

Ing. Pavol Marák

Autoreferát dizertačnej práce

OpenFinger: systém na daktyloskopickú autentifikáciu s GPU akceleráciou

na získanie vedecko-akademickej hodnosti

philosophiae doctor, Ph.D.

v doktorandskom študijnom programe: Aplikovaná informatika

v študijnom odbore: Informatika

Bratislava 2020

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Pavol Marák

Autoreferát dizertačnej práce

**OpenFinger: systém na daktyloskopickú
autentifikáciu s GPU akceleráciou**

na získanie vedecko-akademickej hodnosti

philosophiae doctor, PhD.

v doktorandskom študijnom programe:

Aplikovaná informatika

v študijnom odbore:

Informatika

Bratislava 2020

Dizertačná práca bola vypracovaná: v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave informatiky a matematiky FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Pavol Marák
Ústav informatiky a matematiky, FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. RNDr. Otokar Grošek, PhD.
Ústav informatiky a matematiky, FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Konzultant: Ing. Alexander Hambalík, PhD.
Ústav informatiky a matematiky, FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: doc. RNDr. Radoslav Beňuš, PhD.
Katedra antropológie, Prírodovedecká fakulta
Univerzita Komenského v Bratislave
Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava

plk. Ing. Zuzana Némethová, PhD.
Odbor prírodovedného skúmania a kriminalistických expertíz
Kriminalistický a expertízny ústav PZ
Sklabinská 1, 831 06 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o hod.

Na: Fakulte elektrotechniky a informatiky STU,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
v

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU v Bratislave

Obsah

Úvod	1
1 Ciele dizertačnej práce	2
2 Teória, návrh riešenia a použité metódy	4
2.1 Teoretické východiská	4
2.2 Súčasný stav	5
2.3 Navrhnuté riešenie a použité metódy	5
2.3.1 Hlavné moduly systému OpenFinger	6
2.3.2 Multimodálny režim	8
2.3.3 Knižnice modulu spracovania odtlačkov prstov	9
2.3.4 Knižnice modulu spracovania obrazcov žíl na prste	12
3 Dosiahnuté výsledky dizertačnej práce	13
3.1 Hlavné výsledky	13
3.1.1 Výsledky unimodálneho systému na báze odtlačkov prstov .	13
3.1.2 Výsledky unimodálneho systému na báze obrazcov žíl na prste	14
3.1.3 Výsledky multimodálneho systému	15
3.1.4 Výsledky modulu automatizovaného vyhodnotenia úspešnosti a rýchlosť rozpoznávania	15
3.1.5 Nami implementované sprievodné aplikácie	15
3.1.6 Výsledky komplexného testovania	17
3.2 Zhrnutie prínosov práce	23
4 Zoznam prác dizertanta	24
4.1 Publikované vedecké články a ich citácie	24
4.2 Príspevky na vedeckých konferenciách a ich citácie	26
4.3 Abstrakty	28
4.4 Prednášky a prezentácie	28
4.5 Riešené vedecké projekty	28
Literatúra	29
Summary	32

Úvod

Táto práca sa primárne zaobera problematikou využitia odtlačkov prstov v biometrickej autentifikácii. Hlavným výstupom práce je návrh a implementácia komplexného biometrického systému s názvom OpenFinger. Práca obsahuje v prvom rade teoretickú časť, v ktorej je poskytnutý prehľad východísk nášho výskumu, kde patrí taxonómia vlastností odtlačkov prstov, možnosti evaluácie biometrických systémov a teória automatizovaných daktuloskopických systémov. Teoretická časť obsahuje aj prehľad relevantných vedeckých prác mapujúcich súčasný stav v oblastiach, v ktorých naša práca dosahuje hlavné prínosy, kvôli vytvoreniu si obrazu aktuálneho stavu problematiky a existujúcich riešení. Týmto spôsobom je možné dať výsledky našej práce do kontrastu s výsledkami príbuzných prác predstavujúcich najznámejšie a najvyspelejšie riešenia v skúmanej oblasti. Praktická časť práce sa koncentruje na návrh riešenia s poukázaním na architektúru jednotlivých implementovaných knižníc systému OpenFinger. Každý modul a knižnica má svoju blokovú schému a zdokumentovaný princíp svojho fungovania spolu s matematickým pozadím a vizualizáciou dôležitých operácií. Boli vykonané experimenty vo viacerých testovacích scenároch zameraných na objektívne výhodnote- nie, jednak úspešnosti rozpoznávania identity, ako aj rýchlosťi spracovania údajov v klúčových procesoch. Prezentované výsledky sa opierajú predovšetkým o namerané ukazovatele, akými sú ROC, FAR, FRR, EER alebo distribúcie skóre podobnosti vzoriek, ktoré bolo vypočítané porovnávacími algoritmami. Práca je ukončená sumarizáciou najdôležitejších zistení, výsledkov a zhrnutím prínosov nášho výskumu.

Výsledky tejto práce obohacujú výskumnú oblasť biometrie o nové poznatky a softvérové riešenia obsahujúce nami navrhnuté, nové algoritmy pri spracovaní obrazov odtlačkov prstov ako aj rozpoznávaní ich vzorov. Hlavným výstupom práce je náš biometrický systém OpenFinger napísaný v jazyku C++. Tento systém je kolekciami viacerých softvérových knižníc určených na výkon jednotlivých fáz predspracovania odtlačkov prstov, extrakcie ich charakteristických vzorov a ich porovnávania. Obsahuje implementácie viacerých existujúcich a v literatúre technicky špecifikovaných algoritmov. Avšak, za významnejší prínos môžeme považovať viaceré implementácie algoritmov, ktoré boli prístupné v odbornej literatúre len v rovine teórie, bez dostupných technických špecifikácií alebo zdrojových kódov.

V implementačnej rovine sú najväčším prínosom vlastné, nami navrhnuté algoritmy a postupy na predspracovanie obrazu a metódy na detekciu a klasifikáciu charakteristických vzorov odtlačkov prstov s využitím konvolučnej neurónovej siete. Navyše, náš systém podporuje aj export údajov o odhalených charakteristických znakoch v medzinárodne akceptovanom elektronickom formáte ISO/IEC 19794-2. Značné úsilie v rámci práce bolo venované aj ďalším, publikáčne len minimálne pokrytým oblastiam, akými sú efektívne CPU/GPU implementácie výpočtovo náročných fáz spracovania obrazu (smerová mapa, adaptívny Gaborov filter alebo porovnávací algoritmus BOZORTH3), vytvorenie vlastného modulu na automatizované a konfigurovatelné výhodnotenie úspešnosti rozpoznávania identity a tiež rýchlosťi spracovania údajov na zvolenej databáze biometrických vzoriek.

V aktuálnej odbornej literatúre sme identifikovali aj nedostatok publikácií, ktoré sa venujú spojeniu odtlačkov prstov a obrazcov žíl na prstoch. Z toho dôvodu sme náš systém rozšírili o spracovanie obrazcov žíl na prstoch a dali mu týmto možnosť pracovať v multimodálnom režime, ktorý dosahuje vyššiu presnosť rozpoznávania v porovnaní s unimodálnym režimom. Nás systém využíva fúziu odtlačkov prstov a obrazcov žíl na úrovni porovnávania. Pri realizácii multimodálneho režimu sme preto implementovali a testovali viaceré stratégie normalizácie a fúzie skóre podobnosti vypočítaného jednotlivými porovnávacími algoritmami.

OpenFinger systém sprevádza viacero vlastných podporných aplikácií. Jedná sa najmä o aplikáciu na pokročilé testovanie a nastavovanie parametrov predspracovania obrazu a taktiež interaktívnu aplikáciu na zber trénovacích vzoriek pre konvolučnú neurónovú sieť. Na zdôraznenie prínosu tejto aplikácie, musíme na tomto mieste poznamenať, že v literatúre nebol v čase písania tejto práce dostupný softvér, ktorý by akýmkoľvek spôsobom umožňoval interaktívny a hromadný zber trénovacích vzoriek rôznych typov markantov odtlačkov prstov a ich export do formátu, ktorý je kompatibilný s požiadavkami konvolučnej neurónovej siete. Funkcionalita a možnosti využitia nášho biometrického systému sú ďalej demonštrované formou vlastnej klient-server aplikácie, ktorá poskytuje možnosť vzdialenej biometrickej autentifikácie v počítačovej sieti.

Celý systém je modulárny, vyvíjaný pre 64-bitový operačný systém Linux (vývoj prebiehal v distribúcii Debian a Manjaro) a má otvorený zdrojový kód, dostupný vo verejných GitHub repozitároch. Testovaný bol na školskom serveri vybavenom výkonným procesorom a grafickou kartou. OpenFinger poskytuje najmä biometrickú funkcionality s možnosťou využiť odtlačky prstov alebo obrazce žíl a taktiež aj ich kombináciu. Na druhej strane je vybavený celým radom expertných možností, ktoré podporujú uskutočnenie výskumných experimentov.

1 Ciele dizertačnej práce

V súlade s oficiálnym zadáním môžeme ciele našej práce rozdeliť do nasledujúcich oblastí spolu s vymenovaním jednotlivých čiastkových cielov.

Oblast' návrhu

1. Analýza a výber vhodných algoritmov spracovania odtlačkov prstov pre systém OpenFinger. Spracovanie odtlačkov prstov musí byť koncipované modulárne z dôvodu flexibility a ďalšieho rozširovania funkcionality. Základné moduly sú predspracovanie obrazu, extrakcia charakteristických vzorov a ich porovnanie.
2. Návrh sprievodných aplikácií, pomocou ktorých je možné experimentovať s jednotlivými modulmi.
3. Návrh rozšírenia systému OpenFinger o rozpoznávanie osoby pomocou obrazcov žíl na prste s cieľom vytvoriť vlastný multimodálny biometrický systém a preskúmať jeho možnosti.

4. Návrh nových, vlastných postupov a algoritmov systému OpenFinger, ktoré vylepšujú alebo odstraňujú nedostatky konvenčných prístupov predspracovania obrazu a predovšetkým extrakcie charakteristických vlastností odtlačkov prstov a taktiež obrazcov žíl na prstoch.
5. Zdokumentovanie architektúry systému OpenFinger formou blokových schém jeho vnútorných komponentov.
6. Návrh špecializovanej interaktívnej aplikácie na zber obrazových vzoriek pre potreby trénovania hlbokej konvolučnej neurónovej siete určenej na odhalovanie daktyloskopických markantov v obrazci odtlačku.
7. Špecifikácia požiadaviek, návrh a implementácia klient-server aplikácie na demonštráciu používania systému OpenFinger v praxi.

Oblast' implementácie

1. Špecifikácia softvérových/hardvérových požiadaviek a volba knižníc na spracovanie obrazu, využitie strojového učenia a GPU výpočty.
2. Implementácia komunikácie systému OpenFinger s USB snímačmi odtlačkov prstov, menovite so zariadeniami Suprema BioMini Slim, Futronic FS80 a Biometrika HiScan PRO.
3. Implementácia modulu predspracovania odtlačkov prstov ako aj obrazcov žíl na prste s využitím GPU akcelerácie a vlákien serverového procesora. Pri implementácii sa zameriať hlavne na adaptívne filtrovanie obrazu na báze efektívne implementovaného Gaborovho filtra, ktorý využije CPU a GPU výkon dedikovaného školského servera.
4. Implementácia modulu extrakcie daktyloskopických markantov v odtlačkoch prstov pomocou vlastného algoritmu založeného na analýze kostry odtlačku a špeciálne prispôsobenej konvolučnej neurónovej sieti schopnej klasifikácie vzorov priamo v pôvodnom nespracovanom obraze.
5. Implementácia interaktívnej aplikácie na zber a úpravu trénovacích vzoriek (obrázky daktyloskopických markantov) pre konvolučnú neurónovú sieť.
6. Implementácia exportu extrahovaných charakteristických údajov z odtlačku prsta do medzinárodne akceptovaného formátu ISO/IEC 19794-2.
7. Implementácia extrakcie príznakov v obrazci žíl na prste. Konkrétnie, získanie SIFT a SURF deskriptorov. Využije sa voľne dostupná knižnica OpenCV.
8. Implementácia porovnávania daktyloskopických markantov, ktoré sa musí viedieť vysporiadať sa s rotáciou, posunom a deformáciou obrazca papilárnych línií. Využije sa komerčný algoritmus Suprema BioMini SDK a open-source algoritmus BOZORTH3.
9. Implementácia porovnávacieho algoritmu pre obrazce žíl na prste. Na porovnanie SIFT a SURF deskriptorov sa využije voľne dostupná knižnica OpenCV.

10. Implementácia modulu fúzie odtlačkov prstov a obrazcov žíl na prste. Tento modul zabezpečí fungovanie systému OpenFinger v multimodálnom režime.
11. Implementácia modulu na testovanie úspešnosti rozpoznávania zvlášť v unimodálnom a multimodálnom režime fungovania. Výstupom modulu budú namerané ukazovateľ presnosti aj rýchlosť rozpoznávania na zvolenej databáze biometrických vzoriek.

Oblast' testovania a zhodnotenia výsledkov

1. Vizualizácia výstupov kľúčových operácií spracovania (najmä smerová mapa, mapa kvality, prefiltrované obrazy pomocou Gaborovho filtra, kostra odtlačku a atribúty odhalených daktyloskopických markantov).
2. Testovanie úspešnosti rozpoznávania osôb na rôznych dostupných databázach. Použijú sa ROC, FAR, FRR, EER a iné relevantné metriky.
3. Testovanie a porovnanie úspešnosti rozpoznávania systému v unimodálnom a multimodálnom režime.
4. Testovanie rýchlosť rozpoznávania osôb pri rôznych konfiguráciách knižníc a scenároch použitia (CPU vlákna, GPU podpora, rôzne rozmery obrazu).
5. Demonštrácia použitia vlastných expertných aplikácií na testovanie jednotlivých modulov a knižníc systému OpenFinger.
6. Porovnanie dosiahnutých výsledkov s výsledkami v relevantnej literatúre.
7. Experimentálne nasadenie systému OpenFinger v sietovom prostredí formou klient-server aplikácie.

2 Teória, návrh riešenia a použité metódy

2.1 Teoretické východiská

V teoretickej fáze našej práce, v kapitole 2.1.1, sme sa zamerali na analýzu 3 hlavných úrovni vlastností odtlačkov prstov [1, 2, 7]. Dôraz bol kladený hlavne na tzv. Level-2 znaky, ktoré sme sa rozhodli využiť ako primárne charakteristické znaky odtlačku. Ich presné odhalenie a porovnanie je jadrom nášho systému. Následne sme v kapitole 2.1.2 v stručnosti priblížili hlavné fázy fungovania automatizovaného daktyloskopického systému [3, 5, 7, 12]. V kapitole 2.1.3 dokumentujeme aj dôležitý aspekt vyhodnocovania úspešnosti biometrického systému a opisujeme najznámejšie metriky, ktoré sme aj my využili vo fáze testovania [4, 7, 17].

Teoretické východiská našej práce uzatvára hlbší popis kľúčových fáz spracovania odtlačkov prstov, kde v kapitole 2.2.2 analyzujeme najdôležitejšie operácie týkajúce sa predspracovania obrazu [7, 15, 16, 18, 35], v kapitole 2.2.3 podávame prehľad známych konvenčných metód extrakcie charakteristických znakov odtlačkov prstov [6, 13, 14, 21–23], a v kapitole 2.2.4 sa v krátkosti venujeme aj porovnávaniu odtlačkov prstov [20].

2.2 Súčasný stav

V prípravnej a analytickej fáze nášho výskumu sme zozbierali relevantnú literatúru mapujúcu súčasný stav v skúmanej problematike formou vybraných vedeckých prác zameraných na riešenie problémov úzko súvisiacich s našou prácou. Predovšetkým, podávame prehľad existujúcich algoritmov adaptívneho predspracovania odtlačkov prstov (kapitola 2.3.1), v ktorom sa koncentrujeme na opis existujúcich techník výpočtu smerovej [12,24–26] a frekvenčnej mapy odtlačku [7,29,30] a následne najdôležitejšej techniky, filtrovania obrazu pomocou adaptívneho Gaborovho filtra a jeho existujúcich modifikácií [5,7,12,19,27,28].

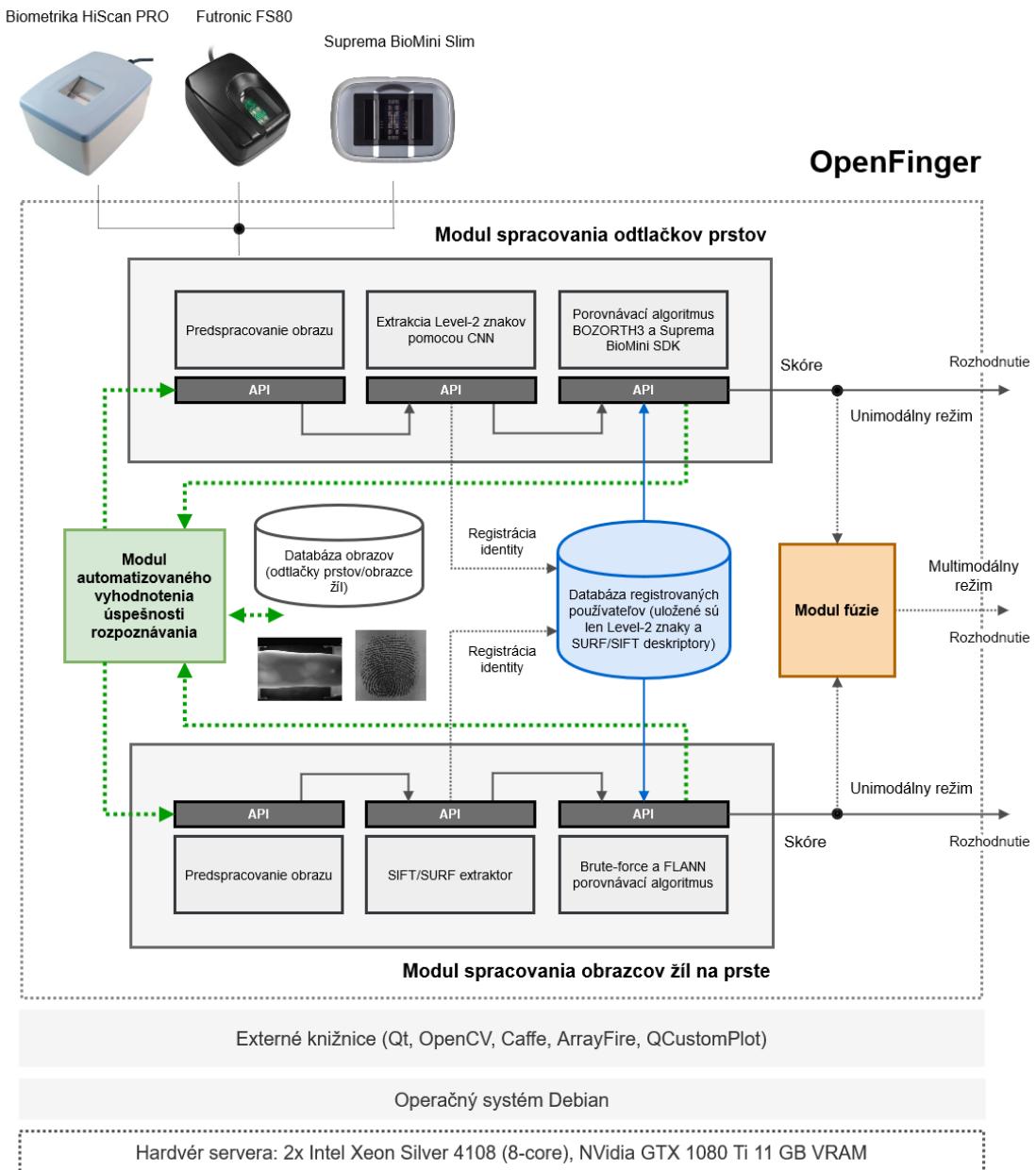
Sprostredkúvame aj základné poznatky z oblasti konvolučných neurónových sietí, nakoľko sme sa rozhodli pre ich využitie pri klasifikácii daktyloskopických markantov v našom systéme. Aby sme mohli dať naše navrhnuté riešenie do kontrastu s publikovanými riešeniami, uvádzame aj prehľad vedeckých prác orientovaných na oblasť využitia rôznorodých architektúr neurónových sietí pri klasifikácii daktyloskopických markantov (kapitola 2.3.2). Venujeme sa systémom na báze modifikovanej siete Inception v4 [31], MENet [32], MinutiaeNet [33] a FingerNet [34].

Nakoľko sme náš systém rozšírili aj o možnosť spracovania a rozpoznávania identity pomocou obrazcov žíl na prste, uvádzame taktiež širšie súvislosti multimodálnych systémov a vedeckých článkov [36–39], v ktorých sú odprezentované aktuálne možnosti súčasného využitia odtlačkov prstov a obrazcov žíl na prstoch v rámci multimodálneho systému (kapitola 2.3.3). Podľa získaných informácií z daných zdrojov je zrejmé, že táto oblasť sa neustále rozvíja a stále sa hľadajú riešenia na množstvo otvorených výskumných problémov. Z toho dôvodu sme sa rozhodli ponúknúť vlastné riešenie biometrického systému schopného využiť kombináciu odtlačkov prstov a obrazcov žíl na prstoch s dokumentáciou všetkých technických detailov a demonštrovaním rozličných foriem fúzie.

2.3 Navrhnuté riešenie a použité metódy

Po zozbieraní potrebných teoretických poznatkov a určení výskumných cieľov a postupov, sme zrealizovali vlastný výskum, ktorý pozostával z návrhovej (kapitola 3.1), implementačnej (kapitola 3.2) a testovacej fázy spolu s vyhodnotením výsledkov realizovaných experimentov (kapitola 3.3).

Náš biometrický systém OpenFinger je tvorený ekosystémom viacerých dynamických softvérových knižníc (biometrické jadro) a sprievodných modulov a aplikácií, ktoré sme implementovali na podporu a rozšírenie jeho funkcionality. Kompletná architektúra systému OpenFinger je znázornená na obrázku 1.



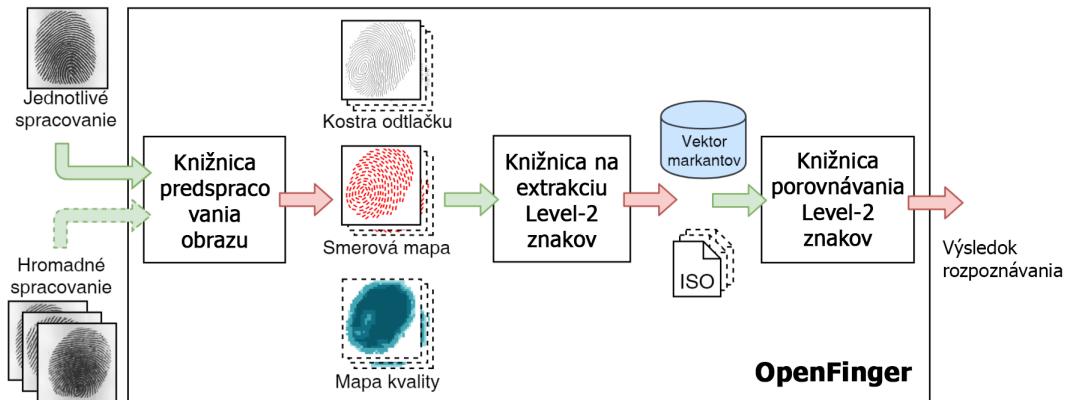
Obr. 1: Architektúra nášho biometrického systému OpenFinger

Všetky moduly systému sú naprogramované v jazyku C/C++ s využitím voľne dostupných knižníc Qt (tvorba dynamických knižníc, tvorba GUI, súborový systém, vlákna, sieťová komunikácia, signály), OpenCV (manipulácia s obrazom, filtrovanie, SIFT/SURF extraktory), Caffe (konvolučné neurónové siete), ArrayFire (GPU implementácie algoritmov) a QCustomPlot (vizualizácia údajov).

2.3.1 Hlavné moduly systému OpenFinger

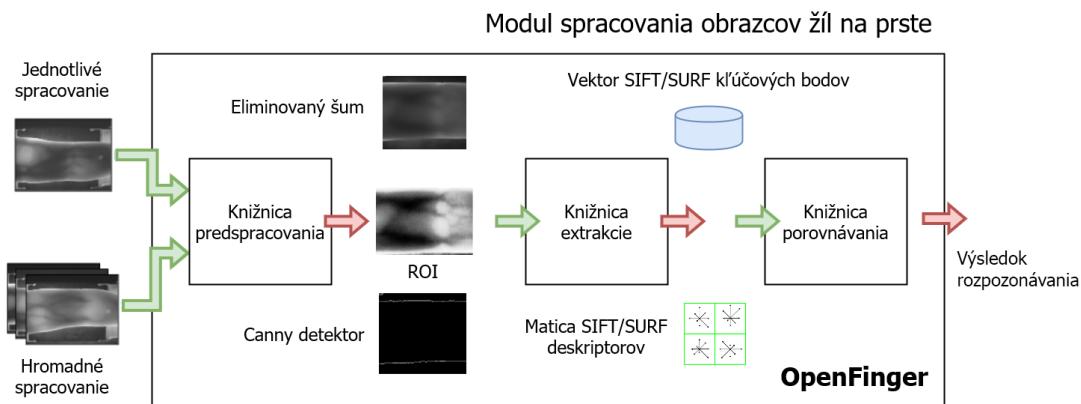
Biometrický modul spracovania odtlačkov prstov, ktorý predstavuje kompletný samostatne fungujúci unimodálny systém (obrázok 2). Pozostáva z 3 knižníc na predspracovanie obrazu (jadrom je adaptívny Gaborov filter), extrakciu Level-2 dakyloskopických markantov a ich porovnávanie. Modul sa začal vyvíjať ako súčasť práce [8].

Modul spracovania odtlačkov prstov



Obr. 2: Biometrický modul na spracovanie odtlačkov prstov

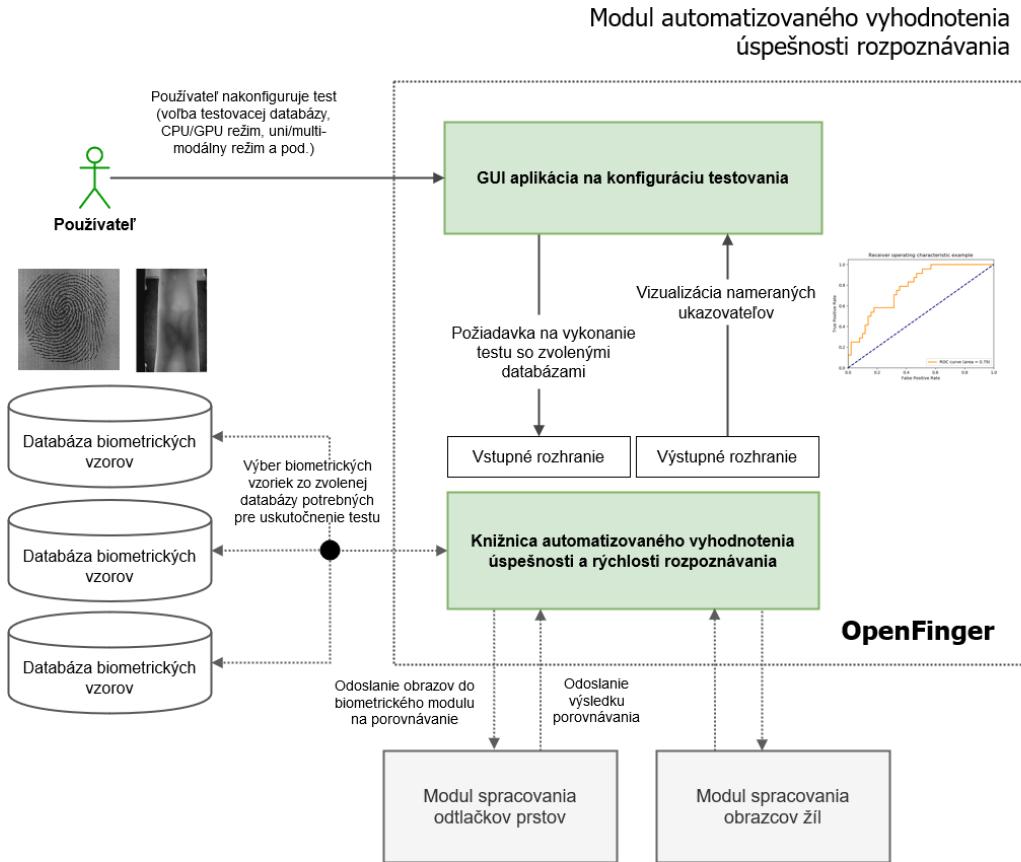
Biometrický modul spracovania obrazcov žíl na prste, ktorý predstavuje kompletnejšie samostatne fungujúci unimodálny systém (obrázok 3). Taktiež pozozáva z 3 knižníc na predspracovanie obrazu (jadrom je extrakcia oblasti prsta a filtrovanie Gaborovým filtrom), extrakciu SIFT a SURF deskriptorov a ich porovnávanie. Základy modulu boli položené a d'alej rozvíjané v prácach [9–11].



Obr. 3: Biometrický modul na spracovanie obrazcov žíl na prste

Modul vyhodnotenia úspešnosti a rýchlosť rozpoznávania, ktorý predstavuje samostatnú dynamickú knižnicu rozšírenú o GUI aplikáciu umožňujúcu komplexné testovanie unimodálneho aj multimodálneho režimu systému (obrázok 4). Ponúka možnosť voľby vlastnej biometrickej testovacej databázy, konfigurácie parametrov vnútorných operácií biometrických modulov ako aj vizualizáciu nameraných ukazovateľov.

Modul fúzie, ktorý je samostatnou dynamickou knižnicou spájajúcou obidva biometrické moduly a vytvára tak multimodálny biometrický systém. Modul vykonáva fúziu na úrovni porovnávania charakteristických znakov. Sú v ňom implementované viaceré techniky pre normalizáciu a fúziu skóre podobnosti dvoch biometrických vzoriek.



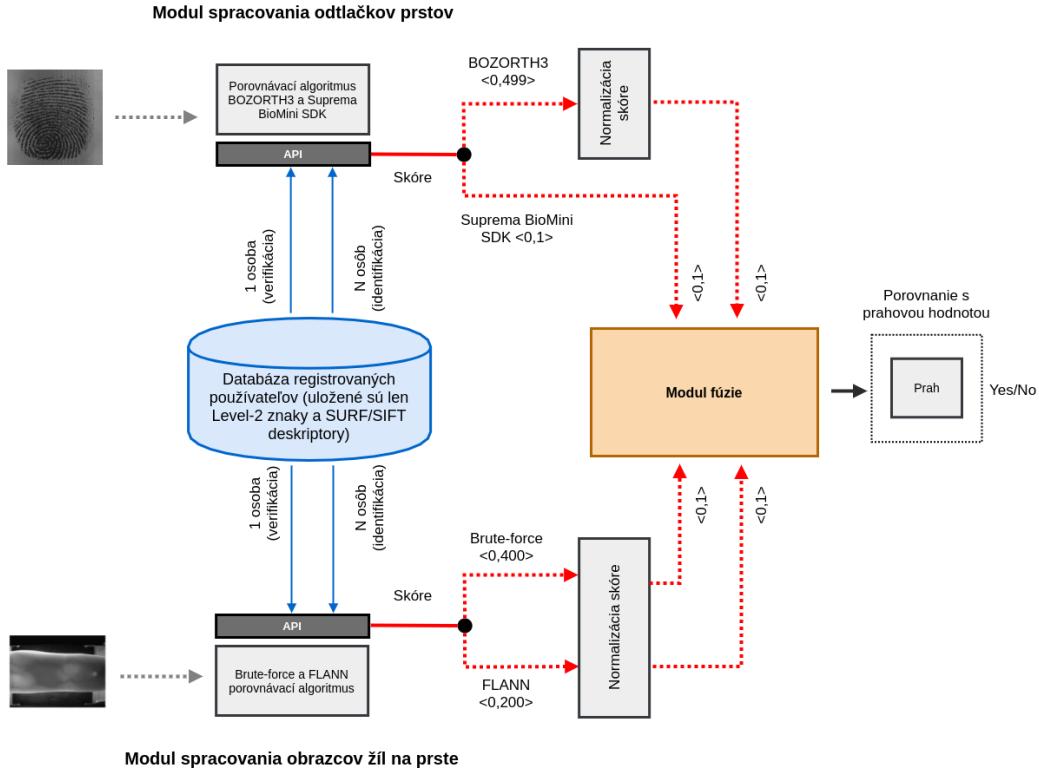
Obr. 4: Modul výhodnotenia úspešnosti a rýchlosť rozpoznávania

2.3.2 Multimodálny režim

Multimodálny režim činnosti nášho systému je zabezpečovaný modulom fúzie. Zvoľili sme použitie fúzie na úrovni porovnávania charakteristických znakov. To znamená, že k rozpoznaniu osoby dôjde v prípade súčasnej zhody Level-2 znakov odtlačku prsta a SIFT/SURF deskriptorov obrazca žíl na prste. Jednotlivé skóre podobnosti vypočítané porovnávacími algoritmami sú následne normalizované do rozsahu $\langle 0, 1 \rangle$, zlúčené do jedinej hodnoty a následne porovnané s rozhodovacím prahom. Fúzia v systéme OpenFinger je znázornená na obrázku 5. V rámci multimodálneho režimu sme implementovali a testovali viaceré techniky normalizácie a fúzie aplikované na skóre podobnosti biometrických vzoriek (viď tabuľka 1).

Tabuľka 1: Implementované a testované známe techniky normalizácie a fúzie v multimodálnom režime systému OpenFinger

Techniky normalizácie	Techniky fúzie
Double sigmoid	Min
Hyperbolický tangens	Max
Z-score	Hyperbolický tangens
Min-Max	Sum
	Product
	Mean

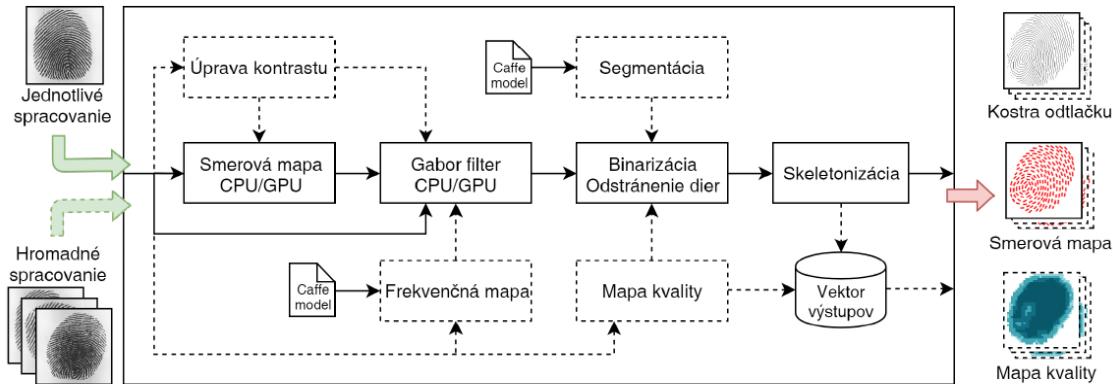


Obr. 5: Fúzia v multimodálnom režime systému OpenFinger

2.3.3 Knižnice modulu spracovania odtlačkov prstov

Rozpoznávanie identity pomocou odtlačkov prstov je proces, ktorý sme rozdelili do 3 samostatných a vzájomne komunikujúcich knižníc.

Knižnica predspracovania obrazu je určená na odstránenie faktorov, ktoré znižujú kvalitu obrazu, a obnovu pôvodného vzoru odtlačku s cieľom zvýrazniť Level-2 znaky. Architektúra knižnice s naznačením hlavných operácií predspracovania je zachytená blokovou schémou na obrázku 6.



Obr. 6: Architektúra knižnice predspracovania obrazu odtlačkov prstov

Hlavné fázy predspracovania odtlačku:

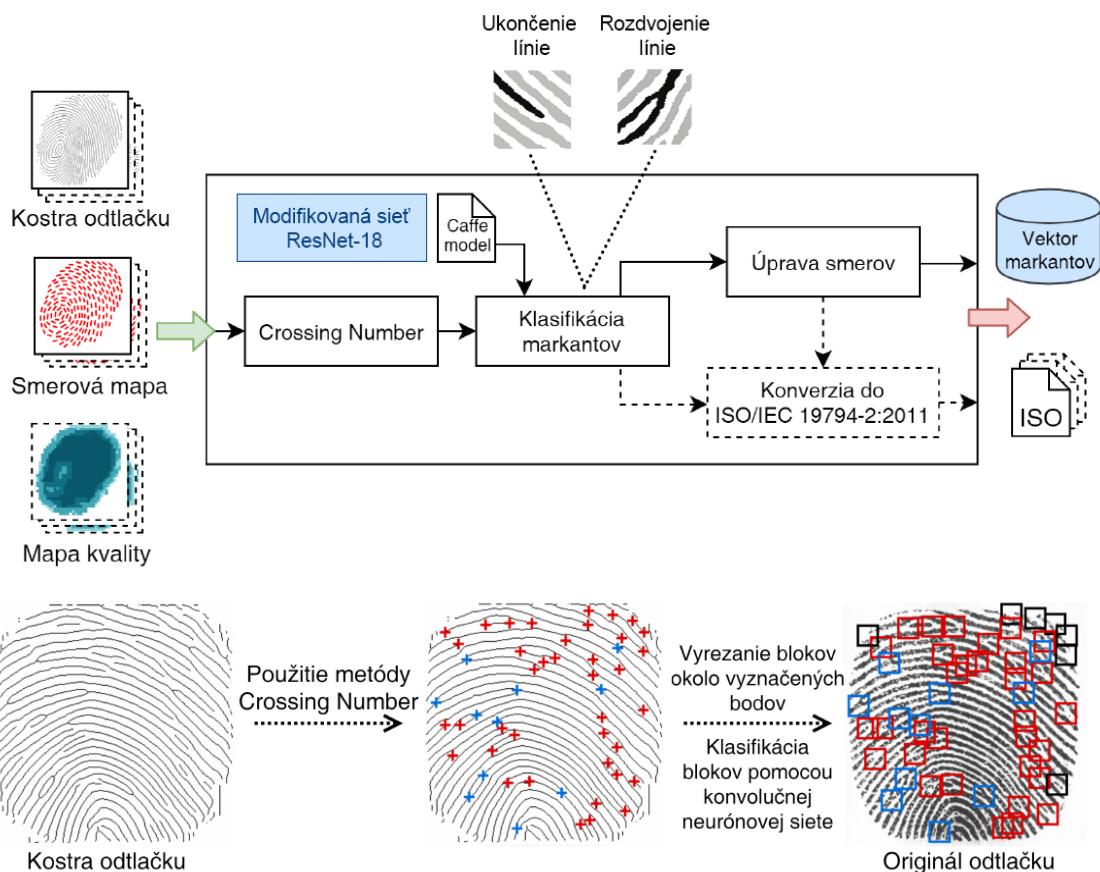
1. *Segmentácia odtlačku prsta* je určená na lokalizáciu oblasti v obraze, ktorá obsahuje daktyloskopický vzor. Vďaka segmentácii pracujeme len s potrebou časťou obrazu a minimalizujeme tak čas spracovania a chyby v dôsledku tvorby falošných vzorov. Na segmentáciu sme použili upravenú neurónovú sieť AlexNet, pre ktorú sme manuálne vyzbierali trénovacie vzorky. Sieť bola po natrénovaní schopná klasifikovať obrazové bloky s rozmerom 19×19 do 2 tried: využiteľný vzor odtlačku a pozadie (nepotrebná časť obrazu). Výsledkom bola maska odtlačku, ktorú sme následne vylepsili pomocou odstránenia falošných dier, ktoré vznikli v dôsledku nepresnosti segmentácie.
2. *Mapa kvality* slúži na zakódovanie zón v odtlačku prsta podľa kvality resp. zreteľnosti vzoru papilárnych línii. Na tento účel sme využili algoritmus MINDTCT z biometrického balíku NBIS [35], ktorý malým obrazovým blokom (8×8) priradí kvalitu v rozsahu 0-4, kde 0 predstavuje najnižšiu a 4 najvyššiu kvalitu obrazu. Mapa kvality sa dá využiť pri extrakcii Level-2 znakov na určenie spoľahlivosti ich odhalenia.
3. *Smerová mapa* vyjadruje lokálne smery papilárnych línii v odtlačku prsta. Je nevyhnutným krokom pre aplikovanie Gaborovho filtra. Na výpočet smerovej mapy sme použili známu techniku založenú na odhadе smeru v obraze pomocou gradientov vypočítaných aplikáciou Sobelovych operátorov. Kvôli vyššej presnosti sme vypočítali smer pre každý obrazový bod odtlačku a smery sme následne vyhľadili použitím Gaussovho filtra.
4. *Adaptívny Gaborov filter* je klúčovou operáciou predspracovania a má signifikantný vplyv na úspešnosť celého systému. Jeho úlohou je obnova pôvodnej štruktúry vzoru odtlačku, t.j. smeru, frekvencie a tvaru papilárnych línii. Gaborov filter využíva výpočtovo náročný matematický aparát a preto sme vytvorili jeho multi-vláknovú (pomocou knižnice Qt) ako aj GPU implementáciu (pomocou knižnice ArrayFire). Filtrovanie prebieha po jednotlivých obrazových bodoch pomocou konvolúcie, v rámci ktorej je na pôvodný obraz aplikovaný osobitný Gaborov filter (alebo aj kernel), nastavený podľa lokálnej orientácie a frekvencie papilárnych línii. Vykonali sme experimenty, kde sme testovali rôzne konfigurácie filtra a na základe nich sme dospeli k optimálnym hodnotám parametrov, ktoré sú uvedené v tabuľke 2.

Tabuľka 2: Optimálne parametre adaptívneho Gaborovho filtra zistené počas experimentov a platné pre obraz v rozlíšení 500 PPI (λ - vlnová dĺžka filtra, σ - smerodajná odchýlka Gaussovej krivky regulujúca silu filtrovania, γ - pomer strán filtra a ψ - fázový posun filtra)

Parameter	Veľkosť filtra	λ	σ	γ	ψ
Optimálna hodnota	31×31	9	3	1	0

Knižnica na extrakciu Level-2 znakov je určená na detekciu a klasifikáciu Level-2 znakov. Rozlišujeme dva základné tvary Level-2 znakov: ukončenie a rozdrobenie papilárnej línie. Hlavnou myšlienkovou bolo navrhnutie nového algoritmu,

ktorý bude odhalovať Level-2 znaky priamo v originále odtlačku, t.j. v pôvodnom neskreslenom vzore. Náš navrhnutý algoritmus v prvej fáze analyzuje kostru odtlačku prsta, v ktorej pomocou techniky Crossing Number [13] odhalí prvotné pozície Level-2 znakov. Vznikne tak množina potenciálnych Level-2 znakov, ktoré musia byť potvrdené neurónovou sieťou. Následne sa pomocou modifikovanej konvolučnej neurónovej siete ResNet-18 klasifikujú obrazové bloky, ktoré boli extrahované z pôvodného nespracovaného obrazu odtlačku z pozícii určených potenciálnymi Level-2 znakmi. Sieť ResNet-18 odhalí falosoňe bloky a pri skutočných Level-2 znakoch určí ich tvarový typ. Následne sa určia ďalšie atribúty odhalených Level-2 znakov ako sú ich smer, poloha a kvalita. Na obrázku 7 môžeme vidieť schému fungovania knižnice extrakcie a princíp odhalovania Level-2 znakov.

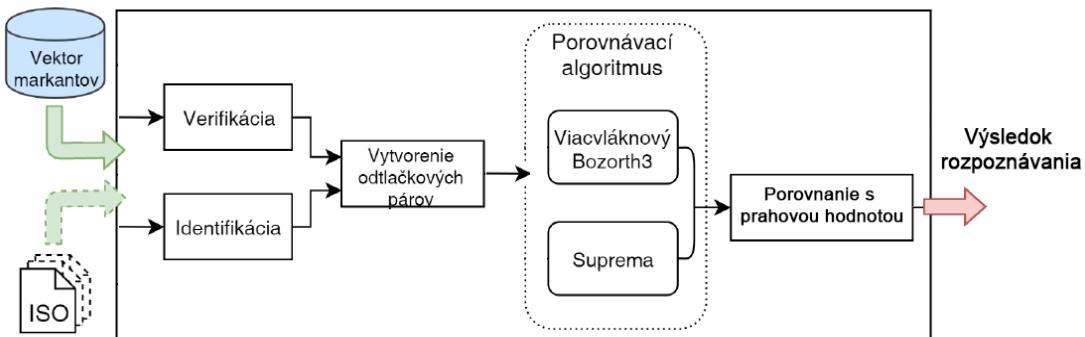


Obr. 7: Architektúra knižnice extrakcie Level-2 znakov (hore) a vizualizácia princípu odhalovania Level-2 znakov pomocou analýzy kostry odtlačku a klasifikácie obrazových blokov pôvodného obrazu pomocou upravenej neurónovej siete ResNet-18 (dole)

Výsledky extrakcie môžu byť voliteľne exportované do medzinárodného elektronického formátu na výmenu biometrických informácií o odtlačkoch prstov ISO/IEC 19794-2. Možnosti extrakcie sme doplnili aj o výpočet tzv. tepelnej mapy extrakcie, v ktorej je klasifikovaný každý obrazový bod odtlačku a neurónová sieť určí, či sa jedná o Level-2 znak a danému rozhodnutiu priradí mieru spoľahlivosti. Vizualizáciou všetkých klasifikácií v rámci jedného obrázku získame prehľad o tom,

v ktorých oblastiach neurónová sieť odhalila markanty a ako sa vysporiadala s nekvalitnými oblasťami.

Knižnica na porovnávanie Level-2 znakov je určená na výpočet skóre podobnosti dvoch odtlačkov prstov pomocou odhalených Level-2 znakov. V našej práci sme zvolili a testovali 2 algoritmy porovnávania: Suprema BioMini SDK (komerčný uzavorený softvér) a BOZORTH3 (open-source) [20]. Knižnica dokáže pomocou nich vykonať verifikáciu a identifikáciu identity. Nakol'ko bol pôvodný porovnávací algoritmus BOZORTH3 značne výpočtovo náročný, vytvorili sme jeho multi-vláknovú implementáciu, ktorá v čase testovania efektívne využívala 32-vlákien dvoch Intel Xeon Silver 4108 procesorov nášho servera. Štruktúra knižnice porovnávania je znázornená na obrázku 8.



Obr. 8: Architektúra knižnice porovnávania Level-2 znakov

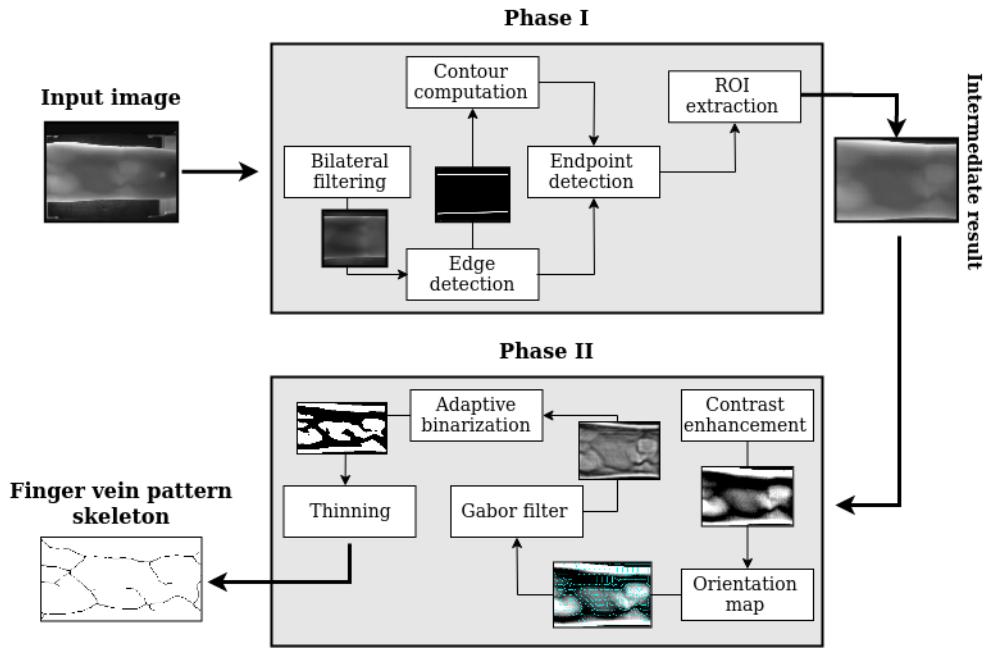
2.3.4 Knižnice modulu spracovania obrazcov žíl na prste

Systém OpenFinger bol rozšírený o modul spracovania obrazcov žíl, aby mohol fungovať v multimodálnom režime spolu s odtlačkami prstov. Podobne ako pri odtlačkoch prstov, aj tento modul bol rozdelený do 3 samostatných a vzájomne prepojených knižníc, ktoré vykonávajú čiastkové operácie. Knižnice a operácie, ktoré sú v rámci nich vykonané sú uvedené v nasledujúcim prehľade.

Knižnica predspracovania obrazu pracuje v dvoch krokoch [10]. Prvý krok je zodpovedný za lokalizáciu prsta v obrazze. Na lokalizáciu sú využité techniky ako bilaterálny filter, detekcia hrán Cannyho detektorom, hľadanie kontúr a určenie ohraňujúceho obdĺžnika, ktorý definuje tú časť obrazu, v ktorej sa nachádza obrazec žíl. V druhom kroku sa zvýrazňujú charakteristické rysy obrazca žíl pomocou Gaborovho filtra. Procesy predspracovania sú vizualizované blokovou schémou na obrázku 9.

Knižnica extrakcie deskriptorov je určená na odhalenie SIFT a SURF deskriptorov [40,41], ktoré predstavujú charakteristické obrazové príznaky odolné voči rotácii a zmenám veľkosti. Na implementáciu sme použili knižnicu OpenCV.

Knižnica porovnávania deskriptorov slúži na porovnanie SIFT a SURF deskriptorov algoritmami Brute-force a FLANN z knižnice OpenCV.



Obr. 9: Architektúra knižnice predspracovania obrazcov žíl na prste

Tento modul sme doplnili o expertnú aplikáciu na testovanie predspracovania. Pomocou nej je možné upravovať hodnoty parametrov jednotlivých operácií predspracovania a vidieť ich účinok na výsledný predspracovaný obraz.

3 Dosiahnuté výsledky dizertačnej práce

Táto časť obsahuje zoznam najdôležitejších výstupov našej práce a summarizáciu prínosov nášho výskumu v oblasti biometrie založenej na odtlačkoch prstov a obrazcoch žíl na prste.

3.1 Hlavné výsledky

V tejto časti uvádzame prehľad hlavných výsledkov našej práce v teoretickej a praktickej rovine.

3.1.1 Výsledky unimodálneho systému na báze odtlačkov prstov

- Vytvorili sme modulárny systém zložený z 3 knižníc. Táto forma implementácie umožňuje možnosti jednoduchej výmeny vnútorných komponentov a ľahkú integráciu do softvéru tretích strán. Knižnice poskytujú API rozhranie pre získanie vstupného obrazu, nastavenie parametrov, Qt signály s výsledkami jednotlivých operácií a diagnostickými informáciami.
- Všetky naše knižnice majú API rozhranie pre expertný režim fungovania, v ktorom umožňujú používateľovi konfigurovať všetky parametre algoritmov

a získavať podrobné diagnostické výstupy a výstupy vnútorných operácií v obrazovej podobe.

- Podpora rôznych modelov snímačov odtlačkov prstov: Suprema BioMini Slim, Futronic FS80 a Biometrika HiScan PRO, ktoré snímajú obraz v rozlíšení 500 a 1 000 PPI. Snímače sú zobrazené na obrázku 10.



Obr. 10: Snímače Suprema BioMini Slim, Futronic FS80 a Biometrika HiScan PRO

- Navrhli sme vlastný postup predspracovania obrazu tvorený výberom z existujúcich a vlastných prístupov. Určili sme najvhodnejšie algoritmy a prepojili ich v poradí, v ktorom transformujeme pôvodný obraz až do podoby kostry odtlačku.
- Vlastná paralelná multi-vláknová a GPU implementácia adaptívneho Gaborovho filtra. Obraz filtrujeme Gaborovym filtrom zstrojeným pre každý obrazový bod zvlášť s využitím jeho lokálneho smeru a frekvencie. Tým dosahujeme silný filtrovací účinok, ktorý výrazne obnovuje kvalitu daktyloskopického vzoru aj v oblastiach so silným zakrivením papilárnych línií.
- Návrh a implementácia nového postupu pri extrakcii Level-2 znakov, ktorý využíva kombináciu analýzy kostry odtlačku a klasifikáciu obrazových blokov pomocou modifikovanej konvolučnej neurónovej siete ResNet-18.
- Využitie mapy kvality pri extrakcii Level-2 znakov. Pomocou nej vieme podeliť Level-2 znakom spoľahlivosť odhalenia a ignorovať tak falosné tvary vznikajúce v oblastiach s nedostatočnou kvalitou obrazu.
- Možnosť exportu odhalených Level-2 znakov do medzinárodného elektrotechnického formátu ISO/IEC 19794-2.
- Vlastná implementácia multi-vláknovej verzie algoritmu BOZORTH3, ktorý je určený na porovnávanie Level-2 znakov.

3.1.2 Výsledky unimodálneho systému na báze obrazcov žíl na prste

- Vytvorili sme modulárny systém zložený z 3 knižníc. Knižnice majú API rozhranie pre získanie vstupného obrazu, nastavenie parametrov, Qt signály s výsledkami jednotlivých operácií a diagnostickými informáciami.
- Implementácia nekonvenčného systému predspracovania obrazu, ktorý vykonáva extrakciu oblasti prsta doplnenú o zvýraznenie charakteristických rysov pomocou Gaborovho filtra. Predspracovaný obraz sme spojili so SURF a SIFT extraktorom, ktorý vyhľadáva charakteristické deskriptory.

3.1.3 Výsledky multimodálneho systému

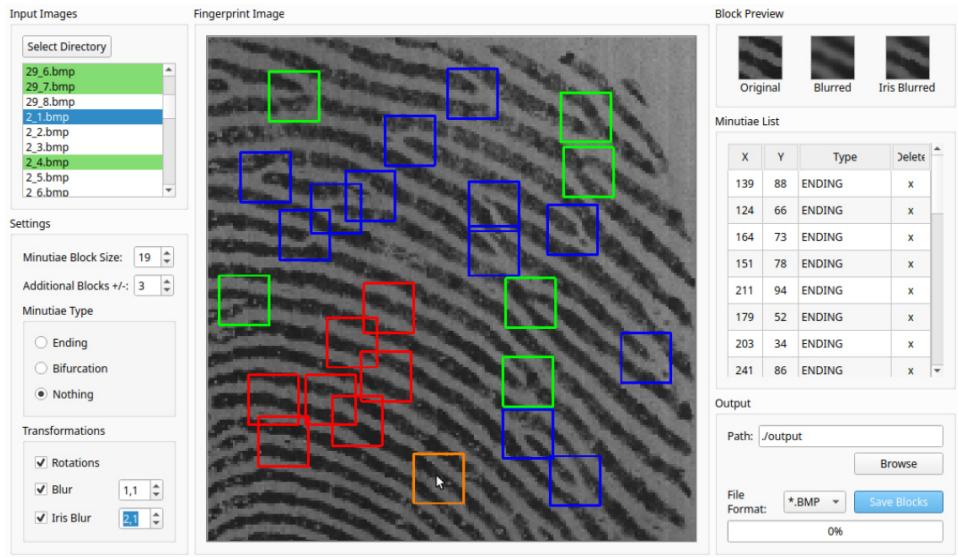
- Vytvorenie multimodálnej biometrickej databázy a modulu fúzie, ktorý spája odtlačky prstov a obrazce žíl vo fáze porovnávania. Multimodálny režim nám umožnil vykonať experimenty, ktorých výsledky rozširujú poznatky v tejto oblasti biometrie, pretože existuje len obmedzený počet publikácií zameraných na zlúčenie odtlačkov prstov a obrazcov žíl využívajúce nami zvolenú formu fúzie.
- Implementácia viacerých stratégí normalizácie a fúzie, ktoré sú aplikované na skóre podobnosti biometrických vzoriek vypočítané porovnávacími algoritmami.

3.1.4 Výsledky modulu automatizovaného vyhodnotenia úspešnosti a rýchlosťi rozpoznávania

- Pomocou tohto modulu môžeme uskutočňovať testovanie, ladenie a diagnostiku celého systému, jednoduchšie odhalovať príčiny nízkej úspešnosti pri rozpoznávaní, identifikovať časovo náročné operácie a hľadať optimálne parametre algoritmov.
- Je možné zvoliť si testovanú biometrickú databázu a režim, v akom systém bude fungovať (unimodálny/multimodálny). Týmto spôsobom vieme skúmať náš systém pri obrazoch variabilnej kvality a pôvodu.
- Modul vie vyčísliť viaceré štandardné ukazovatele úspešnosti rozpoznávania identity. Sú to najmä histogramy pre tzv. impostor/genuine skóre, FAR, FRR, EER a ROC. Pomocou nich vieme objektívne zhodnotiť kvalitu nášho systému a porovnať ho s inými riešeniami.
- Modul dokáže taktiež vyhodnotiť ukazovatele rýchlosťi spracovania údajov v jednotlivých pracovných fázach knižníc, časy trvania operácií na CPU/GPU alebo závislosť dĺžky trvania zvolenej operácie od rozmeru vstupného obrazu.

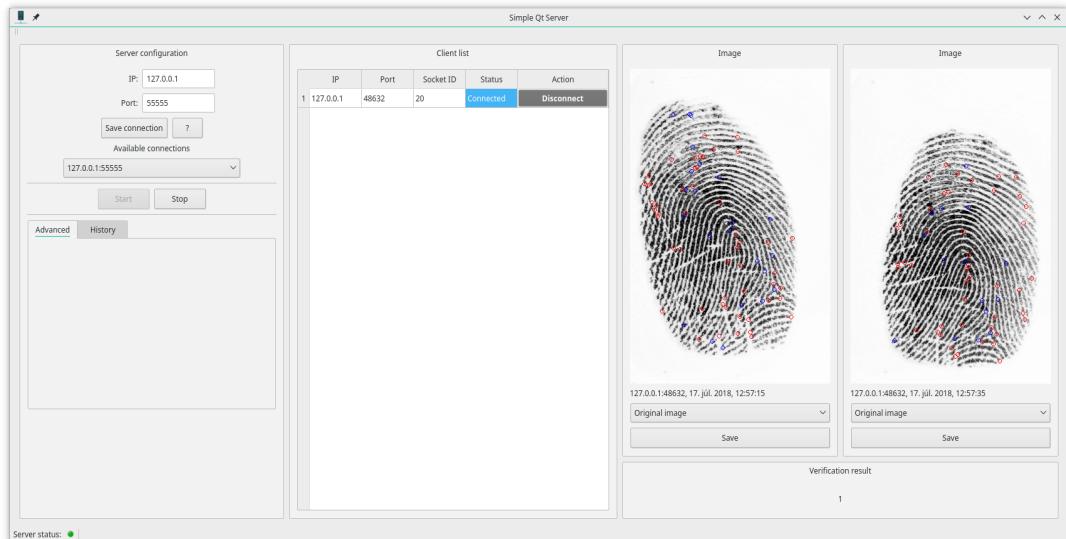
3.1.5 Nami implementované sprievodné aplikácie

- OF Sandbox je GUI aplikácia podporujúca experimenty za účelom hľadania optimálnych parametrov predspracovania odtlačkov prstov a vizualizuje jeho čiastkové výsledky.
- OF Sample Collector je interaktívna GUI aplikácia, pomocou ktorej dokážeme zbierať a upravovať vzorky Level-2 znakov odtlačkov na účely trénovania konvolučnej neurónovej siete určenej na ich klasifikáciu. V literatúre sme sa počas výskumu nestretli s obdobným riešením a preto vnímame túto aplikáciu ako nástroj na zefektívnenie práce aj pre širšiu výskumnú komunitu. Používateľské rozhranie aplikácie vidíme na obrázku 11.



Obr. 11: Aplikácia OF Sample Collector na získavanie vzoriek Level-2 znakov

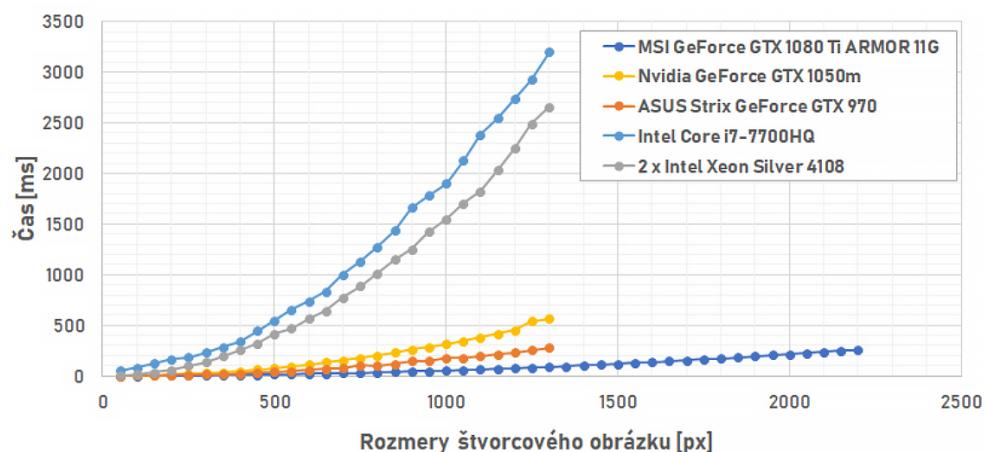
- GUI aplikácia na testovanie parametrov a vizualizáciu výsledkov predspracovania obrazcov žil na prste.
- GUI aplikácia modulu automatizovaného vyhodnotenia rozpoznávania, ktorá slúži na intuitívne konfigurovanie testov a zobrazovanie ukazovateľov v grafickej podobe.
- Klient-server aplikácia, ktorú sme implementovali s cieľom ukázať možnosti praktického využitia systému OpenFinger v počítačovej sieti. OpenFinger je v tomto prípade nasadený na strane výkonného servera a slúži na biometrickú autentifikáciu pripojených klientov. Prenos je chránený protokolom TLS/SSL. Na obrázku 12 vidíme serverovú časť aplikácie.



Obr. 12: Klient-server aplikácia na demonštráciu autentifikácie v počítačovej sieti pomocou systému OpenFinger (obrázok zachytáva serverovú aplikáciu)

3.1.6 Výsledky komplexného testovania

- Testovali sme rýchlosť GPU implementácie výpočtu smerovej mapy na viačerých hardvérových platformách a rôznych rozmeroch obrazu. Dospeli sme k záveru, že GPU implementácia smerovej mapy je vhodná pre obrazy od rozmeru 250×250 . V daných situáciach dosahuje niekoľkonásobne kratší výpočtový čas v porovnaní s 1-vláknou CPU implementáciou.
- Porovnali sme vlastnú CPU a GPU implementáciu Gaborovho filtra pri filtrovaní obrazov rôznych rozmerov. Na testy sme použili viacero grafických kariet a procesorov rôznych výkonností. GPU implementácie sa preukázali ako najrýchlejsie pre všetky prakticky využiteľné rozmery obrazu.



Obr. 13: Porovnanie GPU a CPU implementácie Gaborovho filtra

- Testovali sme rýchlosť vlastnej multi-vláknovej implementácie Gaborovho filtra na serveri s dvomi procesormi Intel Xeon Silver 4108 (spolu 32 vlákien) a pri veľkosti obrazu 300×300 . Pridanie vlákien zvýšilo rýchlosť spracovania, konkrétnie 32 využitých vlákien dosiahlo 9-krát kratší čas oproti 1 vláknu.
- Vykonali sme testovanie rýchlosťi vlastnej multi-vláknovej modifikácie porovnávacieho algoritmu BOZORTH3. Pôvodná, verejne dostupná distribúcia algoritmu využíva 1 vlákno. Vykonali sme experiment, v ktorom sme pomocou algoritmu BOZORTH3 porovnali 7 750 odtlačkových párov. Zistili sme, že najlepší výkon bol dosiahnutý pri počte 32 vlákien (32 súčasne porovnávaných odtlačkov prstov), kde sme zaznamenali 11-násobné zrýchlenie.

Systém OpenFinger bol podrobnený komplexnému testovaniu v 3 rôznych scenároch určených na zhodnotenie globálnej úspešnosti a rýchlosťi porovnávania v oboch unimodálnych a multimodálnom režime. Všetky testy prebehli na školskom serveri, ktorého parametre sú uvedené v tabuľke 3. Na testovanie bol použitý náš modul automatizovanej evaluácie.

Tabuľka 3: Softvérová a hardvérová konfigurácia školského servera

Operačný systém	Debian 10 64-bit
CPU	2x Intel Xeon Silver 4108 (32 vlákien), 1.8 GHz
RAM	2 x 16GB DDR4
GPU	Nvidia GeForce GTX 1080 Ti 11GB GDDR5X
Základná doska	SuperMicro X11DPi-NT
Úložisko	WDC WD2500AAJS-6 250 GB

Scenár A: výsledky testovania unimodálneho systému na báze odtlačkov prstov

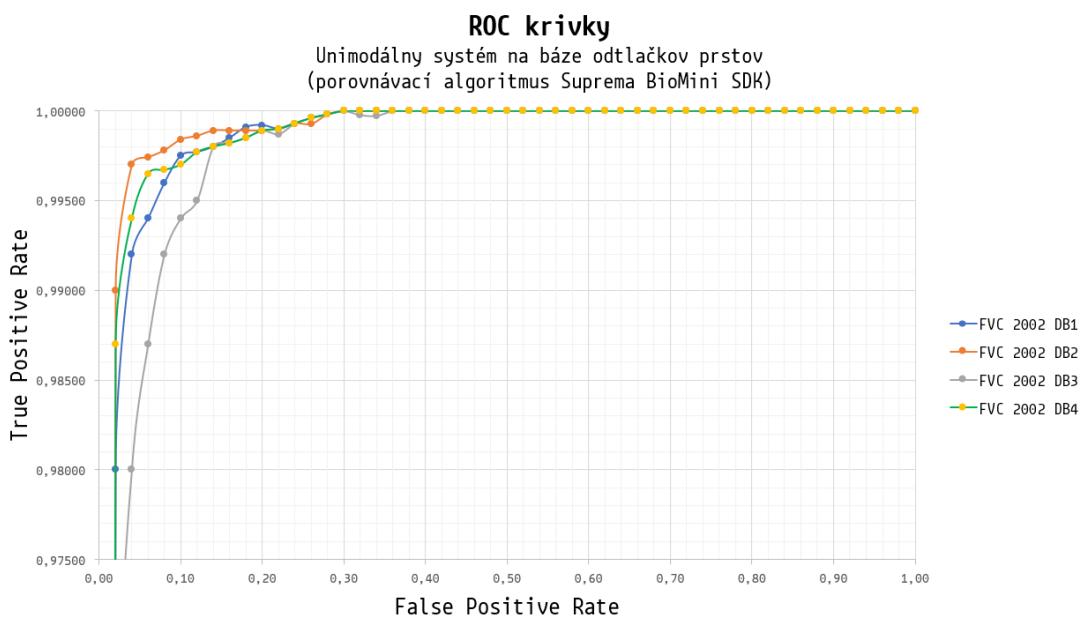
Presnosť rozpoznávania bola globálne zhodnotená rozsiahlym testovaním na 4 verejne dostupných databázach FVC 2002 (každá databáza zosnímaná iným typom senzora). Presnosť rozpoznávania sme vyhodnotili pomocou ukazovateľa EER pre obidva porovnávacie algoritmy, Suprema BioMini SDK (EER_s) a BOZORTH3 (EER_b). V tabuľke 4 vidíme výsledky pre všetky databázy a taktiež aj použitú prahovú hodnotu, ktorú muselo skóre podobnosti odtlačkov prstov prekročiť, aby mohli byť systémom považované za totožné. Najvyššiu úspešnosť sme zaznamenali na databáze FVC 2002 DB2 a algoritmus Suprema BioMini SDK s hodnotou EER na úrovni približne 0.51 %.

Tabuľka 4: Unimodálny systém na báze odtlačkov prstov: hodnoty ukazovateľa EER namerané pre všetky FVC 2002 databázy a obidva porovnávacie algoritmy Suprema BioMini SDK a BOZORTH3

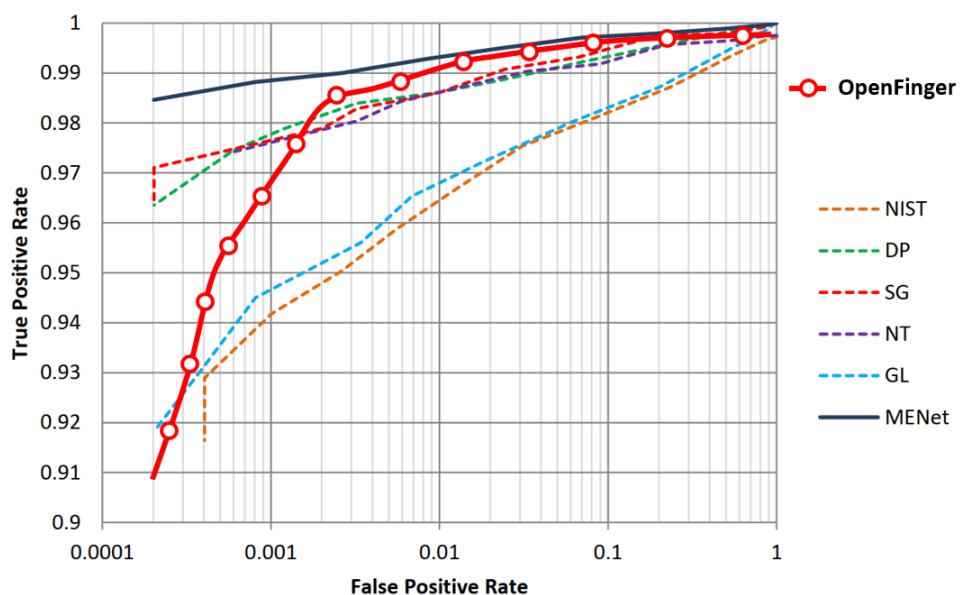
Databáza	EER_s (v %)	t_s	EER_b (v %)	t_b
FVC 2002 DB1	0.97	0.12	2.41	61
FVC 2002 DB2	0.51	0.26	1.41	53
FVC 2002 DB3	1.77	0.11	3.02	51
FVC 2002 DB4	0.67	0.11	1.99	50

V priemere sme dosiahli EER na úrovni oscilujúcej okolo 1 %, čo vnímame ako veľmi dobrý výsledok. Algoritmus Suprema BioMini SDK sa ukázal ako presnejší a preto sme ho ponechali ako predvolený v ďalších experimentoch a jeho prahovú hodnotu pre skóre sme stanovili na úroveň 0.12 (produkuje skóre v rozsahu $\langle 0, 1 \rangle$). Výsledky sú demonštrované aj pomocou ROC kriviek na obrázku 14. Lepší systém je ten, ktorý dosahuje väčšiu plochu pod ROC krivkou.

Náš systém sme porovnali pomocou ROC kriviek so systémom MENet, ktorý tak tiež využíva neurónovú sieť vo fáze odhalovania Level-2 znakov, a ďalšími verejne známymi otvorenými a komerčnými algoritmami (obrázok 15). Všetky systémy boli porovnané na databáze FVC 2002 DB1. Porovnaním s nimi vieme prehlásiti, že náš systém dosahuje porovnateľné výsledky s najlepšími známymi algoritmami.



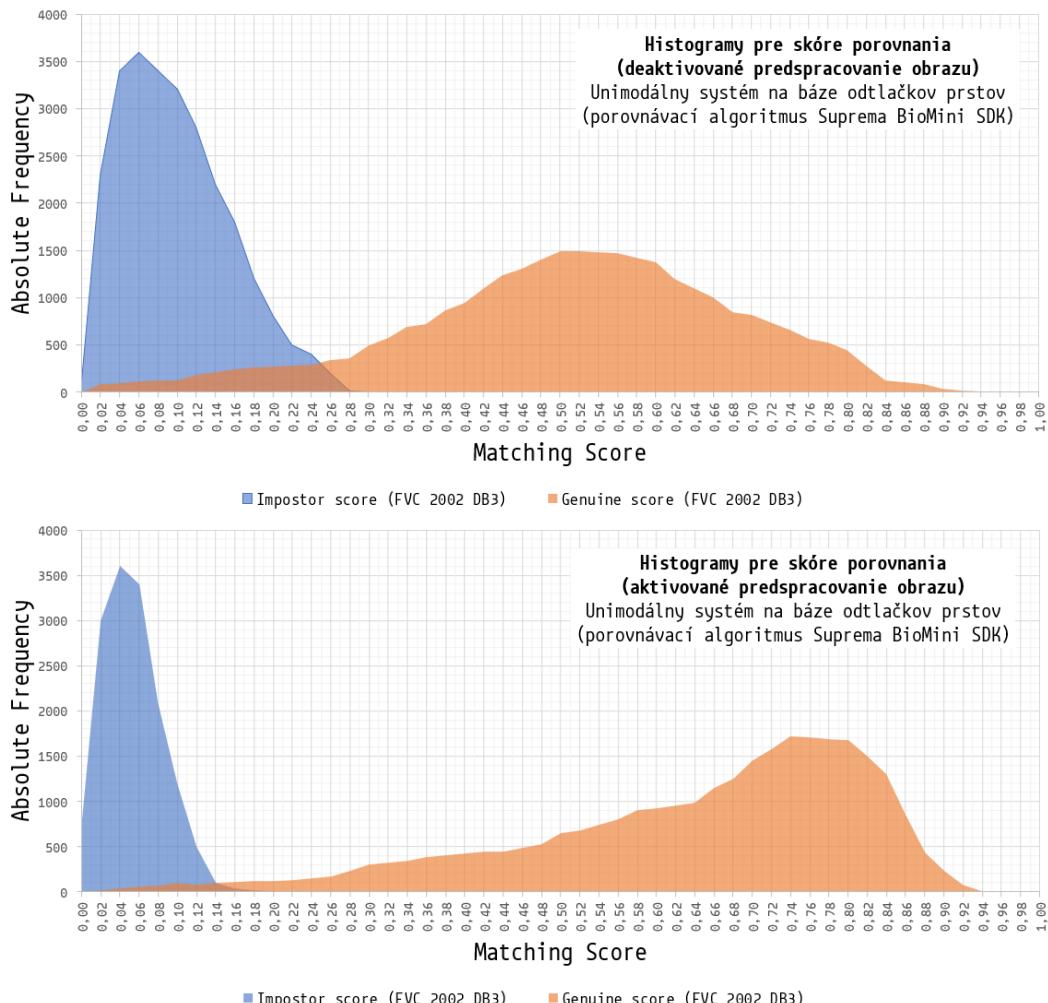
Obr. 14: Unimodálny systém na báze odtlačkov prstov: ROC krivky pre všetky FVC 2002 databázy



Obr. 15: Unimodálny systém na báze odtlačkov prstov: porovnanie nášho systému so systémom MENet a ďalšími známymi algoritmami na databáze FVC 2002 DB1 pomocou ROC kriviek (NIST - algoritmus *MINDTCT*, DP - *CrossMatch Digital Persona*, SG - *SecuGen SDK*, NT - *Neurotechnology SDK*, GL - *Griaule Biometrics SDK*)

Špecifickým problémom odtlačkov prstov je ich nízka kvalita. Osobitne nás preto zaujímalo, akú úspešnosť dosahuje OpenFinger pri práci s kvalitatívne nevyhovujúcimi odtlačkami prstov a aký účinok prináša knižnica na predspracovanie obrázku. Vykonali sme experiment na databáze FVC 2002 DB3, v ktorom sme sa zamerali na vyhodnotenie histogramov pre tzv. genuine a impostor skóre, ktoré

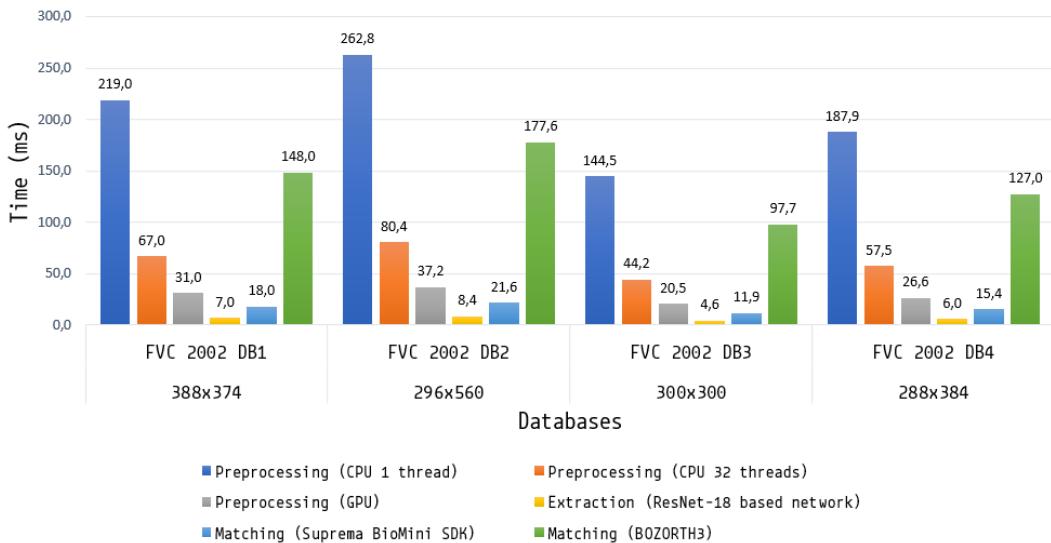
objektívne vypovedá o schopnosti systému rozlišovať odtlačky pochádzajúce z rovnakého prsta a odlišné odtlačky. Vyčíslili sme zvlášť histogramy bez použitia predspracovania a histogramy s použitím predspracovania. Výsledok jasne prezradil, že naše predspracovanie, na čele ktorého stojí adaptívny Gaborov filter má výrazne priaznivý účinok a vrcholy histogramov sú od seba vzdialenejšie a ich prekryv je menší (čo je želaný stav). Jednotlivé histogramy vidíme na obrázku 16.



Obr. 16: Unimodálny systém na báze odtlačkov prstov: histogramy pre skóre porovnania pri deaktivovanom (hore) a aktivovanom (dole) predspracovaní obrazu

Taktiež sme venovali pozornosť aj testovaniu rýchlosťi. V grafe na obrázku 17 vidíme priemerný čas trvania jednotlivých fáz spracovania odtlačku na všetkých FVC 2002 databázach (uvedený je aj rozmer obrazu). Uvedený je priemerný čas spracovania jedného obrázku. Za zmienku stojí najmä pozorovanie, že GPU implementácia predspracovania dosiahla v priemere 7-krát kratší čas ako CPU implementácia (1 vlákno) a porovnávanie odtlačkov algoritmom Suprema BioMini SDK trvalo v priemere 8-krát kratšie ako BOZORTH3 (1 vlákno).

Priemerný čas trvania operácií unimodálneho systému na báze odtlačkov prstov



Obr. 17: Unimodálny systém na báze odtlačkov prstov: priemerný čas trvania čiastkových fáz rozpoznávania na všetkých FVC 2002 databázach

Vykonali sme aj test, kde sme sa zamerali len na vyhodnotenie rýchlosťi predspracovania, pričom sme porovnali implementáciu s využitím 1 vlákna, 32 vláklei a GPU. Rýchlosť sme merali pre rôzne rozmery obrazu. Zistením bolo, že do rozmeru obrazu 300×300 bola najrýchlejšia multi-vláknová implementácia využívajúca 32 vláklei. Väčšie obrazy boli najrýchlejšie spracované na GPU, s akceleráciou až 14-krát oproti 32-vláknam pri rozmere obrazu $1\,000 \times 1\,000$.

Scenár B: výsledky testovania unimodálneho systému na báze obrazcov žíl na prste

Modul rozpoznávania pomocou obrazcov žíl bol testovaný na databáze SDUMLA-HMT v závislosti od typu použitého extraktora (SIFT alebo SURF) a taktiež od typu použitého predspracovania (aktivovaný/deaktivovaný Gaborov filter). Porovnávacím algoritmom bol Brute-force, ktorý už podľa predbežných výsledkov prekonával FLANN algoritmus. Tabuľka 5 uvádzajú namerané chyby EER. Označenie EER_{gon} je chyba EER nameraná pre systém s aktivovaným Gaborovým filtrom v rámci predspracovania, naopak EER_{goff} je chyba s deaktivovaným filtrom. Najlepšou konfiguráciou modulu bolo použitie SURF extraktora s aktivovaným Gaborovým filtrom, ktorá dosiahla chybu EER na úrovni 0.06 %.

Tabuľka 5: Unimodálny systém na báze obrazcov žíl: hodnoty EER namerané na databáze SDUMLA-HMT pre rôzne druhy predspracovania a extraktorov

Typ extraktora	EER_{gon} (v %)	EER_{goff} (v %)
SIFT	4.43	6.10
SURF	0.06	0.75

Predspracovanie jedného obrazu z databázy SDUMLA-HMT trvalo na školskom serveri v priemere 37 ms. Celkové spracovanie jedného obrazu trvalo v priemere 95 ms. Veľkosť obrazca žil v databáze SDUMLA-HMT je 320×240 .

Scenár C: výsledky testovania multimodálneho systému

Spojenie odtlačkov prstov a obrazcov žil na prste prinieslo efekt v podobe zvýšenej presnosti rozpoznávania. Multimodálny systém využíval na strane modulu odtlačkov prstov porovnávací algoritmus Suprema BioMini SDK a na strane modulu obrazcov žil bol ako extraktor použitý SIFT aj SURF a porovnávací algoritmus Brute-force. Na to, aby mohol OpenFinger pracovať v multimodálnom režime, musíme vykonať najprv normalizáciu a následne fúziu skóre. Spomedzi experimentov sa ako najlepšia stratégia normalizácie skóre ukázala metóda založená na hyperbolickom tangense a preto bola v tomto testovacom scenári použitá. Tabuľka 6 dokumentuje nameraný ukazovateľ EER pre multimodálny režim činnosti a viačeré stratégie fúzie skóre. Označenie $EER_{multiSIFT}$ je chyba EER pre konfiguráciu systému so SIFT extraktorom a $EER_{multiSURF}$ je chyba EER pre konfiguráciu so SURF extraktorom. Identita osoby bola v experimente reprezentovaná dvojicou obrazov, t.j. odtlačok prsta (z databázy FVC 2002 DB2) a obrazec žil (z databázy SDUMLA-HMT). Najlepší výsledok dosiahol extraktor SURF a fúzia pomocou metódy *Sum*. Chyba bola v tomto prípade na úrovni 0.03 %.

Tabuľka 6: Multimodálny systém: EER ukazovateľ pre rôzne stratégie fúzie skóre

Ukazovateľ EER (%)	Stratégia fúzie					
	Min	Max	Sum	Product	TanH	Mean
$EER_{multiSIFT}$	4.67	4.03	2.11	4.49	2.79	2.12
$EER_{multiSURF}$	4.68	0.32	0.03	3.66	0.22	0.19

Najúspešnejší variant pre konfiguráciu celého multimodálneho systému je spracovanie odtlačkov prstov s aktivovaným predspracovaním a použitím porovnávacieho algoritmu Suprema BioMini SDK a spracovanie obrazcov žil s aktivovaným predspracovaním a využitím SURF extraktora a porovnávacieho algoritmu Brute-force. Najlepšou metódou normalizácie bol hyperbolický tangens. Najlepšia metóda fúzie bola metóda *Sum*. Tabuľka 7 sumarizuje najlepšie výsledky rozpoznávania (prostredníctvom ukazovateľa EER) dosiahnuté v unimodálnom a multimodálnom režime činnosti.

Tabuľka 7: Porovnanie úspešnosti rozpoznávania v unimodálnom a multimodálnom režime (v tabuľke sú uvedené najlepšie zaznamenané výsledky)

Režim systému OpenFinger	Databáza	EER (%)
Unimodálny (odtlačky prstov)	FVC 2002 DB2	0.51
Unimodálny (obrazce žil)	SDUMLA-HMT	0.06
Multimodálny (odtlačky + obrazce žil)	FVC 2002 DB2, SDUMLA-HMT	0.03

Multimodálny systém dosiahal vyššiu presnosť ($EER = 0.03$) ako obidva unimodálne systémy a týmto nás výskum preukázal vhodnosť kombinácie odtlačkov prstov s iným typom biometrického znaku na vytvorenie presného autentifikačného systému. Potvrdila sa tak aj správnosť našej softvérovej implementácie multimodálneho režimu činnosti.

3.2 Zhrnutie prínosov práce

V práci sme definovali nás výskumný problém a ním je potreba spoľahlivého a modulárneho softvérového systému na daktyloskopickú autentifikáciu s otvoreným zdrojovým kódom. Otvorené nekomerčné riešenia tohto druhu a rozsahu chýbajú v tejto oblasti biometrie, čo obmedzuje široké vedecké skúmanie. Sústredili sme sa na analýzu všetkých dôležitých teoretických aspektov, z ktorých nás výskum vychádza a zmapovali sme súčasný stav v skúmanej problematike.

Vzhľadom na stanovené ciele práce sme pripravili návrh komplexného ekosystému dynamických knižníc, primárne určeného pre operačný systém Linux, ktorý nesie názov OpenFinger. Vykonáva autentifikáciu v unimodálnom aj multimodálnom režime pomocou odtlačkov prstov a obrazcov žíl na prste. V návrhovej fáze sme formou blokových schém špecifikovali architektúru systému na úrovni modulov a vnútorných komponentov jednotlivých knižníc. Koncentrovali sme sa na vysvetlenie použitých metód, ich matematického pozadia, ako aj poskytnutie prehľadnej technickej a používateľskej dokumentácie. Odtlačky prstov aj obrazce žíl na prste boli spracované v 3 fázach: predspracovanie obrazu, extrakcia charakteristických znakov a ich porovnanie. Každá fáza bola implementovaná ako samostatná knižnica.

OpenFinger okrem biometrických knižníc obsahuje viacero modulov a aplikácií, ktoré z neho vytvárajú súbor biometrických nástrojov, ktorý dovoľuje získať obraz z troch typov snímačov odtlačkov prstov, vykonávať biometrickú fúziu, vypočítať svoju úspešnosť a rýchlosť na rôznych databázach a pri rôznych nastaveniach parametrov, interaktívne zbierať trénovacie vzorky pre konvolučnú neurónovú sieť, hĺbkovo testovať algoritmy predspracovania a taktiež demonštrovať jeho schopnosti autentifikácie v počítačovej sieti formou klient-server aplikácie.

Za prínosy našej práce považujeme najmä implementáciu celého systému v danej forme a rozsahu, vytvorenie nových postupov v oblasti predspracovania obrazu (adaptívny Gaborov filter) a extrakcie daktyloskopických markantov priamo z nespracovaného originálu pomocou kombinácie topologickej analýzy kostry odtlačku a klasifikácie obrazových zón v odtlačku pomocou konvolučnej neurónovej siete. Prínosom je aj vytvorenie multimodálneho režimu činnosti, v ktorom sme spojili stále málo preskúmanú kombináciu odtlačkov prstov a obrazcov žíl na prste.

V práci sme zadefinovali viaceré testovacie scenáre, v ktorých sme preverili funkcionality, úspešnosť a rýchlosť rozpoznávania identity v rôznych situáciách, pri rôznych nastaveniach a biometrických databázach. Výsledky sme zdokumentovali formou ukazovateľov používaných na hodnotenie biometrických systémov, ako sú ROC, FAR, FRR, EER a histogramy pre tzv. genuine a impostor skóre.

Hlavným záverom bolo zistenie, že systém OpenFinger svojimi vlastnosťami a funkcionalitou pokrýva mnohé chýbajúce riešenia v príslušnej výskumnej oblasti. Prezentuje množstvo nových prístupov, pri ktorých je poskytnutý ich technologický opis ako aj implementácia formou otvoreného zdrojového kódu. Ako jeden z mála, OpenFinger spája odtlačky prstov a obrazce žíl a ponúka zvýšenú presnosť autentifikácie a vďaka jeho schopnosti využiť GPU akceleráciu, zvláda aj výpočtovo náročné úlohy v priateľnom čase. OpenFinger pozostatáva zo samostatne využiteľných knižníc, ktoré v sebe spájajú implementácie existujúcich metód z oblasti biometrie a málo preskúmaných techník, ktoré boli v literatúre prezentované väčšinou len v teoretickej rovine bez technickej dokumentácie a softvérovej implementácie. Je obohatený taktiež o vlastné, nové postupy určené na pokročilé predspracovanie obrazu a extrakciu znakov jedinečnosti vzorov odtlačkov prstov aj obrazcov žíl. OpenFinger všetky tieto postupy integruje inovatívnym, v dostupných zdrojoch doposiaľ nepublikovaným spôsobom v rámci jedného riešenia s otvoreným zdrojovým kódom.

4 Zoznam prác dizertanta

V tejto sekcií uvádzame všetky naše publikačné výstupy a účasti na riešení vedeckých projektov.

4.1 Publikované vedecké články a ich citácie

Vedecké práce v časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

KOVAČ, I. - MARÁK, P.: Openfinger: Towards a combination of discriminative power of fingerprints and finger vein patterns in multimodal biometric system. In: *Tatra Mountains Mathematical Publications*. Vol. 76, 2020, No. 2. ISSN 1210-3195. DOI: 10.2478/tmmp-2020-0012. (*Práca bola prijatá na publikovanie*).

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: Fingerprint recognition system using artificial neural network as feature extractor: Design and performance evaluation. In: *Tatra Mountains Mathematical Publications*. Vol. 67, 2016, No. 3, s. 117-134. ISSN 1210-3195. DOI: 10.1515/tmmp-2016-0035. (*Článok má 15 registrovaných citácií uvedených v zozname nižšie*).

Tento článok bol citovaný v nasledujúcich publikáciách (podľa Google Scholar a ResearchGate):

1. WIN, K. N. et al.: Fingerprint classification and identification algorithms for criminal investigation: A survey. In: *Future Generation Computer Systems*, Vol. 110, 2020, s. 758-771. DOI: 10.1016/j.future.2019.10.019.
2. COSTEA, N. E. - MOISI, E. V.: Fingerprint Authentication for Budget Application. In: *15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, 2019. DOI: 10.1109/EMES.2019.8795100.

3. BONAZZA, P.: Multimodal biometric security system based on vision, dedicated to access control. *PhD. Thesis*, Université Bourgogne Franche-Comté, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.10019.81448.
4. MESSERSCHMIDT, M. - PLEVA, M.: Biometric Systems Utilizing Neural Networks in the Authentication for E-learning Platforms. In: *17th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, 2019. DOI: 10.1109/ICETA48886.2019.9040132.
5. TEREIKOVSKY, I. A. et al.: The Procedure for the Determination of Structural Parameters of a Convolutional Neural Network to Fingerprint Recognition. In: *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 97, 2019, No. 8.
6. ALANSSARI, A. - WAHHAB, H.I.: Development of the Identification System by Fingerprints. In: *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, Vol. 18, 2018, No. 3, s. 22–30. DOI: 10.14529/ctcr180303.
7. ALANSSARI, A. et al.: Development of the Subsystem for Fingerprints Image Analysis. In: *Science Prospects*, Vol. 108, 2018, No. 9.
8. SABRI, A. Q. - ALFRED, R.: Evaluation of Artificial Neural Network in Classifying Human Gender Based on Odour. In: *Computational Science and Technology CCST 2017*, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2018, s. 324–337. DOI: 10.1007/978-981-10-8276-4_31.
9. NOOR, K. et al.: Performance Enhancement of Fingerprint Recognition System using Classifiers. In: *IEEE Access* PP(99):1-1, Vol. 4, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2879272.
10. RAJU, A. S.: A Survey on Unimodal, Multimodal Biometrics and Its Fusion Techniques. In: *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7, 2018, No. 4.36, s. 689-695. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.36.24224.
11. HOUFI, S. E. et al.: 3D objects classification based on P recogniser. In: *International Journal of Computational Vision and Robotics*, Vol. 8, 2018, No. 6. DOI: 10.1504/IJCVR.2018.095591.
12. NAHAR, P. et al.: Fingerprint Classification Using Deep Neural Network Model ResNet50. In: *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, Vol. 5, 2018, No. 4.
13. TOSKOVA, A. et al.: Neural Networks in the Intelligent Educational Space. In: *ANNA 2018: Advances in Neural Networks and Applications*, 2018.
14. TOSKOV, B. - TOSKOVA, A.: Neural Networks For Personalization Through Biometric Data. In: *Computer Science and Communications*, Vol. 7, 2018, No. 1, s. 100-106.

15. SUDIRO, S. et al.: Fingerprint matching application using hardware based artificial neural network with Matlab. In: *5th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)*, 2017. DOI: 10.1109/ICEEIE.2017.8328764.

4.2 Príspevky na vedeckých konferenciách a ich citácie

KOVAČ, I. - MARÁK, P.: On Utilization of Adaptive Gabor Filters for Finger Vein Pattern Enhancement. In: *ŠVOČ 2020*, Zborník vybraných prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti, 22. apríl 2020, FEI, STU, s. 29-34. ISBN 978-80-227-5003-5.

HAMBALÍK, A. - MARÁK, P.: Preparing Students and Biometrics Experts. In: *International Conference Trends In Education 2019*, Innovation In Education: Teacher as an Agent of Change, Roč. 12, 2019, č. 2, s. 28-37. ISSN 1805-8949. DOI: 10.5507/tvv.2019.010.

KOVAČ, I. - MARÁK, P.: Multimodal biometric system based on fingerprint and finger vein pattern. In: *ŠVOČ 2019*, Zborník vybraných prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti, 10. apríl 2019, FEI, STU, s. 30-36. ISBN 978-80-227-4916-9. (*Článok má 1 registrovanú citáciu uvedenú v zozname nižšie*).

Táto práca bola citovaná v nasledujúcich publikáciách (podľa Google Scholar a ResearchGate):

1. TOYGAR, O. et al.: FYO: A Novel Multimodal Vein Database with Palmar, Dorsal and Wrist Biometrics. In: *IEEE Access* PP(99), May 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991475.

HAMBALÍK, A. - MARÁK, P.: Virtuális laboratórium biometria témažú oktatáshoz és kutatáshoz. In: *Agria Média 2017: ICI 15*, 12. Információtechnikai és oktatás-technológiai konferencia és kiállítás, Líceum Kiadó, Eger, Hungary, Október 11-13, 2017, s. 200-206. ISBN 978-615-5621-86-4.

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: A two-stage fingerprint feature extraction system for low quality fingerprint images. In: *Norwegian-Slovakian workshop in crypto*, Bergen, Norway, February 8 - 10, 2016, s. 46-51. ISBN 978-80-227-4541-3.

HAMBALÍK, A. - MARÁK, P.: Possibilities of software recognition of small irregular patterns in biometrics for purposes of fingerprint analysis. In: *XXIXth DIDMATTECH 2016: New methods and technologies in education and practice*, International Scientific and Professional Conference, Budapest, 25-26 August 2016, Tribun EU, s. 41-54. ISBN 978-963-284-799-3.

HAMBALÍK, A. - MARÁK, P.: Design and implementation of software support for biometrics laboratory courses. In: *Trendy ve vzdělávání*, Roč. 9, 2016, č. 1, s. 75-83, Olomouc, Česká republika. ISSN 1805-8949.

HAMBALÍK, A. - MARÁK, P.: Image content software analysis. In: *Trendy ve vzdělávání*, Roč. 8, 2015, č. 1, s. 71-80. ISSN 1805-8949.

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: Expert system for fingerprint pattern processing. In: *XXVII. DIDMATTECH 2014*, Olomouc : Palacky University, 2014, s. 130-138. ISBN 978-80-86768-96-0.

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: A study of biometric data by means of open source software. In: *XXVII. DIDMATTECH 2014*, Olomouc : Palacky University, 2014, s. 140-148. ISBN 978-80-86768-96-0.

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: Software system for processing and analysis of fingerprints and determination of necessary parameters. In: *1st International conference and exhibition on future RFID technologies*, Eszterházy Károly College, Eger, Hungary, November 5-7, 2014, s. 127-134. ISBN 978-615-5509-23-0.

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: An Extraction of Extended Minutiae Set From Fingerprint Ridge Patterns, In: *Zborník z X. odborného seminára Kriminalistika v praktických príkladoch*, Košice, 19. 3. 2014, s. 142-160. ISBN: 978-80-971125-4-7.

HAMBALÍK, A. - MARÁK, P.: Software recognition of digital image details. In: *XXVII. DIDMATTECH 2014*, Olomouc : Palacky University, 2014, s. 124-148. ISBN 978-80-86768-96-0.

HAMBALÍK, A. - MARÁK, P. - LEHOCKI, F.: Personal area networks in education environment. In: *XXVII. DIDMATTECH 2014*, Olomouc : Palacky University, 2014, s. 119-123. ISBN 978-80-86768-96-0.

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: Automated Extraction of Fingerprint Features for Purposes of Analysis of their Attributes. In: *Recent Advances in Image, Audio and Signal Processing : 9th WSEAS International Conference on Remote Sensing; 1st WSEAS International Conference on Image Processing and Pattern Recognition; 1st WSEAS International Conference on Acoustics, Speech and Audio Processing*, Budapest, Hungary, December 10-12, 2013, s. 161-170. ISBN 978-960-474-350-6.

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: An Extraction of Extended Minutiae Set from Fingerprint Ridge Patterns. In: *ELITECH 2013*, 15th Conference of Doctoral Students, Bratislava, Slovakia, 5 June 2013, Nakladatelstvo STU, 6 s. ISBN 978-80-227-3947-4.

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: An Extraction of Extended Minutiae Set From Fingerprint Ridge Patterns. In: *Book of Articles: 11th International Forensic Symposium*, Bratislava, Slovak Republic, 2013.

MARÁK, P. - HAMBALÍK, A.: Spracovanie charakteristických vlastností odťačkov prstov na účely skúmania ich jedinečnosti. In: *ŠVOČ 2012*, Zborník vybraných prác, Bratislava : FEI STU, 2012, s. 7-12. ISBN 978-80-227-3697-8.

4.3 Abstrakty

HAMBALÍK, A. - MARÁK, P.: Experience from Creating a Powerful Software System for Use in Dactyloscopy and Biometrics in School Conditions. In: *International Conference Trends in Education 2018: Technology, Informatics and Innovations in Education across Disciplines*, Slatinice u Olomouce, Czech Republic. 16.-18. 5. 2018, s. 66, Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-80-244-5318-7.

HAMBALÍK, A. - MARÁK, P.: Some Trends and Problems in Programming and Their Impact on Effectivity of Informatics Education. In: *Abstract Book of International Conference Trends in Education 2017: Technology, Informatics and Educational Technology*, 25. – 26. 5. 2017, DOI: 10.5507/pdf.17.24451527.

4.4 Prednášky a prezentácie

MARÁK, P.: *Biometric authentication using fingerprint images*. BratislavaCrypt, prednáška pre študentov z Nórska v rámci projektu EEA Grant SK06-IV-01-001, FEI STU, Bratislava, 2015.

MARÁK, P. et al.: *A Novel Approach to Construction of Statistical Model of Fingerprint Individuality*. Prezentácia na podujatí 12th International Forensic Symposium, Bratislava, Slovakia, 17th-20th February 2015.

MARÁK, P. et al.: *A Novel Approach to Construction of Statistical Model of Fingerprint Individuality*. Prezentácia na podujatí EAFS 2015, Prague, Czech Republic, 6-11 September 2015.

MARÁK, P.: *Methods of Fingerprint Recognition*. Prednáška pre študentov z USA v rámci projektu NATO SPS 984520, FEI STU, Bratislava, 2014.

4.5 Riešené vedecké projekty

Projekt: *Secure Communication in the Quantum Era*, NATO SPS G5448, Riaditeľ projektu: prof. RNDr. Otokar Grošek, PhD., Obdobie riešenia: 2018-2021.

Projekt: *Secure Implementation of Post-Quantum Cryptography*, NATO SPS 984520, Riaditeľ projektu: prof. RNDr. Otokar Grošek, PhD., Obdobie riešenia: 2012-2016.

Projekt VEGA: *Ochrana osobných údajov v mobilných zariadeniach*. Garant: prof. Ing. Pavol Zajac, PhD. Obdobie riešenia: 2013-2015.

Projekt v rámci Programu na podporu mladých výskumníkov STU: *Rozšírená softvérková extrakcia charakteristických vlastností daktyloskopických vzorov (FingerDetective2014)*, Obdobie riešenia: 2014-2015.

Projekt v rámci Programu na podporu mladých výskumníkov STU: *Softvérková extrakcia charakteristických vlastností daktyloskopických vzorov a možnosti jej ap-*

likácií v súčasnej daktyloskopii, Obdobie riešenia: 2013-2014.

Projekt: *Centrum excelentnosti bezpečnostného výskumu* v rámci programu Operational Program of Research and Development. ITMS kód 26240120034.

Projekt: *Zefektívnenie práce expertov v oblasti daktyloskopie*. Výskumná spolupráca ÚIM FEI STU a KEÚ PZ v Bratislave. Obdobie riešenia: 2010-2013.

Projekt: *Kryptografia prináša bezpečnosť a slobodu* (SK06-IV-01-001), Vedúci projektu: prof. RNDr. Otokar Grošek, PhD. Obdobie riešenia: 2015-2016.

Literatúra

- [1] BOROVANSKÝ, L. a kol. 1973. Soustavná anatomie člověka II. 4. Vydání. Praha: Avicenum, 1973, 476 s.
- [2] ASHBAUGH, D. R. 1999. Ridgeology: Modern Evaluative Friction Ridge Identification. Forensic Identification Support Section, Royal Canadian Mounted Police, 53 p.
- [3] DESSIMOZ, D. et al. 2005. Multimodal Biometrics for Identity Documents: research report. Lausanne : Université de Lausanne, 2005, 150 p.
- [4] FVC-onGoing. On-line evaluation of fingerprint recognition algorithms. University of Bologna : Biometric System Laboratory.
- [5] JAIN, A. K. – PANKANTI, S. 2000. Fingerprint Classification and Matching. Academic Press, 2000, 32 p.
- [6] MAIO, D. – MALTONI, D. 1997. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1997, Vol. 19, No. 1.
- [7] MALTONI, D. et al. 2009. Handbook of Fingerprint Recognition. Second Edition. London : Springer, 2009. 496 p.
- [8] KÁDEK, L. 2018. Daktyloskopický sieťový systém DBOX-server : diplomová práca. Bratislava : FEI STU, 2018. 97 s.
- [9] KOVÁČ, I. 2019. Multimodal biometric system based on fingerprint and finger vein pattern : bakalárská práca. Bratislava : FEI STU, 2019. 122 s.
- [10] KOVÁČ, I. - MARÁK, P. 2020. On Utilization of Adaptive Gabor Filters for Finger Vein Pattern Enhancement. In: ŠVOČ 2020: Zborník vybraných prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti, <http://uef.fei.stuba.sk/web/SVOC2020.pdf>. Bratislava : FEI STU, 2020. 6 s.
- [11] KOVÁČ, I. - MARÁK, P. 2020. Openfinger: Towards a combination of discriminative power of fingerprints and finger vein patterns in multimodal biometric system. In: Tatra Mountains Mathematical Publications. Vol. 76, , 2020, No.2. ISSN 1210-3195. DOI: 10.2478/tmmp-2020-0012.

- [12] THAI, R. 2003. Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction. University of Western Australia, 2003, 71 p.
- [13] PAINDAVOINE, M. - SUDIRO, A. - KUSUMA, M. 2007. Simple Fingerprint Minutiae Extraction Algorithm Using Crossing Number On Valley Structure. In: Automatic Identification Advanced Technologies. p. 41 - 44.
- [14] GOVINDARIJU, V. - SHI, Z. 2006. A chaincode based scheme for fingerprint feature extraction. In: Pattern Recognition Letters. Vol. 27. p. 462 - 468.
- [15] BARTŮNĚK, J. S. 2016. Fingerprint Image Enhancemet, Segmentation and Minutiae Detection [PhD. thesis]. Department of Applied Signal Processing, Blekinge Institute of Technology, Sweden. 44 p.
- [16] TURRONI, F. 2012. Fingerprint Recognition: Enhancement, Feature Extraction and Automatic Evaluation of Algorithms [PhD. thesis]. Department of Computer Science, University of Bologna, Italy. 158 p.
- [17] POH, N. et al. 2012. Description of Metrics For the Evaluation of Biometric Performance. BEAT: Biometrics Evaluation and Testing. 22 p.
- [18] MSIZA, I. S. et al. 2011. Fingerprint Segmentation: An Investigation of Various Techniques and a Parameter Study of a Variance-based Method. In: International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Volume 7, Number 9, September 2011, pp. 5313–5326.
- [19] GOTTSCHLICH, C. 2012. Curved Gabor Filters for Fingerprint Image Enhancement. In: IEEE Transactions on Image Processing, vol. 21, no. 4, pp. 2220-2227, Apr. 2012.
- [20] WATSON, C. I. et al. 2004. User's Guide to Export Controlled Distribution of NIST Biometric Image Software. National Institute of Standards and Technology. 35 p.
- [21] HWANG, H. et al. 2002. Run Representation Based Minutiae Extraction in Fingerprint Image. In: IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Dec. 11-13, 2002, Nara-ken New Public Hall. Nara, Japan. 5 p.
- [22] BANSAL, R. et al. 2010. Effective Morphological Extraction of True Fingerprint Minutiae based on the Hit or Miss Transform. In: International Journal of Biometrics and Bioinformatics(IJBB), Volume (4), Issue (2), 16 p.
- [23] FENG, J. F. et al. 2014. High-resolution palmprint minutiae extraction based on Gabor feature. In: Science China Information Sciences, 2014, Vol. 57: 112106(15), 16 p.
- [24] PATRICIU, V. et al. 2015. Fingerprint Orientation Image Estimation in the Frequency Domain. In: Genetic Algorithms-Fuzzy Based Trade-Off Adjustment Between Software Complexity and Deliverability, Springer International Publishing, pp.439-443.

- [25] HOU, Z. et al. 2011. A review on fingerprint orientation estimation. In: Security and Communication Networks, Volume 4, Issue 5, pp. 591-599.
- [26] ZHU, E. et al. 2006. Fingerprint Ridge Orientation Estimation Based on Neural Network. In: Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on Signal Processing, Robotics and Automation, Madrid, Spain, February 15-17, 2006, pp. 158-164.
- [27] WANG, W. et al. 2008. Design and implementation of Log-Gabor filter in fingerprint image enhancement. In: Pattern Recognition Letters 29 (2008), pp. 301–308.
- [28] YANG, J. et al. 2003. A modified Gabor filter design method for fingerprint image enhancement. In: Pattern Recognition Letters 24 (2003), pp. 1805–1817.
- [29] ZHANG, L. et al. 2009. Fingerprint ridge distance estimation based on ridge search. In: International Joint Conference on Bioinformatics, Systems Biology and Intelligent Computing, pp. 604-607.
- [30] LEHTIHET, R. et al. 2014. Ridge Frequency Estimation for Low-Quality Fingerprint Image Enhancement Using Delaunay Triangulation. In: International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol. 28, No. 1 (2014), 1456002, 15 p.
- [31] ENGELSMA, J. J. et al. 2019. Fingerprints: Fixed Length Representation via Deep Networks and Domain Knowledge. In: arXiv:1904.01099, 10 p.
- [32] DARLOW, L. N. - ROSMAN, B. 2017. Fingerprint minutiae extraction using deep learning. In: IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB), Denver, CO, pp. 22-30.
- [33] NGUYEN, D. et al. 2018. Robust Minutiae Extractor: Integrating Deep Networks and Fingerprint Domain Knowledge. In: International Conference on Biometrics (ICB), Gold Coast, QLD, pp. 9-16.
- [34] TANG, Y. 2017. FingerNet: An unified deep network for fingerprint minutiae extraction. In: IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB), Denver, CO, pp. 108-116.
- [35] WATSON, C. I. et al. 2007. User's Guide to NIST Biometric Image Software (NBIS). Dostupné na <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir7392.pdf>.
- [36] ALSAADE, F. 2008. Score-Level Fusion for Multimodal Biometrics. In: University of Hertfordshire Research Archive, PhD. Thesis, 136 p.
- [37] YANG, W. et al. 2018. A Fingerprint and Finger-vein Based Cancelable Multi-biometric System. In: Pattern Recognition 78, 35 p.
- [38] ELMIR, Y. - KHELIFI, N. 2019. Secured Biometric Identification: Hybrid Fusion of Fingerprint and Finger Veins. In: International Journal of Information Technology and Computer Science 11, pp. 30-39.

- [39] CHERRAT, E. M. et al. 2020. Convolutional neural networks approach for multimodal biometric identification system using the fusion of fingerprint, finger-vein and face images. In: PeerJ Computer Science 6:e248, 15 p.
- [40] LOWE, D. G. 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision, vol. 40, pp. 91-110.
- [41] BAY, H. et al. 2008. Speeded-Up Robust Features (SURF). In: Computer Vision and Image Understanding, vol. 110 (no. 3), pp. 346-359.

Summary

This thesis deals with a crucial problem of information security, namely automated biometric recognition based on fingerprint and finger vein images. We present our research results that revolve around our open-source biometric solution named OpenFinger which is a complex software ecosystem performing unimodal and multimodal authentication. It consists of more modules, libraries, and GUI applications that deliver fingerprint and finger vein recognition functionality. OpenFinger's primary purpose is to serve as an authentication solution, however, it delivers also many expert features for evaluation, biometric fusion, visualization, and parameter adjustment of the underlying biometric engine.

We have organized this thesis to cover major theoretical aspects of our research delving into the fundamental notion of fingerprint pattern properties, principles of fingerprint recognition systems, and reviewing the literature to summarize findings of state-of-the-art scientific publications closely related to our research. In the practical part, we provide a proposal of OpenFinger system, focusing on its architecture portrayed using block diagrams. We analyze all OpenFinger libraries and their building blocks, providing their mathematical and technical background along with appropriate visualizations of biometric processing outputs. Fingerprint and finger vein modules are designed as a composition of three main processing stages, namely, image preprocessing, feature extraction and feature matching.

OpenFinger brings forth several novel proposals in the area of fingerprint pattern enhancement using adaptive Gabor filter (and its multi-threaded and GPU implementation) and Level-2 feature extraction based on a convolutional neural network. Furthermore, we pay our attention to several extensions that make OpenFinger unique in the particular research field, namely, its automated evaluation module, communication with fingerprint scanners, the interactive tool for the collection of train data samples for the convolutional neural network, the export of Level-2 features compatible with ISO/IEC 19794-2 data format, GUI application for image preprocessing testing and client-server application for demonstrating remote biometric authentication.

The final part of the thesis is dedicated to performance evaluation and comprehensive discussion on the results obtained from more testing scenarios. All the conducted experiments were aimed at the assessment of recognition accuracy and

processing speed. Tests were performed on various image datasets with varying quality and different biometric engine settings. The obtained results reveal the overall high fingerprint recognition accuracy on the public FVC 2002 image datasets with EER of about 1 %. Furthermore, we compared our fingerprint mode with well-known state-of-the-art algorithms using ROC curves. On average, we achieved comparable results, outperforming several commercial algorithms. Series of experiments confirmed the strength of our Gabor filter-based image enhancement. Without it, the overall performance in terms of accuracy and speed drops beyond acceptable limits. Processing times were measured as well, highlighting our GPU implementation of image preprocessing that drastically reduced the duration of crucial processing operations. Finger vein mode was evaluated on SDUMLA-HMT dataset, resulting in EER of about 0.06 %. Multimodal mode results confirmed that a combination of fingerprints and finger veins tends to further improve recognition accuracy as we reached EER of about 0.03 %.

Putting all the research outcomes together encourages us to say that we have brought several noteworthy contributions to the area of theory, design, implementation, and evaluation of fingerprint and finger vein recognition systems.