



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**ANALÝZA SYSTÉMŮ PRO MĚŘENÍ KVALITY OTISKU
PRSTŮ**

ANALYSIS OF FINGERPRINT QUALITY ASSESSMENT SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DAVID DEJMAL

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KANICH

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce



19344

Student: **Dejmal David**
Program: Informační technologie
Název: **Analýza systémů pro měření kvality otisku prstů**
Analysis of Fingerprint Quality Assessment Systems
Kategorie: Bezpečnost
Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se měření kvality otisků prstů, metodami biometrického a daktyloskopického rozpoznávání podle otisků prstů. Seznamte se s softwarem pro měření kvality či rozpoznávání otisků prstů - Neurotechnology VeriFinger, NFIQ2.0 a metodou Ing. Oravce.
2. Analyzujte a porovnejte výkonnost systému zmíněných v předchozím bodě na vhodné databázi otisků prstů.
3. Navrhněte vlastní metodiku měření kvality otisků prstů nebo vylepšení některé z analyzovaných.
4. Implementujte algoritmus pro navrženou metodu z předchozího bodu.
5. Otestujte implementovaný algoritmus na databázích z bodu 2.
6. Dosažené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná vylepšení a rozšíření Vašeho řešení.

Literatura:

- Maltoni, D., Maio, D., Jain, A.K. and Prabhakar, S.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, 2009, pages 512. ISBN 978-1-8488-2254-2.
- Oravec, T.: *Methodology of Fingerprint Image Quality Measurement*, Brno, 2018. Master's thesis. FIT BUT, in Brno.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 3.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Vedoucí práce: **Kanich Ondřej, Ing.**
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1. listopadu 2018
Datum odevzdání: 15. května 2019
Datum schválení: 1. listopadu 2018

Abstrakt

Cílem této práce je zdokonalit proces určování kvality otisků prstů programem Fingerprint Quality Visualizer (FQV). Ze vzájemného porovnání stávajících programů NIST Fingerprint Image Quality 2.0 a Neurotechnology VeriFinger bylo prokázáno, že FQV zaostává při zpracování extrémně malých otisků prstů. Jako vylepšení byl tedy navržen a implementován postup pro odhadnutí počtu markantů v otisku na základě jeho reálné velikosti. Závěrečné testování prokázalo, že u vybrané kolekce otisků implementovaná metoda funguje. Tento přístup může být alternativou pro složité hledání a přesné počítání markantů.

Abstract

The aim of this work is to improve the process of determining fingerprint quality by Fingerprint Quality Visualizer (FQV). Mutual comparison of existing programs NIST Fingerprint Image Quality 2.0 and Neurotechnology VeriFinger has proved that FQV is worse in processing of extremely small fingerprints. Therefore, the procedure which estimates the number of minutiae in fingerprint based on its real size has been designed and implemented as an improvement. The final testing has proved that the implemented method works for the selected fingerprint collection. This approach can be an alternative to complex searching and accurate minutiae counting.

Klíčová slova

Otisk prstu, Kvalita otisku prstu, Počet markantů, Velikost otisku prstu, NFIQ, NFIQ 2.0, VeriFinger

Keywords

Fingerprint, Fingerprint quality, Minutiae count, Fingerprint size, NFIQ, NFIQ 2.0, VeriFinger

Citace

DEJMAL, David. *Analýza systémů pro měření kvality otisku prstů*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich

Analýza systémů pro měření kvality otisku prstů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Kanicha. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

David Dejmal
13. května 2019

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Kanichovi za všechny poskytnuté věcné rady.

Obsah

1	Úvod	2
2	Základy zpracování otisků prstů	3
2.1	Základní pojmy	3
2.2	Způsob získávání otisků	5
2.3	Popis zpracování otisku	6
2.4	Kvalita otisku prstu	7
2.5	Příčiny snížené kvality otisku	8
3	Analyzované systémy	12
3.1	NFIQ	12
3.2	Fingerprint Quality Visualizer	22
3.3	Neurotechnology VeriFinger	27
4	Vzájemné porovnání systémů	29
4.1	Databáze otisků	30
4.2	Přesný postup zpracování	31
4.3	Srovnání NFIQ	32
4.4	Srovnání VeriFinger	33
4.5	Srovnání FQV	34
4.6	Shrnutí	36
5	Návrh a implementace	37
5.1	Návrh řešení	37
5.2	Popis implementace	38
5.3	Shrnutí výsledků nové implementace	44
6	Závěr	47
	Literatura	48
A	Obsah přiloženého DVD	50
B	Uživatelský manuál	
	Fingerprint Quality Visualizer 2.0	51
C	Výsledky analýzy	54

Kapitola 1

Úvod

V dnešní době se takřka každý člověk západního moderního světa denně setkává s informačním systémem, aplikací či jiným typem software, který po něm vyžaduje různou formu autentizace, tedy ověření identity uživatele.

Nejvíce rozšířeným způsobem autentizace je textová kombinace přihlašovacího jména a hesla. Toto řešení je ve velké míře dostačující. Jako problémové se ale často ukazují samotné chování uživatelů, kteří nakládají se svými hesly lehkovážně. Stále populárnější alternativou se tedy stává biometrie kvůli větší bezpečnosti a nyní již i nízké ceně zpracování.

V několika posledních letech rapidně přibylo zařízení, která zpracovávají otisky prstů. Firmy investují do technologie jejich zpracování velké množství prostředků a vývoj je velmi živelný. Ačkoliv se otisky prstů prakticky využívají již přes sto let je jasné, že výzkum je v této oblasti stále potřebný.

Cílem této práce je vylepšit již existující program pro určení kvality otisku prstu: *Fingerprint Quality Visualizer* (FQV) [19]. Výpočet kvality je totiž jeden ze základních kroků při zpracování otisku. Pro vylepšení je nejprve nutné FQV porovnat s řešením konkurence a zjistit jeho slabá místa. Ta následně podrobně analyzovat a navrhnout algoritmus pro zdokonalení. Nejdůležitější částí je poté samotná implementace a testování výsledků.

Pro pochopení této problematiky je nejprve nutné vysvětlení základních pojmů, které jsou shrnuty v kapitole číslo 2. Třetí kapitola detailně popisuje tři vybrané aplikace: NIST Fingerprint Image Quality 2.0 [18], FQV a Neurotechnology VeriFinger [14]. Pro každý program jsou uvedeny stručné informace pro pochopení jeho fungování. Čtvrtá kapitola definuje postup analýzy, strukturu použité databáze otisků a vzájemné porovnání všech tří programů. Pátá kapitola obsahuje popis metody použité pro vylepšení určování kvality otisku. V poslední, šesté, kapitole jsou shrnuty všechny dosažené výsledky. V neposlední řadě jsou zde přiloženy také návrhy na další případné inovace a zdokonalení.

Kapitola 2

Základy zpracování otisků prstů

V této kapitole jsou zkráceně popsány všechny teoretické termíny, pojmy a postupy z oblasti biometrie, které je vhodné znát pro úplné pochopení dalších kapitol. Zde uvedený text slouží jako krátké shrnutí této problematiky. Čtenáři, pro něhož je většina uvedených pojmů úplně neznámá, je silně doporučeno vyhledat odkazovanou či jinou vhodnou literaturu pro více informací.

2.1 Základní pojmy

Zde jsou uvedeny naprosto základní pojmy z oblasti biometrie. Znalost těchto odborných termínů je pro zbytek práce nezbytná.

2.1.1 Papilární linie

Jedná se o přirozené výběžky na kůži o výšce 0,1 – 0,4 mm a šířce 0,2 – 0,5 mm. Vyskytují se na vnitřní straně dlaní a spodní části chodidla. Tyto linie vycházejí ze spodních vrstev kůže. Obsahují potní póry a slouží pro lepší citlivost hmatu a zvýšení tření pokožky. Začátky či zakončení těchto linií vytváří speciální útvary zvané markanty. [6]

2.1.2 Otisk prstu

Otisk prstu je vzor tvořený strukturou papilárních linií. Základní vlastnosti otisků shrnují tzv. daktyloskopické zákony [6]:

1. Neexistují na světě dvě osoby, které mají naprosto stejné obrazce papilárních linií.
2. Obrazce papilárních linií člověka jsou celý jeho život relativně neměnné.
3. Papilární linie jsou neodstranitelné, pokud není zničena zárodečná vrstva kůže.

Ukázka otisku prstu je v obrázku 2.1.

2.1.3 Biometrický vzorek – sample

Jedná se o odraz anatomicko-fyziologických nebo behaviorálních charakteristik člověka do vnějšího světa. Biometrickým vzorkem může být otisk prstu, slina, fotografie, zvukový záznam apod. [21]



Obrázek 2.1: Popis otisku prstu.

2.1.4 Biometrické rysy – features

Digitální reprezentace informace extrahované ze vzorku, jež bude použita ke konstrukci či porovnání proti registrovaným šablonám [1]. U otisků prstů se jedná například o markanty extrahované z otisku prstu.

2.1.5 Biometrická šablona – template

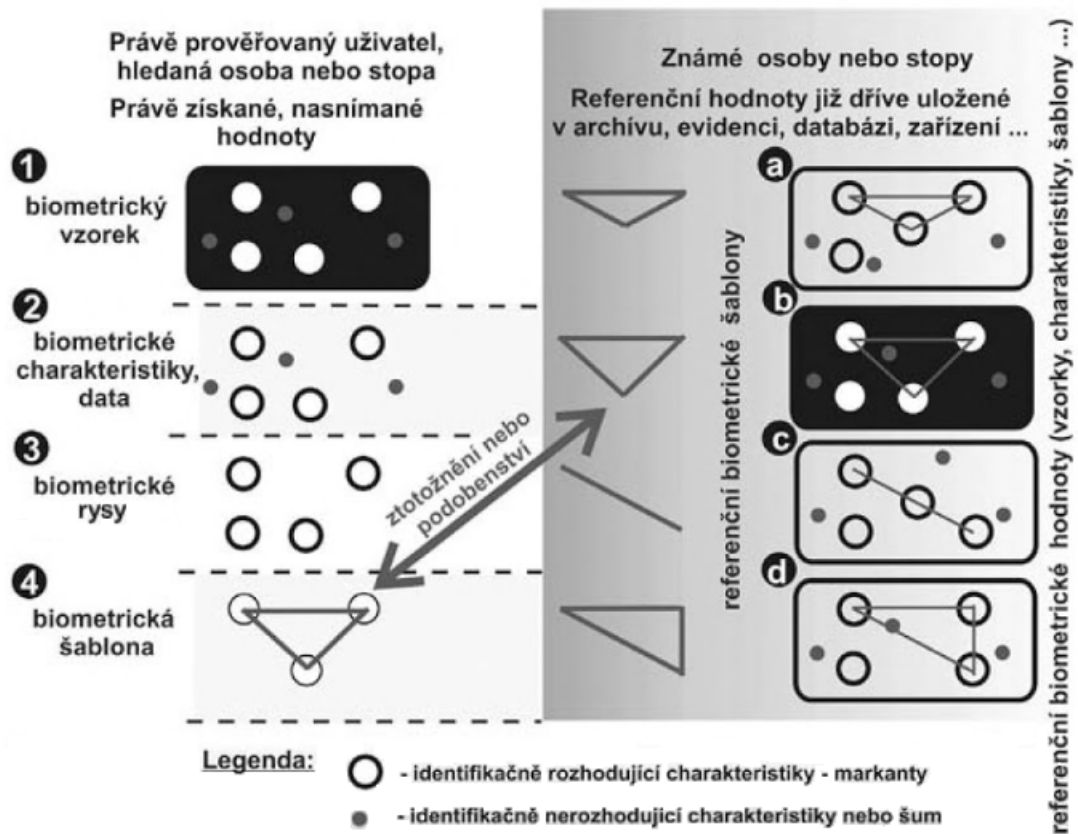
Šablona je konečný výsledek maximální formalizace a optimalizace biometrického vzorku(ů) pro identifikační nebo verifikační účely [21]. Jedná se o model jeho biometrického vzoru. Skládá se z referenčních měř uživatele, založených na extrahovaných rysech [1]. Popis práce s šablonami zobrazuje obrázek 2.2.

2.1.6 Verifikace v biometrii

Jedná se o proces potvrzení zadané elektronické identity uživatele na základě jeho biometrického vzorku. Uživatel zadá do systému svou identitu (např. jméno a příjmení) a zanechá vzorek (otisk prstu). Na základě identity je nalezena patřičná šablona a ta se porovná se zanechaným vzorkem. Výsledkem této operace je rozhodnutí „potvrzeno“ či „nepotvrzeno“. [6]

2.1.7 Identifikace v biometrii

Na rozdíl od verifikace není u identifikace na počátku procesu uvedena identita uživatele. Úkolem systému je tedy tuto identitu rozpoznat. Zachycený vzorek je nutné porovnat se všemi relevantními šablonami a nalézt největší shodu. Výstupem procesu je seznam nalezených šablon a jejich míra podobnosti k vzorku. [6]



Obrázek 2.2: Popis práce se vzorky, rysy a šablonami, převzato z [21].

2.2 Způsob získávání otisků

Způsobů, jakým je možné získat vzorek otisku prstu je vícero a mohou se dělit podle způsobu zanechání nebo podle způsobu získávání. Tato definice rozdělení je převzata z [12].

2.2.1 Rozdělení dle způsobu zanechání

- **Válené**

Tyto otisky se vytvářejí pomocí válení bříška prstu oproti styčnému povrchu. Obsahují nejvíce informací, jelikož je zaznamenán kompletní povrch bříška prstu. Používají se nejčastěji na identifikační karty.

- **Latentní**

Tento druh otisků se využívá v kriminalistice. Přirozená mastnota, která se vyskytuje na povrchu kůže, se z bříška prstu při dotyku přenesou na protilehlý povrch. Tímto se na místě zanechá otisk prstu. Pro extrahování tohoto typu otisku kriminalisté používají různých chemických metod.

- **Píchané**

Vytváří se pouhým přitlačením prstu na styčnou plochu. Tento druh otisku se nejčastěji používá u *live-scan* procesu, který se ještě dále dělí dle technologie snímače (optické, ultrazvukové, ...).

2.2.2 Rozdělení dle způsob získávání

- **Live-scan**

Představuje proces, při kterém se obraz otisku snímá z bříška prstu v reálném čase. Je tedy nutné použít některý z velkého množství typů snímačů otisků prstů. Tato práce se nejvíce zabývá právě takto získanými otisky.

- **Off-line**

Na rozdíl od *live-scan* představuje proces, při kterém je digitalizován již dříve zanechaný otisk. V praxi představuje například naskenování identifikační karty s otisky nebo přímo vyfocení otisku.

2.3 Popis zpracování otisku

Tato podkapitola je převzata a vychází z normy ČSN ISO/IEC 19795 [1]. Popisuje jak biometrický systém pro zpracovávání otisků prstů funguje, což je potřebné pro pochopení důležitosti určení kvality otisků prstů. Způsob práce biometrického systému lze shrnout na abstraktní model, jak demonstruje obrázek 2.3. Model se skládá z pěti samostatných modulů. V praxi je ale časté že jsou tyto moduly spojeny do jednoho zařízení či aplikace.

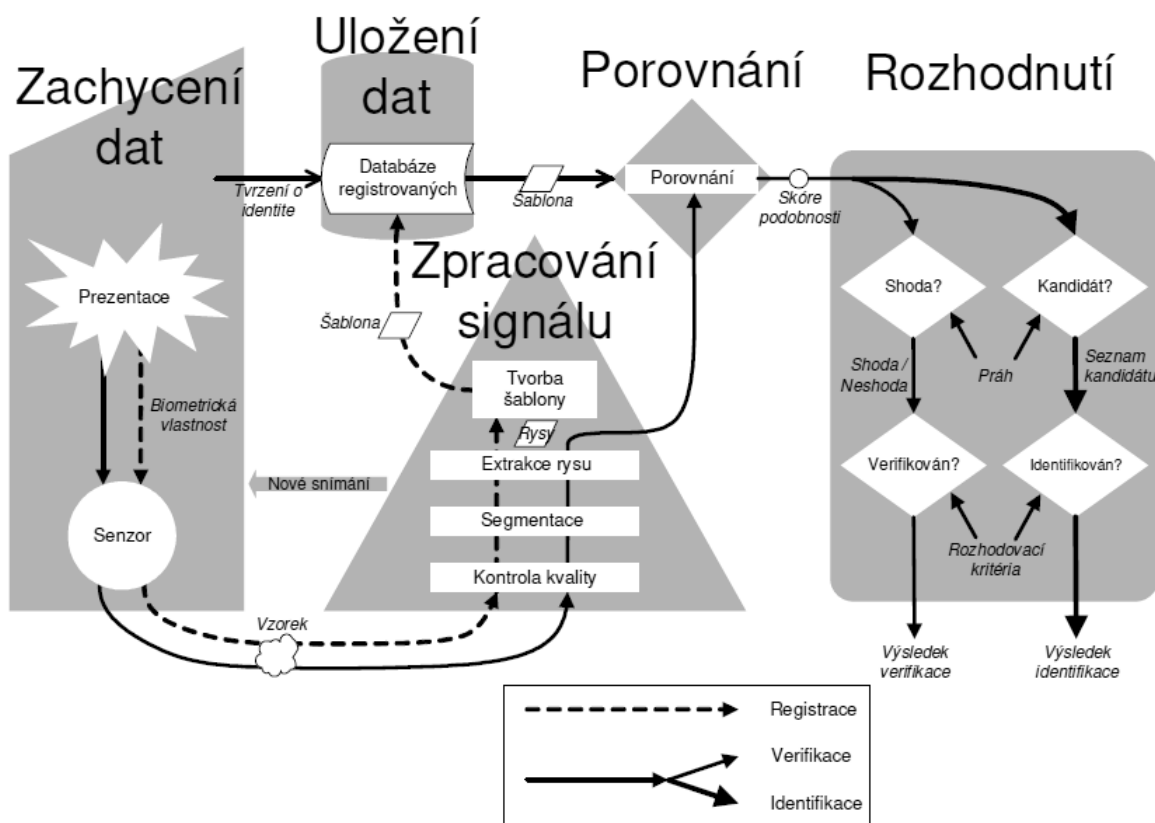
2.3.1 Popis schématu biometrického systému

Část pro zachycení dat zpracovává biometrickou vlastnost a interpretuje ji již jako biometrický vzorek. V našem případě se nejedná o nic složitějšího než snímač otisků prstů, jehož výstupem je obraz otisku (např. obraz formátu WSQ). Další možností je nahrání digitální formy off-line otisku. Při zachytávání dat se také může zadávat tvrzení o identitě například uživatelské jméno. Tímto se specifikuje určitá podmnožina šablon pro pozdější zpracování vzorku.

Následně je obraz odeslán do jednotky pro zpracování signálu. Cílem tohoto modulu je získat co nejvíce význačných rysů z přijatého vzorku. Při zpracování se jednotlivé kroky liší systém od systému. Obecně lze ale říct že všechny provádějí v nějaké formě kontrolu kvality, segmentaci a extrakci rysů.

Kontrola kvality slouží pro rozhodnutí, zda je vzorek vhodný pro zpracování. Pokud kvalita otisku nepřekročí určitý práh nebude obraz dále zpracováván a bude vyžádáno po snímači vytvoření nového vzorku. Pojem segmentace obrazu znamená lokalizaci biometrické vlastnosti uvnitř vzorku. U otisků prstů je tím myšleno rozlišení otisku od jeho pozadí. Extrahování rysů v našem případě představuje nalezení polohy, typu a orientace markantů. Výstupem modulu je šablona určena k registraci nebo rysy připravené k porovnání, často také ve formě šablony.

Modul pro uložení dat představuje databázi registrovaných šablon. Krom samotné šablony je nutné mít uložené i další vhodné detaily jedince. Porovnávací jednotka definuje stupeň shody mezi porovnávanými rysy a jednou či více šablonami. Pro každé jedno porovnání tedy vznikne jedna hodnota, která je poté předávána rozhodovacímu modulu.



Obrázek 2.3: Schéma biometrického systému, převzato z [1].

Chování rozhodovací jednotky se liší podle toho jestli pracuje na verifikaci či identifikaci. Pro verifikaci je výsledkem rozhodnutí shoda/neshoda. Při identifikaci je výsledkem seznam kandidátů. Nad tímto seznamem mohou být ještě prováděny různé operace než je prezentován jako výsledek. Je velmi časté že moduly pro zpracování signálu, porovnání a rozhodnutí jsou integrovány do jednoho programu, který komunikuje s databází šablon, přijímá vzorky ze snímače a prezentuje výsledky.

2.4 Kvalita otisku prstu

Norma ISO/IEC 29794-4:2017 [2] definuje kvalitu obrazu otisku prstu jako míru v jakém údaje otisku splňují specifikované požadavky pro cílenou aplikaci. Tuto normu implementuje program NFIQ 2.0, viz podkapitola 3.1. Velké množství komerčních aplikací, ale implementuje vlastní řešení. Jelikož tato norma není veřejně dostupná nemohu ji tedy blíže specifikovat.

Existuje velké množství dalších zdrojů, které také zavádějí vlastní definice. Například dokumentace k NFIQ první verze [16] definuje kvalitu jako prediktor výkonu algoritmu pro porovnání otisků, před jeho samotným použitím. V literatuře se lze také dočíst „Kvalita otisku prstu je míra jasně rozeznatelných hřebenových a údolních struktur, jakož i extrahovatelnost jednotlivých prvků, například markantů či singularit.“ [4].

V jádru jsou si ale všechny definice velmi podobné. Vycházejí totiž z toho, k čemu je kvalita v praxi určena. Ihned po vytvoření digitálního obrazu otisku prstu, je vyhodnocena jeho kvalita. Pokud je menší než určitá prahová hodnota, nebude otisk nadále zpracováván a bude nutné vytvořit nový obraz, např. opětovným přiložením prstu na snímač. Takto označený nekvalitní otisk totiž nemusí obsahovat dostatečné množství potřebných informací pro korektní následné zpracování.

Pravděpodobnost chybného zpracování je u nekvalitních otisků větší [7]. Kvalita může být také rozhodující faktor při výběru jednoho z většího množství otisků stejného prstu. Otisky, u kterých lze pozorovat rozdíl v kvalitě na první pohled, jsou v obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Otisky s rozdílnou kvalitou – Vlevo kvalitní syntetický otisk , vpravo nekvalitní válený otisk.

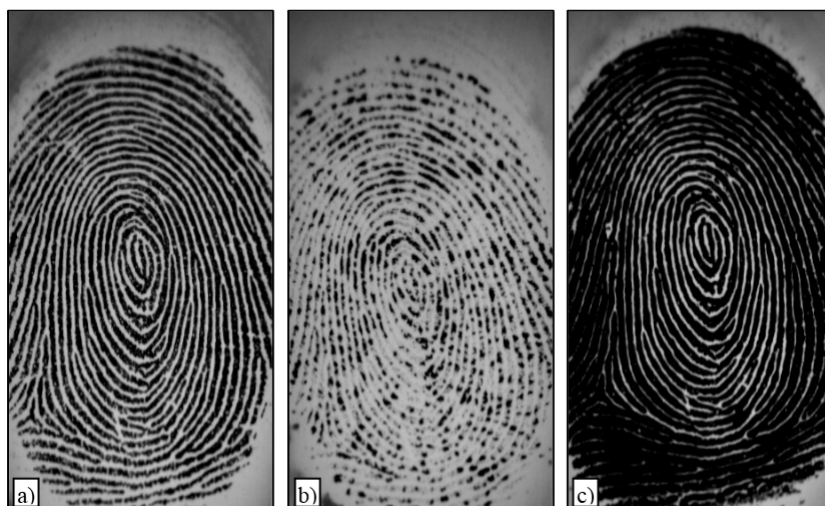
2.5 Příčiny snížené kvality otisku

Faktorů, které ovlivňují kvalitu obrazu otisku, je velké množství a jsou velmi různorodé. V této podkapitole budou lehce popsány nejběžnější problémy, které mohou nastat při metodě live-scan, tedy snímání otisku skenerem. Jak moc každá část ovlivňuje celkovou kvalitu se odvíjí od technologie snímače. Přesné hodnoty byly experimentálně zjišťovány v této práci [25]. Způsobem tvorby deformací obrazu otisku se také zabývá tato kniha [11].

2.5.1 Povrch prstu

Velkou roli na kvalitě hraje sama struktura kůže. Reliéf papilárních linií může být poškozen různým množstvím deformací. Na otisku se velmi projeví například jizvy či různé kožní nemoci [7]. Jistou míru hraje také věk, elasticita papilární linie se s věkem zhoršuje [9].

Záleží také na vlhkosti povrchu bříška prstu. Pokud je velmi vlhké jedná se poté o tzv. mokrý otisk. Ten se vyznačuje velmi výraznými papilárními liniemi, mezi kterými nelze často ani určit hranice. Extrémním výsledkem je až jednolitý útvar. Velmi vysušené bříško také není dobré pro snímání otisků. Ve výsledném obrazu není papilární linie dobře rozeznatelná a často splývá s okolím. Tuto vlastnost demonstruje obrázek 2.5. [8]

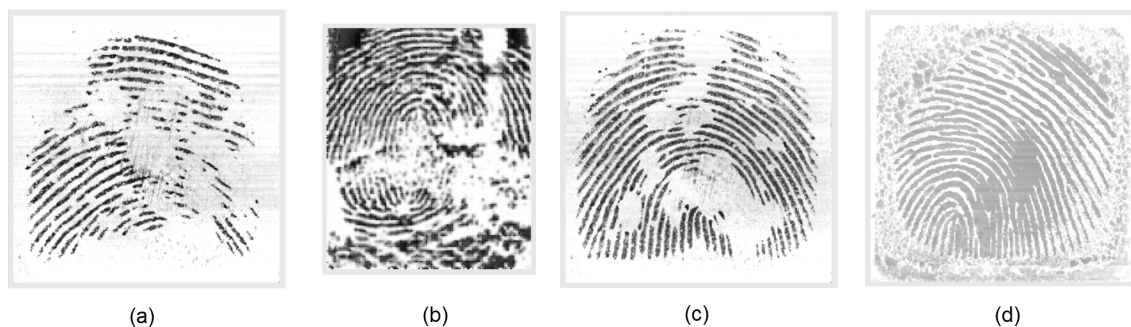


Obrázek 2.5: Tři otisky stejného prstu v rozdílných podmínkách – (a) standardní, (b) suchý, (c) mokrý. Převzato z [12].

2.5.2 Znečištění snímací plochy

Jedná se o jeden z nejčastějších problémů při snímání otisků. Znečistit snímač lze velmi jednoduše jak uživatelem, tak vlivem okolního prostředí. Rozdíl v nečistotách je veliký a záleží v jakých podmínkách se skener používá. Pevné nečistoty nechávají na vzorku artefakty, které mohou být špatně rozeznány a označeny jako markanty. Mastnota či tekutiny také znehodnocují výsledný vzorek a vytváří výše zmíněný mokrý otisk. Obrázek 2.6 obsahuje ukázky znečištěných otisků.

Do této kategorie se také zařazují latentní otisky prstů. Jedná se o pot z prstu, který byl zanechán na snímací ploše předešlým uživatelem. Tyto pozůstatky představují pro některé technologie bezpečnostní riziko, jelikož je lze znovu použít.



Obrázek 2.6: Znečištěné otisky – (a) zemina, (b) piliny, (c) písek, (d) olej. Převzato z [25].

2.5.3 Přítlak

Řádně neproškolený uživatel nemusí vědět jakou silou přiložit prst na kontaktní snímač. Pokud prst přiloží pouze zlehka nemusí se zpracovat celý otisk a papilární linie budou

velmi tenké. Naopak silný tlak prstu může vést ke špatnému rozeznání linií a ve výsledku pouze tmavému obrysu prstu. V extrémních případech může dojít i k poškození snímače.

2.5.4 Okolní osvětlení

V ideálním případě samotný prst překryje většinu samotné snímané plochy. V částech, kde se tak nestane je možné, že se vytvoří deformace kvůli vlivu okolního osvětlení. Typickým znakem jsou tedy ztmavené okraje obrazu, jak ukazuje obrázek 2.7. Na tento faktor jsou citlivé optické senzory. [7]



Obrázek 2.7: Otisky poškozené okolním osvětlením.

2.5.5 Poškození snímače

Je mnoho způsobů jak se může poškodit či úplně vyřadit skener z provozu. Některé poruchy, například rozbitá snímací plocha či defekty v senzoru, mají za následek statické útvary, které se zanášejí do každého obrazu. Takto deformované výstupní vzorky mohou mít velkou chybovost při dalším zpracování.

2.5.6 Elektromagnetické záření

Na elektromagnetické záření jsou citlivé všechny senzory. Problematické zde je, že není ovlivněn jen samotný povrch ale i vnitřní elektronické komponenty zařízení, případně i kabeláž sloužící pro přenos vzorku. Mezi časté následky vystavení elektromagnetickému poli bývá špatné zaostření otisku, jak lze vidět i v obrázku 2.8. [7]

2.5.7 Vibrace

V některých situacích je nutné upevnit senzor na nevyhovující místo, například na stroj či do dopravního prostředku. Vibrace nejsou do jisté míry problematické. Silné vibrace ale mohou poškodit elektronické součásti snímače. Také může velmi jednoduše dojít k nechtěnému pohybu prstu během snímání. Výsledný obraz je poté rozmazaný.



Obrázek 2.8: Otisk poškozený silným elektromagnetickým zářením, převzato z [25].

2.5.8 Teplota

Teplota za normálních podmínek nemá na kvalitu žádný vliv. Problém může být pouze při užití termické či ultrazvukové technologie v extrémních teplotních podmínkách.

Problémům, které mohou vzniknout během snímání otisků je velmi mnoho. V obecném měřítku, při porovnání s ostatními biometrickými senzory, jsou ale snímače otisků prstů velmi odolné a praktické.

Kapitola 3

Analyzované systémy

Tato kapitola popisuje jednotlivé analyzované programy. Jejím účelem je, aby čtenář co nejrychleji pochopil, jakým způsobem tyto programy fungují a v případě potřeby mu pomohly vybrat ten nejvhodnější.

3.1 NFIQ

NIST Fingerprint Image Quality (NFIQ) je open source projekt, který vyvíjí Národní institut standardů a technologie (National Institute of Standards and Technology, NIST), který byl založen v roce 1901 a nyní je součástí amerického ministerstva obchodu. Hlavním cílem organizace je podpora inovací a výzkumu v širokém spektru oborů, pomocí zlepšování vědeckých měření a tvorby standardů. [17]

Agentura NIST má dlouhou historii v oblasti vývoje a standardizace biometrie. Přes 30 let aktivně spolupracovala s FBI a byla u vzniku první verze známého programu AFIS (Automated Fingerprint Identification System). Institut klade velký důraz na uplatnění biometrických poznatků v právním prostředí USA. Jakožto státní organizace razantně pocítila změnu přístupu vlády k biometrii po teroristickém útoku 11.zář 2001. NIST v současnosti vede velké množství výzkumných programů zaměřených na zpracování otisků prstů¹.

3.1.1 NFIQ první verze

Pro uvedení do souvislostí je potřeba alespoň krátce zmínit první verzi programu NFIQ z roku 2004. Postup zpracování lze rozdělit na dva kroky: určení vektoru rysů a mapování na výstupní třídy. Vstupem jsou obrazy otisků a výstupem programu je jedenácti dimenzionální vektor rysů, který popisuje tabulka 3.1 s výslednou pětistupňovou třídaou kvality (1 znamená nejkvalitnější a 5 nejhorší otisk). Tato podkapitola byla převzata z oficiální projektové dokumentace [16], obecnější popis je dostupný i zde [19].

Pro každý blok pixelů se vyčíslí jeho vlastnosti. Z těchto dílčích hodnot se vytváří:

- Mapa orientací – určuje směr papilárních linií
- Mapa nejjasnější struktury – definuje bloky s jasně rozeznatelným směrem
- Mapa nízkého kontrastu – na základě kontrastu separuje bloky pozadí a otisku
- Mapa vysokého zakřivení – určuje míru zakřivení v rámci bloku

¹<https://www.nist.gov/programs-projects/fingerprint>

	Název	Popis
1	foreground	Počet bloků s kvalitou >1
2	total #of minutia	Celkový počet nalezených markantů v otisku
3	min05	Počet markantů s kvalitou $>0,5$
4	min06	Počet markantů s kvalitou $>0,6$
5	min075	Počet markantů s kvalitou $>0,75$
6	min08	Počet markantů s kvalitou $>0,8$
7	min09	Počet markantů s kvalitou $>0,9$
8	quality zone 1	Procentuální zastoupení bloků s kvalitou 1
9	quality zone 2	Procentuální zastoupení bloků s kvalitou 2
10	quality zone 3	Procentuální zastoupení bloků s kvalitou 3
11	quality zone 4	Procentuální zastoupení bloků s kvalitou 4

Tabulka 3.1: Tabulka popisující vektor rysů NFIQ, převzato z [16].

Mapa kvality se vypočítá sloučením těchto čtyř map. Každý blok mapy se poté přiřadí do jedné z pěti skupin, kde bloky v nulté skupině představují pozadí otisku a pátá skupina představuje ty nejkvalitnější části.

Další částí zpracování je nalezení markantů v papilárních liniích. Použitý algoritmus je velmi obecný, a proto často při výpočtu dochází k falešné detekci. Jako opravný mechanismus je použito ohodnocení každého markantu dle dvou kritérií, a to zkvalitě bloku, ve kterém se markant nachází, a kontrastu šedé barvy v nejbližším okolí. Výsledná kvalita markantu je v rozmezí 0 až 1. Tímto je zkompletován vektor rysů.

Následně je potřeba určit třídu kvality. Pomocí třístupňové neuronové sítě bylo vytvořeno nelineární mapování vektoru rysů na potřebnou třídu kvality. Vyhodnocením třídy kvality končí práce programu.

3.1.2 NFIQ 2.0

V roce 2011 začal vývoj druhé verze NFIQ. Krom zlepšení v určování kvalitě nová verze také přináší jemnější výsledné hodnocení (rozsah od 0 do 100), nižší výpočetní složitost a také podporu pro mobilní platformy. V momentální době je program ještě stále ve vývoji, ale verze z dubnu roku 2018 je již velmi komplexní a lze ji považovat použitelnou k podrobné analýze. NFIQ 2.0 je vzorovou implementací již výše zmíněné normy ISO/IEC 29794-4 Biometric sample quality – Part 4: Finger image data [2].

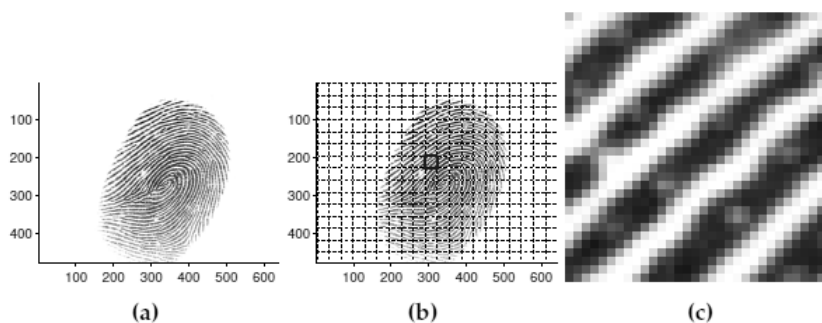
Při vývoji bylo prozkoumáno 155 vlastností otisků, které mají vliv na kvalitu. Z této množiny byly odstraněny ty, které mají malý vliv na celkovou kvalitu nebo je velmi složité je detekovat. Poté byl vypočítán vzájemný vztah mezi dvojicemi vlastností a redundantní byly odstraněny. Následně bylo rysům přiřazeno ohodnocení pro algoritmus určený k predikci výkonosti porovnávacího modulu – Random forests [3] a tím se určily další rysy pro vyřazení. Výsledkem bylo 14 nevhodnějších vlastností, které se zpracovávají při výpočtu. Způsob jejich detekce je popsán v podkapitole 3.1.4. [18]

NFIQ 2.0 pracuje pouze s 8-bitovými, šedotónovými obrazy. Každý pixel tedy dosahuje intenzit šedi v rozmezí 0 (černá) až 255 (bílá). Všechny využití algoritmy jsou navrženy pro práci s obrazy s rozlišením 500 dpi. Podporované jsou pouze naskenované inkoustové otisky a digitální obrazy pořízené optickými snímači.

3.1.3 Postup určení kvality

Tato podkapitola je převzata z aktuální projektové dokumentace [18] a vychází i z analýzy zdrojových kódů. Teoretický popis bude také ve výše zmíněné normě ISO/IEC 29794-4 [2]. Výsledná kvalita vychází opět z vektoru rysů, který se skládá z hodnocení jednotlivých vlastností otisku.

Program kombinuje globální a lokální analýzu obrazu. Globální prvky jsou celkové vlastnosti obrazu jako celku například počet markantů či průměrná hodnota odstínu šedi jednotlivých pixelů. Pro lokální analýzu je nutné rozčlenit obraz na jednotlivé bloky pixelů. Tento postup zobrazuje obrázek 3.1. Velikost bloku se odvodí z celkové velikosti obrazu. Všechny vypočtené hodnoty z těchto bloků mají pouze lokální význam tedy představují lokální analýzu.



Obrázek 3.1: Postup tvorby bloků – (a) vstupní obraz, (b) rozdělení do bloků. (c) detail vybraného bloku. Převzato z [18].

Segmentace obrazu

Jako první krok je nutné separovat otisk od pozadí v obrazu. Pozadí otisku může být poměrně velké, záleží na velikosti snímače a samotného prstu. Veškeré zpracování, které bude následovat, bude pracovat pouze na té části obrazu kde se nachází samotný otisk. Tímto krokem se tedy zmenší zpracovaná plocha a urychlí se celkový výpočet.

Nejprve dojde k ořezání prázdných okrajů. Z okraje každé strany se vypočítá průměr hodnot odstínu šedi pro každý řádek, či sloupec. Pokud je průměrná hodnota ≥ 250 (bílá) je tento řádek/sloupec vyřazen a výpočet pokračuje na dalším řádku/sloupci dané strany. Podrobnější popis je v algoritmu 1.

Takto ořezaný obraz je vstupem do algoritmu 2. Tento algoritmus má za úkol vyříznout samotný otisk. Pro každý blok vypočte jeho směrodatnou odchylku odstínů šedi (daný blok obsahuje širší spektrum barev tedy hledané papilární linie). Pokud překročí určitý práh je blok označen za otisk. Graficky znázorňuje celý postup obrázek 3.2.

Algoritmus 1: Ořezání okrajů

Vstup: Obraz otisku I v odstínech šedi, Práh $T = 250$

Výstup: Oříznutý obraz otisku O

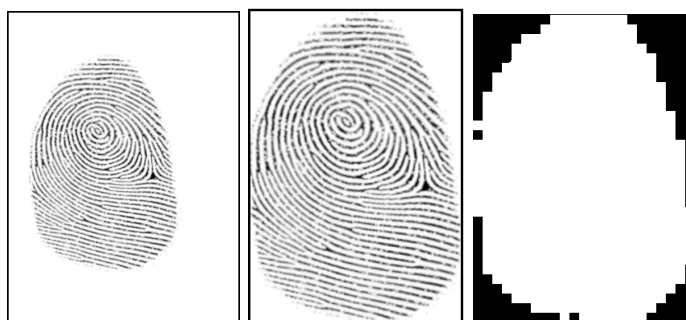
```
1  foreach řádek  $v$   $I$  do
2      vypočti aritmetický průměr odstínu šedi pro daný řádek
3      první výskyt průměru  $<$  práh  $T$  označ  $idy_{top}$ 
4      poslední výskyt průměru  $<$  práh  $T$  označ  $idy_{bottom}$ 
5  end foreach
6  foreach sloupec  $v$   $I$  do
7      vypočti aritmetický průměr odstínu šedi pro daný sloupec
8      první výskyt průměru  $<$  práh  $T$  označ  $idx_{left}$ 
9      poslední výskyt průměru  $<$  práh  $T$  označ  $idx_{right}$ 
10 end foreach
11  $O =$  vyříznutá obrast  $[idx_{left}, idy_{top}]$  až  $[idx_{right}, idy_{bottom}]$  z  $I$ 
12 return  $O$ 
```

Algoritmus 2: Vyříznutí otisku

Vstup: Oříznutý obraz otisku O , Práh $T = 250$

Výstup: Maska samotného otisku v obrazu O_{mask}

```
1  foreach blok  $v$   $O$  do
2      vypočti směrodatnou odchylku šedi  $\sigma$ 
3      if  $\sigma \geq$  práh  $T$  then
4          zaznamenej tento blok do  $O_{mask}$ 
5      end if
6  end foreach
7  return maska bloků z obrazu  $O_{mask}$ 
```



Obrázek 3.2: Postup segmentace obrazu – vlevo originální obraz I , uprostřed oříznutý obraz O , vpravo maska otisku O_{mask} .

Frekvenční bloková analýza

Frekvenční bloková analýza (frequency domain Analysis, FDA) určuje, zda se v daném bloku správně promítají papilární linie. Jak už název napovídá, algoritmus pracuje s jednotlivými bloky otisku. Výstupem je část vektoru rysů. Během výpočtu je určen tzv. popis

hřebene, což je projekce středních hodnot podél y-osy. Vytváří tedy jednorozměrný vektor, který obsahuje informaci o základní periodicitě bloku. Nad tímto popisem se poté vypočítá diskrétní Fourierova transformace a tyto výsledky se následně použijí pro vypočítání určení kvality. Podrobný popis je v algoritmu 3 a ukázka také v obrázku 3.3.

Algoritmus 3: Frekvenční bloková analýza, FDA

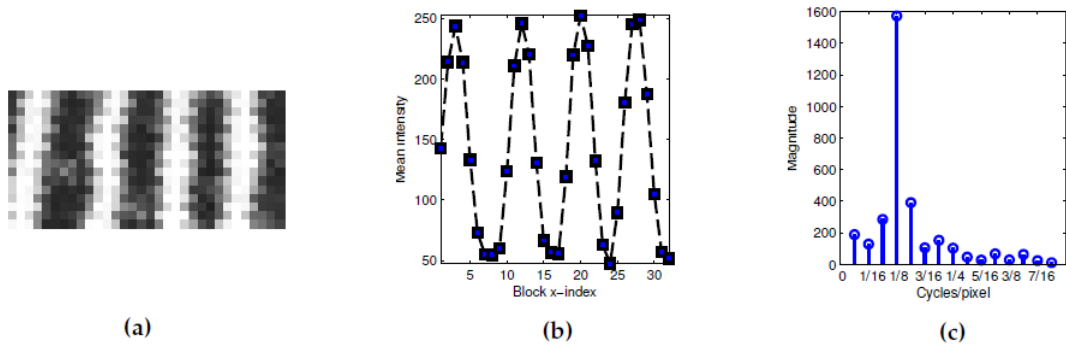
Vstup: Oříznutý obraz otisku O , maska otisku O_{mask}

Výstup: Hodnocení kvality bloku Q_{fda}

```

1  foreach blok  $O_{mask}$  v  $O$  do
2      doplň blok o sousední 2 pixely z každé strany
3      otoč blok tak aby směr papilárních linií byl kolmý k ose x
4      ořízni blok tak aby neobsahoval žádné neplatné oblasti
5      vypočti popis hřebene  $T$  bloku
6      vypočítej dft popisu hřebenu  $T$  pro získání velikosti reprezentace  $A$ 
7      určt  $F_{max}$  jako největší prvek v  $A$ 
8      vypočti  $Q_{fda}$  podle  $A$  a  $F_{max}$ 
9  end foreach
10 return kvalitu  $Q_{fda}$  pro každý bloku  $O_{mask}$ 

```



Obrázek 3.3: Části výpočtu FDA – (a) otočený blok obrazu O , (b) popis hřebene T , (c) výsledek dft popisu hřebene T . Převzato z [18].

Lokální zřetelnost linií

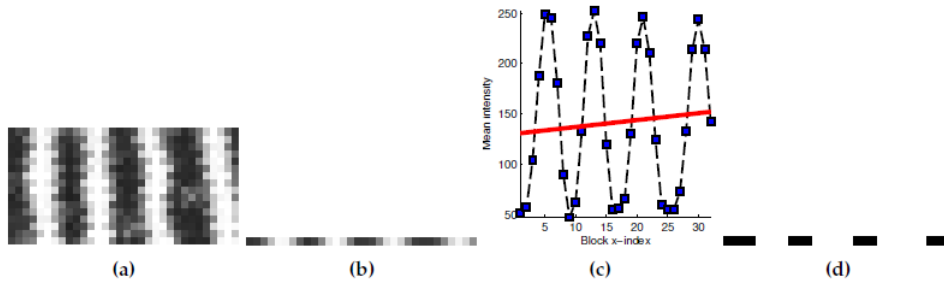
Tento algoritmus (Local Clarity Score, LCS) počítá, jak jsou jednotlivé papilární linie široké a rozlišitelné v rámci jednoho bloku. Nejprve se vytvoří výše zmíněný popis bloku a poté se pomocí lineární regrese klasifikuje, zda se jedná o papilární linii. Takto se každý pixel přidělí do jedné ze dvou skupin. Během výpočtu se také kontroluje šířka linií a zda se nesnižuje jejich odstín. Takto navržený a implementovaný algoritmus selhává v oblastech se složitější strukturou papilárních linií. Těmito místy bývají například markanty či velká zakřivenost v oblasti singularit. Podrobný popis je v algoritmu 4 a vybrané části graficky znázorněny v obrázku 3.4.

Algoritmus 4: Lokální zřetelnost linií, LCS

Vstup: Oříznutý obraz otisku O , maska otisku O_{mask}

Výstup: Hodnocení kvality bloku Q_{lcs}

```
1  foreach blok  $O_{mask}$  v  $O$  do
2      otoč blok tak aby směr papírních linií byl kolmý k ose x
3      ořízni blok tak aby neobsahoval žádné neplatné oblasti
4      vypočti popis hřebene  $T$  bloku
5      vypočti přímkou určující práh  $P$  pomocí lineární regrese nad popisem  $T$ 
6      vypočti vektor  $W$ , který obsahuje šířky hřebenů a údolí
7      urči normálovou šířku hřebenů a údolí
8      urči špatně klasifikované pixely
9      vypočti  $Q_{lcs}$  z špatně klasifikovaných pixelů, normálové šířky a vektoru  $W$ 
10 end foreach
11 return kvalitu  $Q_{lcs}$  pro každý blok  $O_{mask}$ 
```



Obrázek 3.4: Části výpočtu LCS – (a) otočený blok obrazu O , (b) průměrné hodnoty bloku, (c) popis hřebene T s červeně vyznačenou prahovou přímkou, (d) grafické znázornění vektoru W . Převzato z [18].

Jistota určení orientace

Tato míra (Orientation Certainty Level, OCL) určuje, jak je jasně čitelný hlavní směr linií v rámci bloku. Bloky, které mají jasně detekovatelný směr jsou považovány za kvalitnější, dosahují tedy vyšších hodnot. Pomocí centered differences method je určena kovariační matice, z níž je vyčíslena kvalita Q_{ocl} pro každý blok. Jedná se o komplexní matematický výpočet, který nelze zkráceně popsat. Kompletní informace jsou dostupné v samotné dokumentaci [18].

Tok orientace

Tok orientace (Orientation Flow, OFL) slouží pro porovnání orientace daného bloku s jeho osmi-okolím. Bloky, které mají shodný směr jako jejich bezprostřední okolí se považují za kvalitnější. Pokud blok vykazuje velký rozdíl v orientaci vůči sousedům, je potencionálně chybný, a tedy označen za méně kvalitní.

Jednotvárnost papilárních linií

Ridge Valley Uniformity (RVU) kontroluje, zda jsou šířky papilárních linií stejně široké. Šířka linie bývá u otisků většinou velmi podobná a ta místa kde tomu tak není, nejsou vhodná pro následné zpracování porovnávací jednotkou. Podrobný popis je v algoritmu 5. Za povšimnutí stojí podobnost výpočtu s výše zmiňovaným postupem pro určení zřetelnosti linií (LCS) v algoritmu 4.

Algoritmus 5: Jednotvárnost papilárních linií, RVU

Vstup: Oříznutý obraz otisku O , maska otisku O_{mask}

Výstup: Hodnocení kvality bloku Q_{rvu}

```
1  foreach blok  $O_{mask}$  v  $O$  do
2      urči tok orientace pro daný blok
3      otoč blok tak aby tok papilárních linií byl kolmý k ose x
4      ořízni blok tak aby neobsahovaly žádné neplatné oblasti
5      vypočti popis hřebene  $T$  bloku
6      vypočti přímku určující práh  $P$  pomocí lineární regrese nad popisem  $T$ 
7      vypočti vektor  $W$ , který obsahuje šířky hřebenů a údolí
8      urči vektor přechodů  $C$ 
9      vyřaď první a poslední prvek z vektoru  $C$  (jedná se o nekompletní
      hřeben/údolí)
10     vypočti  $Q_{lcs}$  jako poměr šířky údolí a hřebnů
11  end foreach
12  return kvalitu  $Q_{rvu}$  pro každý bloku  $O_{mask}$ 
```

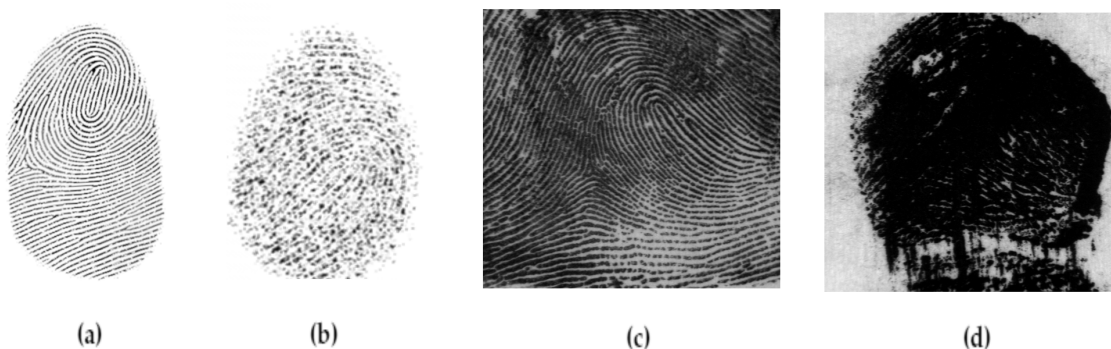
Odstínová diferencovanost

U kvalitního otisku prstů musí být značný rozdíl v odstínech šedi mezi hřebeny a údolími papilárních linií. Také velikost samotného otisku by měla být větší než pozadí. Velmi rychlým a jednoduchým způsobem, jak toto ověřit je vypočítat aritmetický průměr odstínů v obraze. Výsledný aritmetický průměr by tedy měl v ideálním stavu ležet okolo středních hodnot. Pro vektor rysů se používají dvě hodnoty Q_{MU} – průměr odstínů každého pixelu v obraze a Q_{MMB} – průměr průměrů odstínů v každém bloku popředí otisku. Je ale nutno podotknout, že tento přístup může být velmi nepřesný až chybový, jak je vidět v obrázku 3.5.

Markanty

NFIQ 2.0 využívá k určení kvality také údaje o markantech v otisku. Pro detekci používá upravený FingerJet FX OSE (fjfx) extraktor. Zdrojové kódy a dokumentace je dostupná zde [5]. Po nalezení všech markantů v otisku se musí pro každý určit jeho kvalita. Určují se dvě míry Q_{min}^{mu} a Q_{min}^{ocl} .

Pro oba přístupy je nutné vytvořit dočasný blok o velikost 32 x 32 pixelů, který se vytvoří okolo středu markantu. První Q_{min}^{mu} se určuje na základu průměru a směrodatné odchylky odstínů šedi v obraze. Také je použit průměr šedi z dočasného bloku. Druhá míra Q_{min}^{ocl} se vypočítá pomocí výše zmíněné jistoty orientace (OCL) z dočasného bloku. Obě tyto hodnoty se promítnou do vektoru rysů.



Obrázek 3.5: Otisky s rozdílnou kvalitou (a,c \simeq 80; b,d \simeq 42) a rozdílnými hodnotami MMU a MMB(a,b \simeq 205; c,d \simeq 92).

Oblast zájmu

Oblast zájmu (Region of Interest, ROI) označuje ty části obrazu, kde se nachází hlavní část otisku. Výše zmíněné algoritmy pro separaci obrazu počítají s tím, že otisk je jeden celistvý útvar uprostřed obrazu. V praxi se ale stává, hlavně u inkoustových otisků, že je na obraze také přítomno množství další menších objektů.

Postup nalezení této oblasti popisuje algoritmus 6. Zpracování probíhá na principu rozostření a následného binarizování obrazu. K rozostření je použito Gaussova metoda [22] a k binarizování obrazu je využito Otsův algoritmus [20].

Algoritmus 6: Oblast zájmu, ROI

Vstup: Obraz otisku I v odstínech šedi

Výstup: Binarizovaný obraz se zanesenými oblastmi zájmu ROI

- 1 naruš obraz za použití strukturálního bloku o velikosti 5x5
 - 2 rozostří obraz pomocí Gaussovského filtru o šířce a výšce 41 a odchylkou 0
 - 3 binarizuj obraz pomocí Otsovy metody
 - 4 rozostří obraz pomocí Gaussovského filtru o šířce a výšce 91 a odchylkou 0
 - 5 binarizuj obraz pomocí Otsovy metody
 - 6 nalezni obrysy v obraze pomocí algoritmu Suzuki
 - 7 vyplň všechny vzniklé bílé otvory
 - 8 Odstraň všechny černé oblasti, které jsou na okraji snímku a nejsou největším objektem
 - 9 **return** ROI z výsledných černých ploch
-

Původní obraz otisku je rozdělen do dočasných bloků o velikosti 32x32 pixelů. U všech bloků, které obsahují alespoň jeden pixel černé barvy v binarizovaném obrazu ROI , je vypočtena jejich průměrná hodnota odstínu šedi. Průměry od všech bloků jsou opět zprůměrovány a výsledkem je Q_{AREA}^{μ} jenž slouží jako rys kvality.

Další hodnotou pro určení kvality využívající oblast zájmu je souvislosti mapy orientace. Jedná se o součet souvislosti orientace všech dočasných bloků o velikosti 16x16 pixelů. Algoritmus 7 popisuje tento výpočet. Zmíněný součet Q_{COH}^{sum} je také použit v dalším rysu kvality, a to relativním součtu orientace bloků – Q_{COH}^{rel} . Výpočet je velmi jednoduchý

$Q_{COH}^{rel} = Q_{COH}^{sum}/n$, kde n je počet bloků, které mají alespoň jeden pixel v oblasti zájmu ROI . Ve výsledku tedy z oblasti zájmu získáváme tři rysy kvality ($Q_{AREA}^{\mu}, Q_{COH}^{sum}, Q_{COH}^{rel}$).

Algoritmus 7: Výpočet souvislosti mapy orientace, COH

Vstup: Obraz otisku I v odstínech šedi, oblastmi zájmu ROI

Výstup: Hodnocení kvality Q_{coh}

```

1   vypočítej gradient pole vstupního obrazu  $I$ 
2   výsledek použij pro výpočet čtverečního gradientu
3   foreach blok  $16 \times 16$  v  $I$  do
4     if počet pixelů bloku v  $ROI > 0$  then
5       výpočet  $COH$  – souvislosti orientace pro daný blok
6     else
7       nastav coherenci bloku  $COH$  na 0
8     end if
9   end foreach
10  return vypočti  $Q_{sumCOH}$  jako součet všech  $COH$  od každého bloku

```

3.1.4 Zpracování vektoru rysů

Všechny výše zmíněné výpočty sloužily pro sestavení jednoho vektoru kvality pro daný obraz. Pro kompletaci vektoru je v této fázi ještě nutné zpracovat lokální výsledky metrik FDA, LCS, OCL, OFL a RVU. Pro každou tuto hodnotu se vypočte její aritmetický průměr, směrodatná odchylka a také histogram. Každý histogram je reprezentován pomocí 10 tříd (rozsahů), které jsou definované fixně pro každou vlastnost. Histogram je tedy zapsán ve formě deseti-dimenzionálního vektoru.

Formát vektoru rysů:

$$Q_{NFIQ2.0} = ($$

- Q_{FDA}^{μ} – Aritmetický průměr kvality Q_{FDA} všech bloků otisku,
- Q_{LCS}^{μ} – Aritmetický průměr kvality Q_{LCS} všech bloků otisku,
- Q_{OCL}^{μ} – Aritmetický průměr kvality Q_{OCL} všech bloků otisku,
- Q_{OFL}^{μ} – Aritmetický průměr kvality Q_{OFL} všech bloků otisku,
- Q_{RVU}^{μ} – Aritmetický průměr kvality Q_{RVU} všech bloků otisku,
- Q_{FDA}^{σ} – Směrodatná odchylka kvality Q_{FDA} všech bloků otisku,
- Q_{LCS}^{σ} – Směrodatná odchylka kvality Q_{LCS} všech bloků otisku,
- Q_{OCL}^{σ} – Směrodatná odchylka kvality Q_{OCL} všech bloků otisku,
- Q_{OFL}^{σ} – Směrodatná odchylka kvality Q_{OFL} všech bloků otisku,
- Q_{RVU}^{σ} – Směrodatná odchylka kvality Q_{RVU} všech bloků otisku,
- Q_{FDA} – Histogram kvality Q_{FDA} všech bloků otisku,
- Q_{LCS} – Histogram kvality Q_{LCS} všech bloků otisku,
- Q_{OCL} – Histogram kvality Q_{OCL} všech bloků otisku,
- Q_{OFL} – Histogram kvality Q_{OFL} všech bloků otisku,

- Q_{RVU} – Histogram kvality Q_{RVU} všech bloků otisku,
 - Q_{MU} – Průměr odstínů každého pixelu v obrazu,
 - Q_{MMB} – Průměr průměrů odstínů pixelů v každém bloku otisku,
 - Q_{AREA}^{μ} – Průměrná hodnota odstínu šedi v ROI ,
 - Q_{COH}^{sum} – Souvislosti mapy orientace,
 - Q_{COH}^{rel} – Relativní souvislosti mapy orientace,
 - Q_{MIN}^{cnt} – Celkový počet markantů,
 - Q_{MIN}^{com} – Počet markantů v centru otisku,
 - Q_{MIN}^{mu} – Průměr Q_{min}^{mu} vycházející z odstínu šedi v okolí markantů,
 - Q_{MIN}^{ocl} – Průměrná hodnota Q_{min}^{ocl} tedy jistoty orientace v okolí markantů
-)

Následně je použit klasifikační algoritmus Random Forests [3]. NFIQ 2.0 využívá implementaci z knihovny openCV. Jedná se o les rozhodovacích stromů, kde jsou stromy generovány a trénovány podle určitých pravidel. Každý strom rozhoduje, zda je daný vektor v nulté (nekvalitní) či první (kvalitní) třídě. Po zpracování každým stromem dojde k „hlasování“ a je rozhodnuto s jakou pravděpodobností patří do které třídy. Výsledná kvalita se vypočítá jako pravděpodobnost, že daný obraz patří do první(kvalitní) třídy, vynásobeno 100 a zaokrouhleno na nejbližší celé číslo. Algoritmus tedy slouží pro určení výsledné kvality (jedno číslo v rozsahu 0 až 100) z vektoru rysů.

3.1.5 Shrnutí

NFIQ 2.0 disponuje velmi velkou efektivitou. Zpracování jednoho otisku trvá v závislosti na jeho velikosti v řádech milisekund i při použití kancelářského počítače. Celý zdrojový kód je optimalizován pro co nejmenší výpočetní výkon což má zásadní negativní vliv na jeho čitelnost. Vhodná je možnost ponechat ve výstupu i celý vektor rysů. Jelikož se jedná o referenční implementaci mezinárodní normy počítá se s jeho častým začleněním do dalších aplikací, jak tomu bylo u NFIQ 1.0.

Instalace aktuální verze programu není jednoduchá a často se vyskytují různé komplikace. Program je také extrémně citlivý na sebemenší rozdíl v rozlišení či způsobu zachycení otisku. Ovládání je možné momentálně pouze přes příkazovou řádku.

Popis	Hodnota
Podporovaný operační systémy	Linux, macOS
Licence	public domain
Rozlišení otisku	500 ppi
Formát souboru otisku	BMP, JPEG, JPEG2000, WSQ

Tabulka 3.2: Shrnutí informací o NFIQ 2.0.

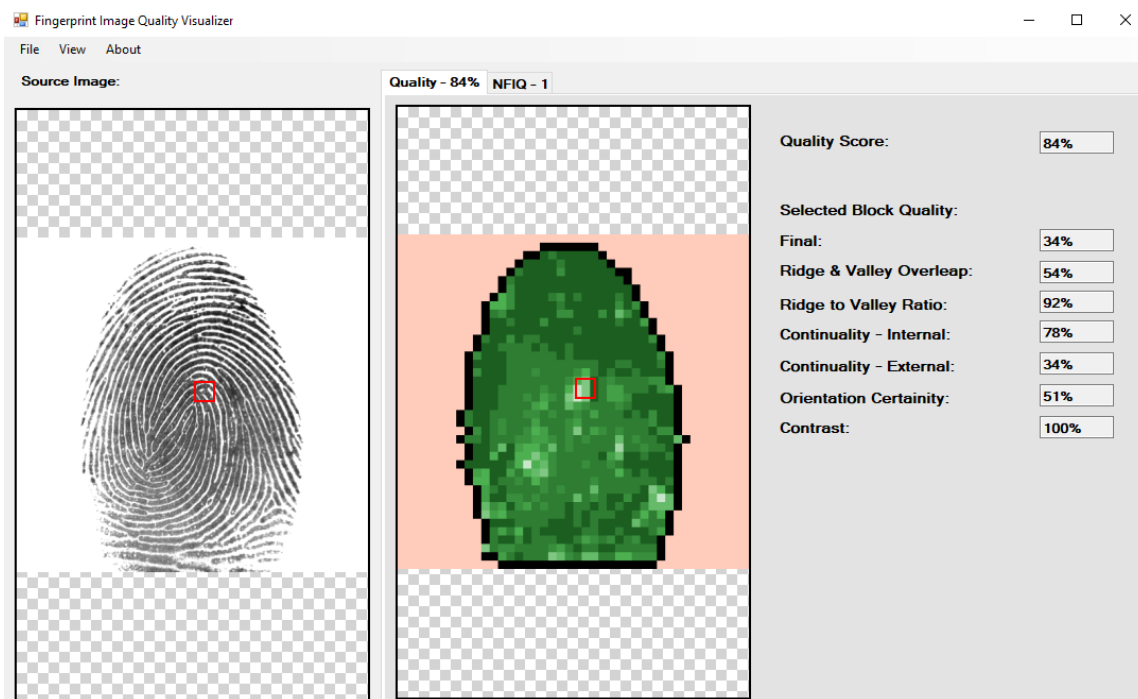
3.2 Fingerprint Quality Visualizer

Jedná se o výsledek diplomové práce Ing. Tomáše Oravce [19]. Cílem práce bylo vytvořit program pro určení kvality otisku, který zpřesní již v té době² zastaralý NFIQ z roku 2004. Verifikace byla provedena vůči NFIQ a programu VeriFinger od firmy Neurotechnology. Program nelze připojit k žádnému snímači, pracuje pouze s již dříve pořízenými obrazy otisků prstů.

Samotná aplikace je napsaná v jazyce C# s využitím .NET Framework 4.5 a Windows Forms. Již při vývoji byl kladen důraz na modularitu a čitelnost. Právě proto jsou výsledné zdrojové kódy lehce rozšiřitelné. Program pracuje pouze v grafickém rozhraní, kde zobrazuje jak originál otisku, obraz kvality tak i hodnoty konkrétních metrik. Obsahuje také implementaci již zmíněného programu NFIQ. Pro uživatele je tedy možné hned porovnat výsledky těchto dvou systémů.

Jedním z cílů práce také bylo adekvátně ohodnotit otisky zasažené různým kožním nemocněním. Takto poškozené otisky totiž mají horší kvalitu než jejich zdravé protějšky. NFIQ ale tento fakt vůbec nebral v potaz a často dokonce nemocné otisky i ohodnocoval lépe. FQV je tedy koncipován tak aby byl schopen kožní choroby detekovat.

Výstupem FQV je míra celkové kvality uvedená v procentech a dalších 7 vlastností každého bloku obrazu. Lze zobrazit také všech 12 hodnot výstupu NFIQ pro daný otisk. Pracovat lze buď jednotlivě nebo dávkově. Při dávkovém zpracování lze celkové výsledky obou částí vyexportovat do souboru ve formátu CSV. Více informací o práci s aplikací lze také vyčíst v uživatelském manuálu, jenž je přílohou diplomové práce. Snímek aplikace je v obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Hlavní okno programu Fingerprint Quality Visualizer.

²Práce byla vytvářena na jaře roku 2018.

3.2.1 Postup určení kvality

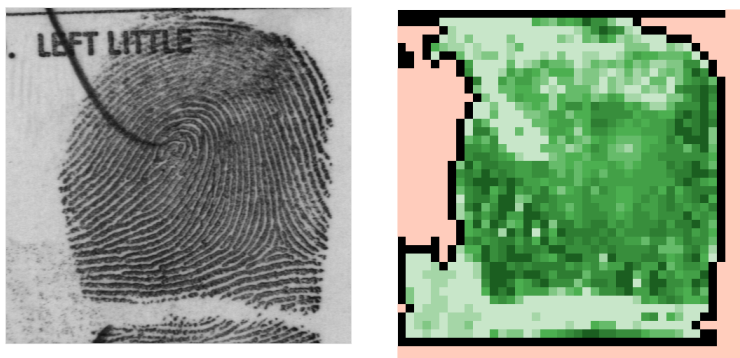
Pro vyhodnocení kvality otisku byly použity poměrně známe a probádané postupy z této oblasti. Níže uvedený popis je pouze stručné shrnutí celkové práce programu. Detailní postup je popsán přímo v textu diplomové práce. Celá tato podkapitola je převzata a zkrácena z tohoto textu [19].

Zpracování a rozdělení obrazu

Jako první krok je potřeba zkonvertovat vstupní obraz do vhodného formátu. Oba programy pracují s obrazy barevné hloubky 256 bitů. FQV pracuje pouze na principu lokální analýzy obrazu. Celý obraz se tedy rozdělí na okna o velikosti 28x28 pixelů a vnořené bloky, jednotné velikosti 12x12 pixelů. Okraje obrazu, které přecházejí z mřížky se ignorují, protože hrany obrazu většinou totiž nenesou podstatné informace. Dále se tedy pracuje pouze s těmito okny a bloky. Pro zobrazení postupu tvorby bloků lze využít obrázek 3.1 od programu NFIQ 2.0.

Separace pozadí

Rozlišit pozadí a samotný otisk je pro další práci klíčové. S bloky, které budou označeny jako pozadí, se nebude již dále pracovat. FQV funguje na jednoduchém principu, kdy analyzuje distribuci šedi v každém bloku. Vychází z vlastnosti otisků, kde se střídají hřebeny a údolí, a tedy i mění intenzita barev. Pokud daný blok obsahuje více odstínů, než je daný práh, je označen jako součást otisku. Tento práh je nastaven na hodnotu 25, tedy skoro 10 % z celého spektra. Pro eliminaci chyb způsobené nežádoucími artefakty v otisku je celý obraz ořezán o 5 % krajních intenzit. Zde je nutno podotknout že jelikož je velikost bloku pevně daná může dojít k špatnému vyhodnocení při extrémně velkém rozlišení otisku. Také mohou být za popředí označeny různé nežádoucí artefakty v pozadí, jak lze vidět na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7: Obraz s chybou při segmentaci otisku.

Určení orientace

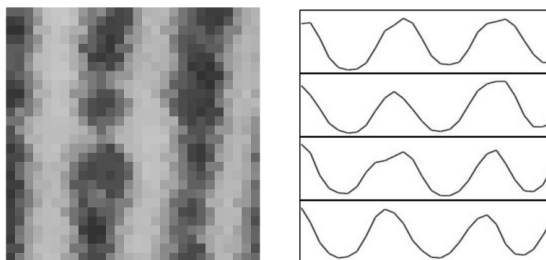
„Základním krokem pro jakékoliv další zpracování otisku je vypočítání pole orientací. Každý z bloků obrazu je postupně otáčen okolo svého středu. Když je velikost úhlu otočení nastavená na 10 stupňů a orientace jednotlivých bloků mohou dosahovat hodnoty v rozmezí 0

až 179 stupňů, získáme tímto způsobem 18 různých otočení bloku. Pro každou z orientací je následně spočítána suma pixelů ve vertikálním směru, čímž vznikne vektor 28 součtů pixelů. V případě že je orientace správná, hodnoty spočítaného vektoru mají mít tvar sinusové křivky, což by mělo odrážet strukturu jednotlivých papilárních linií. Pokud však orientace není správná, hodnoty vektoru budou představovat neidentifikovatelný šum. Cílem tohoto kroku je tedy zkontrolovat všech 18 různých vektorů součtů pixelů a najít ten, který bude mít jednotlivé papilární linie co nejsilnější.“ [19]

Tímto způsobem bude tedy zjištěna orientace daného okna. Během výpočtu je také určena tzv. orientační jistota. Tato hodnota bude představovat určitost správného spočítání orientace. Pokud bude mít dané okno malou orientační jistotu, nepůjde tedy spolehlivě určit orientaci daného okna, orientace bude muset být dopočítána pomocí okolních oken. Tento údaj je totiž potřebný v dalších krocích. Orientační jistota je také použita jako jeden z faktorů určení kvality.

Rozdělení okna

Od této fáze se pracuje pouze s vektory sinusového tvaru, jenž jsou tvořeny pixely ve směru kolmém na orientaci. Sinusová křivka tedy bude připomínat řez otiskem, kde amplituda bude představovat hřeben papilární linie. Tento vektor je jedním z mezivýsledků předešlého kroku. Jelikož jednotlivé linie nemusí být v daném okně rovnoběžné, musí se tedy každé rozdělit na 4 části, kolmo směrem k orientaci. Takto získáme z každého okna různé 4 vektory, jak zobrazuje obrázek 3.8.



Obrázek 3.8: Popis rozdělení okna – vlevo detail bloku, vpravo grafická reprezentace čtyř výsledných vektorů. Převzato z [19].

Kontinualita

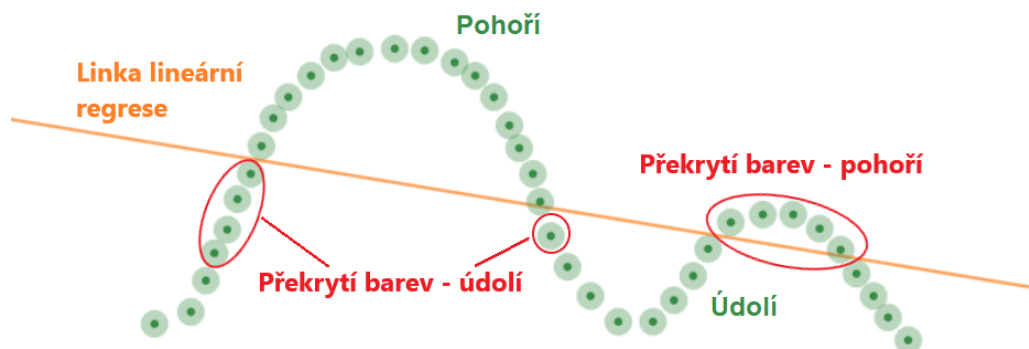
Tento krok má za úkol detekovat přerušení a náhlou změnu v orientaci papilárních linií. Pro každou část okna se vypočítá frekvence pomocí diskrétní Fourierovy transformace (DFT). Pokud jsou si výsledné frekvence každé části podobné, svědčí to o kontinuitě v rámci daného okna. Tato hodnota se také používá pro porovnání vůči 8 nejbližším okolním oknům.

Poměr a rozložení barev hřebenů a údolí

Jako další dílčí faktor určení kvality je použit poměr mezi hřebeny a údolími. Pro každé okno je pomocí lineární regrese vypočtená křivka, která rozdělí vektor na hřebeny a údolí. V ideálním případě je poměr 1:1. Pokud je pohoří více než údolí, je pravděpodobné, že se

jedná o mokrý či znečištěný otisk. V opačném případě nejsou pohoří dostatečně výrazná a může se tedy jednat o tzv. suchý otisk viz výše podkapitola 2.5.

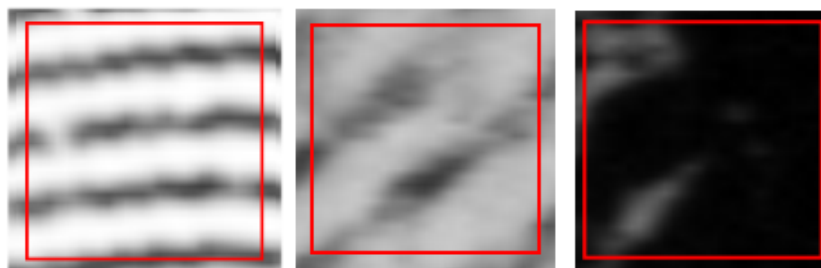
Výše zmíněné rozdělení na hřebeny a údolí je použito i při další fázi určení kvality. Nejprve se vypočte počet překrytí barev mezi těmito dvěma vzniklými skupinami. Samotné překrytí demonstruje obrázek 3.9. Pokud se barvy nepřekrývají je tento vektor ohodnocen 100 % kvalitou. Se zvyšujícím se počtem překrytých pixelů se kvalita zhoršuje, jednotlivé hřebeny splývají s údolími. Tato technika ale často selhává u otisků s problémovým rozlišením nebo u vzorků s periodickým šumem.



Obrázek 3.9: Schéma zobrazující překrytí barev hřebenů a údolí ve vektoru šedi bloku.

Kontrast

Podstatnou veličinou je i kontrast vektoru. Kvůli eliminaci chyb se výpočet provádí jako rozdíl průměrných hodnot jeho 5 % nejvyšších a 5 % nejnižších hodnot intenzity jednotlivých pixelů. Kontrast je dostačující již při využití 30 % rozsahu odstínu šedi. Vektory dosahující této hranice jsou označeny maximální hodnotou kvality kontrastu. Toto ohodnocení lineárně klesá při snižujícím se hodnotě kontrastu. Ukázky této vlastnosti jsou v obrázku 3.10



Obrázek 3.10: Ukázky bloků s odlišným kontrastem – vlevo blok s kontrastem 89 %, uprostřed blok s kontrastem 30 %, vpravo blok s kontrastem 15 %.

3.2.2 Shrnutí

Pro každý blok se tedy vypočte procentuální kvalita těchto šesti vlastností:

- Překrytí distribučních barev hřebenu a údolí podle lineární regrese – Q_l .
- Poměr hřebenu a údolí – Q_r .
- Kontinuality struktury v rámci jednoho bloku – Q_{cb} .
- Kontinuality struktury vzhledem na okolní bloky – Q_{ce} .
- Jistoty orientace – Q_o .
- Rozsah kontrastu – Q_c .

Výsledná kvalita bloku je rovna nejmenší z těchto hodnot. Výjimku tvoří Q_l a Q_r místo kterých, se používá aritmetický průměr všech vlastností. Zde byl nalezen rozpor zdrojových kódů s dokumentací, která tvrdila že výjimka se stahuje pouze na Q_l .

Za poznámku také stojí že tímto výpočtem není nikdy možné získat 100 % kvalitu, jelikož okraje otisku přerušují papírní linii, a to je počítáno za deformaci.

Hlavní výhodou FQV je jeho čitelnost. Rozšíření o nové nebo úprava již implementovaných postupů je opravdu jednoduchá. Proto je program dobrou volbou pro vývoj a testování nových metrik. Výpovědní hodnota výsledků je vzhledem k použití relativně nenáročných algoritmů také velmi dobrá. Užitečné je také zobrazení výsledků jednotlivých metrik u každého okna. Za zmínku stojí také pěkné grafické rozhraní.

Na druhou stranu výpočetní rychlost programu je opravdu velká (v řádech jednotek sekund). Přenositelnost je také velmi omezena. FQV funguje pouze pod operačním systémem Windows. Chybí také možnost spuštění bez grafického prostředí z příkazové řádky. Nelze jej tedy připojit k žádnému snímači. Ač je možné zpracovávat otisky dávkově je stále nutné si vše proklikat, a to při zpracování většího množství otisku není komfortní.

Popis	Hodnota
Podporovaný operační systémy	Windows (.NET Framework 4.5)
Licence	VUT – soukromá
Rozlišení otisku	200 – 1000 ppi
Formát souboru otisku	JPG, JPEG, PNG, BMP

Tabulka 3.3: Shrnutí informací o FQV.

3.3 Neurotechnology VeriFinger

Firma Neurotechnology se zabývá využitím neuronových sítí v oblasti biometrie, počítačového vidění a umělé inteligence. Byla založena v roce 1990 v hlavním městě Litvy, Vilniusu. Momentálně má přes 100 zaměstnanců a firemní zástupce s distributory lze nalézt po celém světě. [13]

Jedním z hlavních produktů je biometrický balíček MegaMatcher, jenž popisuje obrázek 3.11. Integruje v sobě čtyři nástroje, se kterými lze pracovat i jednotlivě:

- VeriFinger – zpracování otisků prstů.
- VeriLook – zpracování obličeje.
- VeriEye – zpracování duhovky oka.
- VeriSpeak – zpracování hlasu.

V současné době jsou tyto produkty použity ve více než 3000 bezpečnostních systémech ve více jak 100 zemích světa³. Za zmínku stojí například identifikace 80 milionu voličů v Bangladéši, biometrický systém pro pasovou kontrolu v Polsku nebo využití rozpoznání obličeje v noteboocích značky Lenovo.

Nástroj VeriFinger je určen pro vývojáře k integrování do biometrických systémů. K dispozici je jako sada pro vývoj softwaru, která umožňuje tvorbu samostatných a webových řešení na platformách Microsoft Windows, Linux, Mac OS X, iOS a Android. Samotná implementace je tvořena i v několika programovacích jazycích jako je C, C++, C#, Java nebo Visual Basic. Technologie zajišťuje rychlou a spolehlivou verifikaci i indentifikaci. [15]

3.3.1 Postup určení kvality

Jelikož je VeriFinger komerční program, není tedy zveřejněn žádný přesný postup, jak dochází k určování kvality. K dispozici je pouze detailní popis aplikačního rozhraní, s kterým lze pracovat [14]. Pro tvorbu vlastního programu je možné také využít některé z velkého množství dostupných vzorových řešení a tutoriálů. Pro tuto práci bylo nutné získat pouze kvalitu otisků v co nejjednodušším formátu pro další analýzu, jak tomu je u NFIQ 2.0 či FQV. Takovouto funkcionalitu bohužel VeriFinger v základním stavu neposkytuje proto bylo nutné si na toto vytvořit vlastní nástroj.

Zdrojové kódy tohoto rozšíření jsou přílohou této práce viz příloha A. Tento nástroj z otisku vytváří biometrickou šablonu. Z této šablony lze poté získat jak kvalitu určenou algoritmem VeriFinger, tak také množství nalezených markantů.

3.3.2 Shrnutí

VeriFinger je komerční software, který je také dostupný i v trial verzi. Program je určen k verifikaci a identifikaci. Kvalita otisku má zde pouze praktické využití, při určování prahu pro postoupení otisku k porovnání. Jedná se pouze o framework, jenž lze velmi jednoduše integrovat do různých aplikací. Dokumentace je velmi rozsáhlá [14]. Aplikace má velmi dobrou přenositelnost, jelikož podporuje velké množství programovacích jazyků tak i operačních systémů. Hledisko rychlosti určování kvality nelze specifikovat, jelikož přesná hodnota je dostupná až po zpracování celého obrazu. Stejně jako NFIQ 2.0 je citlivý jak na rozměry, tak i rozlišení otisku.

³<https://www.neurotechnology.com/cgi-bin/customers.cgi>

Popis	Hodnota
Podporovaný operační systémy	Windows, Linux, Mac OS X, iOS, Android
Licence	339 €/ Trial verze
Rozlišení otisku	250 – 1000 dpi
Formát souboru otisku	JPG, PNG, BMP

Tabulka 3.4: Shrnutí informací o VeriFinger.

<p>VeriFinger 11.0 Standard SDK (€ 339)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 Fingerprint Extractor 1 Mobile Fingerprint Extractor 1 Fingerprint Matcher 1 Mobile Fingerprint Matcher 	<p>VeriLook 11.0 Standard SDK (€ 339)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 Face Extractor 1 Mobile Face Extractor 1 Face Matcher 1 Mobile Face Matcher 	<p>VeriEye 11.0 Standard SDK (€ 339)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 Iris Extractor 1 Mobile Iris Extractor 1 Iris Matcher 1 Mobile Iris Matcher 	<p>VeriSpeak 11.0 Standard SDK (€ 339)</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 Voice Extractor 1 Mobile Voice Extractor 1 Voice Matcher 1 Mobile Voice Matcher
<p>VeriFinger 11.0 Extended SDK (€ 859)</p> <ul style="list-style-type: none"> + 3 Fingerprint Clients + 3 Mobile Fingerprint Clients + Matching Server 	<p>VeriLook 11.0 Extended SDK (€ 859)</p> <ul style="list-style-type: none"> + 3 Face Clients + 3 Mobile Face Clients + Matching Server 	<p>VeriEye 11.0 Extended SDK (€ 859)</p> <ul style="list-style-type: none"> + 3 Iris Clients + 3 Mobile Iris Clients + Matching Server 	<p>VeriSpeak 11.0 Extended SDK (€ 859)</p> <ul style="list-style-type: none"> + 3 Voice Clients + 3 Mobile Voice Clients + Matching Server
<p>MegaMatcher 11.0 Standard SDK (€ 2590)</p> <ul style="list-style-type: none"> + 1 Fast Fingerprint Matcher + 1 Fast Face Matcher + 1 Fast Iris Matcher + 1 Fingerprint Image Processing + 1 Face Image Processing + 1 Iris Image Processing + 1 Voice Processing + 1 Palm Print Client + 1 Palm Print Matcher 			
<p>MegaMatcher 11.0 Extended SDK (€ 4990)</p> <ul style="list-style-type: none"> + 1 MegaMatcher Accelerator Development Edition (fingerprint, face and iris engines) 			
<p>MegaMatcher Automated Biometric Identification System Starting Kit (€ 14,990)</p> <ul style="list-style-type: none"> + 1 Management Service + 1 Image Processing Service + 1 Matching Service Development Edition + 10 MegaMatcher ABIS Client Applications 			

Obrázek 3.11: Popis produktu MegaMatcher, převzato z [15].

Kapitola 4

Vzájemné porovnání systémů

Problematiku porovnání výše zmíněných systémů lze řešit různými způsoby. Tato práce nezahrnuje srovnání z hledisek jako je například rychlost a bezpečnost. Porovnává pouze finální ohodnocení kvality. Samotná definice kvality otisků prstů, jak je popsáno v druhé kapitole, je obecná a neexistuje žádný její matematicky ekvivalent. Přesná hodnota tedy není určitelná, a to klade otázku vůči čemu a jakým způsobem systémy porovnat. V této práci byl zvolen přístup, kdy se vybrané sady otisků zpracují všemi třemi systémy a výstupy se budou porovnávat ze statistického hlediska. Výsledkem této kapitoly jsou trendy, které systémy mají a přesné oblasti ve kterých se liší. Cílem je také nalezení specifické množiny otisků, které FQV ohodnocuje velmi rozdílně, tedy potencionálně špatně.

Dalším možným způsobem srovnání systémů je využití porovnávacího modulu, a tedy přímou konfrontaci kvality a efektivity porovnávání. Pro tento přístup by bylo nutné určit jeden či více algoritmů pro porovnání. V každém případě by ale výsledky byly více ovlivněné vybraným algoritmem oproti postupu pro určování kvality. Tento způsob by byl velmi jednostranný, není proto vhodný pro zvolenou míru univerzálnosti této práce.

Pro každý otisk byly vypočteny a zachyceny hodnoty popisující jenž tabulka 4.1. Krom výsledného hodnocení kvality se také zaznamenal počet nalezených markantů programem VeriFinger a extraktorem FJXF.

Název	Popis
File name	Název souboru
NFIQ1-VERI	Známka NFIQ vypočtena programem VefiFinger
NFIQ1-FQV	Známka NFIQ vypočtena programem FQV
NFIQ2	Hodnota kvality podle programu NFIQ 2.0
VERIFINGER	Hodnota kvality podle programu VeriFinger
FQV-old	Hodnota kvality podle programu FQV 1.0
FQV-new	Hodnota kvality podle programu FQV 2.0
FQV-new Cminutae	Odhadovaný počet markantů podle FQV 2.0
VERI-CMINUTAE	Celkový počet nalezených markantů programem VeriFinger
FJXF-CMINUTAE	Celkový počet nalezených markantů extraktorem FJXF

Tabulka 4.1: Popis zachycených hodnot při analýze.

4.1 Databáze otisků

Pro objektivní a smysluplné porovnání systémů je potřeba vybrat ve správném množství co nejrůznorodější obrazy otisků. Dalším kritériem je, aby byl daný otisk zpracovatelný všemi třemi programy. Nejpřísnější je v tomto ohledu NFIQ 2.0, které striktně vyžaduje obrazy v barevné hloubce 8 bitů, rozlišení 500 dpi, a hlavně aby se jednalo o naskenované inkoustové otisky nebo pořízené pomocí optickými snímači. Tento fakt podstatně zúžil výběr použitelných volně dostupných kolekcí otisků. Pro komplexnější testování byly také využity syntetické otisky. Použité sady otisků popisují tabulky 4.2 a 4.3.

Název sady	Počet	Typ	Získávání
FIT-N	251	Válené – Identifikační karta	Offline
FIT-S-1KSA	250	Syntetické – Anguli	Live-scan
FIT-S-SFGDB-OK	60	Syntetické – SFinGe	
FIT-S-SFGDB-ECZ	60	Syntetické – SFinGe (Ekzém)	
FIT-S-SFGDB-WAR	60	Syntetické – SFinGe (Bradavice)	
FIT-S-SFGDB-GEN	160	Syntetické – SFinGe (Chyba snímače)	
FVC2000-A	80	Optické – SDS (KeyTronic)	
FVC2000-C	80	Optické – TouchChip (STMicroelectronics)	
FVC2000-D	80	Syntetické – SFinGe	
FVC2002-A	80	Optické – Identix TouchView II	
FVC2002-B	80	Optické – Biometrika FX2000	
FVC2002-D	80	Syntetické – SFinGe	
FVC2004-A	80	Optické – V300 (CrossMatch)	
FVC2004-B	80	Optické – U.are.U 4000 (Digital Persona)	
FVC2004-D	80	Syntetické – SFinGe	
NEU-DPUAU4000	520	Optické – U.are.U 4000 (Digital Persona)	
NEU-CMV300	408	Optické – V300 (CrossMatch)	
NIST-FIG0	500	Válené – Identifikační karta	
NIST-FIG1	500	Válené – Identifikační karta	
NIST-FIG2	500	Válené – Identifikační karta	
NIST-FIG3	500	Válené – Identifikační karta	
NIST-FIG4	500	Válené – Identifikační karta	
NIST-FIG5	500	Válené – Identifikační karta	
NIST-FIG6	500	Válené – Identifikační karta	
NIST-FIG7	500	Válené – Identifikační karta	

Tabulka 4.2: Popis databáze otisků.

Celkově bylo zpracováno 6489 otisků prstů. Pro porovnání bylo využito krom veřejně dostupných kolekcí otisků také neširoitelná sada otisků od pacientů s kožními nemocemi označena FIT-N. Zbytek otisků označených FIT-S jsou uměle vygenerované otisky. Obě tyto sady vznikly na Fakultě informačních technologií, Vysokého učení technického a nejsou volně dostupné¹.

Konkrétně sady nazvané FIT-S-SFGDB-WAR a FIT-S-SFGDB-ECZ obsahují totožné umělé otisky jako FIT-S-SFGDB-OK jen s dodatečně degenerovanými kožním onemocněním. Přesněji zkratka WAR představuje warts tedy bradavice a ECZ plným názvem eceza,

¹V případě zájmu o tyto otisky lze kontaktovat výzkumnou skupinu STRaDe FIT VUT.

Název kolekce	Zdroj
FIT	Neveřejné
FVC2000	http://bias.csr.unibo.it/fvc2000/download.asp
FVC2002	http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/download.asp
FVC2004	http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/download.asp
NEU	https://www.neurotechnology.com/download.html
NIST	https://www.nist.gov/srd/nist-special-database-4

Tabulka 4.3: Zdroje kolekcí.

česky atopický ekzém. Vzniká tedy trojice otisků, u kterých by měly programy detekovat zhoršení kvality mezi zdravým a nemocným otiskem.

Dalším zdrojem byly testovací otisky z více ročníků soutěže FVC – International Competition for Fingerprint Verification Algorithms². Jak už název napovídá jednalo se o mezinárodní soutěže zaměřené na výkonost jednotlivých algoritmů pro verifikaci otisků. Kompletní kolekce nejsou volně dostupné, takže bylo využito jen jejich volně dostupné části. Pro tuto práci byly vybrány kvůli jejich velké variabilitě v technice pořizování. Jedná se o všechny otisky označeny předponou FVC.

Z oficiálních stránek firmy Neurotechnology byla použita jejich testovací kolekce otisků. Jedná se o dvě větší sady (každá okolo 500 ks otisků) z dvou různých skenovacích optických zařízení. Tato kolekce má předponu NEU.

Jako poslední byla použita rozsáhlá kolekce s názvem Special Database 4 vytvořená organizací NIST. Jedná se o naskenované identifikační karty, tedy o válené inkoustové otisky. Kolekce je rozdělena do osmi sad pro lehčí zpracování.

4.2 Přesný postup zpracování

Pro kvalitní analýzu programů bylo nutné vytvořit metodický postup zpracování. Prvním krokem bylo nutné převést všechny kolekce otisků na stejnou strukturu. Archivy po stažení obsahují často různé dodatečné dokumenty, ty tedy byly odstraněny. Následně byl využit program IrfanView³ pro konverzi obrazu na požadovaný formát BMP, nastavení barevné hloubky 8 bitů a vytvoření nového unikátního názvu v rámci celé databáze např. „NIST-FIG5-035“. Nové jméno souboru se skládá z názvu kolekce, sady a pořadového čísla. V této fázi jsou obrazy otisků připravené pro určení kvality.

Všechny tři programy podporují dávkové zpracování (pro VeriFinger vlastní nástroj) kde výstupem jsou údaje v CSV souboru. Tyto soubory jsou přílohami této práce. Výsledky byly poté přepokopovány do agregačního souboru, kde byly vyčísleny a vypočteny všechny potřebné statistické údaje. V tomto souboru typu XLSX byly také vytvořeny všechny grafy použité v tomto textu.

Pro každou sadu byly vypočteny průměrné hodnoty kvality získané od každého programu, průměrný absolutní rozdíl v kvalitě mezi programy, směrodatná odchylka tohoto rozdílu a také korelace kvality s množstvím nalezených markantů. Pro výpočet absolutních hodnot reprezentujících celou databázi byl zvolen aritmetický průměr hodnot z každé sady. Tento postup tedy dává každé sadě stejnou váhu nehledě na množství otisků v ní.

²<https://biolab.csr.unibo.it/fvcongoing/UI/Form/Home.aspx>

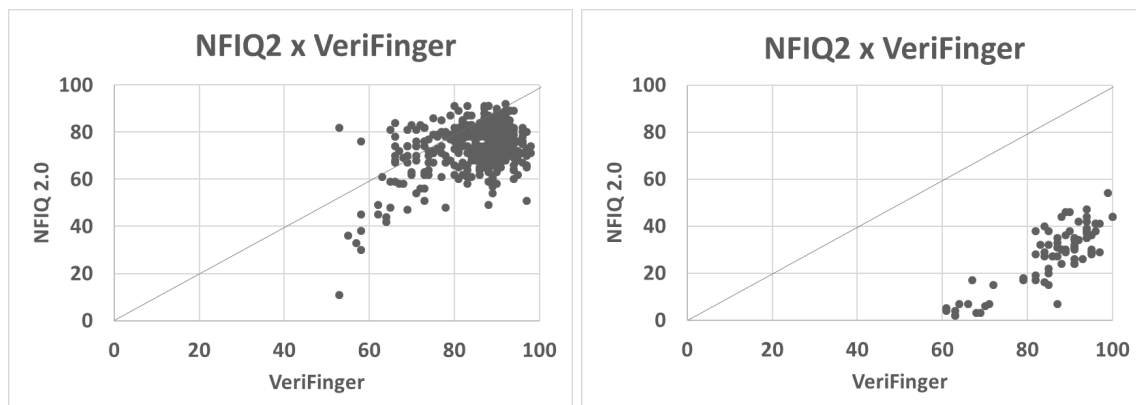
³<https://www.irfanview.com/>

Tímto způsobem nebudou zvýhodněny kolekce s větším množstvím otisků, cílem je mít větší diverzitu v snímacích technologiích.

4.3 Srovnání NFIQ

První verze NFIQ není objektem této práce kvůli svojí zastaralosti, ale jelikož je stále její implementace součástí jak FQV, tak také VeriFinger byly výstupní třídy kvality rovněž zaznamenány. Za zmínku stojí, že se výstupní hodnocení NFIQ u stejného otisku liší v závislosti na programu. V průměru se hodnocení neshodne u 6 % otisků. Tento fakt je pravděpodobně zapříčiněn různou zvolenou výpočetní platformou, jinou produkční verzí NFIQ nebo invazivním vnitřním zpracování obrazu.

Verze NFIQ 2.0, která byla použita v této práci, je velice přísná v hodnocení oproti ostatním programům. Z průměrných konečných hodnot lze vyčíst přibližný rozdíl o 30,1 bodů kvality vůči VeriFinger a 26,2 k FQV, směrodatná odchylka tohoto rozdílu se pohybuje kolem 10 bodů pro oba programy. Vzhledem k stupnici v rozsahu 0 – 100 se jedná o obrovský rozdíl. Největší propast lze sledovat u uměle generovaných otisků. Zajímavé je, že první verze NFIQ takový rozdíl u těchto otisků nevytváří.

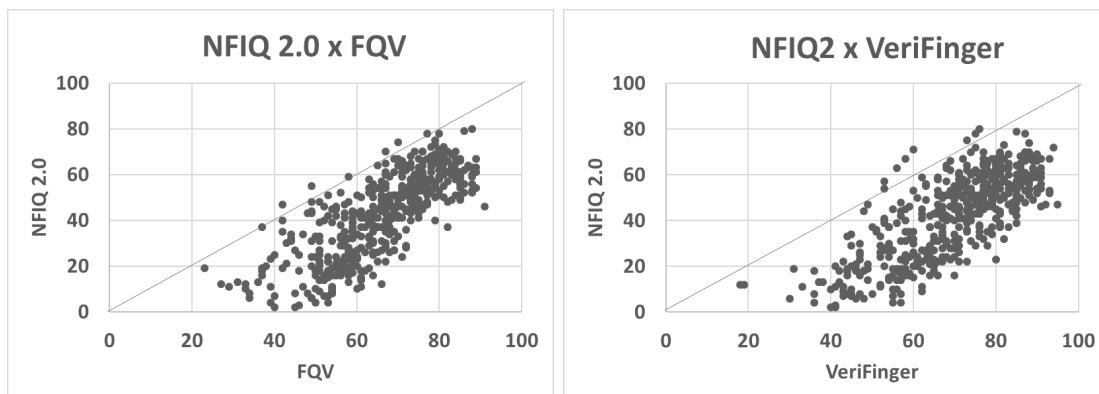


Obrázek 4.1: Srovnání VeriFinger vůči NFIQ 2.0 – vlevo sada NEU-CMV300, vpravo FVC2002-D.

Na dvojici grafů z obrázku 4.1 lze vidět hodnocení kvality u dvou různých sad otisků. Již z prvního pohledu lze vidět veliký rozdíl. Sada NEU-CMV300 byla pořízena pomocí reálného optického skeneru. Zde je průměrný rozdíl v hodnocení pouze 12,6 % vůči VeriFinger, což lze vidět i v blízkosti bodů u diagonální linky jenž představuje shodné hodnocení obou programů. Naproti tomu na grafu od databáze FVC2002-D, jenž obsahuje syntetické otisky, lze pozorovat rozdíl 57,9 %. Velmi podobná čísla dosahuje NFIQ 2.0 u těchto otisků i v porovnání s FQV.

U válených otisků, které jsou v databázi NIST je rozdíl poměrně konstantní jak lze i pozorovat z grafů v obrázku 4.2. Průměrný rozdíl se u těchto sad se pohybuje kolem 23 bodů vůči FQV a 27 vůči VeriFinger. Směrodatná odchylka těchto diferencí se pohybuje kolem 11 bodů.

U detekce zhoršení kvality na základě kožního onemocnění došel NFIQ 2.0 k nejhorším výsledkům. Nejen že nedokázal zhoršení detekovat, ale často poškozené otisky hodnotil



Obrázek 4.2: Hodnocení kvality podle programů VeriFinger a FQV v porovnání s NFIQ 2.0 pro sadu NIST-FIG5.

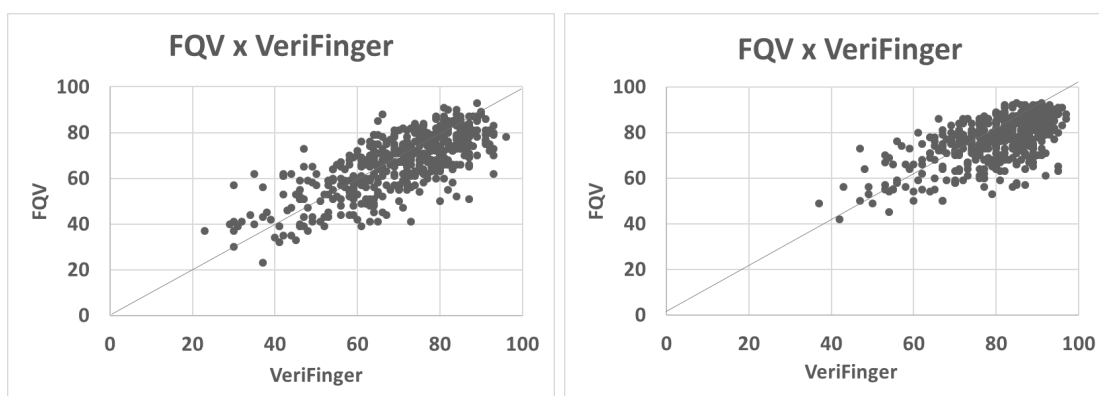
lépe než ty nepoškozené. Jak už bylo popsáno v diplomové práci Ing. Oravce [19] stejným problémem trpěla i první verze NFIQ.

Konkrétně došlo u bradavic k průměrnému zlepšení o jeden bod kvality s směrodatnou odchylkou přibližně 5 bodů. K zhoršení kvality došlo pouze u 33 % otisků. U ekzému byly vytvořeny ještě větší rozdíly. Průměrné zlepšení je pouze 1,8 body, ale směrodatná odchylka se podstatně zvedla již na skoro 10 bodů. Zhoršení bylo detekováno jen u 40 % otisků.

4.4 Srovnání VeriFinger

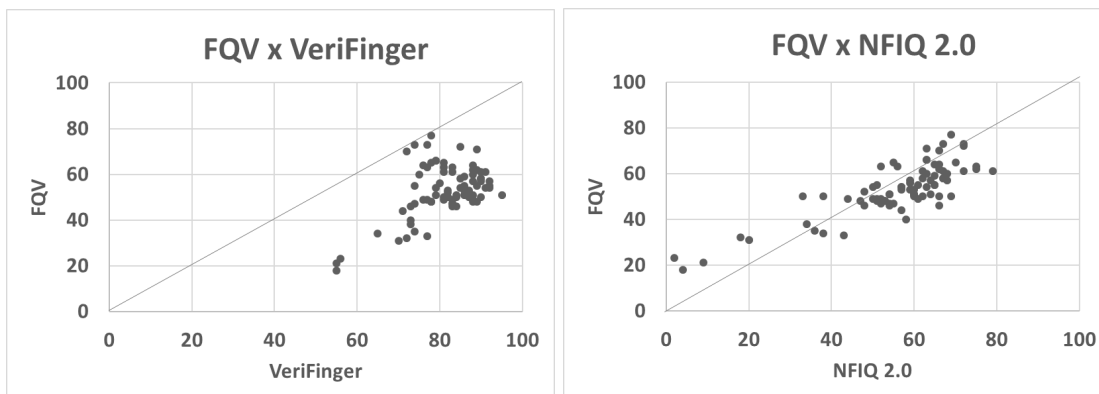
VeriFinger na rozdíl od ostatních programů využil na použité databázi otisků celou šíři hodnotící stupnice. Dokonalé syntetické otisky hodnotí velmi vysoko, často i plným počtem 100 bodů. Na druhou stranu velmi poškozené obrazy dosahují pouze na jednotky bodů.

Hodnocení kvality od FQV je vůči tomu od VeriFinger velmi často velmi podobné. Z celkových čísel vychází rozdíl pouze 10,1 bodů se směrodatnou odchylkou pouze 6,3 bodů. Rozdíl u sad otisků zachyceným jinými způsoby nejsou taktéž veliké, poměr v hodnocení popisuje dvojice grafů z obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Srovnání VeriFinger vůči FQV – vlevo sada NIST-FIG7, vpravo NEU-DPUAU4000.

Jediný velký rozdíl od průměru lze sledovat u sad FVC2000-A a FVC2000-C. Zde průměrný rozdíl přesahuje 20 bodů, FQV zde totiž hodnotí velmi podobně jako NFIQ 2.0, jak lze vidět na grafech v obrázku 4.4. Tyto otisky se vyznačují nízkým kontrastem a pozicí otisku na kraji obrazu. Tyto sady demonstrují, jak programy pracují různě s vlastnostmi obrazu vzorku.



Obrázek 4.4: Hodnocení kvality podle programů VeriFinger a NFIQ 2.0 v porovnání s FQV pro sadu FVC2000-A.

U detekce kožních nemocí získal VeriFinger pomyslné druhé místo, ale i přesto má velké mezery. Nemoc detekoval u stejného množství jako NFIQ 2.0, ale na rozdíl od něho ostatní otisky tak razantně nezlepšoval. V průměru zhoršil hodnocení o 1,3 bodu s odchylkou 3,2 u otisků zasažených bradavicí a necelé 3 body s odchylkou 4,2 u otisků trpícím ekzémem.

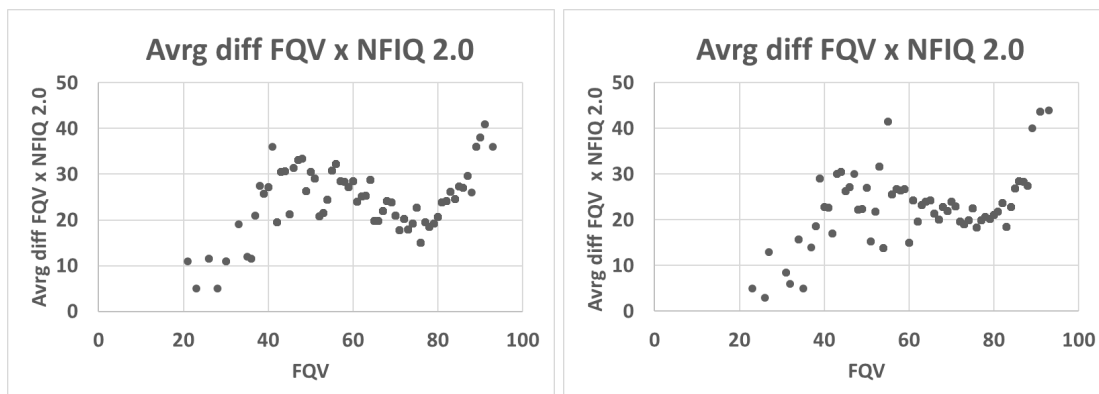
4.5 Srovnání FQV

Z výše uvedeného textu je jasný vztah FQV vůči ostatním programům. Jeho hodnocení se obecně více podobá výsledkům od programu VeriFinger než NFIQ 2.0. Jelikož byl FQV vybrán pro implementaci rozšíření popsaného v následující kapitole, byly jeho výsledky podrobněji analyzovány. Pro upřesnění, kde FQV nejvíce selhává byly pro každou sadu otisků vytvořeny grafy průměrných rozdílů v hodnocení kvality od jiných programů, v závislosti na hodnocení FQV (obrázky 4.5 a 4.6). Jelikož je toto zpracování již více statistické, funguje pouze u větších sad, minimálně v rozsahu řádů několika stovek otisků. Proto je použito pouze u kolekcí NIST a NEU.

Grafy z obrázku 4.5 jsou si velmi podobné. To platí pro celou kolekci NIST, u toho způsobu porovnání. Největší rozdíl lze pozorovat v kvalitě u průměrných otisků (okolo 50 bodů) podle FQV vůči NFIQ 2.0. U kvalitnějších otisků (okolo 80 bodů) se rozdíl o málo zmenší a opět roste u těch nejchvilnějších. Tento trend lze pozorovat pouze u této kolekce a je zapříčiněn více faktory.

Jak již bylo výše zmíněno NFIQ 2.0 hodnotí otisky velmi přísně a často průměrným otiskům podle FQV vypočte velmi nízkou hodnotu kvality. FQV pouze velmi zřídka použije hodnocení pod 20 bodů, což na druhou stranu dělá NFIQ 2.0 velmi často, zde tedy dochází k velkému rozdílu u hůře hodnocených otisků.

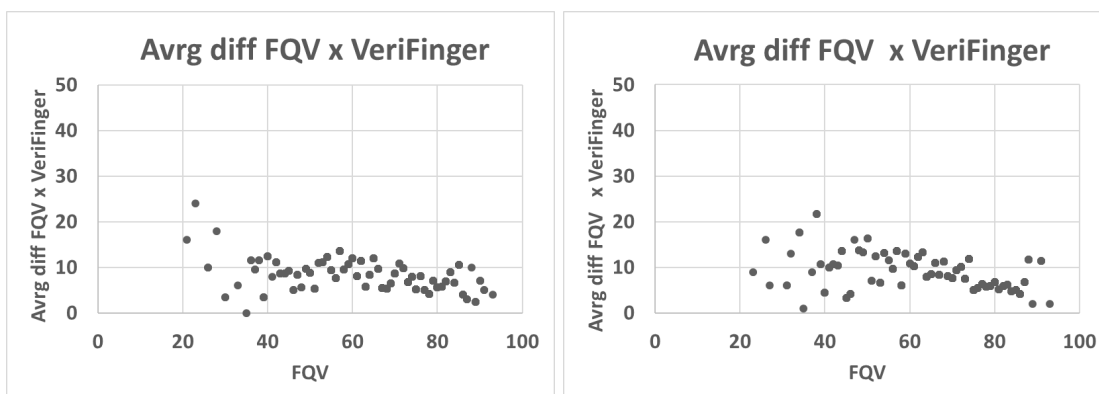
Dalším velkým rozdílem, který vychází již z popisů programů je neschopnost FQV pokrýt větší množství vlastností otisků. NFIQ 2.0 obsahuje podstatně komplexnější algoritmy,



Obrázek 4.5: Hodnocení FQV vůči průměrnému rozdílu NFIQ 2.0 u sad NIST-FIG3 (vlevo) a NIST-FIG6 (vpravo).

kteř jsou schopny detekovat více poškození. To je další důvod proč, pro kvalitní otisky podle FQV, NFIQ 2.0 vypočte tak nízké hodnocení.

Další dvojice grafů z obrázku 4.6 je ze stejné kolekce otisků ale popisuje rozdíl vůči programu VeriFinger. Jak lze vidět, rozdíly jsou podstatně nižší a poměrně rovnoměrně rozloženy. Extrémy nejsou veliké a v rámci celé kolekce NIST jsou velmi proměnné, nevyskytují se na stejných místech.



Obrázek 4.6: Hodnocení FQV vůči průměrnému rozdílu VeriFinger u sad NIST-FIG3 (vlevo) a NIST-FIG6 (vpravo).

Nad sadou otisků s kožními nemocemi si FQV vedl nejlépe. Kaz v otisku byl detekován téměř ve všech případech. Ani jeden otisk nebyl označen za kvalitnější než původní zdravý vzor. Zhoršení kvality bylo pro bradavice v průměru 2 body s odchylkou 1,4. U ekzému došlo ale k výraznému zhoršení hodnocení. Průměrná hodnota zhoršení činila 11,2 bodů s odchylkou 6,4 bodu. Jedná se tedy o velmi velkou reakci na poškození otisku. Největší zhoršení činilo celých 27 bodů což je velmi velké číslo. Je až na zvážení, zda byla kvalita otisku touto chorobou až tak zásadně poškozena.

4.6 Shrnutí

Výsledné hodnocení kvality se mezi programy často velmi liší. Hodnocení FQV a VeriFinger jsou si podobná oproti NFIQ 2.0, který hodnotí mnohdy podstatně hůř. Z analýzy také vyplynulá, že NFIQ 2.0 a VeriFinger nejsou přizpůsobeny pro zohlednění kožních nemocí do hodnocení kvality.

Jak bylo již výše popsáno u otisků se nezaznamenávala pouze jejich kvalita, ale také počet detekovaných markantů, a to hned dvěma algoritmy. Zajímavým faktem je že při výpočtu míry korelace mezi množstvím markantů a výslednou kvalitou, vycházejí pro každou sadu velmi odlišná, často dokonce záporná čísla. Tento fakt demonstruje že mapování vektoru kvality NFIQ 2.0 na výslednou hodnotu je velmi komplexní a nedá se linearizovat. VeriFinger také pravděpodobně tuto hodnotu používá, a jelikož firma Neurotechnology pracuje především na poli neuronových sítí, je možné, že tuto technologii využili i v tomto produktu pro převod vlastností na výslednou hodnotu.

Závěrem porovnání je potřeba ještě zmínit, že FQV nezpracovává všechny aspekty otisku. NFIQ 2.0 je ještě stále ve vývoji a je tedy jisté, že bude ještě vylepšen. VeriFinger je optimalizován pro vlastní porovnávací algoritmus. Další grafy z porovnání jsou v příloze C.

Kapitola 5

Návrh a implementace

Jak již bylo výše popsáno, programem vybraným pro vylepšení se stal Fingerprint Quality Visualizer. Již ze samotné analýzy z třetí kapitoly vyšlo najevo že není jiné cesty. VeriFinger je komerční program bez veřejných zdrojových kódů a NFIQ 2.0 je ještě stále ve vývoji agenturou NIST. FQV měl jako jeden z cílů již při vývoji možnou rozšiřitelnost, a proto přidání nové funkčnosti nebylo tak obtížné. Proto při porovnání systémů popsaném ve čtvrté kapitole byl FQV podroben detailnějšímu prozkoumání.

Jelikož program pracuje čistě na principu lokální analýzy, nemá šanci sledovat žádné globální vlastnosti otisku. U NFIQ 2.0 i VeriFinger patří mezi tyto vlastnosti například počet nalezených markantů v celém obrazu. FQV při vyhodnocování kvality bloků nevidí dál než do nejbližšího okolí a celková kvalita je určena z aritmetického průměru kvalit bloků. Tato absence globálního zpracování představuje velkou mezeru ve správném vyhodnocování kvality.

Přímým důsledkem je nesprávné určení (nadhodnocení) kvality u malých otisků. Tyto otisky obsahují malé množství markantů, tedy nesou malou míru informace pro porovnávací algoritmus, a proto jsou méně kvalitní. Toto tvrzení bylo potvrzeno při porovnávání programů.

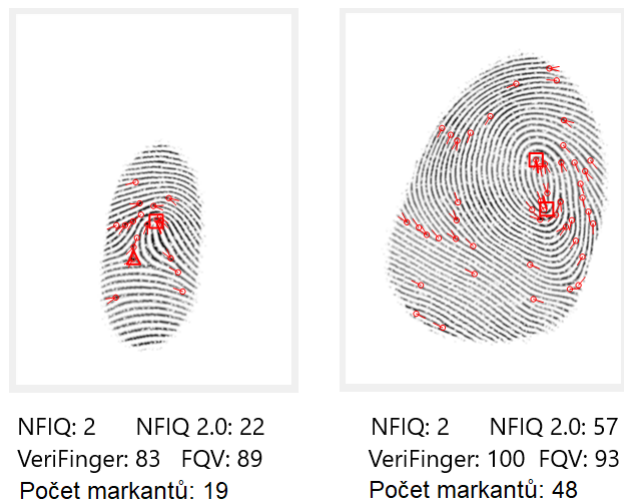
Cílem vylepšení tedy bylo určeno začlenění globálního zpracování obrazu do FQV za účelem zhoršení kvality u otisků s nevyhovující velikostí. Také zvolené mapování vlastnosti bloků otisku na kvalitu není optimální, a proto bude také upraveno. Pro verifikaci výsledků poslouží již vyhodnocený dataset otisků z předešlé kapitoly.

5.1 Návrh řešení

Jak již bylo zmíněno NFIQ 2.0 a pravděpodobně i VeriFinger řeší problém s velikostí otisků hledání markantů v otisku. Počet markantů dobře definuje množství obsažených informací v otisku. Jestliže jich je málo, je otisk malý či značně zdeformovaný. Na druhou stranu u velkého množství markantů pravděpodobnost správného porovnání stoupá, a tudíž i samotná kvalita otisku. Problém ale vychází již z logiky věci, hledání markantů je poměrně pracná operace na výpočetní zdroje. Často tedy dochází k snížení přesnosti hledání, což má ale za následek velké množství falešných nálezů. NFIQ 2.0 pro tuto úlohu využívá volně dostupný extraktor FingerJet FX OSE [5].

V této práci byl zvolen ale odlišný způsob řešení i za cenu nejistých výsledků. Pro jednoduchost vychází z předpokladu, že malý otisk obsahuje málo markantů a větší otisk více. Cílem tedy je zjistit reálnou velikost otisku a z něj odhadnout počet obsažených markantů.

V praxi ale množství markantů vzhledem k velikosti otisku určuje více faktorů, krom všech uvedených v podkapitole 2.5, tak také šířka a hustota papilárních linií. Proto se předpokládá že odhad bude pouze orientační, ovšem pro určení kvality postačující. Obrázek 5.1 demonstruje vztah velikosti otisku, počtu markantů a kvality.



Obrázek 5.1: Otisky s vyznačenými markanty a hodnocením kvality.

Předpoklad vztahu mezi množstvím markantů a reálnou velikostí otisku je potvrzen zde [23]. Zmíněná práce mimo jiné sdružuje i výsledky z jiných publikací týkajících se hustoty markantů. Z výsledků si tato práce převzala hodnotu 0,2 markantu na jeden mm^2 , tedy 1 markant na $5 mm^2$.

Dalším rozšířením je změna mapování vlastností bloků do kvality. Využit bude vážený průměr procentuálního vyjádření vlastností. Jednotlivé koeficienty budou určeny experimentálně na základě výsledků z testovací databáze.

5.2 Popis implementace

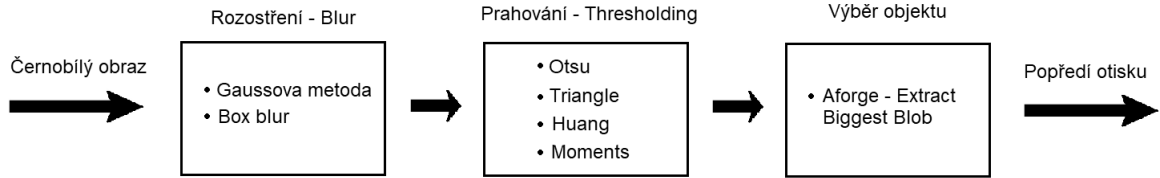
Samotná implementace výše zmíněných rozšíření lze rozdělit do třech celků a to: Hledání popředí otisku, určení kvality vzhledem k velikosti a vylepšení mapování kvality bloku. Mimo tyto úpravy bylo lehce přepracováno grafické uživatelské rozhraní pro lepší práci s programem. Také byla přidána možnost měnit vhodné konfigurační hodnoty přímo z aplikace. Stručný popis veškeré přidané funkcionality je dostupný v uživatelské příručce (příloha B).

5.2.1 Hledání popředí otisku

FQV již obsahuje separaci popředí otisku. Jedná se ovšem o lokální metodu pracující s bloky obrazu. Pracuje na principu rozložení distribuce šedi viz. výše 3.2.1. Tento způsob separace je efektivní u otisků s neporušeným pozadím ale při artefaktech v okolí, často selhává a to významně. Pro zmiňovaný výpočet markantů je přesné určení otisku v obrazu klíčové. Právě proto byl do FQV implementován další postup pro detekci popředí.

Pro zajištění potřebné diverzity byla zvolena metoda pracující přímo s pixely obrazu, a ne s bloky. Postup zpracování popisující obrázek 5.2 je ve své podstatě jednoduchý. Skládá se

ze silného rozostření obrazu a následného prahování. Po rozostření otisku se skryjí všechny nedokonalosti a nežádoucí artefakty v pozadí. Následné binární prahování detekuje v obrazu jeden či více objektů. Největší z objektů je poté prohlášen za samotný otisk. Tato metoda bývá někdy používána v oblasti počítačového vidění a podobně pracuje i NFIQ 2.0.



Obrázek 5.2: Popis výpočtu popředí otisku.

Rozostření obrazu

Pro rozostření obrazu byly implementovány dva různé algoritmy. Prvním je tzv. simple box blur, což představuje pouhou konvoluci obrazu s konstantní maskou, kde jsou všechny koeficienty stejné. Jedná se o velmi jednoduchou metodu, která nedosahuje tak kvalitních výsledků. Masky o velikosti 3x3 vypadá takto:

$$\text{BoxBlur} = \begin{bmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Druhou volbou tedy byl sofistikovanější algoritmus, a to Gaussovo rozostření [22]. Jedná se o v praxi velmi často používanou metodu. Gaussova funkce pro jednu dimenzi z rovnice 5.2 se rozšíří o další rozměr. Rovnice 5.3 ukazuje toto rozšíření a pomocí ní je vypočtena potřebná maska. Parametr σ představuje směrodatnou odchylku.

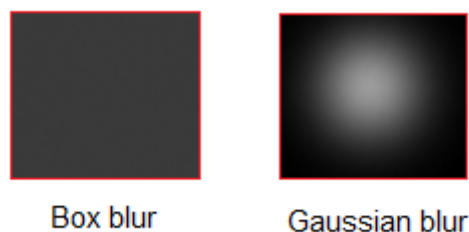
$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5.2)$$

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.3)$$

Výsledné hodnoty masky představují vážený průměr s největší vahou, uprostřed jenž se směrem ke kraji rovnoměrně zmenšují. Vytváří tedy tzv. kruhovitou masku. Ukázka masky o velikosti 3x3:

$$\text{GaussianBlur} = \begin{bmatrix} 0.077847 & 0.123317 & 0.077847 \\ 0.123317 & 0.195346 & 0.123317 \\ 0.077847 & 0.123317 & 0.077847 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Po vytvoření masky probíhá opět stejná konvoluce s pixely obrazu. Oba zmíněné algoritmy představují jistou formu filtru dolní propusti. Grafickou reprezentaci obou masek obsahuje obrázek 5.3. Z důvodu efektivnosti implementace jsou ve finální verzi použity poněkud odlišné obdoby těchto algoritmů.



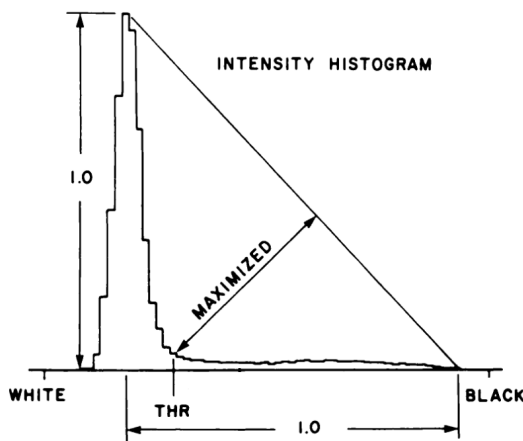
Obrázek 5.3: Grafická reprezentace vypočtených masek pro rozostření.

Prahování obrazu

Samotné prahování obrazu bylo pracněji testováno kvůli nedostatečným výsledkům. Do FQV byly implementovány nakonec celkově 4 algoritmy pro určování prahu, přičemž všechny pracují pouze nad histogramem obrazu. Jako problematické se ukázaly obrazy kde např. samotný otisk představuje většinu obrazu, větší část otisku je silně zdeformovaná nebo kde otisk není celistvý.

Prvním z řady algoritmů je v praxi velmi často používaná Otsova metoda. Pracuje na principu dvou fuzzy množin (popředí a pozadí) přičemž hledá jejich hranice (práh). V této hodnotě dochází k co největšímu váženému rozptylu těchto množin, a tedy nejmenšímu poměru mezi těmito dvěma hodnotami. Více informací je dostupných zde [20].

Pro další prahovací algoritmus byla použita tzv. Trojúhelníková metoda (Triangle method). Zajímavé je že pracuje s histogramem čistě geometricky jak popisuje obrázek 5.4. Jako problematické se ale často stává správné určení významu extrému v histogramu, a tedy prohození popředí s pozadím. Více informací je dostupných v tomto článku [26], ale pozor, tato metoda byla představena pouze jako část biologického výzkumu.

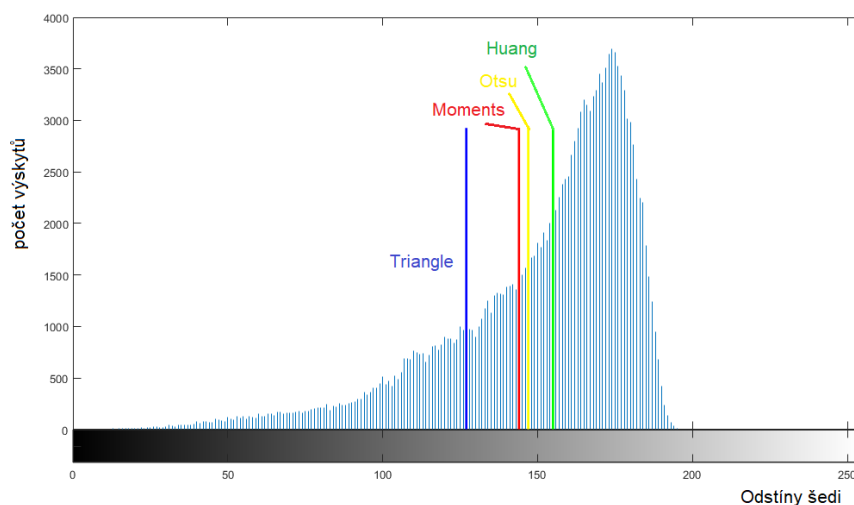


Obrázek 5.4: Histogram odstínu šedi s vyznačeným trojúhelníkem a vypočteným prahem, převzato z [26].

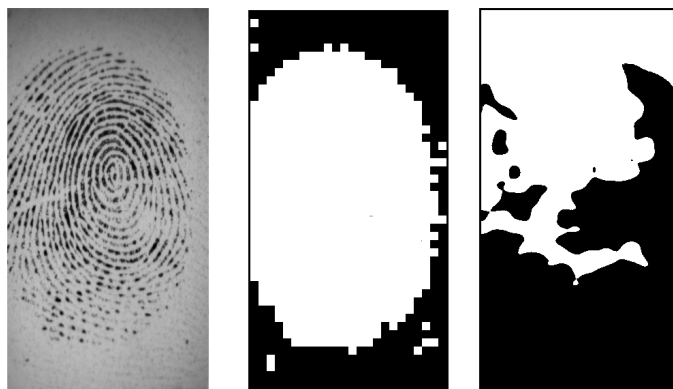
Třetím v pořadí je Huangův algoritmus (Huang algorithm). Jedná se o komplexnější algoritmus, který využívá fuzzy množiny a pracuje s mírou entropie. Tato metoda vykazuje u otisků velmi dobré výsledky. Podrobný popis algoritmu je popsán zde [10].

Posledním v pořadí z implementovaných metod je moment-preserving thresholding. Tento algoritmus byl použit pro své uváděné dobré výsledky při práci s rozostřenými obrazy. Zpracovává momenty v histogramu šedi obrazu a z nich následně určuje ideální práh. Přesný popis algoritmu je dostupný zde [24].

Efektivní implementace všech čtyř algoritmů byla převzata z Java knihovny JImage¹. Rozdíl ve výsledcích lze vidět v obrázku 5.5. I přes všechnu snahu a experimentování není výsledné určování popředí bezchybné, jak demonstruje obrázek 5.6. I z tohoto důvodu bylo pro zpracovávání bloků ponecháno stávající řešení a zde popsané určování popředí slouží pouze pro výpočet plochy otisku. Pro možnost volné konfigurace lze všechny zmíněné algoritmy kombinovat přímo z uživatelského prostředí FQV.



Obrázek 5.5: Histogram odstínu šedi s vyznačenými prahy.



Obrázek 5.6: Původní obraz a masky při zpracování podle bloků (uprostřed) a podle pixelů (vpravo).

¹https://imagej.net/Auto_Threshol

5.2.2 Určení kvality vzhledem k velikosti

Tato část se skládá také z dvou částí a to výpočtem velikosti otisku v mm^2 a promítnutí této hodnoty do finální kvality otisku.

Výpočet velikosti otisku

Pro výpočet reálné velikosti otisku potřebujeme z obrazu tři věci: počet pixelů x_{pixels}, y_{pixels} , rozlišení DPI_x, DPI_y a množství pixelů představující samotný otisk v obraze. Všechny programy pro určování kvality jsou velmi citlivé na velikost a rozlišení, takže předpokládáme, že jsou tyto hodnoty definovány a jsou přesné. Počet pixelů představující popředí obrazu, tedy otisk, jsme získali z předešlého kroku. Jedná se o proměnnou *foregroundPercentagePixels*.

Výpočet velikosti z těchto hodnot představují rovnice 5.7. FQV již v původní verzi počítala procentuální množství bloků představující popředí a pokud byla tato hodnota pod 20 %, vypisovala varovné hlášení. Tato funkce byla z programu odstraněna, ale procentuální zastoupení otisku *foregroundPercentageBlock* lze použít pro výpočet velikosti také, což ukazuje rovnice 5.8. Výběr, který z těchto přístupů zvolit lze opět z uživatelského prostředí. Rozdíl ve výpočtu demonstruje obrázek 5.7.

$$xLength [mm^2] = \frac{x_{pixels} \times (inch \times 10)}{DPI_x} \quad (5.5)$$

$$yLength [mm^2] = \frac{y_{pixels} \times (inch \times 10)}{DPI_y} \quad (5.6)$$

$$Area = (xLength \times yLength) \times \frac{foregroundPercentagePixels}{x_{pixels} \times y_{pixels}} \quad (5.7)$$

$$Area = (xLength \times yLength) \times foregroundPercentageBlock \quad (5.8)$$



Obrázek 5.7: Původní obraz a masky při zpracování podle pixelů (vlevo) a podle bloků (vpravo).

Začlenění velikosti do kvality otisku

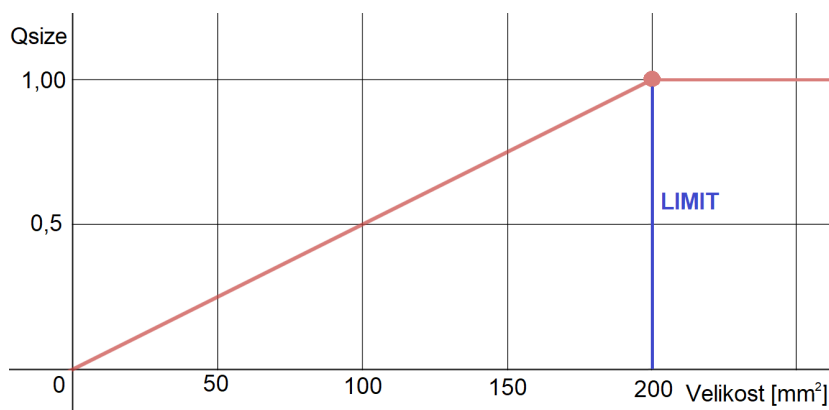
Jak bylo popsáno při návrhu nyní je potřeba zohlednit vypočtenou velikost $size$ v mm^2 do kvality otisku. Jelikož je velikost globální vlastností musí se promítnout až do koncové kvality po vyčíslení kvalit všech bloků. Nejprůchoďejším řešením je tuto, v původní verzi, finální hodnotu vynásobit proměnou Q_{size} z rozsahu 0 až 1.

Pro výpočet této proměnné Q_{size} byly navrženy a implementovány funkce popsané v rovnicích 5.9 a 5.10. Obě pracují s hodnotou $LIMIT$ jenž představuje maximální velikost, po které již nebude výsledná kvalita zhoršována kvůli malé velikosti. Funkce v této hodnotě tedy dosáhne maximální hodnoty 1. Grafické znázornění funkcí představují obrázky 5.8 a 5.9. V prvním případě se jedná o přímé lineární mapování, přesný popis vypadá takto:

$$Q_{size} = \begin{cases} \frac{\frac{100}{LIMIT} \times size}{100} & \text{pro } size < LIMIT \\ 1 & \text{pro } size > LIMIT \end{cases} \quad (5.9)$$

Jako druhý způsob se využilo exponenciální mapování. Matematický zápis vypadá takto:

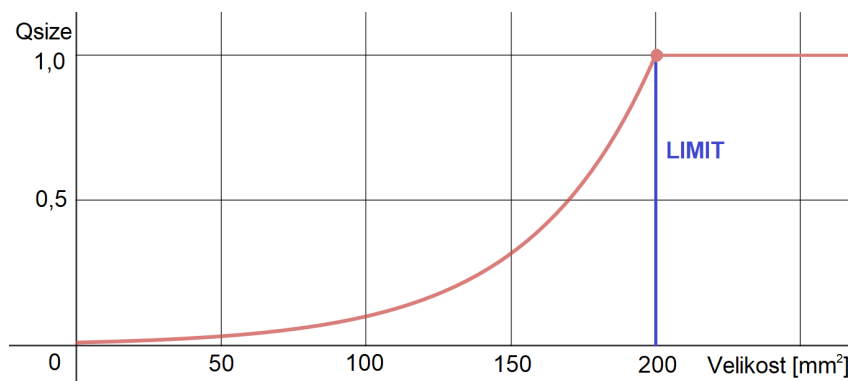
$$Q_{size} = \begin{cases} e^{\frac{size}{LIMIT} / \ln 100} / 100 & \text{pro } size < LIMIT \\ 1 & \text{pro } size > LIMIT \end{cases} \quad (5.10)$$



Obrázek 5.8: Grafické znázornění lineárního mapování Q_{size} kde $LIMIT = 200$.

Nejprve byla implementována exponenciální funkce. Vycházelo se z předpokladu, že křivka této funkce bude lépe interpretovat malou velikost otisků. Při testování se ale tato funkce ukázala jako nevhodná, jelikož byla k menším otiskům moc přísná a přespříliš jim snižovala kvalitu. Ukázalo se, že lineární křivka v této oblasti funguje lépe.

Pro určení hodnoty $LIMIT$ je nutné se vrátit k návrhu implementace, kde bylo určeno že v průměru připadá jeden markant na $5 mm^2$. Zde si musíme ještě uvědomit jaký reálný počet markant potřebuje porovnávací algoritmus pro korektní zpracování. Při porovnání programů byla snaha odhadnout hodnotu, při které se již nebudou otisky penalizovat za malý počet markantů. Jak již bylo zmíněno výše, korelace se neprokázala a mapování je velmi komplexní. Nicméně byla hodnota $LIMIT$ experimentálně určena na $200 mm^2$ tedy přibližně 40 markantů. Tato hodnota je ale velmi závislá na vybrané sadě otisků. Proto je také přístupná z grafického rozhraní aplikace.



Obrázek 5.9: Grafické znázornění exponenciálního mapování Q_{size} kde $LIMIT = 200$.

5.2.3 Vylepšení mapování kvality bloku

Při studiu dokumentace byla objevena potencionální slabost aplikace v mapování kvality jednotlivých bloků. Původní popis je popsán výše v podkapitole 3.2.2. Idea byla taková, že se v nové verzi využije váženého průměru jednotlivých kvalit, popis představuje rovnice 5.11. Samotné váhy těchto kvalit se opět určovaly experimentálně a pro ulehčení práce jsou také nastavitelné z uživatelského rozhraní.

$$Q_B = \frac{w_1 Q_l + w_2 Q_r + w_3 Q_{cb} + w_4 Q_{ce} + w_5 Q_o + w_6 Q_c}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6} \quad (5.11)$$

Při pokusech učit ideální hodnoty vah ale došlo k neúspěchu. Zde se projevila chyba již z návrhu. Vážený průměr při jakémkoliv nastavení pokaždé blok ohodnotí lépe než funkce, která vybírá vždy minimální prvek z množiny kvality. Otisky byly poté silně nadhodnoceny. Nicméně funkcionalita byla ponechána a může sloužit pro testování stávajících metrik. Rozsah koeficientů vah je v rozmezí od 0 do 100, tudíž lze jednoduše vybranou metriku při minimálním nastavení naprosto vyřadit z výpočtu.

Jako alternativa byla ale implementována v pořadí již třetí funkce pro mapování kvality bloků. Metoda určí za kvalitu daného bloku vždy tu nejhorší ze všech šesti vypočtených hodnot. Zde je změna oproti původnímu řešení opravu malá, v první verzi se používá minimální hodnota pouze čtyř hodnot a poté aritmetický průměr. Výsledkem je plošné zhoršení kvality o jednotky procent. Jen velmi výjimečně se touto změnou způsobí zhoršení o více jak desítku procent. Popis tohoto nového mapování 2.verze vypadá takto:

$$Q_B = \min(Q_l, Q_r, Q_{cb}, Q_{ce}, Q_o, Q_c) \quad (5.12)$$

5.3 Shrnutí výsledků nové implementace

Verifikace byla provedena proti testovací databázi a všechny navržené specifikace se s drobnými výhradami podařilo splnit. Z experimentů byla definována optimální konfigurace, kterou popisuje tabulka 5.1. Toto nastavení bylo použito při zpracování všech otisků. Využití této konfigurace není závazné a lze jej libovolně nastavovat přímo z uživatelského rozhraní. Také je možnost si toto nastavení uložit a načíst z konfiguračních souborů, které jsou ve formátu XML.

Nastavení	Hodnota
Způsob výpočtu velikosti	Pixel
Rozostřovací metoda	Gaussova metoda
Binarizační metoda	Huang
Hodnota <i>LIMIT</i>	200mm ²
Funkce pro mapování velikosti na kvalitu	Lineární
Mapovací funkce pro kvalitu bloků	verze 2.0

Tabulka 5.1: Tabulka popisující výchozí konfiguraci programu FQV 2.0.

Pro ověření, zda se vytvořenou metodikou podařilo odhadnout počet markantů v otisku, bylo rozšířeno množství údajů ukládaných při dávkovém zpracování. Původní položky byly rozšířeny o odhadovaný počet markantů² a procentuální zastoupení otisku v obraze podle blokového zpracování. Z těchto hodnot lze identifikovat obrazy, u kterých došlo k rozporu při zpracování.

Jako výchozí hodnota pro počet markantů byla použita hodnota určená programem VeriFinger. Tento počet je podstatně přesnější než hodnota určená pomocí NFIQ 2.0. Extraktor markantů FingerJet FX OSE [5] je v NFIQ 2.0 upraven pro obecnější a efektivnější výpočet. To nese za následek jeho časté selhávání, které se ovšem eliminuje určováním kvality jednotlivých markantů.

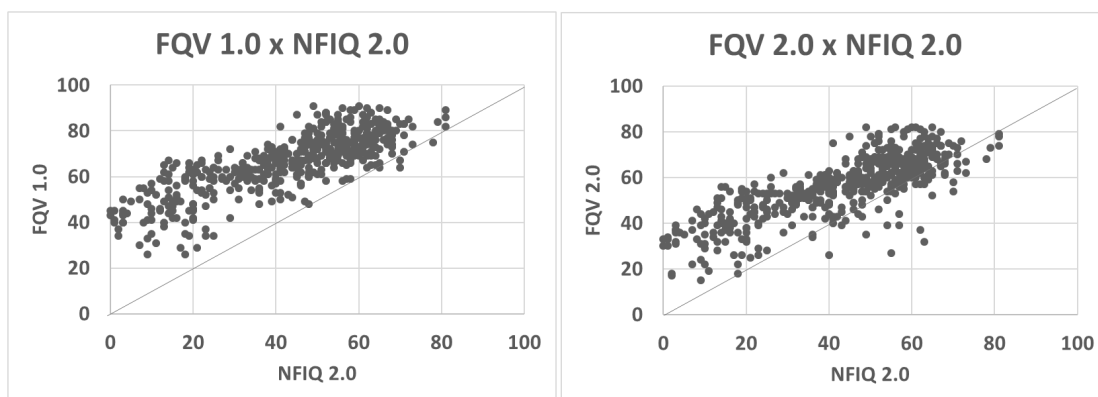
Z výsledků se vypočetl pro každou sadu aritmetický průměr rozdílu odhadovaného počtu podle FQV a vypočtené hodnoty podle VeriFinger. Také byla vypočtena směrodatná odchylka tohoto průměru. Výsledky se liší mezi jednotlivými kolekcemi, ale lze je rozřadit do dvou skupin.

Do první skupiny patří všechny kolekce krom NIST a sady FIT-N. U těchto otisků se odhadovaný a reálný počet liší v průměru o 5. Směrodatná odchylka je 10 markant. Výsledky jsou si tedy velmi podobné a potvrzují čísla o hustotě markant jako pravdivá. Větší odchylku tvoří obrazy, u kterých se nepovedlo korektně určit popředí v obraze. Nejlepších čísel dosáhla sada NEU-CMV300, která má průměr rozdílu pouze 0,02 a odchylku 11 markantů. Zde se rozdíl pohybuje většinou v jednotkách, což je pro určení kvality dostačující.

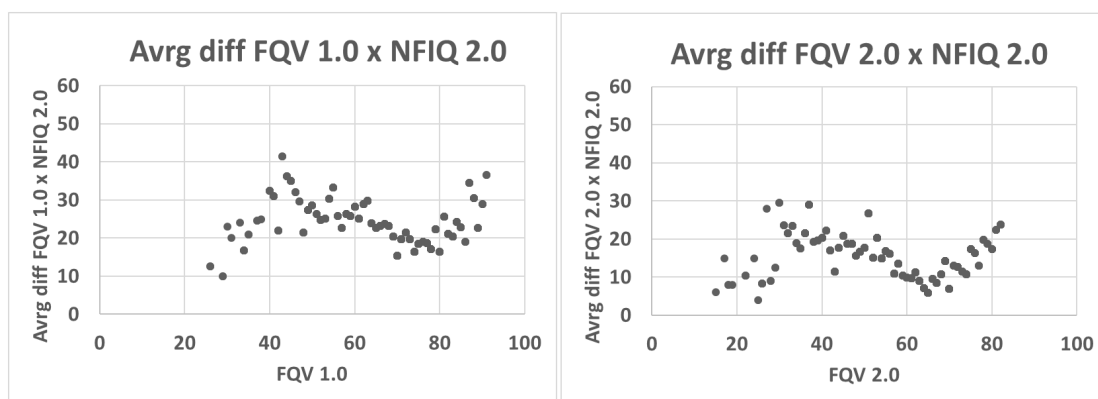
Do druhé skupiny se řadí celá kolekce NIST a sada FIT-S. Společnou vlastností je nízká kvalita otisků a také způsob získávání (válené otisky). U těchto obrazů dochází k velké míře selhávání segmentace popředí a také výpočet reálné velikosti není přesný. Nutno podotknout, že NFIQ 2.0 měl u těchto otisků také velkou chybovost při hledání popředí. Průměrná hodnota rozdílu v počtu markant činí přibližně 21 a směrodatná odchylka je 30. U těchto otisků vytvořená implementace selhala.

Změna v mapování kvality bloků měla ale zásadnější význam na změnu kvality. Zahrnula totiž každý otisk, ne pouze ty s extrémně malou plochou. Výběrem té nejnižší hodnoty jako výslednou kvalitu bloku logicky snížilo celkové hodnocení FQV. V průměru se hodnocení snížilo o 18 bodů. Průměrný rozdíl v hodnocení oproti NFIQ 2.0 se snížilo z původních 26 na 16 a u VeriFinger zvedlo z 10 na 25. Odchylky zůstaly podobné. Z těchto čísel lze pozorovat přiblížení v hodnocení k NFIQ 2.0. Rozdíly se projeví u každé konkrétní sady různorodě. Obrázky 5.10, 5.11 a 5.12 ukazují změnu na sadě NIST-FIG0. Další grafy s porovnáním jsou v příloze C.

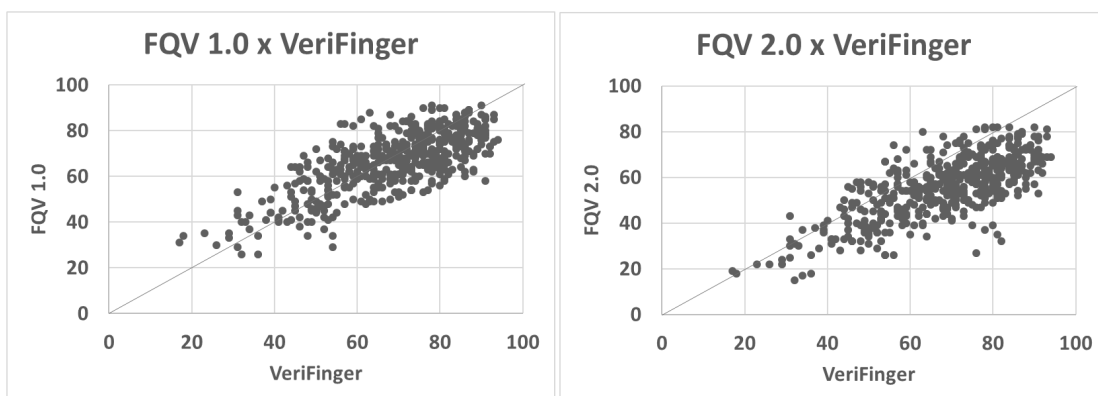
²Velikost otisku v mm² vydělena pěti.



Obrázek 5.10: Hodnocení kvality podle programu NFIQ 2.0 v porovnání s FQV 1.0 a FQV 2.0 pro pro sadu NIST-FIG0.



Obrázek 5.11: Hodnocení FQV 1.0 a FQV 2.0 vůči průměrnému rozdílu NFIQ 2.0 u sady NIST-FIG0.



Obrázek 5.12: Hodnocení kvality podle program VeriFinger v porovnání s FQV 1.0 a FQV 2.0 pro pro sadu NIST-FIG0.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo porovnat tři stávající programy pro určování kvality otisků prstů a jeden z nich zdokonalit. Konkrétně se jednalo o programy NFIQ 2.0 od agentury NIST, Vefi-Finger od firmy Neurotechnology a Fingerprint Quality Visualizer (FQV) jenž je výsledkem diplomové práce Ing. Oravce. Poslední zmíněný byl vybrán pro vylepšení.

Nejprve byly všechny programy detailně prostudovány s cílem pochopení metod, jež používají pro výpočet kvality. Tuto část popisuje třetí kapitola. Následně byla vytvořena rozmanitá databáze otisků prstů čítající přibližně 6500 kusů. Pro každý otisk byla určena kvalita pomocí tří zmíněných aplikací. Program VeriFinger ve výchozím stavu ale nepodporuje dávkové určování kvality. Pro tuto funkcionalitu byl tedy vytvořen vlastní nástroj, který je přílohou práce. Popis a výsledky analýzy jsou obsahem kapitoly čtyři.

V dalším kroku byly navržena a implementována vylepšení pro program FQV. Cílem bylo zpřesnit hodnocení kvality u extrémně malých otisky prstů. Po dokončení prací na programu byla opět zpracována celá databáze otisků a byly vyhodnoceny nové výsledky.

Hlavní částí rozšíření byl alternativní způsob určování počtu markantů v otisku a jejich následné začlenění do výsledné kvality. Běžným způsobem zjišťování tohoto počtu je přímé hledání markantů v otisku. Hledání je ale náročné na výpočet a také není pro určování kvality nutná přesná hodnota. Proto byla vytvořena nová metoda vycházející z reálné velikosti plochy otisku a statistických údajů.

Postup se skládá z nalezení otisku v obrazu, výpočtu velikosti otisku v mm^2 a přepočtu na odhadovaný počet markantů. Tento způsob vykazuje poměrně přesné výsledky, které se ale liší v závislosti na podobě a typu obrazů otisků. Nejlepších výsledků dosáhla sada NEU-CMV300, která čítá přes 400 otisků. Průměrný rozdíl počtu nalezených a odhadnutých markantů byl 0,025 se směrodatnou odchylkou 11,2. U těchto otisků byl rozdíl tedy v jednotkách markantů čímž byla prokázána funkčnost řešení. Všechny podrobné informace obsahuje pátá kapitola. Touto částí byly tedy splněny všechny části zadání.

Navázáním na tuto práci může být další vylepšení programu FQV. Jakkoliv jsou obsažené postupy robustní vždy se najdou otisky, u kterých se přesné určení kvality nezdaří. Možným vylepšením může být například další přístup pro separaci popředí, využití nějaké formy adaptivního prahování či implementace úplně nové metriky.

Za povšimnutí bude také stát vydání finální verze programu NFIQ 2.0 a také k ní přiložený Research Kit, který bude obsahovat implementaci s dokumentací pro nepoužité metriky. Případně lze tuto práci rozšířit přidáním dalších programů pro určování kvality.

Literatura

- [1] ČSN ISO/IEC 19795-1: *Informační technologie – Testování a hodnocení výkonnosti biometrik*. Technická zpráva, Českým normalizačním institutem, Praha, 2007.
- [2] ISO/IEC 29794-4: *Information Technology - Biometric Sample Quality - Part 4: Finger Image Data*. Technická zpráva, International Organization for Standardization, Ženeva, 2017.
- [3] Breiman, L.; Cutler, A.: *Random Forests*. [online], navštíveno 15.1.2019.
URL <https://www.stat.berkeley.edu/users/breiman/RandomForests/>
- [4] Chen, Y.; Dass, S.; Jain, A.: *Fingerprint Quality Indices for Predicting Authentication Performance*. In *Audio and Video Based Biometric Person Authentication*, Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005, ISBN 978-3-540-27887-0, s. 160–171.
- [5] DigitalPersona: *FingerJetFX OSE – Fingerprint Feature Extractor*. [online], navštíveno 12.3.2019.
URL <https://github.com/FingerJetFXOSE/FingerJetFXOSE>
- [6] Drahanický, M.: *Biometrie*. Brno: M. Drahanický, první vydání, 2011, ISBN 978-80-254-8979-6.
- [7] Drahanický, M.: *Fingerprint recognition technology : related topics : skin disease, image quality and liveness detection*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011, ISBN 978-3-844-33007-6.
- [8] Dusio, M.: *Fingerprint quality assurance using image processing*. Disertační práce, Technical University of Denmark, DTU Compute, 2013, vedoucí: Rasmus Larsen.
URL http://www2.imm.dtu.dk/pubdb/views/publication_details.php?id=6587
- [9] Galbally, J.; Haraksim, R.; Beslay, L.: *A Study of Age and Ageing in Fingerprint Biometrics*. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, ročník 14, č. 5, Březen 2019: s. 1351–1365, ISSN 1556-6013, doi:10.1109/TIFS.2018.2878160.
- [10] Huang, L.-K.; Wang, M.-J.: *Image thresholding by minimizing the measures of fuzziness*. *Pattern Recognition*, ročník 28, Leden 1995: s. 41–51, doi:10.1016/0031-3203(94)E0043-K.
- [11] Kanich, O.: *Fingerprint damage simulation : a simulation of fingerprint distortion, damaged sensor, pressure and moisture*. Saarbrücken: Lambert academic publishing, 2014, ISBN 978-3-659-63942-5.
- [12] Maltoni, D.; Maio, D.; Jain, A. K.; a.j.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. London: Springer London, 2009, ISBN 9781848822535.

- [13] Neurotechnology: *Company Information*. [online], navštíveno 27.1.2019.
URL <https://www.neurotechnology.com/about.html>
- [14] Neurotechnology: *MegaMatcher SDK - Developer's Guide*. [online], navštíveno 27.1.2019.
URL https://download.neurotechnology.com/Neurotec_Biometric_SDK_Documentation.pdf
- [15] Neurotechnology: *VeriFinger SDK*. [online], navštíveno 27.1.2019.
URL <https://www.neurotechnology.com/verifinger.html>
- [16] NIST: *Fingerprint Image Quality*. [online], navštíveno 15.12.2018.
URL https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=905710
- [17] NIST: *About NIST*. [online], navštíveno 20.12.2018.
URL <https://www.nist.gov/about-nist>
- [18] NIST: *NFIQ2.0 - Report*. [online], navštíveno 30.11.2018.
URL https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2018/11/29/nfiq2_report.pdf
- [19] Oravec, T.: *Metodika měření kvality otisků prstu*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2018.
URL <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/DP.php?id=20656>
- [20] Otsu, N.: *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, ročník 9, č. 1, Leden 1979: s. 62–66, ISSN 0018-9472, doi:10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [21] Rak, R.: *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. Praha: Grada, první vydání, 2008, ISBN 978-80-247-2365-5.
- [22] Shapiro Linda, G.: *Computer vision*. New Jersey: Prentice-Hall, vyd. 1 vydání, 2001, ISBN 0-13-030796-3, 149-151 s.
- [23] Thai, R.: *Fingerprint Image Enhancement and Minutiae Extraction*. Disertační práce, The University of Western Australia, 2003.
- [24] Tsai, W.-H.: *Moment-preserving thresholding: A new approach*. Graphical Models and Image Processing, ročník 19, Listopad 1984: s. 377–393.
- [25] Tuč, D.: *Testování vlivů prostředí na snímače otisků prstů*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2005.
URL <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/BP.php?id=3257>
- [26] Zack, G. W.; Rogers, W. E.; Latt, S.: *Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency*. The journal of histochemistry and cytochemistry : official journal of the Histochemistry Society, ročník 25 7, 1977: s. 741–753.

Příloha A

Obsah přiloženého DVD

- Elektronická verze této práce ve formátu PDF.
- Spustitelná aplikace Fingerprint Quality Visualizer 2.0.
- Zdrojové kódy aplikace.
- Zdrojové kódy nástroje pro získávání kvality pomocí programu VeriFinger.
- Soubory formátu CSV obsahující hodnocení kvality.
- Agregační soubor formátu XLSX s všemi vypočtenými údaji.
- Volně dostupná část databáze otisků.

Příloha B

Uživatelský manuál Fingerprint Quality Visualizer 2.0

Jedná se o revizi původního dokumentu, který byl přílohou diplomové práce Ing. Oravce [19].

Spuštění programu

Program je určený pouze pro operační systém Windows 7 či novější. Minimálním požadavkem pro spuštění je knihovna .NET Framework verze 4.5. Spustitelná aplikace je přílohou práce a jmenuje se `FQV.exe`. Druhou možností spuštění programu je překlad přiložených zdrojových kódů.

Vyhodnocení jednoho otisku

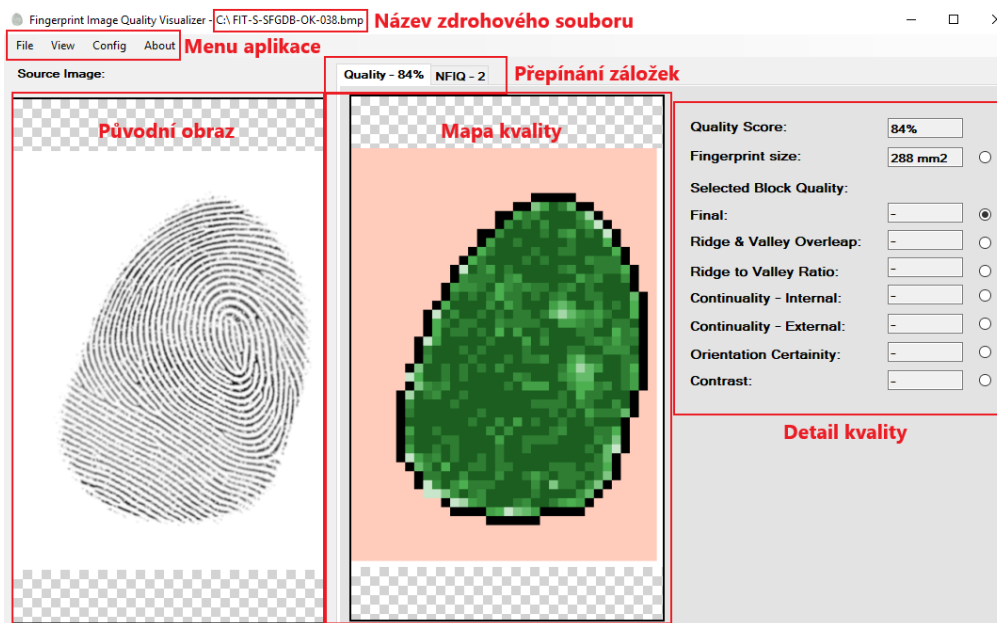
Načtení otisku může být realizované buď klasicky pomocí menu (**File => Load Single Fingerprint**), nebo s využitím „drag & drop“ funkcionality. Podporované formáty obrazů jsou JPG, JPEG, PNG a BMP. Po načtení obrázku začne program otisk automaticky zpracovávat současně jak pomocí vlastních metod, tak také NFIQ. Výsledky výpočtu se prezentují v hlavním okně aplikace, které se skládá z původního obrazu otisku na levé straně a dvou záložek. Mezi záložkami lze přepínat a obsahují detailní popis kvality podle NFIQ nebo vlastní výpočet.

Mód hodnocení FQV

V tomto módu je zobrazena mapa kvality podle bloků nebo výsledek segmentace otisku, jenž se používá pro výpočet velikosti. Barevné rozložení má tento význam:

- **Mapa kvality:**
 - **Bledě oranžová** – pozadí otisku.
 - **Černá** – hrany otisku.
 - **Odstíny zelené** – plocha otisku kde nejsytější zelená představuje nejlepší kvalitu.

- Segmentace otisku:
 - Černá – pozadí.
 - Bílá – popředí tedy samotný otisk.



Obrázek B.1: Snímek aplikace FQV 2.0 s popisem hlavních částí.

Původní obraz spolu s mapou kvality lze pomocí kolečka myši synchronizovaně přiblížovat/oddělovat, případně posouvat. Pravý kliknutím myši lze uložit mapu kvality. Při kliknutí levého tlačítka myši do jednoho z obrázků se vyznačí konkrétní část a její informace se zobrazí v detailu kvality na bočním panelu. Význam jednotlivých položek v detailu:

- **Quality Score** – výsledná kvalita celého obrazu.
- **Fingerprint size** – velikost otisku v obrazu v mm^2 .
- **Final** – finální kvalita vybraného bloku Q_B .
- **Ridge & Valley Overleap** – kvalita vyjádřena pomocí velikosti překryvu barev u hřebenů a údolí v bloku.
- **Ridge to Valley Ratio** – kvalita vyjádřena pomocí poměru hřebenů a údolí v bloku.
- **Orientation Internal** – kvalita vycházející z kontinuity papilárních linií v bloku.
- **Orientation External** – kvalita vycházející z rozdílu v orientaci vůči okolním blokům.
- **Orientation Certainty** – kvalita vyjádřená pomocí míry dominance orientace v dané části.
- **Contrast** – kvalita vypočtena z výraznosti papilárních linií vůči pozadí otisku.

Aplikace také podporuje přepnutí výběru mapy kvality podle jednotlivých metrik. Při přepnutí na zobrazení velikosti otisku se buď zobrazí binarizovaný černobílý obraz popředí a pozadí nebo barevná mapa celkové kvality. Zobrazení se řídí pomocí nastavené metody pro výpočet velikosti.

Mód hodnocení NFIQ

Podobně jako v předchozím módu i zde se vygeneruje mapa kvality. Tentokrát vychází z hodnocení bloků podle NFIQ. Opět je kvalita zobrazována pomocí odstínu zelené barvy. Také je zobrazen vektor rysů jenž popisuje tabulka z původního textu 3.1.

Dávkové zpracování obrazů

Dávkové zpracování je možné pomocí volby **File => Load Multiple Fingerprints**. Po kliknutí se zobrazí dialogové okno, kde je nutno zadefinovat množinu souborů pro zpracování. Také je přítomna možnost začlenění rozšířených informací do výsledného souboru. Po spuštění výpočtu je postup práce barevně zobrazován v samostatné liště. Po dokončení práce je nutné zadat název pro soubor s výsledky ve formátu CSV. Pokud bude zvolen již existující soubor výsledky se pouze zapíší na konec.

Základní formát výsledku:

<název_vstupního_obrázku>; <hodnocení_kvality>

Rozšířený formát výsledku:

<název_vstupního_obrázku>; <hodnocení_kvality>; <NFIQ_hodnocení_kvality>;
<odhadovaný_počet_markantů>; <procentuální_velikost_otisku_v__obrazu>

Nastavení způsobu výpočtu

Část výpočtu FQV lze konfigurovat. Nastavení je dostupné přes **Config => Settings**. Význam nastavení shrnuje tabulka B.1. Celé nastavení lze libovolně ukládat/nahrávat. Tyto konfigurační soubory jsou ve formátu XML.

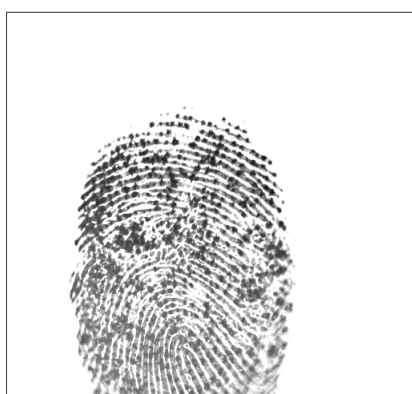
Název bloku	Význam
Foreground size	Minimální velikost otisku pro niž je kvalita = 1
Function for Foreground analysis	Funkce pro mapování velikosti otisku na kvalitu
Type of Foreground calculation	Výběr způsobu výpočtu velikosti otisku
Blur	Výběr algoritmu pro rozostření obrazu
Binarization	Výběr algoritmu pro binarizaci obrazu
Type of calculate block quality	Způsob mapování kvality bloku
Average Weights	Velikost váhy při využití váženého průměru

Tabulka B.1: Shrnutí možného nastavení programu FQV.

Příloha C

Výsledky analýzy

Sada NEU-CMV300

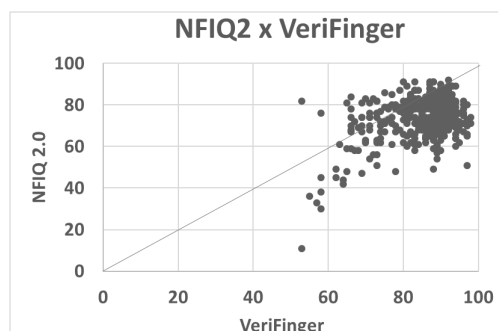


NFIQ: 4 NFIQ 2.0: 11 VeriFinger: 53
FQV 1.0: 59 FQV 2.0: 50
Počet nalezených markantů: 44
Počet odhadnutých markantů: 44

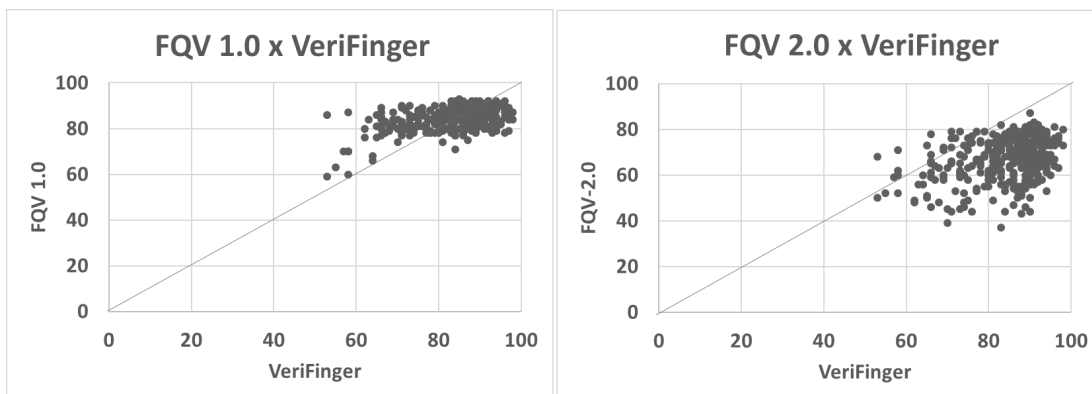


NFIQ: 1 NFIQ 2.0: 75 VeriFinger: 89
FQV 1.0: 89 FQV 2.0: 79
Počet nalezených markantů: 48
Počet odhadnutých markantů: 50

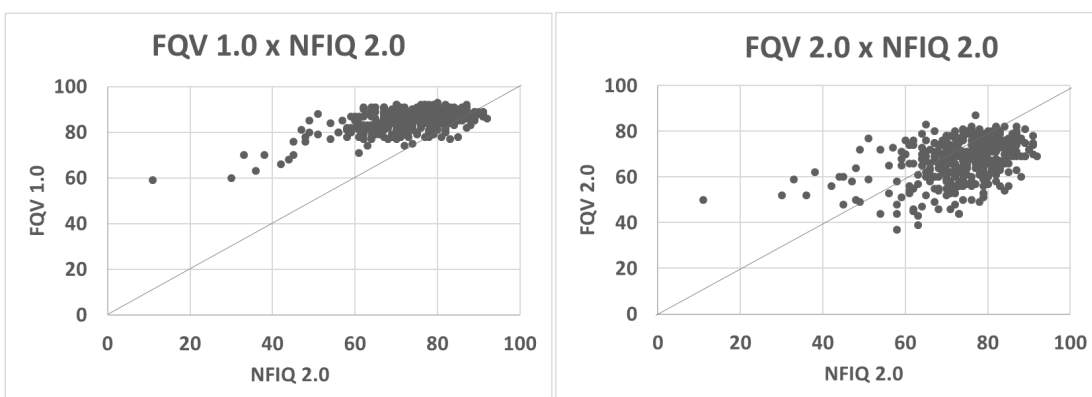
Obrázek C.1: Otisky NEU-CMV300-402 (vlevo) a NEU-CMV300-036 (vpravo) s hodnocením kvality a počtem markantů.



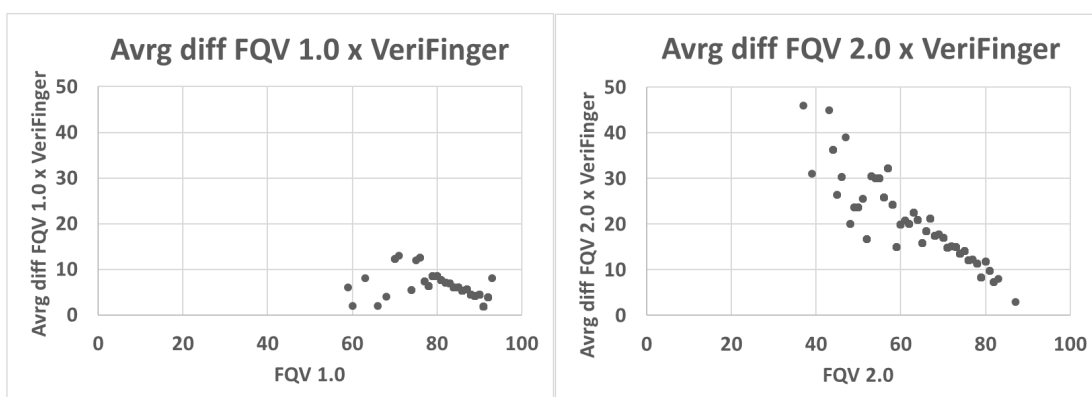
Obrázek C.2: Hodnocení kvality podle program VeriFinger v porovnání s NFIQ 2.0.



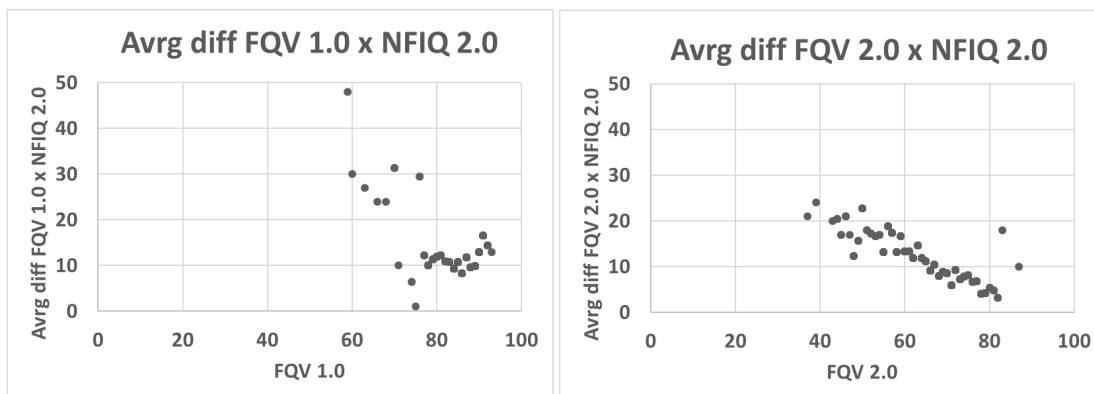
Obrázek C.3: Hodnocení kvality podle program VeriFinger v porovnání s FQV 1.0 a FQV 2.0.



Obrázek C.4: Hodnocení kvality podle programu NFIQ 2.0 v porovnání s FQV 1.0 a FQV 2.0.



Obrázek C.5: Hodnocení FQV 1.0 a FQV 2.0 vůči průměrnému rozdílu VeriFinger.



Obrázek C.6: Hodnocení FQV 1.0 a FQV 2.0 vůči průměrnému rozdílu NFIQ 2.0.

Sada NEU-DPUAU4000

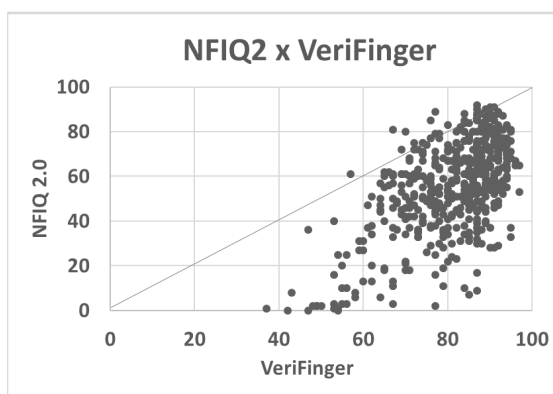


NFIQ: 1 NFIQ 2.0: 56 VeriFinger: 91
FQV 1.0: 86 FQV 2.0: 75
Počet nalezených markantů: 35
Počet odhadnutých markantů: 41

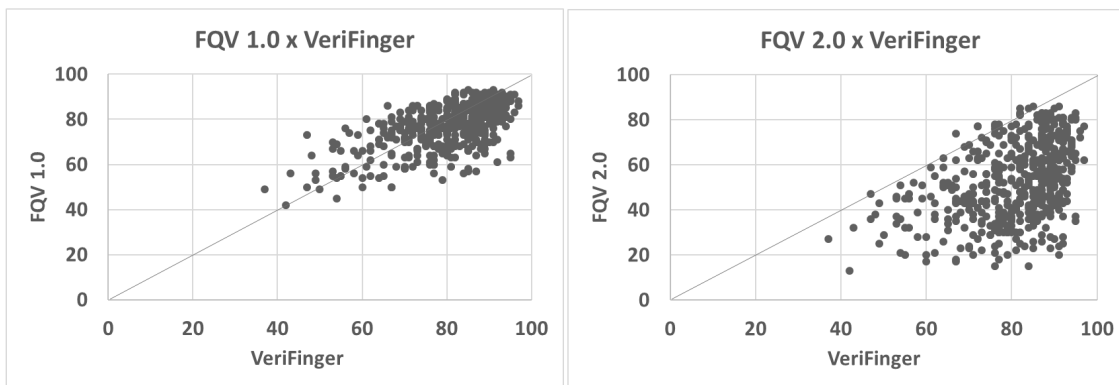


NFIQ: 5 NFIQ 2.0: 2 VeriFinger: 48
FQV 1.0: 64 FQV 2.0: 38
Počet nalezených markantů: 31
Počet odhadnutých markantů: 28

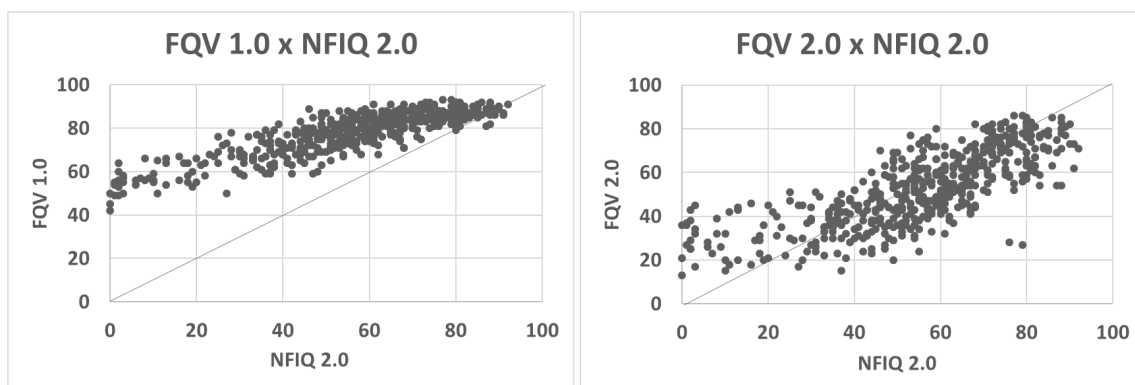
Obrázek C.7: Otisky NEU-DPUAU4000-028 (vlevo) a NEU-DPUAU4000-456 (vpravo) s hodnocením kvality a počtem markantů.



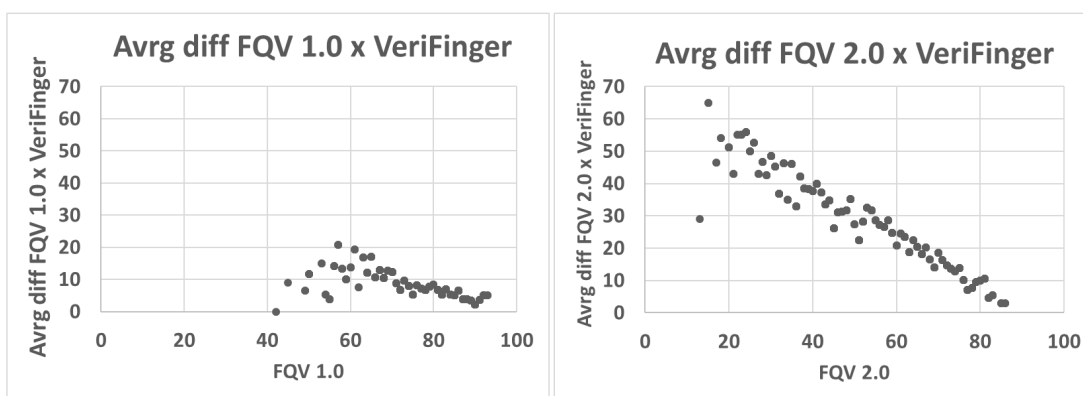
Obrázek C.8: Hodnocení kvality podle program VeriFinger v porovnání s NFIQ 2.0.



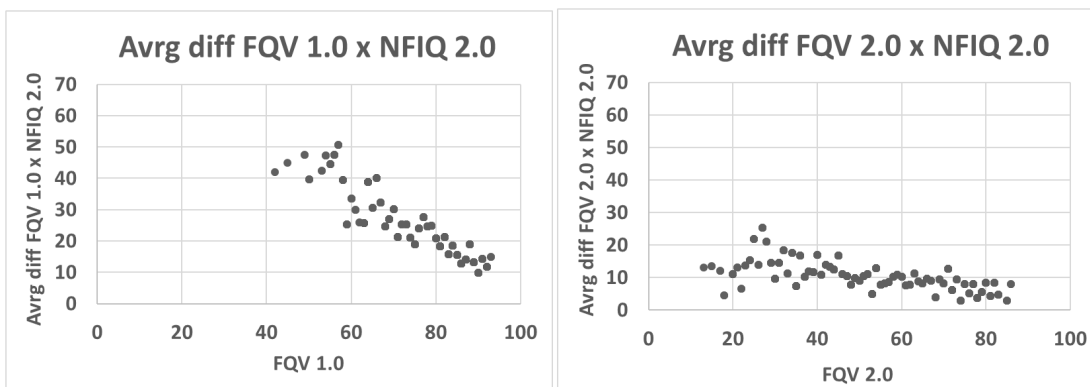
Obrázek C.9: Hodnocení kvality podle program VeriFinger v porovnání s FQV 1.0 a FQV 2.0.



Obrázek C.10: Hodnocení kvality podle programu NFIQ 2.0 v porovnání s FQV 1.0 a FQV 2.0.



Obrázek C.11: Hodnocení FQV 1.0 a FQV 2.0 vůči průměrnému rozdílu VeriFinger.



Obrázek C.12: Hodnocení FQV 1.0 a FQV 2.0 vůči průměrnému rozdílu NFIQ 2.0.