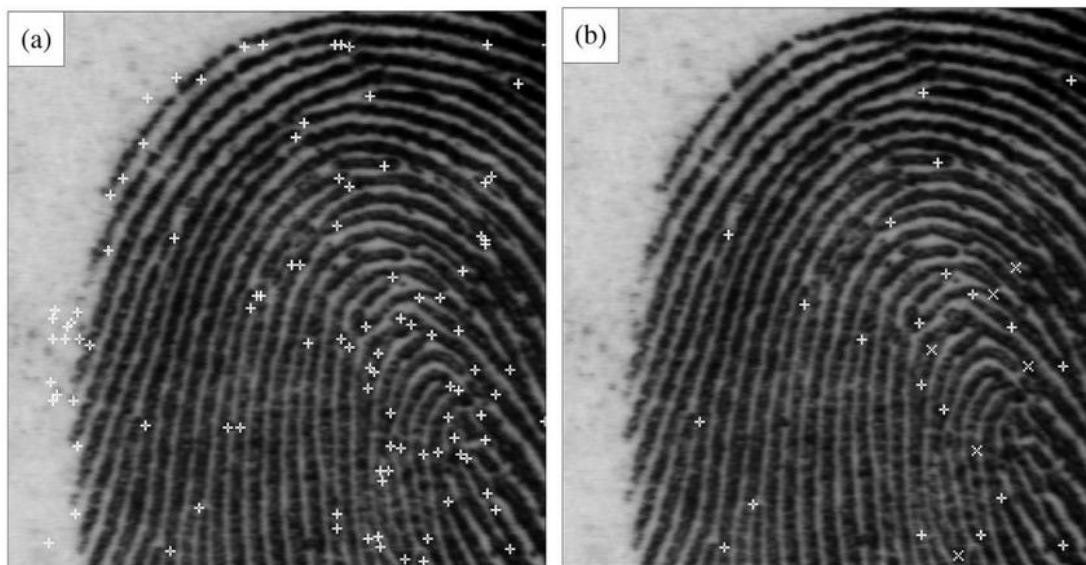
Obrázok 15 Typická topológia ukončenia papilárnej línie

Pre každé rozdvojenie je potrebné urobiť nasledovné:

1. Vyhodnotiť smer ukončenia v λ bodoch
2. Ak sa v λ bodoch nachádza iný markant, objavili sme falošné ukončenie
3. Treba sa posunúť po papilárnej línii o $\lambda/2$ bodu
4. Vyhľadať okolité línie v kolmom smere na papilárnu línii, kde sa nachádza ukončenie
5. Ak sa do vzdialenosti $3\lambda/2$ nenájde žiadna susedná línia, objavili sme falošné ukončenie, v opačnom prípade sme objavili platné ukončenie

Testovanie celého algoritmu

Navrhnuté riešenie bolo testované na vzorke 500 odtlačkov z databázy NIST Special Database 4. Odtlačky boli zastúpené v rozdielnych kvalitách. Navrhnutý algoritmus extrakcie v priemere zredukoval prvotný počet odhalených markantov o takmer 98 % z priemerného počtu 2900 na 40 markantov.



Obrázok 16 Výsledok extrakcie rozdvojení a ukončení

2. 1. 2 Extrakcia markantov technikou Crossing Number

Zdroj: [2] MALTONI, D. et al. Handbook of Fingerprint Recognition: Second Edition

Väčšina existujúcich extrakčných techník je založená na skúmaní a vyšetrovaní štruktúry odtlačkov prstov, kde sa očakáva, že papilárne línie sú v obraze zastúpené tmavšími čiarami ako priehlbiny medzi nimi. Niekedy sa kvôli zjednodušeniu práce uvažuje aj o inverznej reprezentácii obrazu. Vtedy sa význam papilárnych línií zamení s medzerami medzi nimi a vyšetruje sa štruktúra medzier, ktorá rovnako hodnotne vypovedá o polohách charakteristických znakov. Najpoužívannejšie algoritmy detekcie markantov sú založené na skúmaní štruktúry kostry odtlačku, ktorá obsahuje obrazec papilárnych línií o hrúbke 1 obrazového bodu. Techniky zúženia hrúbky širokých papilárnych línií s nepravidelnými obrysami sú veľmi citlivé a zavádzajú do kostry mnohé umelé papilárne línie vedúce k detekcii nepravých markantov. Kostra odtlačku obsahuje len dve hodnoty 0 (papilárne línie) a 1 (medzery). Nakoľko sú medzery medzi papilárnymi líniami užšie ako samotné línie, je vhodnejšie vytvárať kostru duálneho obrazu. Zužovanie línií je náročný morfológický proces a pri medzerách medzi papilárnymi líniami je väčší predpoklad, že sa zachová ich pôvodná štruktúra a nevznikajú tak modifikácie pôvodných topologických štruktúr. Ešte pred samotným procesom zužovania papilárnych línií sa musí odtlačok previesť do binárnej podoby.

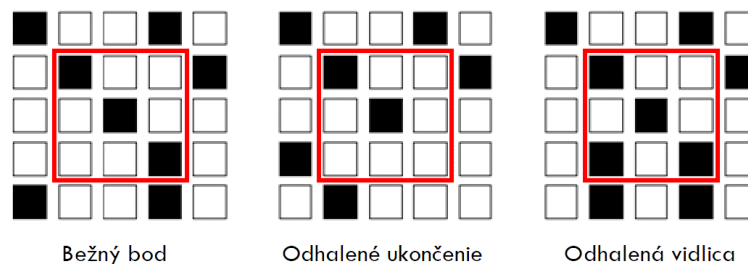
Technika *Crossing Number* (CN) predstavuje stopovanie papilárnych línií a vyhodnocovanie okolia každého ich bodu. Označme bod kostry ako p . Hodnota CN pre vyšetrovaný bod predstavuje počet prechodov z 0 do 1 v jeho susedstve, ktoré obsahuje 8 bodov. Matematické vyjadrenie CN je podľa dané vzťahom (1). Funkcia $val(p_i)$ vracia hodnotu obrazového bodu p_i . Pri stopovaní papilárnych línií postupne prechádzame všetky body $p = 0$ a počítame ich hodnotu CN . Môžu nastať tieto situácie:

- $CN = 0$, objavili sme izolovaný bod
- $CN = 1$, objavili sme ukončenie papilárnej línie
- $CN = 2$, objavili sme priebežný bod papilárnej línie

- $CN = 3$, objavili sme rozdvojenie papilárnej línie
- $CN > 3$, ignorované body

$$CN(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1 \dots 8} |val(p_{i \bmod 8}) - val(p_{i-1})| \quad (1)$$

Na obr. 17 vidíme zopár ukážkových bodov v kostre odtlačku (umiestnené v strede matíc), ktorých CN odhalilo bežný bod papilárnej línie (vľavo), ukončenie (v strede) a vidlicu (vpravo).



Obrázok 17 Vyhodnotenie okolia obrazového bodu metódou CN

Potom, čo sa vyšetrí všetky body papilárnych línií a na základe hodnoty CN sa priradia, buď k vidlici alebo ukončeniu, máme k dispozícii všetky reálne markanty a tiež aj množinu falošných markantov. Metóda CN je teda efektívnym nástrojom na extrakciu markantov len za predpokladu, že pracujeme s odtlačkami prstov vysokej kvality alebo bol odtlačok prvorodne spracovaný nejakým kontextovým filtrom, kde sa potlačili všetky zdroje šumu a nepravidelností v topológii odtlačku.

2. 1. 3 Extrakcia markantov priamo v originálnom obraze

Zdroj: [5] MAIO, D. – MALTONI, D. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints.

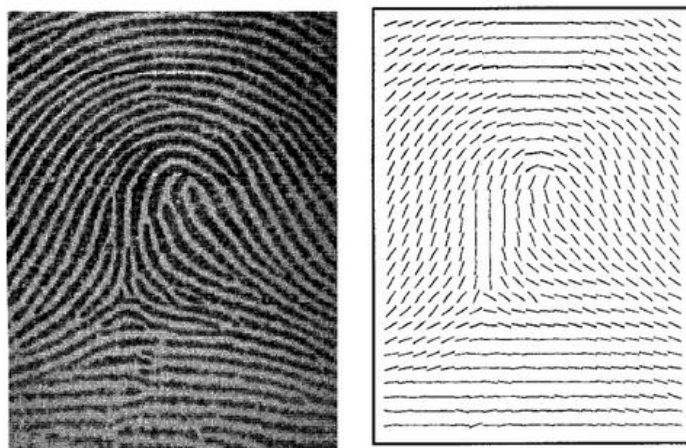
Väčšina automatizovaných systémov na rozpoznávanie osôb odtlačkami je založená na porovnávaní Level-2 daktyloskopických markantov. V doméne automatizovaných systémov prevažujú dva typy markantov, ktoré sú softvérovo extrahované: ukončenia a rozdvojenia papilárnych línií. Spoľahlivá strojová extrakcia týchto špecifických znakov je stále nevyriešeným problémom tejto vednej oblasti. Je to extrémne kritický proces, obzvlášť pri odtlačkoch nevyhovujúcej kvality, kde šum a nedostatok kontrastu vytvára umelé konfigurácie obrazových bodov, ktoré sú podobné daktyloskopickým markantom a na druhej strane sa strácajú skutočné markanty. Na riešenie tejto úlohy boli navrhnuté rozličné techniky, ktoré majú spoločnú črtu – transformujú obrázok zo stupňov šedej farby do binárnej formy. Technika navrhnutá autormi je zatiaľ jediná svojho druhu a využíva sofistikovaný algoritmus sledovania papilárnych línií a vyhodnocovania lokálneho kontextu na zistenie prítomnosti spomínaných dvoch typov markantov.

Daktyloskopické markanty označované aj ako Galtonove charakteristiky sú lokálne nespojitosti v priebehu papilárnych línií tvoriacich spleť odtlačkový vzor. Identifikačný model využívaný FBI je

založený na klasifikácii markantov do dvoch tried: rozdvojenie a ukončenie papilárnej línie. Pre každý markant sa zaznamenáva tvarová trieda, súradnice a uhol, ktorý zvierajú dotýčnica k papilárnej línii s horizontálnou osou. Motivácia autorov navrhnúť metódu, ktorá vychádza z priameho hľadania markantov v nespracovanom obraze pramení predovšetkým z týchto faktorov:

- Konvenčné techniky strácajú počas binarizácie dôležité diskriminačné vlastnosti
- Binarizácia spoločne so zužovaním papilárnych línii je časovo náročný proces
- Globálne aj lokálne binarizačné techniky poskytujú neuspokojivé výsledky pri aplikácii na odtlačky nízkej kvality

Základná idea stojaca v pozadí tejto metódy je sledovanie priebehu papilárnej línie v obraze podľa smerov získaných zo smerovej mapy odtlačku. Smerová mapa odtlačku je analytické vyjadrenie odtlačku prostredníctvom odhadu smeru papilárnej línie. Odhad smeru je zvyčajne počítaný gradientovou technikou, ktorá kvantifikuje zmenu intenzity obrazových bodov v určených smeroch. Na základe detekcie klesania alebo stúpania hodnôt intenzity sa dá definovať smer, ktorý je kolmý na gradient a zároveň súbežný zo smerom, ktorý vykazuje línia na malom priestore.

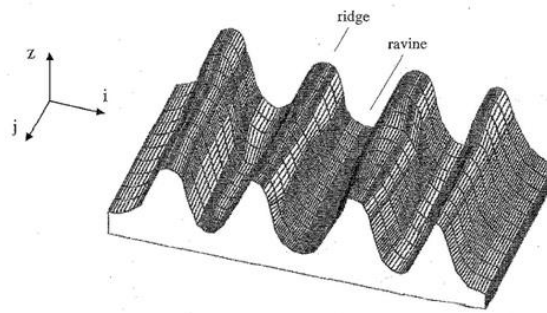


Obrázok 18 Odtlačok a vizualizácia jeho smerovej mapy

Sledovanie papilárnych línii začína rozmiestnením štartovacích bodov na ploche odtlačku. Z každého štartovacieho bodu, začína algoritmus sledovať papilárnu líniu až pokiaľ nenarazí na jej ukončenie alebo spojenie s inou líniou. Na zamedzenie viacnásobného prechodu rovnakou líniou sa využíva značkovacia stratégia.

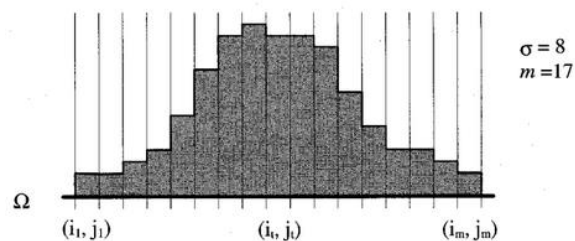
Sledovanie priebehu papilárnej línie

Z matematického pohľadu je papilárna línia definovaná ako postupnosť bodov, ktorá obsahuje lokálne maximum pozdĺž jedného smeru. Takúto postupnosť bodov získame projekciou intenzity obrazových bodov v smere kolmom na papilárnu líniu. Na ilustráciu posluží priestorový model papilárneho terénu, ktorý obsahuje hrebene (papilárne línie) a priehlbiny (medzery medzi nimi).



Obrázok 19 Priestorový model papilárneho terénu

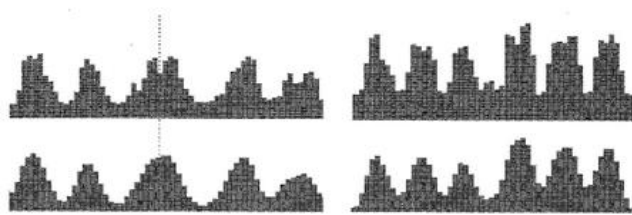
Základnou schopnosťou algoritmu, ktorý sleduje papilárnu líniu je určenie časti obrazu, ktorá patrí papilárnej línii. To sa dosiahne opakovaným a progresívnym hľadaním lokálneho maxima v postupnosti bodov prislúchajúcej intenzite obrazových bodov a jej smer je kolmý na smer papilárnej línie. Spájaním po sebe idúcich maxím vytvárame polygonálnu aproximáciu papilárnej línie. Počiatkom v štartovacom bode sa v každom kroku sledovania vypočíta nový bod (i_t, j_t) posunutím o μ obrazových bodov v smere papilárnej línie. Vytvorí sa rovina rezu Ω so šírkou $2\sigma + 1$ a v nej sa lokalizuje maximum, ktoré sa označí ako ďalší bod papilárnej línie (i_n, j_n) . Rovina rezu Ω je znázornená na obr. 19. Algoritmus beží pokiaľ sa kladne nevyhodnotí jedno z ukončovacích kritérií.



Obrázok 20 Prierez papilárnej línie s projekciou intenzity obrazových bodov

Sumarizácia krokov algoritmu sledovania papilárnej línie:

1. Tvorba prierezu papilárnej línie
2. Určenie lokálneho maxima intenzity v priereze
3. Získanie nového smeru posunu v ďalšom kroku
4. Testovanie ukončovacieho kritéria



Obrázok 21 Ukážka výsledku normalizácie prierezu papilárnym terénom (vrchný riadok znázorňuje dva prierezy cez časť odtlačku pred normalizáciou a spodný riadok znázorňuje rovnakú časť odtlačku po normalizácii)

Variabilita intenzity obrazových bodoch, ktoré patria papilárnym líniam je nežiadúcim javom, pretože znemožňuje vyhľadávanie lokálneho maxima v priereze línie. Z toho dôvodu museli autori algoritmu navrhnúť spôsob normalizácie papilárnej línie pred hľadaním maxima. Normalizácia profilu prierezu papilárnej línie pozostáva z dvoch krokov:

1. Vypočíta sa priemer intenzity obrazových bodov v menšom počte susedných a po sebe idúcich prierezoch
2. V druhom kroku nasleduje konvolúcia obrazu so špeciálnou maskou, ktoré predstavuje ideálny tvar prierezu papilárnej línie

Ukončovacie kritériá

1. *Prekročenie hranice oblasti záujmu.* Súradnice nového bodu polygonálnej reprezentácie papilárnej línie prekračujú platný rozsah súradníc obrazu.
2. *Ukončenie.* Nenájde sa také lokálne maximum, pri ktorom by uhol vytvorený medzi čiarou, ktorá spája dve posledné lokálne maximá a smerom posledného bodu línie zo smerovej mapy, bol menší než prahová hodnota β .
3. *Pripojenie sa k línii.* Nový bod sledovania papilárnej línie už bol raz označený ako patriaci inej línii.
4. *Nadmerné zakrivenie.* Čiara, ktorú tvoria dve posledné lokálne maximá vytvára s lokálnou orientáciou papilárnej línie uhol väčší než prahová hodnota Ψ . Tento uhol by mal modelovať také zakrivenie papilárnej línie, ktoré je netypické pre papilárne línie na malej ploche. Náhla zmena smeru papilárnej línie indikuje prerušenie jej kontinuity, čoho zdrojom býva väčšinou obrazový kaz.

Detekcia markantov

Hlavným problémom je riadenie algoritmu stopovania papilárnych línii. Treba ošetriť, aby stopovanie prešlo všetkými líniami a zároveň každou líniiou iba raz. Predložená technika využíva pomocný obraz T , ktorý má rovnaké rozmery ako pôvodný obraz odtlačku. Tento obraz je plošne inicializovaný na hodnotu 0. Vždy keď sa skončí stopovanie jednej súvislej papilárnej línie, príslušné súradnice v obraze T sa označia vhodným identifikátorom. Takto sa tvorí polygonálna forma odtlačku, ktorej zlomy prislúchajú rovinám rezu Ω , v ktorých sme lokalizovali maximá intenzity. Keďže hľadanie markantov začína z množiny náhodne vybraných bodov na ploche odtlačku, musí sa pre každý štartovací bod nájsť najbližší bod (i_c, j_c) v obraze T , ktorý patrí papilárnej línii.

Potom, čo sme stanovili bod (i_c, j_c) opakuje sa procedúra sledovania papilárnej línie opísaná vyššie. Na tomto mieste je potrebná opätovná interpretácia ukončovacích kritérií:

- *Prekročenie hranice oblasti záujmu.* Nebol objavený žiadny markant.
- *Ukončenie.* Bol objavený markant ukončenie.
- *Pripojenie sa k línii.* Bol objavený markant rozdvojenie alebo sme sa pripojili k miestu línie, v ktorom sme začali sledovanie.
- *Nadmerné zakrivenie.* Znamená objavenie markantu ukončenie.



Obrázok 22 Výsledok extrakcie markantov na vzorovom odtlačku (obrázok vpravo znázorňuje polygonálnu reprezentáciu odtlačku, ukončenia sú označené kruhmi a rozdvojenia štvorcami)

V experimentálnej časti autori porovnali ich metódu s metódami, ktoré extrahujú markanty v kostre odtlačku. Vlastnú metódu označili ako A a porovnávané metódy ako B, C, D a E. Metódy B, C, D a E sa líšili v technikách binarizácie a zužovania papilárnych línií a preto je toto vzájomné porovnanie určitým náhľadom aj do silných a slabých stránok týchto techník. Porovnávané metódy využívali na extrakciu ukončenia a rozdvojenia metódu CN opísanú vyššie v dokumente. Porovnávanie metód prebehlo tak, že sa tieto metódy postupne testovali v reálnom biometrickom systéme a vyhodnocovali sa tieto ukazovatele:

- Miera neodhalených markantov (d)
- Miera odhalených falošných markantov (f)
- Mier markantov so zameneným tvarovým typom (x)

TABLE 1
AUTOMATIC MINUTIAE DETECTION.

fingerprint	minutiae	A			B			C			D			E		
		d	f	x	d	f	x	d	f	x	d	f	x	d	f	x
1	33	0	2	7	0	25	2	1	102	7	0	53	6	0	5	4
2	29	3	1	4	0	20	2	2	24	1	1	34	2	2	4	0
3	28	1	2	4	0	24	0	1	35	1	1	28	2	0	4	4
4	37	3	0	4	0	15	3	4	32	0	1	42	3	2	2	2
5	22	0	0	3	0	38	1	0	80	2	1	18	0	0	8	2
6	23	0	0	4	0	3	2	0	25	3	0	19	2	0	2	1
7	31	2	1	2	3	13	2	2	27	2	0	40	3	2	0	2
8	31	1	0	3	0	2	0	1	10	3	0	5	4	0	0	3
9	21	1	10	1	1	115	1	0	180	1	0	153	1	0	24	2
10	22	1	0	4	0	53	1	0	104	3	0	100	1	0	8	4
11	32	3	5	4	1	22	4	2	22	3	3	73	4	1	5	2
12	33	3	8	2	0	23	3	4	45	1	1	79	3	0	10	5
13	20	0	0	4	0	48	2	0	57	3	0	81	2	0	7	5
14	37	0	5	6	1	43	5	3	67	5	1	57	4	0	11	2

Whole set					
	A	B	C	D	E
dropped minutiae	4.51%	1.50%	5.01%	2.26%	1.75%
false minutiae	8.52%	111.28%	203.01%	195.99%	22.56%
exchanged minutiae	13.03%	7.02%	8.77%	9.27%	9.52%
total error	26.07%	119.80%	216.79%	207.52%	33.83%

Obrázok 23 Porovnanie vybraných metód extrakcie podľa špecifikovaných ukazovateľov (A – metóda autorov, B – konkurenčné metódy extrahujúce markanty z kostry odtlačku)

Môžeme vysloviť nasledovné závery:

- Priemerná hodnota ukazovateľov (d) a (x) je porovnateľná s hodnotami iných metód
- Priemerná hodnota ukazovateľa (f) je značne nižšia ako pri iných metódach, z čoho sa dá jasne usúdiť, že zvolený prístup je odolný voči falošným markantom
- Navrhnutý algoritmus dosiahol najlepší výsledok pri miere celkovej chyby (z angl. total error)

2. 1. 4 Extrakcia markantov prostredníctvom okrajových bodov papilárnych línií

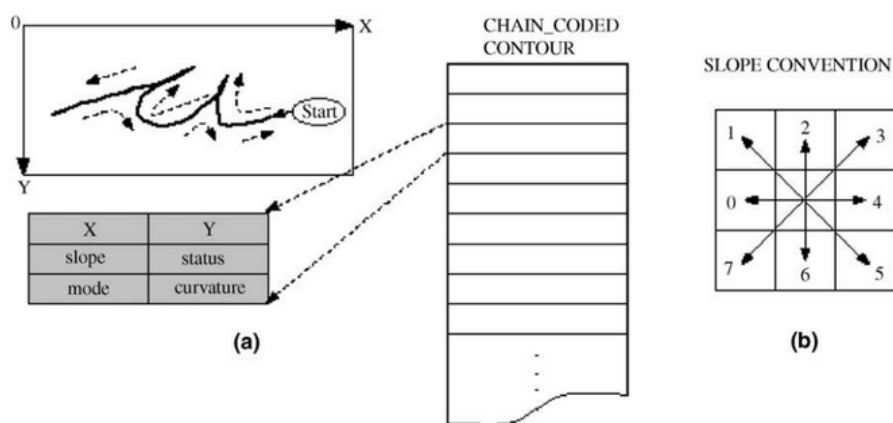
Zdroj: [6] GOVINDARIJU, V. - SHI, Z. *A chaincode based scheme for fingerprint feature extraction.*

Autori navrhli metódu, ktorá modeluje papilárne línie odtlačku vo forme reťazového kódu vytvoreného z okrajových bodov papilárnych línií. Táto reprezentácia odtlačku umožňuje okrem extrakcie markantov aj efektívne obrazové predspracovanie. Z reťazového kódu sa dá odvodiť lokálny smer papilárnej línie. Využitím informácie o lokálnom smere sa dá použiť adaptívne filtrovanie obrazu.

Obrázok v odtlačku bežne obsahuje od 40 do 100 daktyloskopických markantov, prevažne rozdvojenie a ukončenie papilárnej línie. Kritickým krokom pri porovnávaní odtlačkov je spoľahlivé určenie presnej polohy markantu v obraze. Z dôvodu nedokonalosti snímania odtlačkov a stratám grafickej informácie v rámci transformačných procesov, ktoré spracúvajú odtlačok sa stáva, že niektoré markanty sú

nenávratne stratené alebo na druhej strane sú vygenerované falošné. Ku chybám dochádza aj pri stanovení presných súradníc alebo orientácie markantu.

Veľké množstvo existujúcich techník vychádza zo spoločného základu a tým je kostra odtlačku. Odhalenie markantu v kostre odtlačku je rýchle, ale kostra nie je bez optimálneho predspracovania vernou reprodukciou pôvodného obrazca odtlačku. Alternatíva, ktorá odstraňuje tento nedostatok je opísaná v tejto technike, ktorá vychádza z binárneho obrazu. Obraz je postupne preskúmaný zhora nadol a zaznamenávajú sa polohy prechodu z čiernej do bielej farby. Takto vznikne mapa okrajových bodov papilárnych línií – tzv. kontúry. Sledovaním postupnosti okrajových bodov proti smeru hodinových ručičiek sa vytvárajú čiastkové postupnosti elementov. Každý element tejto postupnosti je bližšie špecifikovaný (x,y) súradnicami, lokálnym smerom v kontexte okolitých papilárnych línií a ďalšími pomocnými informáciami ako zakrivenie lokálneho segmentu papilárnej línie. Na obr. 24 je vizuálna reprezentácia tohto reťazového kódu spoločne s konvenciou určenia smeru každého elementu, ktorá sa dá jednoducho zistiť na základe smeru prechodu z bielej do čiernej farby.



Obrázok 24 Detail schémy reťazového kódu okrajových bodov papilárnej línie

Obnova štruktúry odtlačku pomocou reťazového kódu okrajových bodov

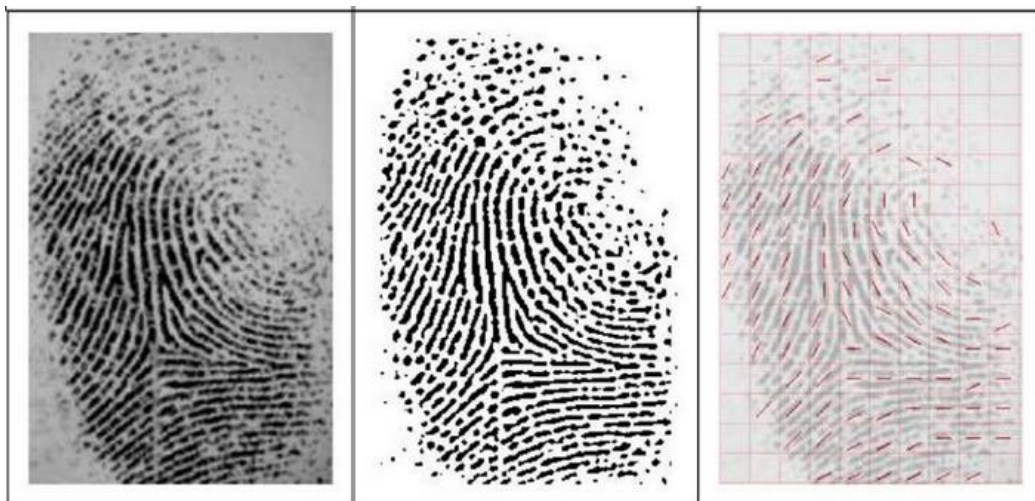
Binarizácia často prevedie odtlačok do formy, v ktorej nie je pripravený odhaľovanie drobných detailov. Cieľom obnovy štruktúry odtlačku je:

- zvýšenie zreteľnosti papilárnych línií
- uchovanie ich celistvosti (odstrániť umelé preseknutia a potlačiť premenlivosť intenzity obrazových bodov, ktoré patria papilárnym líniám)
- zabrániť vzniku falošných útvarov

Obraz sa najprv prevedie do binárnej formy použitím adaptívneho algoritmu binarizácie. Následne sa vypočíta smerová mapa odtlačku z elementov reťazového kódu okrajových bodov papilárnych línií a použitím masky veľkosti 15 x 15. Potom nasleduje aplikácia filtra eliptického tvaru, ktorý má hlavnú os zarovnanú so smerom lokálnej orientácie papilárnej línie. Reťazový kód okrajových bodov má výhodu, že je z neho možné zrekonštruovať pôvodný binárny tvar odtlačku v pôvodnej veľkosti.

Výpočet smerovej mapy prostredníctvom reťazového kódu

Smer získame postupným prechádzaním elementov reťazového kódu. Smer počítame pre blok obrazu 15 x 15 obrazových bodov. V každom bloku sa vyberie 8 smerov elementov reťazového kódu a zvolí sa dominantný smer. Týmto postupom získavame celkom uspokojivé odhady smeru aj pri latentných odtlačkoch, ktoré sa vyznačujú nízkou obrazovou kvalitou. Výsledok odhadu smeru prostredníctvom reťazového kódu vidíme na obr. 25.



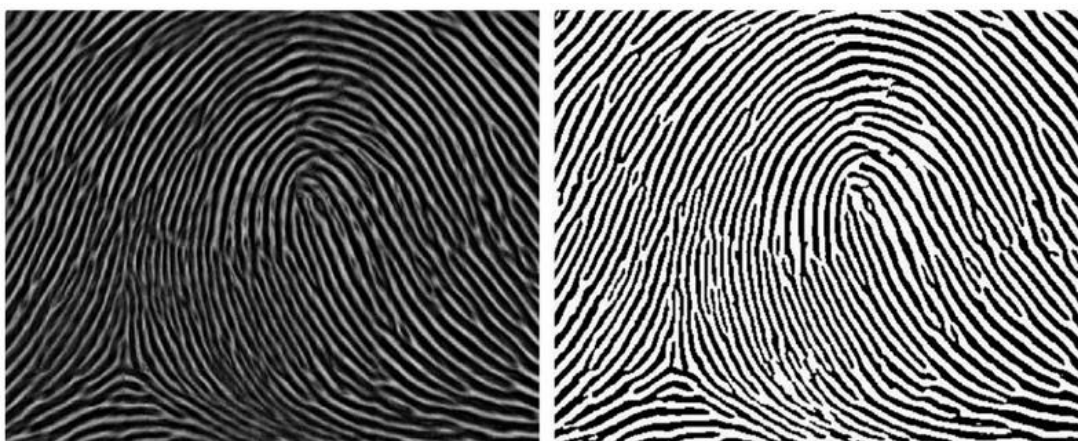
Obrázok 25 Originál odtlačku, výsledok adaptívnej binarizácie a smerová mapa získaná z reťazového kódu

Anizotropné filtrovanie odtlačku

Nepresná binarizácia vedie k tvorbe umelo rozdelených a spojených papilárnych línií. Autori použili smerovo parametrizovaný anizotropný filter eliptického tvaru, ktorý má hlavnú os zarovnanú so smerom papilárnej línie, ktorý je prevzatý zo smerovej mapy vypočítanej v predchádzajúcom kroku. Účinok filtra vyhladzuje obrazové body v tomto smere. Anizotropný filter je matematicky vyjadrený zápisom (2).

$$h(x_0, x) = V + S \cdot \rho(x - x_0) \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{((x-x_0) \cdot n)^2}{\sigma_1^2(x_0)} + \frac{((x-x_0) \cdot n_\perp)^2}{\sigma_2^2(x_0)} \right] \right\} \quad (2)$$

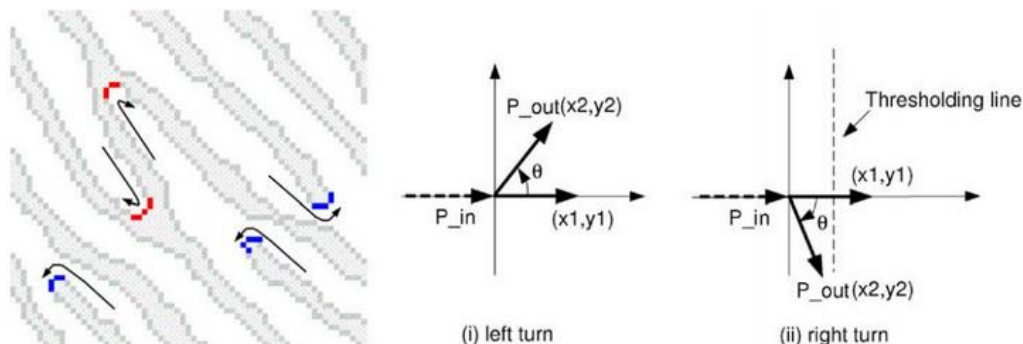
Parametre n a n_\perp sú navzájom kolmé jednotkové vektory, pričom n je rovnobežný s papilárnou líniou. Tvar konvolučného jadra filtra je ovládaný pomocou $\sigma_1^2(x_0)$ a $\sigma_2^2(x_0)$. Parameter x_0 predstavuje bod odtlačku, na ktorý sa filter aplikuje. Parametre V a S umožňujú ďalšie prispôsobenie tvaru filtra, konkrétne výšku eliptického tvaru a mieru modifikácie okolitých obrazových bodov.



Obrázok 26 Obnova štruktúry odtlačku pomocou anizotropného filtra a prislúchajúci binárny obrazec

Extrakcia markantov s využitím vlastností reťazového kódu

Celý proces je založený na postupnom prechode všetkými bodmi reťazového kódu, ktorý obsahuje okrajové body papilárnej línie. Prechod je realizovaný proti smeru hodinových ručičiek. Ukončenie je detegované vtedy, keď postupnosť elementov reťazového kódu vytvorí významné zakrivenie doľava. Podobne, rozdkovenie je odhalené vtedy, keď postupnosť elementov reťazového kódu vytvorí významné zakrivenie doprava. Znáznornenie tejto techniky je na obr. 27.



Obrázok 27 Využitie okrajov papilárnych línií pri extrakcii ukončenia a rozdkovenia

Nech vektor P_{in} vchádza do okrajového bodu P a nech vektor P_{out} vychádza z bodu P . Výpočet týchto dvoch vektorov využíva zopár susedných okrajových bodov, kvôli zvýšenej odolnosti voči obrazovým kazom. Významnosť smerovej zmeny v bode P je daná uhlom θ (3), ktorý zviera vektor P_{in} a P_{out} .

$$\theta = \arccos \frac{P_{in} \cdot P_{out}}{|P_{in}| |P_{out}|} \quad (3)$$

Nech vektor $P_{in} = (x_1, y_1)$ a $P_{out} = (x_2, y_2)$, potom $\theta = \arccos(x_1 y_1 + x_2 y_2)$. Stanovila sa prahová hodnota T , ktorú musí spĺňať každá významná zmena zakrivenia, konkrétne $x_1 y_1 + x_2 y_2 < T$. Ak platí $x_1 y_2 - x_2 y_1 > 0$, vtedy sme odhalili zakrivenie doľava a ak platí $x_1 y_2 - x_2 y_1 < 0$, vtedy sme odhalili zakrivenie doprava.

Na kvantitatívne zhodnotenie úspešnosti extrakcie markantov prostredníctvom tejto techniky, použili autori metódy výpočet ukazovateľa *Goodness Index (GI)*. GI je blokovo orientovaný spôsob odhadu úspešnosti a preto je celková úspešnosť daná súčtom čiastkových úspešností v jednotlivých blokoch odtlačku, ktoré sa môžu líšiť kvalitou. GI je vyjadrený vzťahom (4).

$$GI = \frac{\sum_{i=1}^r q_i(p_i - d_i - i_i)}{\sum_{i=1}^r q_i t_i}$$

Význam jednotlivých parametrov je nasledovný:

- r je celkový počet blokov veľkosti 15 x 15
- p_i je počet správne odhalených markantov v bloku i
- d_i je počet neodhalených skutočných markantov
- i_i je počet odhalených falošných markantov
- t_i je skutočný počet markantov v bloku
- q_i je vyjadrenie obrazovej kvality v bloku (1 = vyhovujúca, 2 = stredná, 3 = nízka)

Množina skutočného počtu markantov bola poskytnutá expertom z prostredia kriminalistiky. Hodnota GI v priemere dosahovala úroveň 0,44.

Ďalej boli vypočítané štandardné chybové charakteristiky v zmysle miery vynechaných skutočných markantov (z angl. dropped minutiae), miery falošných markantov (z angl. false minutiae), miery tvarovo zamenených markantov (z angl. exchanged minutiae) a miery celkovej kumulatívnej chyby (z angl. total error). V tabuľke na obr. 28 vidíme porovnanie navrhutej metódy s rovnakými metódami, ktoré sú porovnávané v časti 2. 2. 3.

Average errors					
	A (%)	E (%)	B (%)	C (%)	Our method (%)
Dropped minutiae	4.51	1.75	1.50	5.01	0
False minutiae	8.52	22.56	111.28	203.01	38.67
Exchanged minutiae	13.03	9.52	7.02	8.77	5.39
Total error	26.07	33.83	119.80	216.79	44.06

Obrázok 28 Porovnanie chybovosti metódy s inými existujúcimi metódami

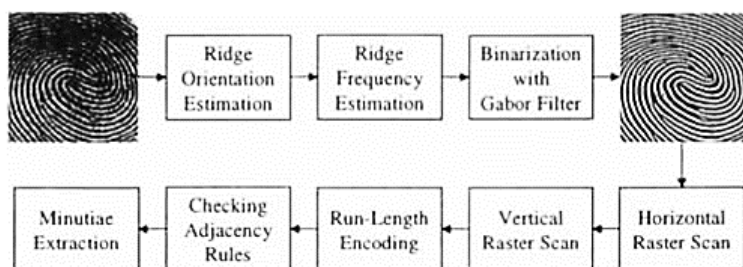
2. 1. 5 „Run-length“ schéma extrakcie daktyloskopických markantov

Zdroj: [7] HWANG, H. et al. *Run Representation Based Minutiae Extraction in Fingerprint Image*.

Táto technika je ďalšou alternatívou k metódam, ktoré vychádzajú z kostry odtlačku a snaží sa poukázať na to, že analýzou binárnej podoby odtlačku, ktorá zachováva viac charakteristických detailov než kostra, je možné docieľiť spoľahlivú extrakciu s výsledkami porovnateľnými s konvenčnými technikami a potenciálom na ďalšie zlepšovanie. Na prekonanie známych problémov, ktoré sú späté s procesom zužovania papilárnych línií bola navrhnutá inovatívna technika extrakcie založená na horizontálnych a vertikálnych rezoch papilárnou líniou, ktoré sú ich tvorcami nazývané ako „run-length“. Všetky papilárne línie sú týmto spôsobom vyjadrené ako postupnosti takýchto rezov, pri ktorých sa kontroluje

ich susednosť. Markanty sú definované ako rozdeľujúce sa a ukončujúce sa rezy, ktoré sa nazývajú charakteristické rezy. Nie všetky charakteristické rezy prislúchajú reálnym markantom a preto sa zaviedli niektoré geometrické obmedzenia na overenie charakteristických rezov. V porovnaní s metódami, ktoré sú založené na zužovaní papilárnych línií sa táto metóda ukázala v špecifických podmienkach testovania autorov ako spoľahlivejšia.

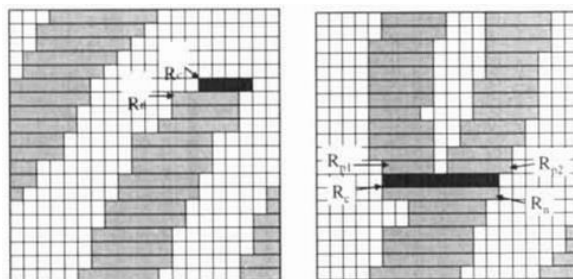
Prvým krokom, ktorý autori implementovali bol prevod originálu odtlačku do binárnej podoby. Použitá bola menej tradičná technika binarizácie pomocou dvojrozmerného Gaborovho filtra. Keďže Gaborov filter modeluje súbežné papilárne línie formou zvlnenej sínusovej roviny, ktorá je amplitúdovo modulovaná Gaussovou krivkou, je schopný obnoviť lokálny smer aj frekvenciu línií a zároveň redukovať premenlivosť intenzity obrazových bodov, ktorá spôsobuje komplikácie pri extrakcii markantov. Avšak tento filter potrebujeme aplikovať postupne na všetky body odtlačku s premenlivými parametrami. Najdôležitejšie parametre, ktoré vstupujú do filtra sú lokálny smer a lokálna hrúbka papilárnej línie. Na základe týchto parametrov sa filter adaptuje na špecifický kontext v odtlačku a konvolúciou s pôvodným odtlačkom dochádza k obnove jeho štruktúry.



Obrázok 29 Blokový diagram navrhnutého algoritmu extrakcie využívajúceho tzv. „run-length encoding“

Run-length encoding

Binárny odtlačok je kompletne špecifikovaný zreťazeným zoznamom priečných rezov jednotlivými papilárnymi líniami. V odtlačku je rez definovaný ako postupnosť čiernych obrazových bodov od jedného okraja papilárnej línie k protiľahlému okraju. Pre každý rez sa zaznamenáva štartovací bod a koncový bod rezu.



Obrázok 30 Ukážka horizontálnych rezov papilárnymi líniami

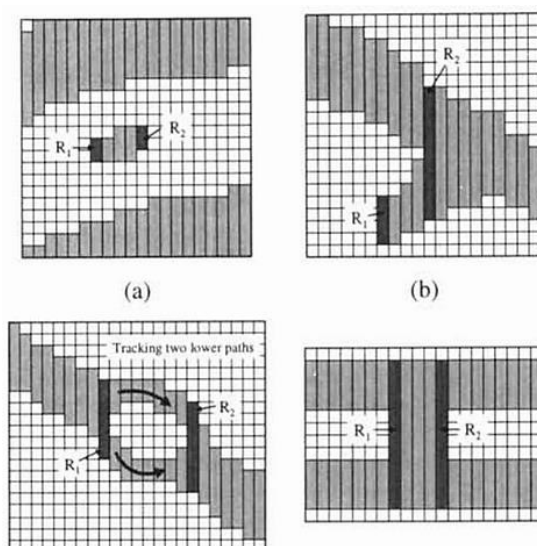
Pozorným sledovaním zistíme, že ukončenie papilárnej línie je dané rezom, za ktorým sa už nenachádza žiadny iný rez. Rez, ktorý je rozdelený oznamuje prítomnosť rozdvojenia papilárnej línie. Keďže orientácia papilárnych línií sa mení a v prípade zhodnej orientácie línie s orientáciou rezov je ťažké spoľahlivo detegovať markanty, vytvoria sa okrem horizontálnych, aj vertikálne rezy. Horizontálne rezy obsahujú 3 parametre: x, y, z , kde x je číslo riadku a y a z sú štartovací a koncový stĺpec. Obdobná filozofia je použitá aj pri vertikálnych rezoch.

Kontrola susednosti rezov

Každý rez sa porovnáva s bezprostredne predchádzajúcim a nasledujúcim rezom a testuje sa ich susednosť. Hovoríme, že dva rezy sú susedné ak sa ich body dotýkajú hranami. Každá línia je zostavená z rezov $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$, pričom platí, že P_{i+1} je susedný rez P_i . Regulárny rez je taký rez, ktorý má aj predchádzajúceho aj nasledujúceho suseda. Singulárny rez je taký, ktorý má len jedného suseda. Pri kontrole susednosti rezov môžu nastať tieto prípady:

1. Aktuálny rez nemá suseda
2. Aktuálny rez má oboch susedov
3. Aktuálny rez má jedného zo susedov
4. Aktuálny rez má naraz buď dvoch predchádzajúcich susedov alebo dvoch nasledujúcich susedov
5. Aktuálny rez má na oboch stranách viac ako dvoch susedov

Prvý prípad predstavuje izolovaný bod papilárnej línie. Druhý prípad predstavuje priebežný bod papilárnej línie, ktorý nie je ničím zaujímavý. V treťom prípade dochádza k odhaleniu ukončenia. Vo štvrtom prípade hovoríme o detekcii rozdvojenia. Piaty prípad je odhalením rozvetvenia papilárnej do troch vetiev.



Obrázok 31 Ukážky falošných štruktúr odtlačku, ktoré sa prejavujú v charakteristických rezoch

Validácia charakteristických rezov

Nie všetky charakteristické rezy možno označiť za reálne pozície markantov. Treba zvážiť niektoré geometrické kritériá a overiť ich platnosť. Ak sa kritériá nespĺnia, treba charakteristický rez ignorovať. Tieto parametre sa používajú na validáciu charakteristických rezov:

- dĺžka rezu; ak je dĺžka rezu väčšia ako prahová hodnota, rez sa ignoruje
- dĺžka medzery medzi, ktorá rozdeľuje jeden rez; ak je dĺžka väčšia ako zvolený prah, daný rez sa ignoruje
- dĺžka cesty, ktorú vytvorili susedné rezy; ak sa nájde na ceste z charakteristického rezu R_c v určitej minimálnej vzdialenosti ďalší charakteristický rez, potom je R_c označený za falošný. Minimálna dĺžka je stanovená ako dvojnásobok priemernej hrúbky papilárnej línie

3 Vlastný výskum: návrh, implementácia a testovanie vlastného riešenia

Hlavným cieľom nášho výskumu v oblasti biometrických algoritmov rozpoznávajúcich vzory odtlačkov je návrh metódy automatizovanej extrakcie daktyloskopických markantov, ktoré sú stavebnými prvkami jedinečnosti odtlačkov prstov. Zámerom je navrhnúť systém s kolekciou pravidiel na rozpoznávanie markantov z klasifikačnej schémy, ktorá je využívaná aj pri manuálnej daktyloskopической identifikácii forenznými expertmi na KEÚ PZ. Táto schéma obsahuje všetky tvarové zvláštnosti papilárnych línií, ktoré sú v súlade s medzinárodnými klasifikáciami využívanými expertmi v kriminalistike v iných krajinách a taktiež so štúdiami vedcov z akademickej sféry.

Náš algoritmus extrakcie bol inšpirovaný existujúcimi metódami, ktoré využívajú tzv. kostru odtlačku ako podklad pre extrakciu. Kostra odtlačku umožňuje aplikovať a algoritmizovať také činnosti akými sú rýchle odhalenie ukončenia a rozdvojenia papilárnej línie, stopovať papilárne línie, merať ich dĺžky a vyhodnocovať konfigurácie viacerých markantov na základe ľahko implementovateľných pravidiel. Čo je v tomto prípade veľkým prínosom je fakt, že kostra je reprezentácia odtlačku, ktorá je veľmi úsporná a obsahuje informácie o celkovej štruktúre odtlačku. Kvôli konverzii pôvodného obrazu odtlačku v odtieňoch šedej do binárnej formy kostry je takáto forma zatiaľ pravdepodobne najlepšou reprezentáciou odtlačku, ktorá poskytuje možnosti na extrakciu tvarovo komplexných vzorov.

Očakávaný prínos

- Očakávaným prínosom je návrh systému, ktorý umožňuje expertom vo forenzej vede uskutočňovať analýzy vlastností odtlačkov a vo forme expertného systému bude plniť funkciu výskumného nástroja pri odhaľovaní kardinálnych vlastností nielen odtlačkov prstov, ale aj málo preskúmaných odtlačkov dlaní.
- Ďalšou očakávanou vlastnosťou, ktorá je súčasťou návrhových kritérií je schopnosť extrahovať minimálne množstvo falošných markantov a odhaliť čo najviac zo skutočných markantov. Na uspokojivé splnenie týchto nárokov je potrebné, aby algoritmus extrakcie odhaľoval len tvary, ktoré spĺňajú určité štatistické kritériá, ktoré boli konzultované priamo so znalcami z kriminalistického prostredia. Druhým predpokladom pre spoľahlivú extrakciu je používanie predspracovania odtlačkov a záverečnej validácie výstupov. Predspracovanie má za úlohu obnoviť kvalitu odtlačku zvýšením zreteľnosti papilárnych línií a potlačením zdrojov degradácie originálneho vzoru. Odtlačok obsahuje neobnoviteľné segmenty, ktoré sú priestorom pre vznik falošných štruktúr, pripomínajúcich markanty. Rovnako, výstupom z extrakcie sú aj tvary, ktoré sú prítomné na okrajoch odtlačku a tie sú vo všeobecnosti ignorované. Všetky takéto falošné útvary musia byť vylúčené z finálneho vektora markantov. Záverečná validácia výstupov vykonáva zopár analytických činností, ktorými zisťuje prítomnosť takýchto falošných útvarov a stará sa o ich priame odstránenie z obrazu alebo o ich označenie za falošné.
- Jedným z uplatnení nášho softvéru je aj zber štatistických údajov z databázy odtlačkov KEÚ PZ. Táto databáza obsahuje odtlačky zosnímané v kontrolovaných podmienkach v obrazovom rozlíšení 1 000 dpi. V počte viac ako 1 100 odtlačkov predstavuje reprezentatívnu vzorku slovenskej populácie. Prostriedkami viacrozmerných štatistických analýz vybraných údajov z odtlačkov je možné dopracovať sa k záverom, ktoré by viedli k zvýšeniu efektivity práce nielen

expertov, ale aj automatizovaných systémov. Cieľom tých analýz je vybudovanie nového systému daktyloskopickkej identifikácie, ktorý má reflektovať moderné svetové trendy.

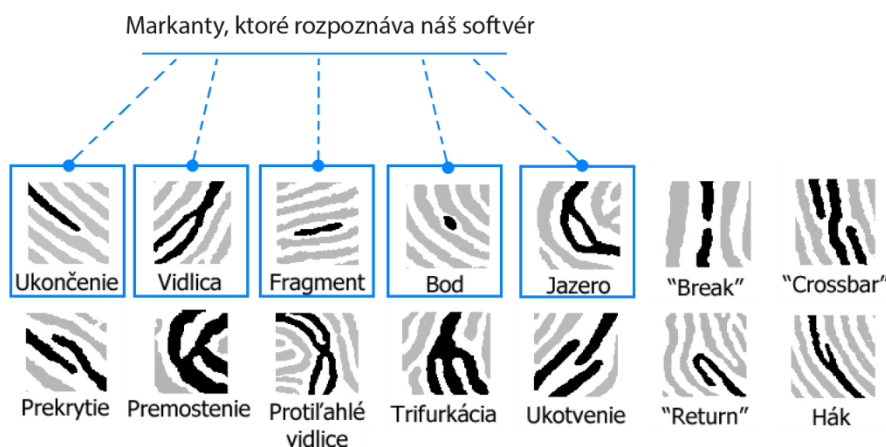
- Kombináciou nového systému daktyloskopickkej identifikácie, ktorá vychádza z rozlišovania významu jednotlivých tvarových typov markantov pri procese identifikácie a softvérovej metódy extrakcie, ktorá je automatizovaným spôsobom schopná rozlišovať široké spektrum charakteristických znakov je možné vytvoriť základy novej generácie biometrických systémov, ktoré by mohli nájsť plnohodnotné uplatnenie pri rozpoznávaní osôb odtlačkami prstov nízkej kvality. Naš algoritmus plánujeme využiť ako extrakčný modul a integrovať ho do existujúceho biometrického systému a následne vyčíslit štandardnými postupmi presnosť identifikácie a verifikácie osôb.

3. 1 Vlastná metóda extrakcie Level-2 markantov

Hlavnou myšlienkou algoritmu, ktorý vyvíjame je *rozlišovanie širokého spektra zvláštností papilárnych línií*, ktoré pomáhajú vytvoriť profil jedinečnosti každého odtlačku. Od tohto profilu sa očakáva, že bude mať výpovednejšiu hodnotu ako reprezentácia odtlačku len na základe obmedzeného vyjadrenia biologickej variability prostredníctvom ukončení a rozdvojení.

Algoritmus je zložený z dvoch hlavných modulov:

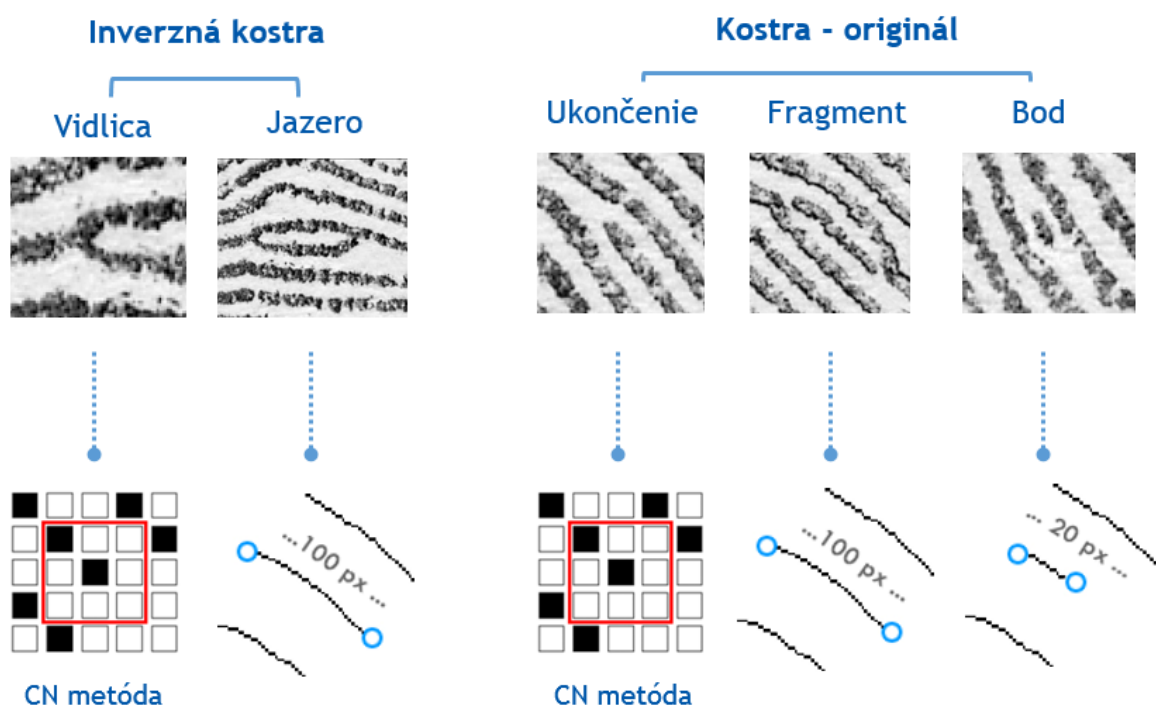
- Obrazové predspracovanie
- Extrakcia a validácia výstupov



Obrázok 32 Klasifikačná schéma a vyznačenie markantov, ktoré rozpoznáva náš softvér

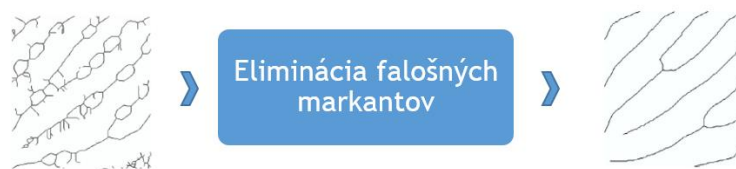
Rozhodli sme sa inšpirovať viacerými technikami, ktoré preukázali veľký potenciál pri definovaní pravidiel odhaľovania markantov na základe topologických vlastností kostry. Na to, aby sme potlačili vplyv negatívnych faktorov ako sú šum, cudzie častice, nízky kontrast alebo iné znehodnotenie, sme implementovali obrazové predspracovanie pozostávajúce z reťaze algoritmov, ktorých úlohou je postupne ohraničiť siluetu odtlačku, odstrániť šum, obnoviť kontrast a nakoniec adaptívne filtrovať odtlačok smerovo a frekvenčne parametrizovaným Gaborovým filtrom.

V module extrakcie sa v prvom kroku odhaľujú dve základné tvarové zvláštnosti: ukončenie a rozdzvenie papilárnej línie. Využívame na to metódu CN. Následne sa podľa hierarchického modelu klasifikácie markantov rozpoznáva v kostre 5 tvarových typov markantov. Na rozpoznávanie vzorov, ktorými sú tieto markanty charakteristické využívame topológiu kostry a topológiu inverznej kostry. Inverzná kostra je presnejším vyjadrením štruktúry odtlačku. V inverznej kostre sa sleduje priebeh papilárnych línií zo štartovacích bodov, ktorými sú ukončenia a rozdzvenie. Ak v určitej vzdialenosti od začiatku štartovacieho bodu dôjde ku vyhodnoteniu ukončovacieho kritéria, ktoré je dané určitým násobkom jednotkovej vzdialenosti L . Hodnota L predstavuje priemernú vzdialenosť medzi potnými pórnymi papilárnej línie a úsek papilárnej línie tejto dĺžky je jej základným stavebným blokom. My sme počas experimentov pracovali s odtlačkami s rozlíšením 1 000 dpi a v týchto podmienkach dosahuje hodnota L úroveň 10 obrazových bodov. Táto hodnota ako aj celý postup pri vyšetřovaní topologických štruktúr odtlačku boli konzultované s expertmi na daktyloskopickú identifikáciu z KEÚ PZ.



Obrázok 33 Pravidlá klasifikácie markantov podľa topologickej štruktúry kostry a jej inverznej podoby

Po klasifikácii nasledujú dva kroky, ktorých cieľom je priamo z obrazu odstrániť falošné štruktúry, ktoré boli umelo vytvorené v kostre odtlačku a na základe štruktúrnych a štatistických pravidiel vylúčiť z finálneho vektora markantov tie, ktoré nespĺňajú kritériá týchto pravidiel. Pri eliminácii dochádza k opätovnému vyšetřovaniu topológie odtlačku avšak tentoraz sú pravidlá nastavené na odhaľovanie niektorých umelých tvarov a tie sú následne priamo z obrazu vymazané.



Falošné útvary, ktoré vznikli v procese generovania kostry



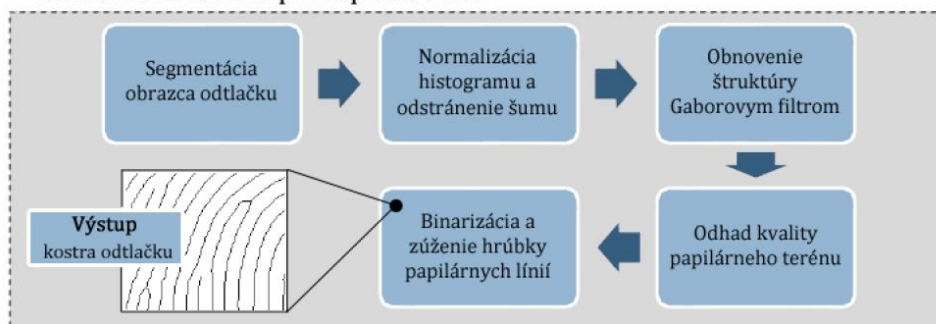
Obrázok 34 Eliminácia falošných markantov z kostry odtlačku

Po eliminácii falošných útvarov prichádza verifikácia markantov, ktorá markanty označuje za neplatné v týchto prípadoch:

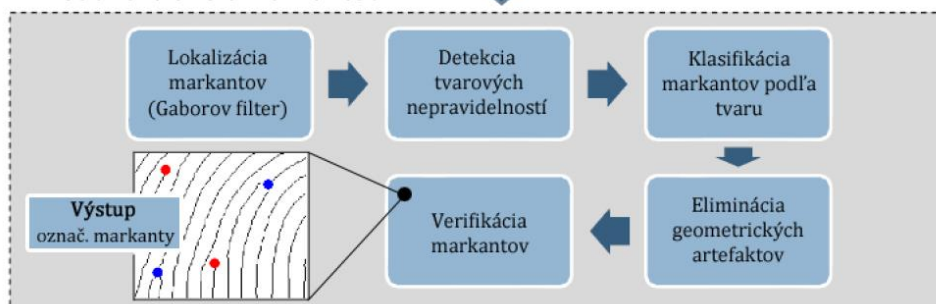
- Ak sa markant nachádza v bloku s nadmernou hustotou iných markantov (viac ako 2 markanty na ploche 5 mm^2)
- Ak je markant tvorený papilárnymi líniami, ktoré tvoria atypický vzor (mostík a prerušenie línie)
- Ak sa markant nachádza na okraji odtlačku
- Ak sa markant nachádza v oblasti, kde má mapa kvality papilárneho terénu nízku hodnotu (nižšiu ako 0,25 – určené experimentálne)

Architektúra navrhnutého softvérového riešenia

Modul obrazového predspracovania



Modul extrakcie markantov



Obrázok 35 Architektúra softvéru pozostávajúca z dvoch hlavných modulov

Pri experimentálnom overení úspešnosti nášho riešenia sme pracovali s databázou 1 100 odtlačkov prstov. Úspešnosť sme overovali prostredníctvom viacerých ukazovateľov:

- Úspešnosť extrakcie jednotlivých typov markantov
- Úspešnosť extrakcie v závislosti od Level-1 daktyloskopického vzoru
- Úspešnosť extrakcie v znehodnotených odtlačkoch
- Získané relatívne frekvencie

Najpodstatnejším ukazovateľom bolo vyhodnotenie úspešnosti extrakcie pre jednotlivé typy markantov. Experimenty sme vykonali s použitím nami implementovaného predspracovania a bez neho, aby sme mohli zhodnotiť účinok obnovy štruktúry papilárneho terénu. Referenčnými hodnotami pri testovaní boli markanty, ktoré boli ručne označené expertom, spoločne s ich tvarovým typom a relatívnymi frekvenciami.



V jednom odtlačku v priemere odhalíme 61 „pravých“ markantov

Priemerná úspešnosť extrakcie markantu:

$$\frac{M_{soft}}{M_{exp}}$$

V 1 100 odtlačkoch, kde boli rovnomerne zastúpené všetky prsty a všetky Level-1 daktyloskopické vzory sme v priemere rozpoznali 61 expertom označených markantov. Toto číslo vzhľadom na podmienku numerického štandardu daktyloskopickej identifikácie je postačujúce na objektívnu identifikáciu osoby. Priemerná úspešnosť rozpoznania markantov bola na úrovni 68,22 %. Na túto úroveň úspešnosti sme sa dopracovali používaním obrazového predspracovania, ktoré zvýšilo celkovú úroveň úspešnosti až o 49,5 %.

Použitá literatura

- [1] JAIN, A. K. – ROSS, A. A. – NANDAKUMAR, K. 2011. *Introduction to biometrics* [online]. New York : Springer Science+Business Media, 2009. 328 p. Dostupné na: <http://www.springer.com/computer/image+processing/book/978-0-387-77325-4>
- [2] MALTONI, D. et al. 2009. *Handbook of Fingerprint Recognition: Second Edition* [online]. London : Springer, 2009. 496 p. Dostupné na: <http://www.springer.com/computer/image+processing/book/978-1-84882-253-5>
- [3] THAI, R. 2003. *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction* [online]. University of Western Australia, 2003, 71 p. Dostupné na: <http://www.csse.uwa.edu.au/pk/studentprojects/raymondthai/RaymondThai.pdf>
- [4] FARINA, A. et al. 2008. *Fingerprint minutiae extraction from skeletonized binary images* [online]. In: Pattern Recognition, Vol. 32, p. 877 – 889. Dostupné na: <http://visgraph.cs.ust.hk/biometrics/Papers/FingerPrints/pr1999-05-01.pdf>
- [5] MAIO, D. – MALTONI, D. 1997. *Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints* [online]. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, Vol. 19, No. 1. Dostupné na: [http://vlsi.catholic.ac.kr/pds/data/research/bio/\[3\]direct%20grayscale%20minutiae%20detection%20in%20fingerprints%20.pdf](http://vlsi.catholic.ac.kr/pds/data/research/bio/[3]direct%20grayscale%20minutiae%20detection%20in%20fingerprints%20.pdf)
- [6] GOVINDARIJU, V. - SHI, Z. 2006. *A chaincode based scheme for fingerprint feature extraction* [online]. In: Pattern Recognition Letters. Vol. 27. p. 462 - 468. Dostupné na: <http://www.sciencedirect.com>
- [7] HWANG, H. et al. 2002. *Run Representation Based Minutiae Extraction in Fingerprint Image* [online]. In: MVA2002, IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Dec 11 -13, 2002, p. 64 - 67. Dostupné na: <http://b2.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/mva/proceedings/CommemorativeDVD/2002/papers/2002064.pdf>