



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

PŘEVOD OTISKŮ PRSTŮ NASNÍMANÝCH MOBILNÍM ZAŘÍZENÍM DO STANDARDIZOVANÉHO FORMÁTU - ÚPRAVY OBRAZU

CONVERSION OF FINGERPRINTS CAPTURED BY A MOBILE DEVICE INTO A STANDARDIZED FORMAT -
IMAGE EDITING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Mucha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Číka, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Vojtěch Mucha

ID: 240956

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Převod otisků prstů nasnímaných mobilním zařízením do standardizovaného formátu - úpravy obrazu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte literaturu týkající se zpracování a rozpoznávání otisků prstů.
2. Navrhněte algoritmičtý postup pro obrazovou transformaci otisku prstu nasnímaného mobilním zařízením do standardizovaného formátu (šedotónový s výraznými papilárními liniemi a potlačenými údolími).
3. Vámi navržený algoritmus z bodu 2 implementujte.
4. Provedte nasnímáním alespoň 100 otisků prstů a experimentálně ověřte kvalitu převedených otisků prstů dle standardu NFIQ 2.
5. Dosažené výsledky zhodnoťte a navrhněte rozšíření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PRIESNITZ, Jannis, et al. An overview of touchless 2D fingerprint recognition. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2021, 2021.1: 1-28.
- [2] MALTONI, Davide, et al. Handbook of fingerprint recognition. London: springer, 2009.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 28.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Číka, Ph.D.

Konzultant: prof. Ing. Martin Drahanský, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou převodu otisků prstů nasnímaných mobilním zařízením do standardizovaného formátu. V dnešní době se mobilní zařízení stávají stále běžnějšími prostředky pro akvizici biometrických dat, včetně otisků prstů. Zpracování a normalizace takto získaných otisků jsou nezbytnou součástí pro následnou biometrickou analýzu získaných otisků prstů. Cílem práce je návrh a implementace algoritmu pro převod fotky prstu do šedotónového obrazu otisku prstu s výraznými papilárními liniemi a potlačenými údolími. Algoritmus je implementován v jazyce C++ s využitím knihovny OpenCV a natrénované neuronové sítě pro detekci prstů z obrázku ruky. Dosažené výsledky jsou zhodnoceny podle algoritmů na hodnocení kvality otisků prstů NFIQ 2 a Innovatrics.

KLÍČOVÁ SLOVA

bezdotykové, C++, OpenCV, otisk prstu, segmentace, zpracování obrazu

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of fingerprint conversion taken by a mobile device into a standardized format. In the present day, mobile devices are used more and more often to acquire biometric data, fingerprints included. Processing and standardization of such data is an essential part of the subsequent biometric analysis. The aim of the work is to design and implement an algorithm which would convert a photo of a finger into a grey scale picture of its fingerprint with distinct papillary lines and subdued valleys. The algorithm is implemented in C++ using OpenCV library and a trained neural network for finger detection from hand image. The achieved results are evaluated according to the algorithms for assessing the quality of fingerprints NFIQ 2 and Innovatrics.

KEYWORDS

touchless, C++, OpenCV, fingerprint, segmentation, image processing

MUCHA, Vojtěch. *Převod otisků prstů nasnímaných mobilním zařízením do standardizovaného formátu – úpravy obrazu*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2024. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Číka, PhD.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Vojtěch Mucha
VUT ID autora:	240956
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	Převod otisků prstů nasnímaných mobilním zařízením do standardizovaného formátu – úpravy obrazu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Číkovi, Ph.D. a zvláště konzultantovi panu prof. Ing. Martinu Drahanskému, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Aktuální stav řešené problematiky	13
1.1 Otisky prstů	13
1.1.1 Struktura otisků prstů	13
1.1.2 Identifikace jedince	14
1.2 Technologie snímačů otisků prstů	15
1.2.1 Inkoustová metoda	16
1.2.2 Optické snímače	16
1.2.3 Kapacitní snímače	17
1.2.4 Termální snímače	18
1.2.5 Ultrazvukové snímače	18
1.2.6 Průtahové snímače	18
1.2.7 Bezdotykové snímače	19
1.3 Problematické otisky prstů	19
1.3.1 Problémy dotykových systémů	19
1.3.2 Problémy bezkontaktních snímačů	20
1.4 Normy otisků prstů	21
1.4.1 Normy ANSI/NIST	21
1.4.2 Normy ISO/IEC	22
2 Algoritmy zpracování otisků prstů	24
2.1 Způsoby pořízení digitálního obrazu otisku prstu	26
2.1.1 2D	26
2.1.2 3D	27
2.1.3 Zařízení pro bezdotykové snímání	28
2.1.4 Detekce prezentačních útoků	31
2.1.5 Kontrola kvality zachyceného snímku	31
2.2 Segmentace ruky a ROI	32
2.2.1 Segmentace ruky a prstů	32
2.2.2 Segmentace ROI	34
2.3 Normalizace otisků prstů	35
2.3.1 Metoda filtrace	36
2.4 Stanovení kvality výsledného otisku	36
2.4.1 NFIQ 2	37
2.4.2 Innovatrics algoritmus	39

3	Realizace	40
3.1	Knihovny pro úpravy obrazu	40
3.1.1	OpenCV	40
3.2	Výběr programovacího jazyka	41
3.2.1	C++	41
3.3	Implementace	41
3.3.1	Získání snímku ruky	41
3.3.2	Extrakce jednotlivých ROI pomocí neuronové sítě	43
3.3.3	Zhodnocení kvality před převodem	45
3.3.4	Odstranění pozadí	45
3.3.5	Aplikace metody CLAHE	46
3.3.6	Aplikace mediánového filtru	47
3.3.7	Normalizace	48
3.3.8	Odhad orientace a výpočet frekvence hřebenů	49
3.3.9	Aplikace Gaborova filtru	50
3.3.10	Zhodnocení kvality výsledných otisků	50
4	Zhodnocení dosažených výsledků	51
4.1	Vyhodnocení kvality podle NFIQ 2	51
4.2	Vyhodnocení kvality podle Innovatrics	51
4.3	Možná vylepšení algoritmu	54
	Závěr	55
	Literatura	56
	Seznam symbolů a zkratk	61
A	Obsah elektronické přílohy	63
A.1	Segmentace oblastí zájmu (ROI) z obrázku	63
A.2	Algoritmus pro vylepšení otisků prstů	63
A.3	Innovatrics algoritmus na kontrolu kvality	63

Seznam obrázků

1.1	Struktura kůže.	14
1.2	Daktyloskopické markanty.	14
1.3	Princip optického snímače.	17
1.4	Princip kapacitního snímače.	17
1.5	Princip ultrazvukového snímače.	18
1.6	Ukázka průtahu prstu uživatele	19
1.7	Zkreslení v dotykovém snímači z důvodu jiných tlaků.	20
2.1	Proces zpracování otisků prstu.	25
2.2	Pracovní postup bezdotykového předběžného zpracování.	26
2.3	Schéma rozložení kamer u zařízení od TBS.	29
2.4	3D snímek vytvořený pomocí IDloop CFC.	30
2.5	Kvalita zachycení obrázku prstu.	32
2.6	Segmentace pomocí prahování.	34
2.7	Ukázka segmentace konečků prstů.	35
2.8	Normalizace otisku prstu.	37
3.1	Algoritmus zpracování otisků prstu.	42
3.2	Výstup původní neuronové sítě.	43
3.3	Chyba extrakce.	44
3.4	Upravený výstup neuronové sítě.	45
3.5	Odstranění pozadí.	46
3.6	Aplikace metody CLAHE.	47
3.7	Aplikace mediánového filtru.	48
3.8	Normalizace obrázku.	49
3.9	Výsledný vylepšený obrázek.	50
4.1	Falešné markanty.	54

Seznam tabulek

1.1	Základní daktyloskopické markanty a jejich identifikační hodnota. . .	15
2.1	Vlastnosti, podle kterých se posuzuje kvalita u NFIQ 2.	38
4.1	Zhodnocení výsledků pomocí NFIQ 2.	52
4.2	Zhodnocení výsledků pomocí Innovatrics.	53

Seznam výpisů

3.1	Aplikace CLAHE	46
3.2	Aplikace mediánového filtru	48
3.3	Funkce provádějící normalizaci	49

Úvod

Otisky prstů se staly nedílnou součástí našeho každodenního života. V dnešní době mají velkou škálu využití. Neslouží pouze v kriminalistice k vypátrání pachatele, jak tomu bylo v minulosti, ale téměř každý má dnes mobil vybavený čtečkou otisků prstů, využívající tuto biometrickou identifikaci k odemykání zařízení, autorizaci plateb a obecně jako zabezpečovací prvek místo hesla. Jsou to nezaměnitelné rysy, které zůstávají celý život neměnné.

Mezi nejvíce rozšířená zařízení pro získávání otisků prstů stále patří dotykové snímače, přestože mají oproti bezdotykovým několik nevýhod. Dochází u nich k deformaci kůže prstu, vznikají latentní otisky a pomocí dotyku se mohou šířit nemoci především na senzorech ve veřejných prostorách. Během pandemie COVID-19 se dostalo bezdotykovým systémům pro snímání a následné rozpoznávání otisků prstů zvýšené popularity, protože minimalizovaly riziko přenosu nákazy prostřednictvím dotyku.

Navzdory mnoha výhodám, které nabízejí bezdotykové systémy, se jim zatím nepodařilo proniknout do širokého využívání veřejností. Může to být způsobeno obavami ve společnosti ze zneužití pouhé fotky prstu nebo také složitějším mechanismem sejmutí otisku prstu bez dotyku, kdy je zapotřebí určitá spolupráce od uživatele. Dotykové systémy snímají otisk přímo a vytvářejí šedotónový obraz bez potřeby větších úprav. Naopak bezdotykové senzory nejprve získávají barevnou fotku prstu a teprve následně ji pomocí specializovaných algoritmů převádějí na výsledný šedotónový obraz, jak ho známe u dotykových senzorů. Uvedený proces může vést k delší době zpracování, zejména na zařízeních s nižším výpočetním výkonem.

Cílem práce je navrhnout univerzální řešení pro zpracování otisků prstů, které využívá volně dostupné knihovny a algoritmy a implementovat jej. Navržené řešení bude schopno převést barevnou fotografii otisku prstu, získanou běžným mobilním zařízením, na šedotónový obraz.

Práce je rozdělená do dvou částí – teoretický rozbor a praktická implementace. První část (teoretická) je dělena do dvou kapitol. První kapitola (kapitola 1) se věnuje základním biometrickým principům. Je v ní probrán význam otisků prstů, technologie snímačů obnášející různé problémy a nakonec normy otisků prstů. Druhá kapitola (kapitola 2) je také teoretická a navrhuje obecný postup při zpracování otisků prstů vyfocených mobilním zařízením a následné převedení do standardizovaného formátu. Druhá část práce (kapitola 3) se zaměřuje na realizaci algoritmu na převod otisků prstů z fotky do standardizovaného formátu. V poslední kapitole (kapitola 4) jsou zhodnoceny dosažené výsledky a navržena možná vylepšení.

1 Aktuální stav řešené problematiky

Naše společnost se stává poslední dobou více elektronicky založená a více mobilní. Nelze spoléhat pouze na náhradní prostředky určování identity, jako jsou hesla (pro přihlášení do mobilu, počítače, mobilního bankovníctví) nebo platební karty (pro placení, výběr hotovosti) k určení totožnosti uživatele. Karty mohou být odcizeny, hesla prolomena, nebo je uživatel může nevědomky někomu poskytnout.

V případě biometrického rozpoznávání, tedy využívání jedinečných anatomických (např. otisky prstů, obličej, duhovka) charakteristik a chování (např. řeč) k rozpoznávání jedinců, se jedná o spolehlivější alternativu. Biometrie se stává nezbytnou součástí efektivních a lépe zabezpečených řešení pro identifikaci osob, protože biometrické identifikátory nejsou přenositelné, nelze je snadno sdílet, nebo ztratit. Použití biometrie může snížit podvody a zároveň zlepšit uživatelskou pohodu. [1]

1.1 Otisky prstů

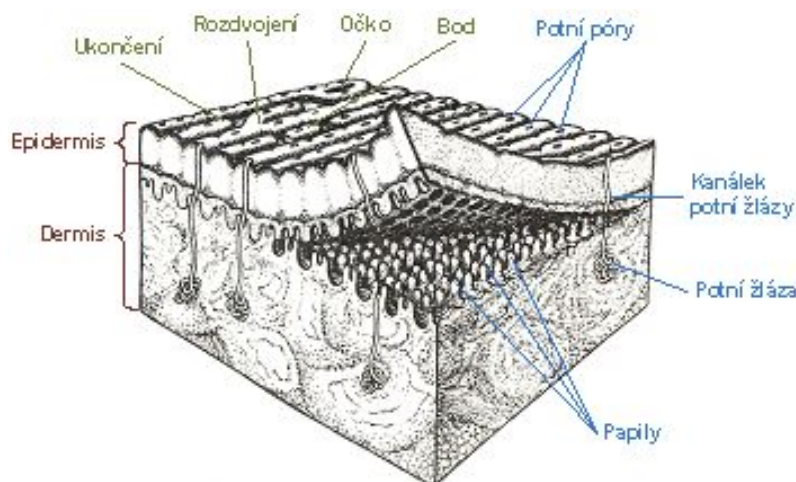
Otisky prstů jsou nejběžněji využívaným odvětvím v rámci biometrického rozpoznávání. Jsou to jedinečné a osobní znaky, které se nacházející na konečcích každého prstu. Otisky prstů se staly běžným prostředkem zabezpečení v moderních zařízeních a jsou využívány v každodenním životě. Většina moderních chytrých telefonů má čtečku otisku prstu a otisk prstu je tam využíván jako zabezpečení místo hesla. Otisky prstů jsou také využívány v již zmíněné kriminalistice. [2, 3, 4]

1.1.1 Struktura otisků prstů

Dlaně rukou a chodidla nohou vykazují na rozdíl od zbytku kůže celého těla zvrásnění kůže. Tyto zvrásnění jsou tzv. papilární linie. Pomocí těchto linií je jednoznačně určena identita jedince, protože průběhy těchto papilárních linií má každý jedinec odlišné. Navíc na těchto částech lidského těla zcela chybí ochlupení, které by mohlo mít negativní vliv pro zařízení na rozpoznávání jedinečnosti osob. Mezi papilárními liniemi se nacházejí údolí tzv. rýhy. [5]

Prst se tedy skládá ze vzoru střídavých hřebenů a údolí. Hřebeny na koncích prstů se vyvíjely v průběhu let, aby umožnily člověku chytat a držet předměty. Vývoj otisků prstů je ovlivněn genetickými faktory a prostředím, ve kterém se jedinec vyvíjel. Genetický kód v DNA určuje obecný vzor vývoje kůže, ale konkrétní tvar otisků je ovlivněn náhodnými událostmi, jako je přesná poloha plodu v děloze a složení okolní plodové vody. To vysvětluje, proč i otisky prstů jednovaječných dvojčat jsou odlišné. Otisky prstů se plně vyvinou kolem sedmého měsíce těhotenství a jejich vzory zůstávají neměnné po celý život jedince, s výjimkou situací, jako jsou zranění

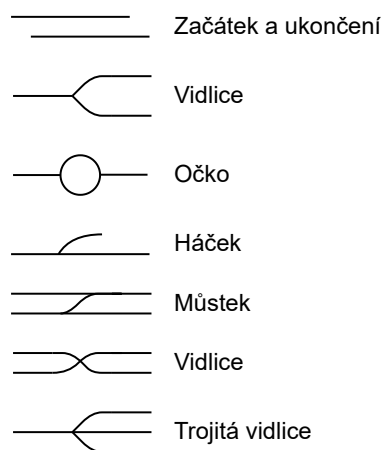
prstů. [2] Po celý život vykazují stabilitu vůči narůstajícímu věku i okolnímu prostředí. S přibývajícím věkem se sice mění rozměry plošek prstů, dlaní či chodidel, avšak struktura zůstává stejná [5].



Obr. 1.1: Struktura kůže. Převzato z [5].

1.1.2 Identifikace jedince

Identifikace jedince se provádí pomocí daktyloskopických markantů. Jednoznačně vyjádřená individualita papilárních linií se projevuje v tom, že obsahují velký počet těchto markantů. Mezi markanty patří např. *začátek a ukončení papilární linie, vidlice, očko, háček, můstek, překřížení, trojitá vidlice* atd. Pokud otisk prstu obsahuje dostatečný počet těchto znaků (nejméně 10), pak může být jednoznačně identifikován jedinec. [6]



Obr. 1.2: Daktyloskopické markanty.

Při porovnávání dvou otisků prstů se prověřuje, zda se tentýž znak nachází také na druhém otisku. Vyhledávají se jednotlivé markanty a pokud nějaký obsahují oba otisky, hledá se jejich poloha. Poloha znaku se vyjadřuje tím, že se určuje vzájemná poloha a vyjadřuje se počtem papírných linií, které jsou mezi nimi. Jestliže se všechny charakteristické znaky shodují tvarem i polohou, můžou být otisky považované za shodné.

Jednotlivé markanty se nevyskytují na otisku ve stejném počtu. Některé jsou častější. Z toho vyplývá, že jednotlivé markanty mají různou identifikační hodnotu, kterou lze vyjádřit matematickým vztahem:

$$I = -\log n, \quad (1.1)$$

kde I je identifikační hodnota markantu a n je četnost výskytu markantů na 1 mm^2 . [6]

V tabulce 1.1 jsou identifikační hodnoty pro základní markanty podle [6], seřazené podle velikosti od shora dolů. Čím vyšší mají markanty identifikační hodnotu, tím jsou vzácnější a vyskytují se méně často.

Tab. 1.1: Základní daktyloskopické markanty a jejich identifikační hodnota. Zdroj [6].

Daktyloskopický markant	Identifikační hodnota
Trojité vidlice	3,7
Křížení	3,1
Zdvojení	2,6
Očko	2,4
Posunutí	2,4
Můstek	2,3
Háček	2,1
Krátká linie	2,0
Tečka	1,7
Dvojitá vidlice	1,3
Začátek, ukončení	1,0

1.2 Technologie snímačů otisků prstů

Aby bylo možné zaznamenat otisk prstu, je potřeba mít nějaký snímač. Snímače jsou zařízení, která nasnímají otisky prstů a převedou do digitální podoby pro účely identifikace nebo ověření osoby. Snímače se dělí na live-scan snímače nebo se otisky mů-

žou získat pomocí off-line akvizice. V současné době se převážně používají live-scan snímače, kde je otisk prstu zachycen a zpracován okamžitě, což má hojně využití např. pro ověření totožnosti osoby. Naopak off-line snímání se využívá ve forenzním odvětví, kdy je otisk prstu obtisknut na určité místo a následně je tento obtisk analyzován. [1]

Snímače neboli skenery je možné klasifikovat také podle toho, kolik prstů jsou schopny snímat během jediné operace:

- Jedno-prstové – uživatel jednoduše předloží jeden prst, který je zachycen a zpracován. Pokud uživatel potřebuje zachytit více prstů, musí je snímat jednotlivě, vždy po jednom.
- Více-prstové – uživatel předloží více prstů najednou a tyto prsty se najednou zachytí. Palec se dělá většinou zvlášť. Tato metoda vyžaduje pokročilejší technologie, které jsou schopny zaznamenat více otisků prstů současně a následně je rozlišit a zpracovat. [1, 7]

1.2.1 Inkoustová metoda

Jde o metodu off-line získání. Tato metoda patří mezi nejstarší metody zachycení otisků prstů. Jde o to, že se nanese inkoust, nebo jiné barvivo na prst a poté se přitiskne na papír, nebo nějaký jiný specializovaný povrch a tím se vytvoří otisk prstu.

Tato metoda nese sebou několik nevýhod. Je nehygienická a pro uživatele velmi nepohodlná. Při nesprávném přitisknutí prstu může být tato metoda nepřesná. Vytvořený otisk se může snadno smazat, nebo poškodit. Proto se s nástupem skenerů vytvořené otisky často naskenovaly do digitální podoby. Dnes se tato metoda téměř nepoužívá, nahradily ji rychlejší a přesnější skenery. [1]

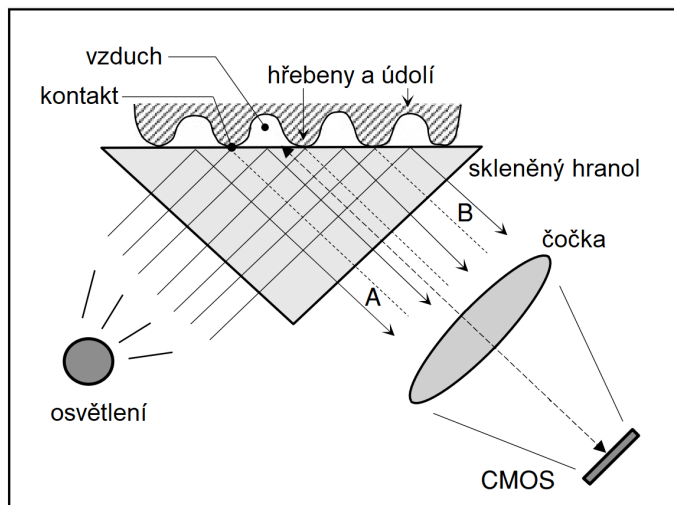
1.2.2 Optické snímače

Existuje mnoho principů optických snímačů. Mezi nejběžnější se řadí: *FTIR* nebo *elektro-optický* snímač.

Frustrated Total Internal Reflection (FTIR)

Je to nejstarší a stále často používaná technika přímého snímání otisků prstů. Prst je umístěn na skleněném, nebo plastovém hranolu, kde hřebeny jsou v optickém kontaktu s povrchem hranolu, zatímco údolí zůstávají v určité vzdálenosti. Hranol je osvětlen zleva difúzním světlem a světlo vstupující do hranolu je odraženo na údolích a rozptýleno na hřebenech. To umožňuje snímat hřebeny a údolí jako tmavé a světlé plochy v obraze. Paprsky světla dopadají na pravou stranu hranolu a jsou zaostřeny pomocí čočky na snímač CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*).

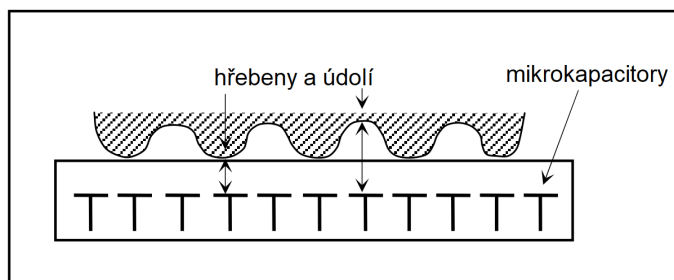
FTIR snímače jsou třírozměrné, což znamená, že nemohou být snadno oklamány pomocí fotografie nebo tištěných obrazů otisku prstu. [1]



Obr. 1.3: Princip optického snímače. Převzato z [1].

1.2.3 Kapacitní snímače

Kapacitní senzory jsou dvourozměrná pole mikrokapacitorů vložená do panelu. Druhým elektrickým pólem každého mikrokapacitoru je samotná kůže prstu. Když je prst umístěn na čip, mezi povrchem prstu a jednotlivými křemíkovými pláty se vytváří malé elektrické náboje. Velikost těchto nábojů závisí na vzdálenosti mezi povrchem otisku prstu a kapacitními pláty. Kapacitní senzory, podobně jako optické, nelze snadno oklamat přiložením ploché fotografie obrazu otisku prstu, protože měří vzdálenosti, a proto mohou detekovat pouze třírozměrný povrch. [1]



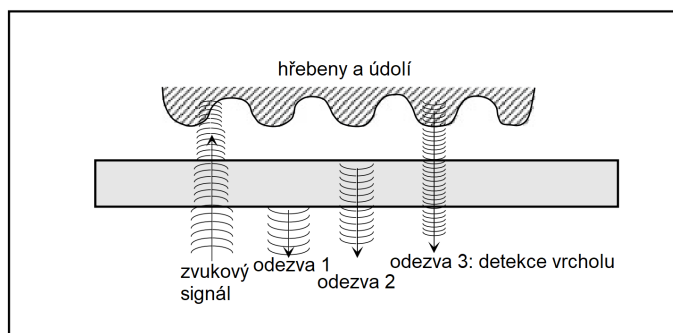
Obr. 1.4: Princip kapacitního snímače. Převzato z [1].

1.2.4 Termální snímače

Termální senzory používají pyroelektrický materiál k detekci otisků prstů na základě teplotních rozdílů mezi hřebeny a údolími otisku. Na základě těchto rozdílů generují jiné napětí v závislosti na teplotě. Tento rozdíl v teplotě vytváří obraz při kontaktu, ale rychle mizí kvůli dosažení teplotní rovnováhy. Oproti jiným technologiím jsou termální senzory méně citlivé na elektrostatické výboje a snášejí tlustší ochrannou vrstvu, ale spotřebovávají více energie a mají pomalejší akvizici dat. Teplota je důležitým faktorem, který dokáže napovědět, zda snímaný otisk patří živé osobě. Lze tedy eliminovat různé pokusy o podvrh neživého padělku. [1, 6]

1.2.5 Ultrazvukové snímače

Ultrazvukové snímání principiálně spočívá v odesílání zvukových signálů směrem k povrchu otisku prstu a následném zachycení odraženého signálu. Tento odražený signál slouží k výpočtu hloubkového obrazu otisku a identifikaci struktury hřebenů. Základními komponentami ultrazvukového senzoru jsou vysílač, který generuje krátké zvukové pulsy a přijímač, který detekuje odezvy, jež vzniknou při odrazu těchto zvukových pulsů od povrchu otisku prstu. [1]

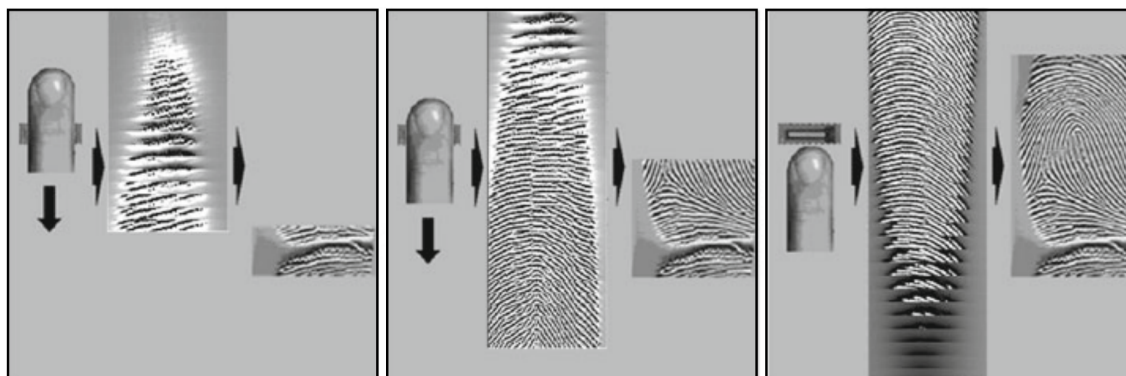


Obr. 1.5: Princip ultrazvukového snímače. Převzato z [1].

1.2.6 Průtahové snímače

S cílem zmenšit plochu snímačů byla navržena metoda tzv. „sweep sensing“, která spočívá v tom, že uživatel přejede prstem přes senzor a získají se částečné obrazy otisku prstu tzv. řezy. Rekonstrukce obrazu z řezů může být prováděna během snímání, nebo až po jeho dokončení. Vzhledem k tomu, že tato metoda zahrnuje snímací pohyb pouze nahoru a dolů, šířka senzoru může být široká jako prst, jak je vidět na obrázku 1.6. Na druhou stranu, z principu snímání, by výška senzoru mohla být jen jedno pixelová řada. V praxi se však používá větší výška senzoru, protože rychlost

přejetí prstu je neznámá a mohla by se měnit, proto je nutné zajistit určitý stupeň překryvu, aby bylo možné jednotlivé řezy efektivně sloučit do plného obrazu otisku prstu. [1]



Obr. 1.6: Ukázka průtahu prstu uživatele. Převzato z [1].

1.2.7 Bezdotykové snímače

Tato zařízení používají velmi kvalitní fotoaparát, nebo jiné zařízení pro zachycení detailů otisků prstů. Prst během snímání není v kontaktu s žádným povrchem, ale může být položen na stojánku, který zajišťuje konstantní vzdálenost od fotoaparátu a předchází se tím také nežádoucím pohybům prstu. [1]

Bezkontaktní zařízení pro snímání otisků prstů jsou na trhu již řadu let, ale stále nenašly dostatečný zájem pro jejich rozšíření, ačkoliv mají mnohé výhody oproti klasickým dotykovým systémům. Důvodem může být náročnější implementace a s tím spojena vyšší cena. [8]

1.3 Problematické otisky prstů

1.3.1 Problémy dotykových systémů

Většina současně používaných zařízení pro snímání otisků prstů používá dotykově založený snímač. Vzhledem k tomu, že otisk prstu není plochý, uživatel musí fyzicky přiložit prst a vyvinout tlak na určité snímací ploše.

Tyto techniky založené na dotyku však sebou nesou určité problémy.

- **Deformace kůže prstu.** Různá místa otisku prstu mohou být zachycena s rozdílnou intenzitou způsobenou nerovnoměrným rozpoštěním tlaku prstu při snímání. S touto deformací kůže při snímání také souvisí, že se markanty v určitém místě otisku prstu přiblíží a dochází ke zkreslení výsledného otisku.

Na obrázku 1.7 jsou zachyceny dva otisky prstů z jednoho prstu s různými markanty v důsledku rozdílných fyzických tlaků při snímání.



Obr. 1.7: Zkreslení v dotykovém snímači z důvodu jiných tlaků. Převzato z [9].

- **Latentní otisky.** Při opětovném použití snímače, může na snímači zůstat předešlý otisk, který negativně ovlivní nové snímání. Latentní otisky mohou být také zneužity, když je otisk prstu použit jako zabezpečovací prvek např. místo hesla.
- **Vlivy okolí.** Chyby způsobené znečištěním snímače nebo bříška prstu, suchou kůží, zpoceným prstem nebo vysokou vlhkostí vzduchu. Dále sem patří chyby způsobené otřesy nebo vibracemi snímače nebo prstu při snímání. U optických snímačů můžou chyby vznikat také proměnlivými světelnými podmínkami. [8, 9, 10]

1.3.2 Problémy bezkontaktních snímačů

Bezdotykové snímání otisků prstů řeší mnoho problémů, které často omezují správné fungování dotykových systémů. Hlavní výhodou je, že nedochází k deformaci kůže prstu, jsou odolnější vůči nečistotám a proměnlivým podmínkám prostředí. Při jejich snímání nedochází k latentním otiskům, proto nemůže dojít ke zneužití osob, nedochází k přenosu onemocnění, z čehož má ve veřejných prostorách řada lidí obavy, a proto se tento způsob snímání může setkat s vyšší přijatelností od široké veřejnosti. [10]

Navzdory mnoha výhodám, které bezdotykové snímání přináší, se s nimi pojí také mnohé výzvy.

- **Přístrojová omezení.** Snímaný prst se při snímání může mírně potočit, nebo nepatrně pohybovat, což může způsobit nesprávné zaostření a snímky mohou obsahovat šum. Dalším problémem může být nerovnoměrné osvětlení. Tento problém se vyskytuje zejména u přenosných zařízení, která se vyskytují v různých světelných podmínkách. Proto je dobré používat nějaký přídavný zdroj světla. V různých prostředích mohou vznikat různé stíny a odrazy, což

představuje výzvu v oblasti pozadí na snímcích. Tento problém je také zvláště patrný u přenosných zařízení, která se nacházejí v různorodých prostředích s různými typy pozadí. [11]

- **Nekonzistentní podmínky.** Při bezkontaktním snímání není zaručena vždy přesná vzdálenost mezi prstem a snímačem. Tento problém může způsobit proměnlivou velikost zachyceného prstu. [10, 11]
- **Omezení biologických objektů.** Otisky prstů mohou být ovlivněny vrozenými vadami nebo nemocemi jedinců, kteří trpí dermatologickými problémy, které mohou vést k méně výrazným papilárním liniím. Pokud jedinec vykonává fyzickou práci celý život, tak u něho může docházet k rozmělnění hřebenu otisků prstů a snímači se nepodaří tak dobře zachytit otisk. Věk jedince také ovlivňuje obraz otisku prstu, protože s narůstajícím věkem se mění velikost prstu. Snímání je také negativně ovlivněno nečistotou a potem na prstech. [11]
- **Tvorba nástrojů prezentačních útoků.** Pokud podvodník zjistí informace o markantech otisku prstu, není potom obtížné vytvořit falešné špičky prstu z běžně dostupných materiálů, jako je křemík, jíl nebo želatina. Tímto způsobem je možné obejít různé přístroje používající otisky prstu jako druh zabezpečení. Detekce prezentačních útoků je způsob, jak zjistit, zda otisk prstu skutečně pochází z živého konečku prstu. U dotykových zařízení je tato detekce poněkud jednodušší. Lze ji dosáhnout kontrolou statických vlastností (např. teplota, vodivost) a dynamického chování (např. deformace kůže, pocení, krevní tlak). [12] Podrobnosti k detekci prezentačních útoků u bezkontaktních snímačů v kapitole 2.1.4.

1.4 Normy otisků prstů

Normalizace datových struktur pro interoperabilní využití biometrických dat mezi organizacemi je z mnoha hledisek největší a nejdůležitější částí úsilí o standardizaci biometriky. Aktivita se zaměřuje na dvě oblasti: proces ANSI-NIST pro data v oblasti výkonu zákonů a SC 37 pro všechny ostatní aplikace. Cíl je stejný v obou případech – bezproblémová, správná a efektivní výměna dat mezi produkty různých výrobců.

SC 37's Working Group 3 vyvíjí normy pro formát výměny biometrických dat. Jedná se o největší pracovní skupinu v rámci SC 37 a vyvíjí normy s největším zastoupením na trhu. Vyvíjí například různé normy ISO/IEC. [2]

1.4.1 Normy ANSI/NIST

ANSI/NIST ITL 1-2007

Tato norma, která byla zahájena v roce 1986 jako formát přenosu markantů, je

nejstarší, nejrozšířenější a pravděpodobně nejdůležitější biometrickou normou. Slouží k formátování a přenosu textových údajů, detailních bodů a obrazových dat mezi právními orgány, jak v rámci Spojených států, tak i mezinárodně.

Byl vytvořený na *National Institute of Standards and Technology* (NIST) ve spolupráci s různými subjekty v reakci na potřebu Federálního úřadu pro vyšetřování, aby stanovil jednotný kódový systém pro data, která se používají při kriminalistických vyhledáváních. Jeho vypěstlost vedla k jeho přijetí včetně Ministerstva vnitřní bezpečnosti USA, a používá se pro vnitřní aplikace, včetně kontroly na hranicích a interoperability s FBI (*Federal Bureau of Investigation*). FBI oficiálně používá normu ANSI/NIST ve svém systému pro elektronický přenos biometrických údajů, což stanovuje rozhraní mezi FBI biometrickým zařízením a systémy jiných agentur. [2]

1.4.2 Normy ISO/IEC

ISO/IEC 19794-2

Tato norma byla publikovaná v roce 2005 a obsahuje údaje o markantech prstu. Specifikuje datové formáty pro reprezentaci otisků prstů na základě markantů. Definuje obecný formát záznamu, který může obsahovat jeden nebo více otisků prstů, a je navržen pro použití v široké řadě aplikací, kde je zahrnuto automatické rozpoznávání otisků prstů. Norma definuje příslušné pojmy – popisuje, jak určit typ markantů, polohu a orientaci a určuje formáty pro ukládání dat. Záznam markantů otisků prstů obsahuje záhlaví záznamu, které obsahuje obecné informace (jako je velikost a rozlišení obrázku) a počet zastoupených otisků prstů (zobrazení prstů). Pro každý markant je veden záznam, který obsahuje informace o typu, pozici, směru a kvalitě markantu.

Navržený přístup je schopen rekonstruovat obraz otisku prstu na základě šablony markantů získanou z jediného otisku prstu. [8]

ISO/IEC 19794-3

Tato norma byla publikovaná v roce 2006 a obsahuje údaje o vzorech prstu. Podle normy se kódují data o hřebenech otisků prstů pomocí spektrální dekompozice na buňky pole. Buňky mohou být obdélníkové a překrývat se. Používá se jedna ze tří metod dekompozice: *kosinusové trojice*, *diskrétní Fourierovu transformaci* (DFT) a *Gaborovy filtry*. [2]

ISO/IEC 19794-4

Tato norma byla publikovaná v roce 2005 a obsahuje údaje o obrazu prstu. Norma definuje kontejner pro 2D rastrové obrázky prstů a dlaní ve stupních šedi. Záznam

obsahuje pole pro označení pozice prstu, typ otisku, skenování a uložené rozlišení. Přesnost může být 1–16 b a obrázky mohou být buď nekomprimované, nebo zakódované pomocí JPEG, JPEG 2000, PNG, nebo WSQ. Tato norma kóduje stejný obsah jako jeho protějšek pro právní výkonnost ANSI/NIST a přímo z něj přebírá obsah, jako jsou výčtové hodnoty pro typ zobrazení a pozici prstu. [2]

WSQ

Vzhledem k tomu, že evidence otisků prstů má mnoho záznamů a každý digitalizovaný obraz otisku prstu má nezanedbatelnou binární velikost, byly vytvořeny specializované komprimační algoritmy. Jedním z nejběžněji používaných algoritmů pro komprimaci je *Wavelet Scalar Quantization* (WSQ).

V praxi bylo zjištěno, že komprimace otisků prstů do formátu JPEG, který se běžně používá pro ukládání obrazových dat v počítačích, je nevyhovující. Kromě poklesu kvality dochází také k nežádoucímu jevu, tzv. „čtverečkování“, kdy vznikají umělé hrany v obraze. Metoda WSQ nabízí poměrně vysoký komprimační poměr (1:4 až 1:50) s minimální ztrátou zpracovaných dat a poskytuje i vysokou rychlost komprimace. [6]

2 Algoritmy zpracování otisků prstů

Zachycená obrazová data se výrazně liší mezi bezdotykovými a dotykovými zařízeními pro snímání otisků prstů. U většiny dotykových zařízení se vytváří obraz ve stupních šedi, kde je oblast pokožky hřebenů prstu dotýkající se povrchu skeneru zobrazena černě (nebo tmavě šedými hodnotami), zatímco údolí a pozadí jsou bílé (nebo světle šedé hodnoty). Tyto vzorky se obvykle používají přímo k extrakci rysů bez rozsáhlého předzpracování. [13]

Naopak většina bezdotykových schémat poskytuje barevné obrazy prstů, které vyžadují podrobné předzpracování před samotnou extrakcí rysů. Problematikou jsou nízký kontrast mezi hřebeny a údolími prstu, rozmazané oblasti zájmu (ROI – *Region of Interest*) a změny polohy, rotace, nebo náklon prstu. Přístup k zpracování obrazu musí být vytvořen s ohledem na konkrétní zařízení a podmínky během zachycování. [13] Předzpracování může být rozděleno dle [7, 13] do následujících kroků:

1. Získání obrazu

Nejdříve je potřeba určitým způsobem získat snímek otisku prstu. K tomu může sloužit celá řada zařízení, ať už to jsou specializovaná zařízení, určená přímo k tomuto účelu, nebo univerzální přístroje k zachycení obrazu, jako je digitální fotoaparát, nebo chytrý telefon. Existuje také mnoho různých způsobů zachycení otisku prstu.

2. Detekce a segmentace

V tomto kroku je nejprve detekována ruka, která obsahuje jeden, nebo více prstů. Následně dochází k segmentaci prstů a ruky od pozadí. Viz obrázky 2.2b, 2.2c. Dále dochází k segmentaci oblastí zájmu (ROI). V případě, že obraz obsahuje více prstů, je nutné provést segmentaci všech ROI. Tyto ROI jsou následně rozděleny do samostatných obrázků pro další úpravu.

3. Normalizace otisku prstu a další vylepšení

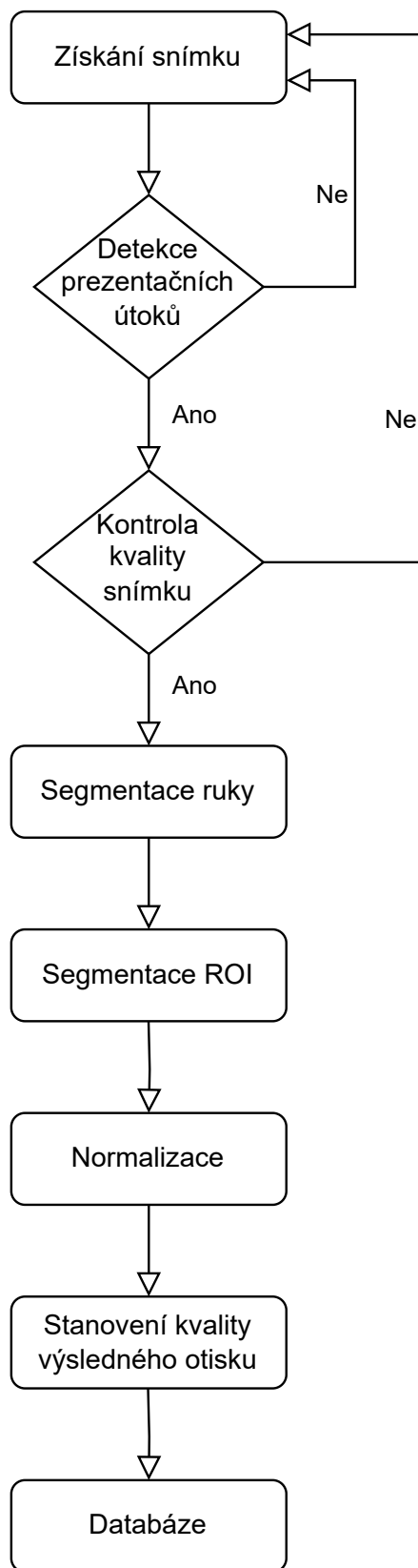
V této fázi dochází k extrakci ROI a převodu do stupňů šedi (obr. 2.2d) a dalšímu vylepšování. Pro zlepšení zachyceného obrazu prstu jsou využívány různé techniky zpracování obrazu, které mají za cíl zvýšit kontrast a ostrost, jak je vidět na obrázku 2.2e. Obraz prstu je vylepšen, aby se získaly otisky prstů a zdůraznily se jejich charakteristické rysy, například pomocí skeletonizace (obr. 2.2f).

4. Stanovení kvality výsledného otisku

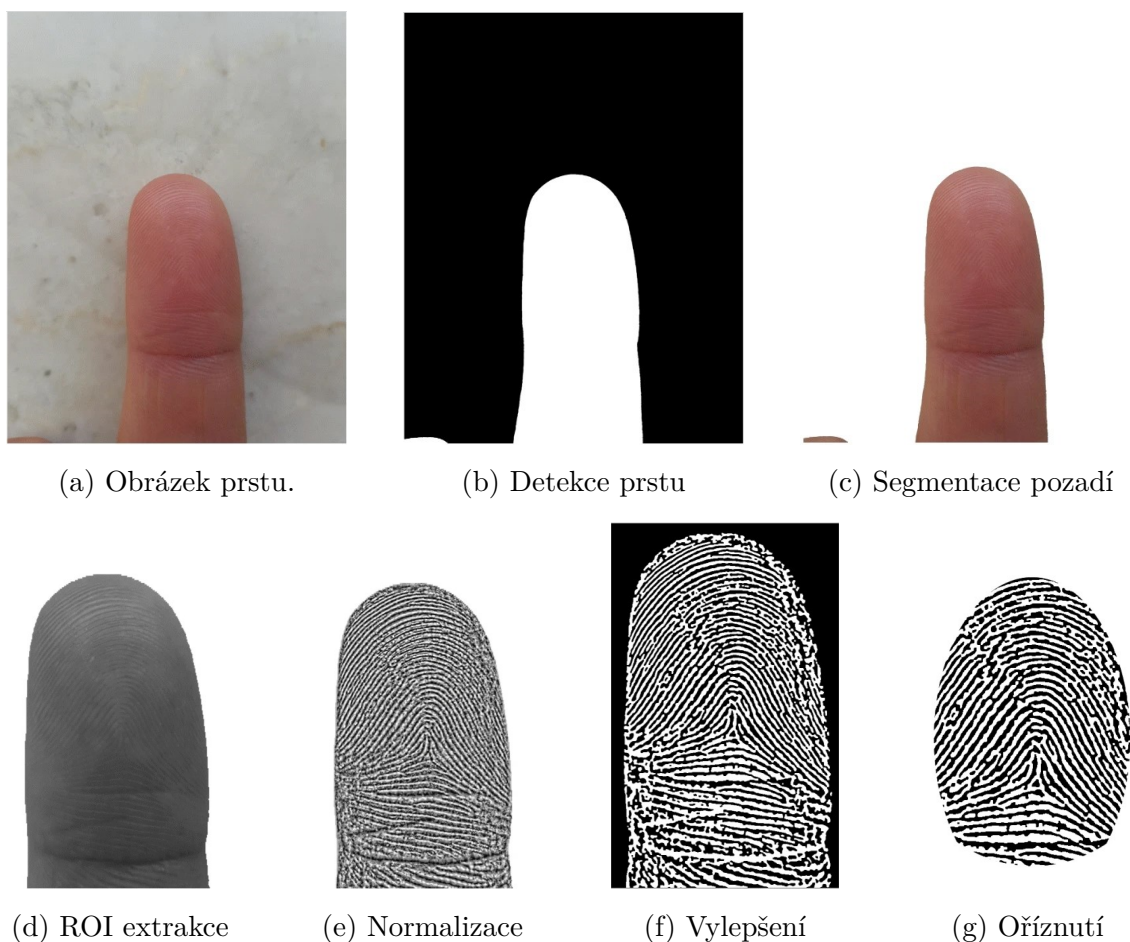
V tomto kroku je stanovena kvalita výsledného otisku (např. pomocí algoritmu NFIQ 2).

5. Uložení do databáze

Výsledné otisky prstů jsou uloženy do databáze.



Obr. 2.1: Proces zpracování otisků prstu.



Obr. 2.2: Pracovní postup bezdotykového předběžného zpracování. Převzato z [13].

2.1 Způsoby pořízení digitálního obrazu otisku prstu

Existují významné rozdíly mezi metodami akvizice, zejména v technikách používaných pro řízení polohy prstu, osvětlení a pozadí. Snímky otisků prstů získané za kontrolovaných a nekontrolovaných podmínek vykazují výrazné rozdíly v kvalitě. Akviziční postupy s kontrolou umístění prstu, osvětlením a pozadím mohou dosáhnout lepší kvality snímků než nekontrolované metody akvizice. Nicméně nastavení řízené akvizice vyžaduje vyšší míru spolupráce ze strany uživatele. [7]

2.1.1 2D

Nejjednodušším způsobem získání obrazu otisku prstu spočívá v použití jediné digitální kamery (webové kamery, fotoaparátu mobilního zařízení, atd.) a to bez použití přídavného světla [14]. Tento způsob získávání byl v minulosti nepoužitelný, protože kvality těchto zařízení byly nesrovnatelně horší, než je tomu v dnešní době. Jak již bylo zmíněno, snímky pořízené bez přídavného světla jsou téměř nepoužitelné kvůli

nízkému kontrastu mezi hřebeny a údolími. Z tohoto důvodu je u většiny zařízení běžné používat dodatečných osvětlovacích technik, a to buď ve formě jednobodových, nebo vícebodových zdrojů světla. Jednobodové jsou sice cenově dostupnější a jednodušší na implementaci, ale nejsou tak účinné jako vícebodové. U vícebodových zdrojů světla dochází k lepšímu rozptylu světla a výsledkem je rovnoměrný kontrast v různých částech otisku prstu. [10]

Jak uvádí například studie [8, 9], viditelnost a kontrast zachycených otisků závisí také na vlnové délce použitého světla. Dlouhé vlnové délky, jako je bílé světlo, nebo infračervené záření, mají tendenci pronikat do kůže a být absorbovány epidermem. Naopak modro-zelené světlo s vlnovou délkou 500 nm se ukázalo jako světlo s nejlepšími vlastnostmi pro nejpodrobnější zachycení otisku prstu. Je to dáno tím, že toto světlo vykazuje nižší absorpci hemoglobinu a navíc modrá barva je doplňkovou barvou ke žluté a červené, což jsou dominantní barvy kůže otisků prstů. Kromě toho, použití modře zbarvených filtrů nejen pomáhá snížit rušivé světlo z okolí tím, že odstraní zbytečné vlnové délky světla, ale zároveň minimalizuje rušivý šum, který by mohl ovlivnit kvalitu zachycených snímků. Pro zajištění dostatečného osvětlení jsou často používány modro-zelené LED diody jako zdroje světla.

Dalším faktorem akvizičních systémů je vzdálenost mezi prstem a kamerou. Většina systémů provádí akvizici na vzdálenost menší než 10 cm od senzoru, aby došlo k co nejlepšímu zaostření a zachycení prstu. Čím blíže je ale prst k senzoru, tím znatelnější je i jeho nepatrný pohyb. Proto se často využívá stojan, na který se prst položí. Tím dochází k minimalizaci jeho pohybu. Kromě toho mnoho systémů také využívá vodítka pro umístění prstu pro zajištění optimální vzdálenosti od zařízení pro akvizici. [10]

2.1.2 3D

Využitelná plocha zachycená bezkontaktním snímáním je ve skutečnosti menší, než je tomu u plochých senzorů pro dotykové otisky. To je způsobeno tím, že zakřivení prstu zvyšuje hustotu vzorů hřebenů a údolí, což může vést k zachycení otisku prstu, kde jsou hřebeny a údolí blízko sebe. Tento jev může způsobit obtíže při identifikaci otisku, neboť vzdálenost mezi údolími a hřebeny je důležitým parametrem při posuzování autenticity otisku prstu.

S cílem zvýšit přesnost systémů určených k zachycení otisku prstu využívajících jedinou kameru s jedním zorným polem, byly vyvinuty bezkontaktní snímače, které využívají více kamer, nebo více zorných polí. Tento nový koncept řeší problém zvýšené hustoty hřebenů a údolí na okraji prstu tím, že získává více snímků z různých úhlů. Když je tento problém řešen jedinou kamerou, která uživatele po zachycení snímku automaticky vyzve, aby pootočil prstem pro zachycení prstu z dalšího úhlu,

je poté následovně zkonstruování konečného snímku otisku prstu velmi výpočetně náročné. Proto se častěji používají specializovaná zařízení, která mají více kamer, obvykle kolem pěti, pevně umístěných na strategických místech. Uživatel vloží prst na označené místo, mezi tyto kamery, které současně pořídí snímky, jež jsou následně zpracovány a je vytvořen výsledný obraz otisku prstu. [8]

2.1.3 Zařízení pro bezdotykové snímání

V současné době existuje mnoho druhů zařízení pro získání otisků prstů. Klíčovými faktory pro hodnocení těchto zařízení jsou jejich velikost, výkonnost, kompatibilita a cena [9]. S ohledem na snahu o rozšíření bezkontaktního snímání mezi širokou veřejností preferují mnozí výzkumníci použití univerzálních zařízení pro získávání otisků prstů před specializovanými přístroji, neboť jsou více dostupná. Tato univerzální zařízení zahrnují digitální fotoaparáty, webové kamery, zejména však chytré telefony.

Využití těchto zařízení bylo experimentálně zkoumáno. Kvalita webových kamer je ve srovnání s digitálními fotoaparáty a chytrými telefony horší, ale i tak některé z nich dosáhly biometrického rozpoznávání na základní úrovni, kde ale rozpoznávání není moc spolehlivé. Dnešní chytré telefony se díky kvalitním fotoaparátům, možnosti rychlého zpracování obrazu a celkové univerzálnosti staly preferovanými zařízeními pro zachycení otisků prstů u řady výzkumníků. [13]

Chytré telefony

Chytré telefony jsou v dnešní době velmi rozšířené. Běžně se využívají pro ukládání citlivých dat a pro přístup k různým službám. S ohledem na potřebu zabezpečeného ukládání informací, správu hesel, možnosti on-line plateb, vyžadují tato zařízení silné ověřovací mechanismy. Z tohoto důvodu má mnoho chytrých telefonů poslední doby zabudované senzory, speciálně navržené pro biometrické získávání. Jsou to např. snímače otisků prstů, kamery pro oční biometrii, nebo zařízení pro získávání trojrozměrných vzorků obličeje. Tyto zabezpečovací prvky zpříjemňují uživatelům používání chytrých telefonů, neboť nemusí při každém odemknutí telefonu zadávat heslo, nebo PIN.

Vzhledem k nedávnému pokroku v rychlosti, rozlišení a dynamickém rozsahu digitálních fotoaparátů zabudovaných do smartphonů přitahuje biometrie otisků prstů stále větší zájem. Nejnovější modely mobilních zařízení mají fotoaparáty srovnatelné se specializovanými digitálními fotoaparáty, proto je jejich kvalita více než dostačující.

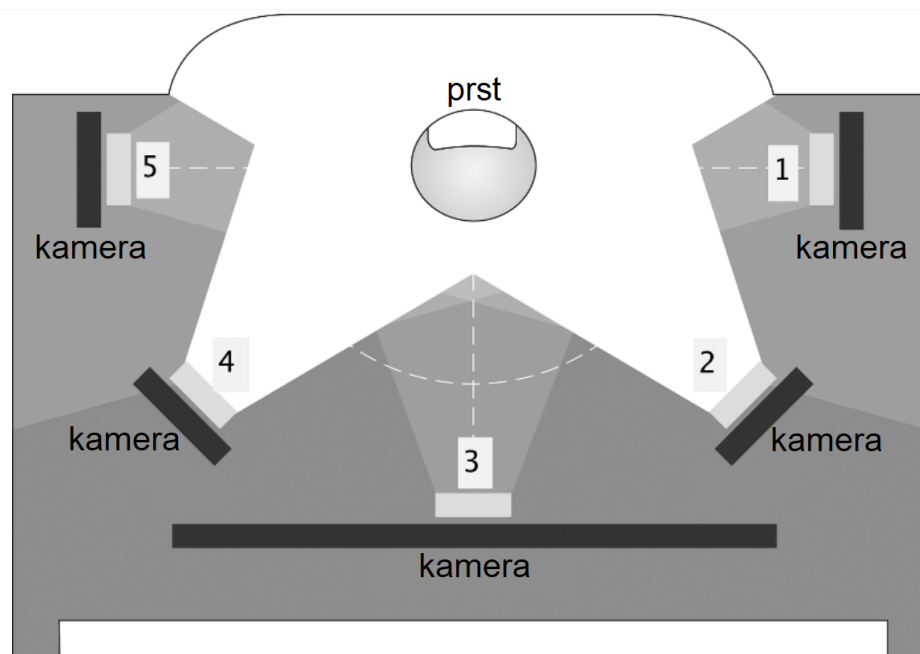
Existují různé metody, jak získat otisky prstů pomocí kamer v chytrých telefonech. Obvykle jsou parametry kamery, jako je ohnisková vzdálenost, clona objektivu

a doba expozice, automaticky nastaveny pomocí softwarového nástroje pro získávání, který poskytuje operační systém. Uživatel zachytí obraz otisku prstu, jakmile je prst v zorném poli kamery a je zaostřen. Pro optimální výsledky se doporučuje ponechat aktivované automatické ostření a využít režim makro, pokud je k dispozici. Dále je vhodné povolit blesk. Pro nejlepší výsledky se také doporučují externí přídavná světla a makročochky jako užitečné rozšíření pro zlepšení kvality snímků. [7, 13]

Režim makro je speciálním režimem fotoaparátu určeným k fotografování detailů blízkých objektů. Pro dosažení nejlepšího zachycení je doporučována vzdálenost 3–5 cm od fotoaparátu. Tento režim je nejlépe využitelný pro zachycení pouze jednoho, nebo dvou prstů, protože při pokusu o fotografování více prstů, za dodržení vzdálenosti 3–5 cm, se prsty nemusí vejít do zorného pole fotoaparátu.

Specializovaná zařízení – The Surround Imager™

Tento přístroj byl vyvinut švýcarskou společností *Touchless Biometric Systems* (TBS). Je to inovativní snímač, schopný bezkontaktně zachytit otisk prstu od nehtu k nehtu. Zařízení je složeno z pěti kamer umístěných na půlkruhu a zaměřených na jeho střed, kde má být prst umístěn během snímání a obsahuje i soubor zelených LED světél, také umístěných v půlkruhu. Pro dosažení nejlepších výsledků je prst umístěn na speciálním stojánku, což minimalizuje jakékoli nepřesnosti způsobené třesem a zajistí ostrost výsledného snímku. Je důležité, aby se část prstu, která má být zachycena, nedotýkala žádného povrchu a prst musí být umístěn v přesné pozici, aby byl kompletně obsažen v zorném poli všech pěti kamer.



Obr. 2.3: Schéma rozložení kamer u zařízení od TBS. Převzato z [15].

Po vložení prstu do zařízení uživatel obdrží na obrazovce pokyn „Nehýbejte se“, což je signál, po kterém je zařízení připraveno zachytit otisk prstu. Jakmile je prst správně umístěn, zařízení automaticky spustí snímání. Během tohoto procesu je každé LED osvětlení nastaveno na konkrétní intenzitu a pět kamer zachytí snímek prstu současně. Tyto zachycené pohledy jsou následně pomocí různých algoritmů a technik spojeny dohromady, což umožňuje vytvoření 3D rekonstrukce otisku prstu. Tento pokročilý přístroj, vyvinutý společností TBS, úspěšně překonává tradiční problémy spojené s technologiemi založenými na dotyku a poskytuje spolehlivé a konzistentní výsledky. [8, 16]

Specializovaná zařízení – IDloop CFS

IDloop CFS představuje další zařízení pro 3D snímání otisků prstů, vyvinuté německou společností *IDloop*. Toto zařízení disponuje velkým skenovacím objemem a umožňuje bezkontaktní zachycení až čtyř prstů, nebo obou palců. Registrace, ověření a identifikace jsou realizovány jednoduše tím, že uživatel přiloží ruku, nebo palec nad senzor.

Toto zařízení zachycuje otisky prstů plně v 3D obrazech, které lze automaticky převést na tradiční 2D obrazy. Skenér je proto kompatibilní s kontaktními systémy otisků prstů, které lze použít k úspěšnému porovnání s tradičními databázemi otisků prstů založených na kontaktech.

Vysokorychlostní automatické zachytávání čtečky rozpozná všechny uživatele pohodlným způsobem, bez vlivu okolního světla nebo různých typů pleti. Kromě toho není během procesu snímání vyžadován žádný pohyb ruky. To umožňuje kompaktní a přehlednou integraci zařízení. [17]



Obr. 2.4: 3D snímek vytvořený pomocí IDloop CFC. Převzato z [17].

2.1.4 Detekce prezentačních útoků

Detekce prezentačních útoků má dle normy ISO/IEC 30107 za cíl odlišit skutečné biometrické vzorky od potenciálních prezentačních útoků na senzor. V oblasti biometrie otisků prstů je cílem rozpoznat skutečné prsty od syntetických artefaktů, což zahrnuje různé materiály, výtisky a obrázky na elektronických zařízeních. [7]

Existují algoritmy detekce prezentačních útoků založené na jednotlivých bezdotykových snímcích otisků prstů, které lze hodnotit i pro snímky pořízené pomocí mobilních zařízení. Jedna z metod využívá extrakci lokálních binárních vzorců a matice společného výskytu na úrovni šedé, která klasifikuje obrázky pomocí klasifikátoru dopředné neuronové sítě. [18]

U bezdotykových systémů je také jednou z možností metody detekce prezentačních útoků metoda založená na vlnkové analýze povrchové textury špičky prstu pomocí digitální zrcadlovky s vysokým rozlišením. Tím se zkoumá povrch otisku na různých úrovních hrubosti, což umožňuje odhalit, zda je otisk prstu živý nebo zfalšovaný. Další metody mohou využívat analýzy infračerveného záření nebo detekci srdečního rytmu, který se projevuje v malých pohybech kůže na prstu. [12]

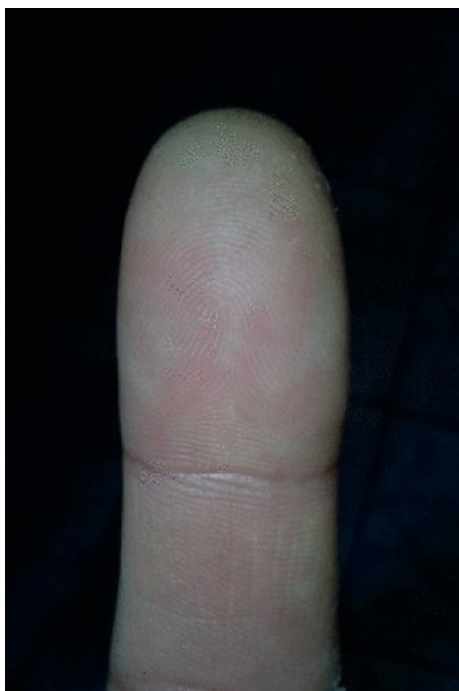
2.1.5 Kontrola kvality zachyceného snímku

Ve srovnání s dotykovými systémy, pro rozpoznávání otisků prstů, mají bezdotyková schémata více kritických kroků během získávání a zpracování, což může negativně ovlivnit výkon systému. Proto je pro bezdotykové vzorky zvláště důležité mít kvalitní a propracovaný proces zajištění kvality. Klíčovým kritériem pro kvalitu obrazu otisku prstu je vysoká úroveň ostrosti, nezbytná pro efektivní detekci hřebenů prstu. [7, 20]

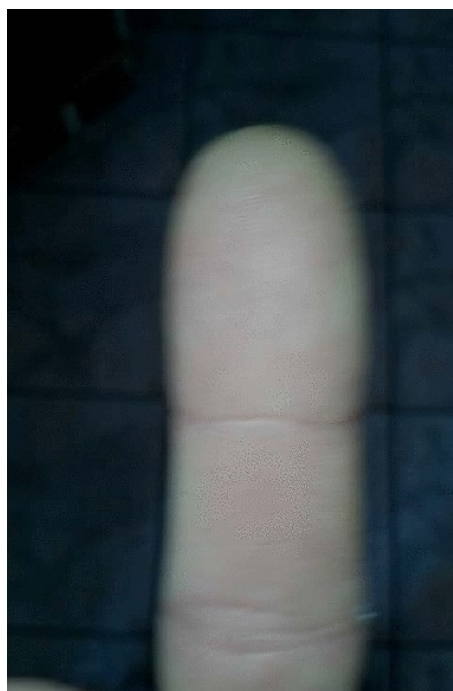
Studie [20] používá k určení ostrosti obrazu přístup založený na hranách. K tomuto účelu je použit *Sobelův filtr*, který vypočítá hrany (veličiny gradientu) v obraze. Vysoce frekventované přechody (silné okraje) se mohou objevit pouze na ostrých snímcích a jsou jasně viditelné jako čáry na okraji obrazu (viz obrázek 2.5a). Rozmazané obrázky neobsahují ostré hrany, a proto na obrázku nejsou téměř žádné viditelné čáry (viz obrázek 2.5b). K měření ostrosti snímků se používá vlastní definovaná metrika – „hustota hran“. Ta se vypočítá pomocí rovnice

$$Edge_{density} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=1}^{M=x} \sum_{y=1}^{N=y} E(x, y), \quad (2.1)$$

kde M je počet sloupců obrazu okraje, N je počet řádků obrazu okraje a $E(x, y)$ je gradient-magnituda pixelu na pozici (x, y) . Čím vyšší vyjde hodnota, tím více je ostrý obraz. Hustotu hran stačí vypočítat na základě malé plochy, např. 50×50 pixelů ve středu fotografie, aby se zkrátila doba výpočtu. Fotografie se pořídí pouze tehdy, když projde touto kontrolou a hustota hran překročí empiricky definovaný práh.



(a) Dobře zaostřený obrázek prstu



(b) Rozmazaný obrázek prstu

Obr. 2.5: Kvalita zachycení obrázku prstu. Převzato z [20].

Naopak v [7, 13] jsou oblasti otisků prstů rozděleny do bloků pro účely hodnocení kvality. Následně je na každý z bloků aplikován určitý algoritmus hodnocení kvality, buď k sloučení výsledků každého bloku do jednoho skóre, nebo k zohlednění pouze oblastí nad určitým prahem pro extrakci rysů. Tato metoda přináší výhodu oproti přístupu popsánému v [20] v tom, že dokáže rozpoznat, zda je zaostřena pouze část prstu a v takovém případě se převod neprovede.

2.2 Segmentace ruky a ROI

Termín segmentace se obecně používá k označení oddělení oblasti otisku prstu (popředí) od pozadí obrázku. Oddělení pozadí je užitečné pro to, aby se vyhnulo extrakci prvků v nepotřebných oblastech. Bez odstranění oblasti pozadí před extrakcí prvků může dojít k vytvoření falešných markantů. [1]

2.2.1 Segmentace ruky a prstů

Neomezené snímací systémy, které nemají navádění prstem založené na vyhrazeném hardwaru nebo navádění na obrazovce, vyžadují detekci prstů. Takový algoritmus detekuje polohu a orientaci prstu a tvoří základ pro automatický snímací systém.

Obraz je poté segmentován a oříznut na oblast obsahující otisk prstu. Lze rozlišit různé přístupy detekce, přičemž v praxi se často používají jejich kombinace. [13]

Segmentace na základě barvy

Pro segmentaci oblastí otisků prstů pomocí barevných informací porovnáváme každý pixel vstupního obrázku s rozložením barevného modelu otisku prstu v normalizovaném barevném prostoru. Nejčastěji se využívají prostory RGB, YCbCr nebo HSV. Zejména při použití určitého osvětlení je určení založené na kontrastu nebo barvě účinným mechanismem pro segmentaci prstů. Barva kůže dlaně (včetně prstů) je ovlivněna především absorpčním spektrem okysličeného hemoglobinu, což způsobuje podobnou míru odrazu na vizuálních vlnových délkách pro všechny prsty. Tuto charakteristiku lze aplikovat na všechny lidi pomocí normalizovaného rozložení barev odvozeného z ukázkových obrázků. [13, 16]

Segmentace na základě ostrosti

Přístupy založené na ostrosti využívají rozdíl mezi zaostřenou oblastí prstu a rozostřeným pozadím. Tento efekt je nejvhodnější na snímcích pořízených s velmi malou vzdáleností mezi prstem a snímačem a široce otevřenou clonou. Jednou z možností této detekce je metoda založená na Tenengradu, která je využita v technice automatického ostření. V metodě založené na Tenengradu s použitím Sobelova operátoru jsou vypočítány horizontální a vertikální gradienty obrázků a následně je stanoven určitý práh pro oddělení ostrého popředí od oblasti pozadí. [13, 16]

Segmentace pomocí prahování

Prahování obrazu je technika, která segmentuje obraz do dvou, nebo více oblastí na základě úrovně intenzity, což usnadňuje analýzu a extrakci požadovaných prvků. Tím, že nastavíme prahovou hodnotu, můžeme klasifikovat pixely s intenzitou nad, nebo pod touto hodnotou.

Při prahování se obraz převede na binární obraz ve stupních šedi a poté je každá hodnota pixelu klasifikována podle prahové hodnoty jako černá nebo bílá na základě úrovně intenzity nebo úrovně šedé. Tímto způsobem se snižuje obraz pouze na dvě úrovně intenzity, což usnadňuje identifikaci a izolaci objektů zájmu. [19]

Segmentace pomocí konvolučních neuronových sítí

Detekce ruky pomocí konvolučních neuronových sítí je moderní a velmi účinná metoda při zpracování signálů a obrazu. Má velmi široké spektrum využití, a proto se dá aplikovat i při detekci ruky z obrazu. Kromě toho jsou tyto sítě schopny adaptivně se učit různé rysy ruky a jsou schopny generalizovat své schopnosti na nové obrázky. [7]



(a) Původní obrázek



(b) Výsledný obrázek

Obr. 2.6: Segmentace pomocí prahování. Převzato z [19].

2.2.2 Segmentace ROI

Po identifikaci prstu je klíčové extrahovat oblast zájmu (ROI), což představuje špičku prstu. Tento proces zahrnuje normalizaci šířky, výšky a rozlišení, přičemž v některých případech, zejména ve více omezených nastaveních, probíhá detekce prstu a extrakce ROI současně.

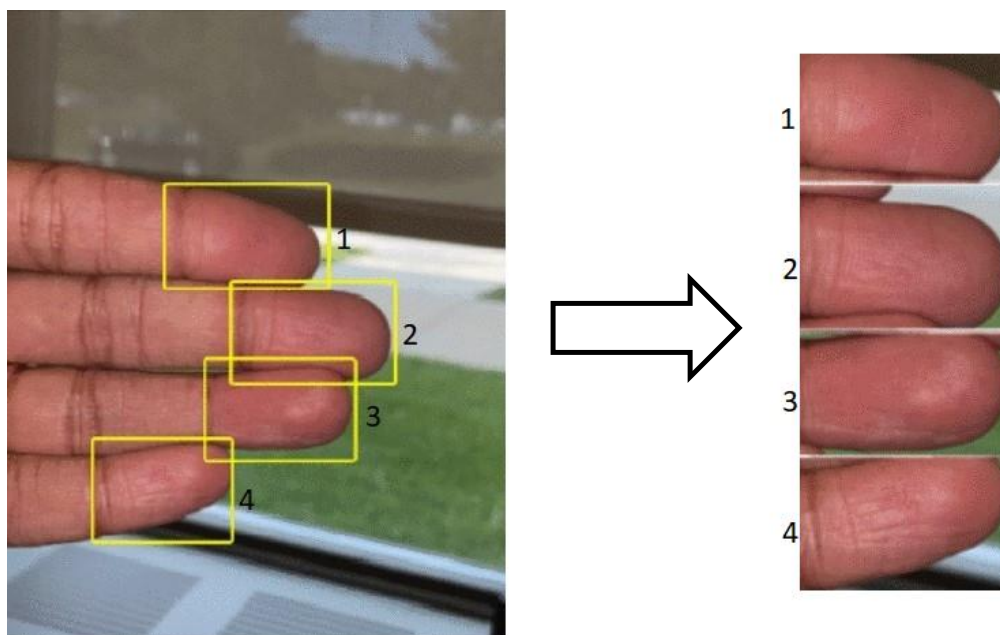
První přístup k segmentaci zahrnuje kombinaci segmentace na základě barvy s využitím Gaussovy funkce hustoty pravděpodobnosti, kde v ROI dochází k nárůstu této hustoty. Tato technika umožňuje efektivní oddělení špičky prstu od okolního prostředí na základě barevné informace.

Další metodou je extrakce ROI na základě geometrických vlastností prstu. U této metody je ROI staticky vypočítána pomocí detekce charakteristických bodů, jako je špička prstu, a nespojitosti. Zde vzniká problém v situacích, kdy jsou prsty vůči sobě natočené, což může způsobit chyby při vylepšení otisku prstu.

Mnoho srovnávacích algoritmů využívá jako referenční body hlavní nebo singulární bod, což umožňuje identifikaci špičky prstu a následnou segmentaci. Tyto body poskytují klíčové orientační body, které mohou být využity k přesnému vymezení špičky prstu. [13]

Některé studie také využívají orientaci hřebenové linie a zakřivení k detekci jádrového bodu. Tyto charakteristiky poskytují další informace o struktuře prstu, které mohou být důležité při segmentaci špičky. [13]

Další možnost extrakce ROI spočívá ve vyhledání rýhy, která odděluje články prstu a vzniká ohybem posledního článku prstu. Tato oblast je lokalizována a následně je provedena segmentace konce prstu [22]. Také je možná segmentace pomocí



Obr. 2.7: Ukázka segmentace konečků prstů. Převzato z [21].

natrénovaných neuronových sítí, což představuje moderní a velmi spolehlivý přístup k extrakci špičky prstu s využitím hlubokého učení.

2.3 Normalizace otisků prstů

Cílem normalizace je přetvořit barevný snímek prstu do podoby, jako by byl snímek sejmут dotykovým senzorem. V ideálním zobrazení prstu se linie hřebenu a údolí mění a mají pevnou orientaci. Hřebeny a údolí ze snímků prstů pořízených za vhodných podmínek lze snadno identifikovat a body markantů lze správně detekovat. [23] Při extrakci markantů je klíčové eliminovat šum z obrazu a provést jeho vylepšení. Například metoda CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*) je jedním z nejvýhodnějších přístupů pro mobilní snímky otisků prstů, protože je úspěšná při zvyšování ostrosti snímků s nízkým kontrastem a je v přesnosti lepší než adaptivní vyrovnání histogramu, protože překonává jeho problém nadbytečného zesílení šumu, který by vedl k nevhodným výsledkům [24].

CLAHE zachycuje a zlepšuje lokální hraniční informace, což má klíčový význam pro proces extrakce otisků prstů. Po převedení obrazu z formátu RGB na odstíny šedi je rozdělen na malé nepřekrývající se oblasti o stejné velikosti. Vyrovnání histogramu se následně aplikuje na každý blok samostatně. Tato metoda zvyšuje kontrast obrazu tím, že rozšiřuje rozsah intenzity na místech, kde se pixely shlukují. K omezení zvýšení kontrastu dochází omezením sklonu kumulativního distribučního

grafu, který závisí na sklonu transformační funkce. To v konečném důsledku snižuje hodnotu histogramu u této hodnoty pixelu. Oříznutím histogramu na předem definovanou hodnotu CLAHE omezuje sklon kumulativní distribuce, což minimalizuje nadbytečný šum ve výsledném obraze. [24] Normalizace otisku prstu pomocí metody CLAHE je znázorněno na obr. 2.8b.

Po rovnoměrném rozložení oříznutých pixelů do zbývajících bloků je využita metoda lineární interpolace k odstranění těchto oblastí. V oddělených blocích se průměrná hodnota pixelů, každý je vyrovnán hodnotou šedé, vypočítá pomocí rovnice 2.2:

$$N_{av} = \frac{(N_{Xp} \cdot N_{Yp})}{N_{gray}}, \quad (2.2)$$

kde N_{gray} je počet úrovní šedi v bloku, N_{Xp} je počet pixelů na ose x a N_{Yp} je počet pixelů na ose y. Tímto způsobem je zajištěno úplné odstranění hranic a dosažení optimálního výsledku. [23]

2.3.1 Metoda filtrace

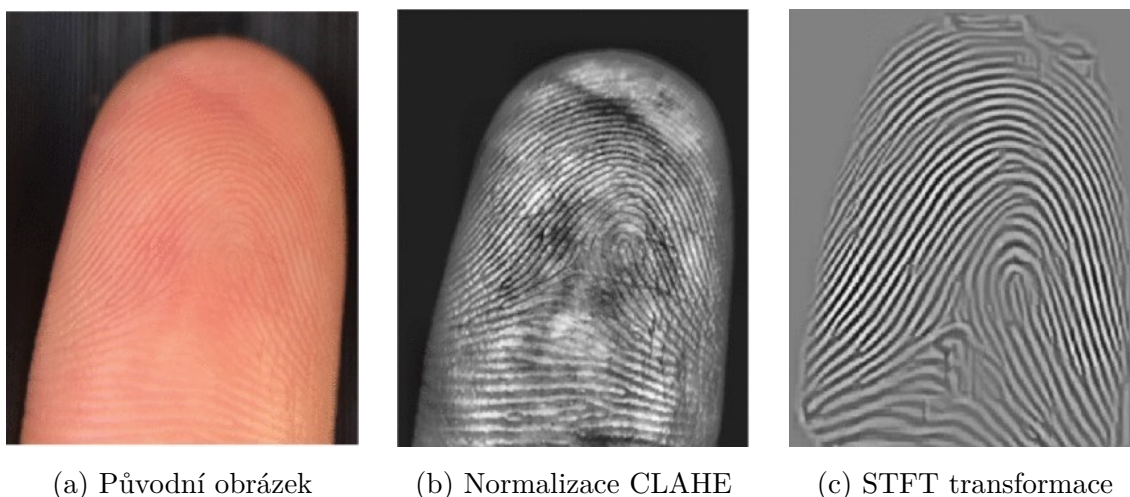
Otisk prstu obsahuje orientační a nestacionární prvky. Tyto struktury je nutné zlepšit tak, aby byla zachována kontinuita hřebenové linie. Pro dosažení tohoto cíle se využívá metoda filtrování, kterou lze aplikovat jak ve zpracování prostorových dat, tak ve frekvenční oblasti, a to v závislosti na orientaci a odhadu frekvence.

Filtrování ve zpracování prostorových dat přináší výpočetní složitost kvůli konvolucím, a proto je preferováno filtrování ve frekvenční oblasti. Pro tento účel je obraz transformován do frekvenční oblasti pomocí Fourierovy transformace a z této transformace jsou extrahovány klíčové vlastnosti, jako jsou orientace a informace o frekvenci. Tyto informace jsou následně využity pro aplikaci funkce filtrování ve frekvenční oblasti na samotný obraz.

Pro analýzu nestacionárních prvků se vyžaduje časová a frekvenční analýza. K tomu byla navržena krátkodobá Fourierova transformace (STFT – *Short-Term Fourier Transform*). Tento přístup umožňuje spolehlivější získání informací, jako jsou směr a frekvence, při analýze otisků prstů. Z tohoto důvodu je považováno za vhodné aplikovat STFT na získané obrazy otisků prstů. [23] Transformace pomocí STFT je znázorněna na obr. 2.8c.

2.4 Stanovení kvality výsledného otisku

Posouzení kvality hraje klíčovou roli v rámci systémů rozpoznávání otisků prstů, bez ohledu na to, zda se jedná o dotyková, či bezdotyková schémata. Rozlišujeme dva typy hodnocení kvality: kontrola kvality získaného snímku a hodnocení kvality



Obr. 2.8: Normalizace otisku prstu. Převzato z [23].

výsledného vzorku. Kontrola kvality získaného snímku je nezbytným předpokladem pro úspěšné provedení automatického rozpoznávacího procesu. Zajišťuje, že do dalších fází jsou předány pouze vzorky, které prošly předchozí kontrolou kvality ve fázi zpracování. Metody kontroly kvality získaného snímku byly podrobněji diskutovány v kapitole 2.1.5.

Obecně lze hodnotit kvalitu otisku prstu na globální úrovni (kde jedna hodnota kvality platí pro celý obrázek), nebo na lokální úrovni (kde je odhadnuta odlišná hodnota pro každý blok nebo pixel obrázku). Posuzování kvality podle lokálních úrovní je výhodnější, protože poskytují podrobnější informace, a globální kvalita může být vypočítána z těchto lokálních úrovní.

Nejpoužívanějším přístupem k odhadu kvality otisků prstů je NFIQ (*NIST Fingerprint Image Quality*). První verze NFIQ 1 byla představena v roce 2004, o deset let později byla představena druhá verze, známá jako NFIQ 2 (v roce 2014). NFIQ definuje kvalitu jako predikci schopnosti shody: kvalitní otisky prstů pravděpodobně získají vysoké skóre shody. Výhodou této metody je, že nepotřebuje referenční pravdu od lidského odborníka, což eliminuje potřebu subjektivního hodnocení. To je zvláště výhodné, pokud se zaměřujeme na automatizované porovnávací algoritmy a minimalizujeme lidský subjektivismus. NFIQ 1 a NFIQ 2 jsou koncipovány pro otisky prstů s rozlišením 500 dpi. [3]

2.4.1 NFIQ 2

Při vývoji NFIQ 2 byly klíčové požadavky zaměřeny na dosažení lepší účinnosti, detailnější struktury (s využitím 101 kvalitních zásobníků namísto původních 5) a modulární design otisků prstů v porovnání s jeho předchůdcem, NFIQ 1. V prvním

kroku byl proveden důkladný průzkum literatury s cílem vybrat z původního počtu 155 kandidátských vlastností. Nakonec bylo vybráno 14 vlastností na základě jejich prediktivní schopnosti, výpočetní doby a korelace (viz tabulka 2.1). [3]

Tab. 2.1: Vlastnosti, podle kterých se posuzuje kvalita u NFIQ 2. Zdroj [3].

Číslo	Typ	Vlastnost
1	lokální	Analýza ve frekvenčním pásmu
2	lokální	Lokální zřetelnost linií
3	lokální	Úroveň jistoty orientace
4	lokální	Tok orientace
5	lokální	Jednotnost papilárních linií
6	globální	Průměrná úroveň šedi
7	globální	Průměr průměrné úrovně šedi bloků
8	globální	Počet markantů
9	globální	Počet markantů v centrální oblasti
10	globální	Průměrný stupeň kvality markantů (na základě úrovně šedi)
11	globální	Průměrný stupeň kvality markantů (na základě koherence)
12	globální	Průměr plochy ROI
13	globální	Součet koherence orientační mapy ROI
14	globální	Součet relativní koherence orientační mapy ROI

NFIQ 2 využívá open-source extraktor markantů FingerJet FX OSE. Software čte nezpracovaný nebo WSQ komprimovaný obrázek otisku prstu, vypočítá sadu vlastností kvality a použije je k předpovídání užitečnosti obrázku. NFIQ 2 generuje skóre kvality v souladu s mezinárodní normou ISO/IEC 29794-1 a hodnotí je na stupnici od 0 do 100, kde 0 značí žádnou užitečnou hodnotu a 100 nejvyšší užitečnou hodnotu. [25]

Při vývoji byla také navržena zjednodušená verze, která využívá přístup Bag-of-Words a je optimalizována pro efektivní provoz na zařízeních s omezenými výpočetními zdroji. Trénovací sada bloků (např. 24×24 pixelů), extrahovaných z otisků prstů, je seskupena podle prostorové podobnosti a vytváří tak číselník nebo vizuální slovník. Autoři použili samoorganizující se mapu SOM (*Self-Organizing Map*) místo klasického přístupu K-means, přičemž topologické uspořádání SOM urychluje proces hledání nejlepší shodné jednotky během on-line fáze. Kódový seznam je následně využíván k extrakci příznakových vektorů pevné velikosti z obrazu otisku prstu. Tyto vektory jsou mapovány do přihrádek kvality pomocí náhodného lesa klasifikátoru. [3]

2.4.2 Innovatrics algoritmus

Innovatrics je mezinárodní společnost se sídlem na Slovensku, která se specializuje na vývoj a poskytování biometrických technologií a řešení. Byla založena v roce 2004 a od té doby se stala jedním z předních poskytovatelů biometrických řešení, specializujícím se na vývoj pokročilých technologií rozpoznávání otisků prstů, obličejů a duhovky.

Jedním z produktů, které Innovatrics nabízí, je IDKit SDK. Tento software poskytuje vývojářům nástroje a knihovny pro integraci pokročilých biometrických funkcí do jejich aplikací. Jedním z algoritmů této knihovny je algoritmus na hodnocení kvality otisků prstů.

Knihovna IDKit přijímá jako vstup biometrické vzorky uložené v různých obrazových formátech. Pro obrázky otisků prstů podporuje formáty BMP, PNG, JPG, JPEG2K, GIF, TIFF a WSQ.

Kvalita otisku prstu je vyjádřena hodnotou mezi 0 (nejnižší kvalita) a 100 (nejvyšší kvalita). Je spojená s celkovým počtem rozlišovacích rysů nalezených ve snímku otisku prstu.

Vyšší kvalita otisku prstu obvykle vede k lepším výsledkům identifikace. Obecně platí, že otisky prstů s kvalitou nad 40 jsou dostatečné pro spolehlivé porovnání. [26, 27]

3 Realizace

3.1 Knihovny pro úpravy obrazu

Volba OpenCV pro realizaci byla motivována několika faktory. OpenCV je univerzální knihovnou v oblasti zpracování obrazu díky své široké funkcionalitě, efektivní implementaci a podpoře pro různé programovací jazyky. Velkou výhodou OpenCV je také to, že má dostupnou detailní dokumentaci a je k dispozici velké množství příkladů použití této knihovny.

Aktivní komunita se neustále stará o pravidelné aktualizace a vylepšování knihovny a s tím přiložené dokumentace, a proto je tato knihovna kompatibilní s většinou nejnovějších technologií. Další předností knihovny je její výkon a rychlost i na zařízeních s menším výpočetním výkonem. [28]

Alternativy, jako je Scikit-image, jsou zaměřeny na jednoduchost a integraci se Scikit-learn pro strojové učení, což je vhodné pro jednodušší úlohy. Scikit-Image je částečně napsán v Cythonu, což je programovací jazyk, který je nadmnožinou Pythonu. Scikit-Image, který používá pole NumPy jako obrazové objekty, nabízí mnoho různých algoritmů pro segmentaci a manipulaci s barevným prostorem, geometrickou transformaci, detekci rysů a mnoho dalšího. Nevýhodou knihovny je omezenější funkcionalita a méně obsáhlá dokumentace než je tomu u OpenCV.

Mahotas klade důraz na výkon a efektivitu, je vhodný pro práci s velkými daty a nabízí některé pokročilé techniky počítačového vidění. Umožňuje využívat funkce, jako jsou místní binární vzory a haralick. Dokáže vypočítat 2D a 3D obrázky prostřednictvím jednoho ze svých modulů a odtud extrahuje informace pro provádění pokročilého zpracování obrázků. Má mnoho oblíbených funkcí, jako jsou výpočty konvexních bodů, morfologické zpracování a porovnávání šablon. Má však méně uživatelsky přívětivé rozhraní a menší komunitu, takže nepodléhá pravidelným aktualizacím. [29, 30]

3.1.1 OpenCV

OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) je knihovna určená pro počítačové vidění a zpracování obrazu. Původně byla vytvořena pro jazyk C++, ale v dnešní době podporuje i Python, Javu a další jazyky. OpenCV představuje širokou škálu funkcí pro analýzu obrazu a videa od základních operací, jako jsou filtry a detekce hran, až po pokročilé techniky, jako jsou sledování objektů a rozpoznávání obličejů. Díky své otevřené licenci a aktivní komunitě vývojářů se jedná o jednu z nejpopulárnějších knihoven pro práci s obrazem, a proto je využívána od průmyslu až po vědecký výzkum. [28, 31]

3.2 Výběr programovacího jazyka

Pro implementaci algoritmu byl vybrán programovací jazyk C++. Při rozhodování o volbě programovacího jazyka bylo zvažováno více možností. Jedním z hlavních kritérií byla kompatibilita s knihovnou OpenCV, která je v této práci použita. V nabídce kromě C++ byl také Python. Python je rovněž kompatibilní s OpenCV, má jednoduchou syntaxi a čitelnost. Má také rozsáhlou komunitu a podporu, existuje velké množství příkladů použití tohoto jazyka a kvalitní dokumentace. Avšak nakonec byl zvolen jazyk C++. Hlavním důvodem byla vyšší efektivita, výkon a přímý přístup k funkcím. [32]

3.2.1 C++

C++ je vysokoúrovňový programovací jazyk s vysokou úrovní kontroly. Byl vyvinut jako rozšíření jazyka C a nabízí výhody jako je vysoký výkon a široká škála použití od systémového programování po vývoj aplikací s grafickým uživatelským rozhraním. Podporuje objektově orientované programování, umožňuje efektivní využití systémových prostředků a paměti, což vede k vynikajícímu výkonu a efektivitě aplikací. C++ podporuje různé programátorské koncepty, včetně tříd, dědičnosti, polymorfismu, šablon a výjimek. [32, 33]

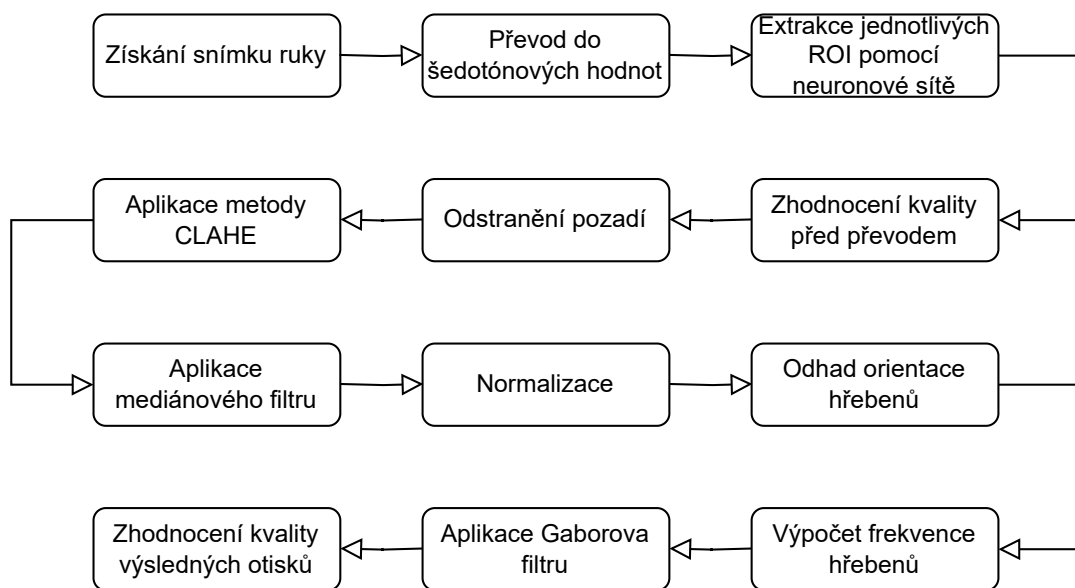
3.3 Implementace

Tato část se zabývá implementací navržených postupů pro zpracování otisků prstů získaných pomocí mobilního zařízení. Algoritmus postupuje podle schématu znázorněného na obr. 3.1.

Nejdříve je popsán proces získávání snímku ruky, který slouží jako vstup pro algoritmus. Poté je detailněji rozebrána extrakce jednotlivých oblastí zájmu (ROI) pomocí neuronové sítě. Následně je vyhodnocena kvalita vysegmentovaných konečků pomocí algoritmu NFIQ 2 a Innovatrics. Dále jsou aplikovány filtry na předzpracování obrazu, jako je mediánový filtr a metoda CLAHE. Následuje fáze normalizace a odhadu orientace otisků prstů a výpočtu frekvence hřebenů. Poté je aplikován Gaborův filtr pro zvýraznění papilárních linií. Nakonec je vyhodnocena kvalita výsledných otisků.

3.3.1 Získání snímku ruky

Snímky ruky byly získávány pomocí fotoaparátu mobilního telefonu Samsung Galaxy A33 v režimu PRO, kde je možné ručně nastavit parametry fotoaparátu. Tento režim umožňuje uživatelům upravit nastavení jako je čas expozice, citlivost ISO,



Obr. 3.1: Algoritmus zpracování otisků prstu.

nebo vyvážení bílé pro co nejkvalitnější výsledky. Kromě toho bylo použito manuální ostření.

Během pořizování snímků bylo hlavním cílem zachytit co nejlepší detaily otisků prstů. Při čelním pohledu na dlaň je palec v nevhodné pozici pro snímání, protože u něj není vidět jádro. Proto byly snímány pouze ostatní 4 prsty. Problém nastává v tom, že fotoaparát mobilního telefonu má potíže se zaostřením všech 4 prstů najednou. V důsledku toho jsou na některých fotografiích některé prsty rozmazané, což má negativní dopad na proces vylepšení. Vylepšené otisky pak nedosahují takové kvality, jako kdyby byly dobře zaostřené.

Při snímání se prováděly opakované testy za různých světelných podmínek a s různými nastaveními parametrů mobilního fotoaparátu. Pořízené snímky mají velikost 3000×4000 pixelů. Po nasnímání vzorků s různým nastavením parametrů a za různých světelných podmínek se dospělo k závěru, že optimální výsledky jsou dosaženy při následujícím nastavení:

- čas expozice: $1/125$ s,
- citlivost ISO: 50.

Byla také použita externí svítidla EMOS COB LED P4536, která byla nastavena na světelný tok 1000 lm.

Čas expozice je doba, po kterou je snímač osvětlen světlem. Delší expozice znamená, že snímač bude osvětlen déle, což způsobí vznik světlejší fotografie. Kratší expozice zase minimalizuje rozmazání obrazu, avšak vzniklá fotografie bude tmavší.

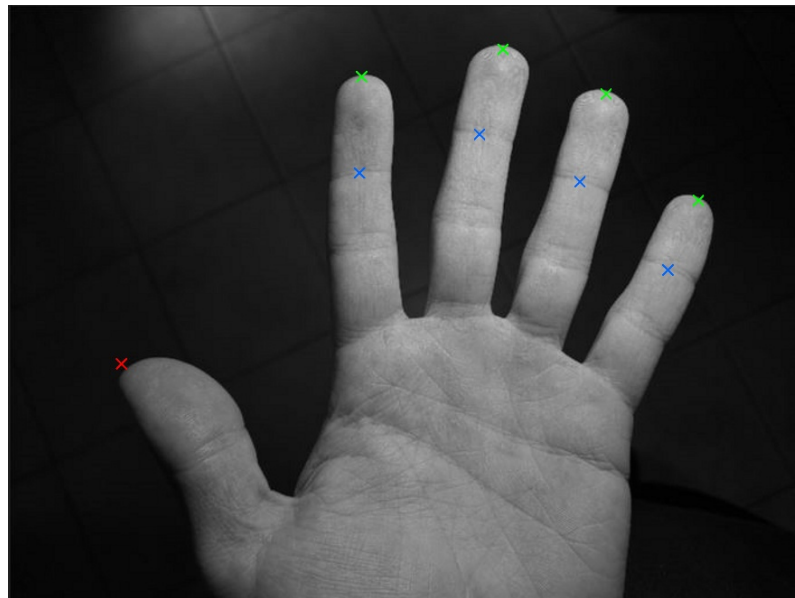
Citlivost ISO indikuje, jak citlivý je snímač na světlo. Vyšší citlivost ISO umož-

ňuje fotografování v nízkých světelných podmínkách, ale může způsobit zvýšený šum a snížení kvality obrazu. Nižší citlivost ISO snižuje šum, ale vyžaduje více světla pro dostatečnou expozici.

Světelný tok ovlivňuje celkovou jasnost snímku. Při vyšší hodnotě osvětlení jsou detaily lépe viditelné a snímek má obvykle vyšší kontrast. Naopak při nedostatečném osvětlení mohou být snímky tmavé a s větším množstvím šumu. [34]

3.3.2 Extrakce jednotlivých ROI pomocí neuronové sítě

V práci byla použita neuronová síť, která byla vytvořena s využitím zdroje [35] a dále dotrénována společností TBS na vlastních datech. Poskytnutá neuronová síť načte vstupní obrázek v šedotónových hodnotách a detekuje poslední články prstu. Označí vždy koneček a začátek poslední článku (kloubu) prstu. U palce označí pouze koneček. Výstup neupravené neuronové sítě je na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Výstup původní neuronové sítě.

Výsledkem detekce neuronové sítě jsou 4 body označené zelenými křížky jako *finger* (prst), 4 body označené modrými křížky jako *joint* (kloub) a 1 červený křížek jako *thumb* (palec). Aby bylo možné jednotlivé oblasti zájmu také extrahovat, došlo k upravení výsledku neuronové sítě. Jednotlivé body prstů a palců jsou předány jako body se souřadnicemi v pixelech v obrázku.

Nejdříve je potřeba určit, které body prstů a kloubů označují stejný prst. To se provede tak, že se vypočítají jednotlivé vzdálenosti mezi konečky prstů a klouby a určí se 4 páry nejbližších bodů. Vzdálenost d mezi bodem prstu f a bodem kloubu

j se určí, jako:

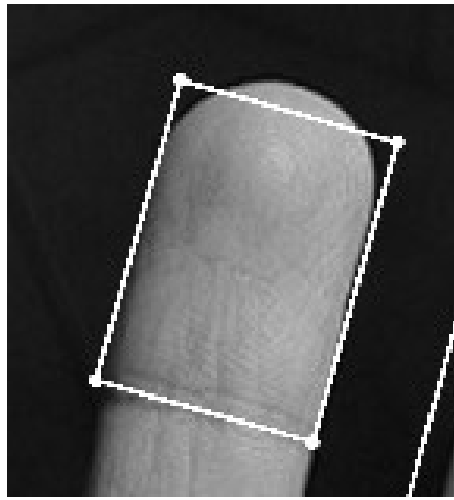
$$d = \sqrt{(j_x - f_x)^2 + (j_y - f_y)^2}. \quad (3.1)$$

Tímto jsou určeny 4 páry nejbližších bodů konečků a kloubů.

Dále dochází k přepočtu bodu označujícího koneček prstu, aby se vyextrahoval celý poslední článek prstu a nedocházelo k chybám extrakce, jako je na obr. 3.3. Nové souřadnice bodu konečku prstu f' se určí pomocí původního konečku f a kloubu j :

$$f' = \left[f_x - j \cdot \frac{j_x - f_x}{\sqrt{(j_x - f_x)^2 + (j_y - f_y)^2}}; f_y - j \cdot \frac{j_y - f_y}{\sqrt{(j_x - f_x)^2 + (j_y - f_y)^2}} \right], \quad (3.2)$$

kde j označuje vzdálenost v pixelech, o kolik se má nový bod f' vzdálit od původního konečku f ve směru od kloubu j .



Obr. 3.3: Chyba extrakce.

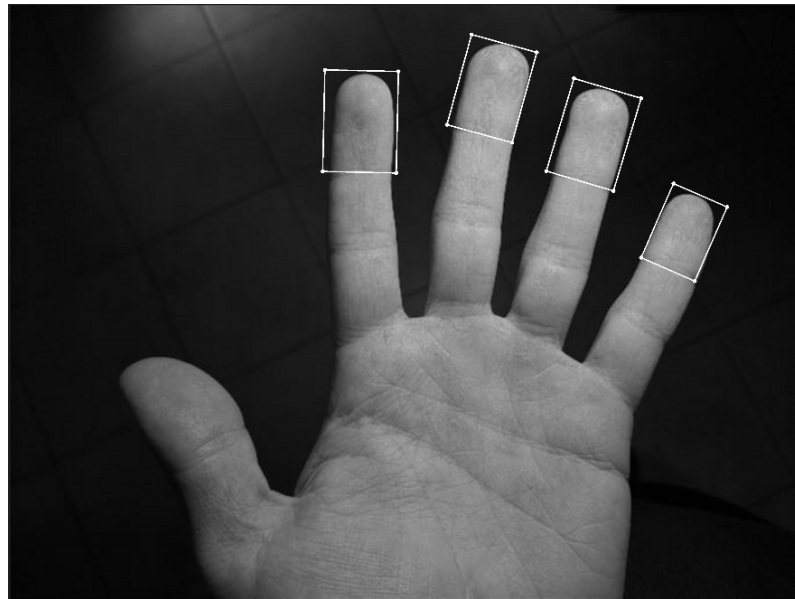
Poté dochází k výpočtu souřadnic rohových bodů obdélníka $ABCD$, který udává extrahovanou oblast. Souřadnice jednotlivých bodů obdélníka se dopočítají z bodu konečku prstu f' a z bodu kloubu j . Nejdříve je získán vektor \mathbf{v} , který se poté přičte nebo odečte od bodů f' , resp. j . Vektor \mathbf{v} se určí jako:

$$\mathbf{v} = \left(\frac{-f'_y + j_y}{2 \cdot p}; \frac{f'_x - j_x}{2 \cdot p} \right), \quad (3.3)$$

kde p udává kolikrát bude strana AB menší než BC (pro $p = 1$, vznikne čtverec). Jednotlivé body A, B, C, D se určí podle:

$$\begin{aligned} A &= [f'_x - \mathbf{v}_x; f'_y - \mathbf{v}_y], \\ B &= [f'_x + \mathbf{v}_x; f'_y + \mathbf{v}_y], \\ C &= [j_x + \mathbf{v}_x; j_y + \mathbf{v}_y], \\ D &= [j_x - \mathbf{v}_x; j_y - \mathbf{v}_y]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Upravený výstup je na obr. 3.4, kde v obdélnících jsou oblasti zájmu (ROI), které se vysegmentují.



Obr. 3.4: Upravený výstup neuronové sítě.

3.3.3 Zhodnocení kvality před převodem

Každý extrahovaný otisk prstu pomocí neuronové sítě je před použitím algoritmu na vylepšení hodnocen z hlediska kvality, aby se mohla srovnat kvalita před a po převodu. Kvalita je posuzována pomocí dvou algoritmů.

Prvním z nich je algoritmus NFIQ 2, který přijímá obrázky s 8bitovou hloubkou a vstupní obrázek může mít maximální šířku 800 px a maximální výšku 600 px. Vyhodnocuje kvalitu a přiděluje jí hodnocení v rozsahu od 0 do 100, kde 0 označuje nejhorší a 100 nejlepší kvalitu.

Druhým algoritmem pro hodnocení kvality je algoritmus od společnosti Innovatrics, součástí IDKitu SDK. Tento algoritmus neomezuje velikost vstupních obrázků, ale automaticky je převádí na vhodnou velikost. Stejně jako NFIQ 2 i tento algoritmus hodnotí kvalitu číslem v rozmezí od 0 do 100, kde 0 značí nejnižší a 100 nejvyšší kvalitu.

Například prst na obr. 3.5a byl ohodnocen kvalitou 41 podle NFIQ 2 a 76 pomocí algoritmu od Innovatrics.

3.3.4 Odstranění pozadí

Ze získaných snímků je odstraněno pozadí (je změněno na černou barvu), aby obrázek neobsahoval rušivé elementy, ze kterých by poté mohly vzniknout falešné mar-

kanty. K tomuto se používá metoda segmentace na základě barvy (viz kap. 2.2.1).

Prochází se každý pixel obrázku a porovnává jeho hodnoty s danou referenční hodnotou. Experimentováním byla určena hodnota v RGB [50, 50, 50]. Pokud jsou hodnoty pixelu menší nebo rovny této referenční hodnotě, jsou hodnoty pixelu nastaveny na [0, 0, 0], což v barevném prostoru RGB odpovídá černé barvě.



(a) Původní obrázek



(b) Odstraněné pozadí

Obr. 3.5: Odstranění pozadí. Původní obrázek převzat z [7].

3.3.5 Aplikace metody CLAHE

Metoda CLAHE adaptivně aplikuje histogramové vyrovnání na malé regiony obrázku. Tímto způsobem umožňuje zachování lokálního kontrastu a detailů, což je důležité pro zlepšení kvality obrazu. CLAHE omezuje kontrast s cílem zabránit přílišnému zvýraznění šumu nebo nerovnoměrného osvětlení. [36] Více informací o této metodě v kapitole 2.3.

Výpis 3.1: Aplikace CLAHE

```
Ptr<CLAHE> clahe = createCLAHE();  
clahe->setClipLimit(clipLimit);  
clahe->setTilesGridSize(Size(gridSize, gridSize));  
clahe->apply(image, equalized_image);
```

Prvním krokem je inicializace CLAHE objektu pomocí funkce *createCLAHE()*. Tímto se vytvoří instance CLAHE objektu, který bude použit pro vyrovnání histogramu.

Následuje nastavení parametru *clipLimit*. Tento parametr určuje maximální kontrast, který je povolen při vyrovnávání histogramu v každé malé oblasti (dlaždici) obrázku. Tím se omezuje dynamický rozsah intenzit v obraze, což pomáhá kontrolovat případné extrémní hodnoty.

Dalším krokem je nastavení velikosti dlaždic (*gridSize*), na které bude CLAHE aplikováno. Tato velikost určuje, jak velká oblast bude použita pro adaptivní vyrovnání histogramu. Větší dlaždice umožní zachování větších detailů, zatímco menší dlaždice mohou být vhodné pro zvýraznění místních kontrastů.

Nakonec je CLAHE aplikováno na vstupní obrázek pomocí funkce *apply()*, která adaptivně vyrovnává histogram každé dlaždice. Tímto postupem se zlepšuje kontrast a jas v obraze, přičemž se zachovávají lokální detaily a struktury. [28]

Na obr. 3.6 je ukázka aplikace metody CLAHE s parametry *clipLimit* = 12 a *gridSize* = 32.



(a) Obrázek s odstraněným pozadím



(b) Aplikace metody CLAHE

Obr. 3.6: Aplikace metody CLAHE.

3.3.6 Aplikace mediánového filtru

Mediánový filtr je metoda, která redukuje šum v obraze a zlepšuje jeho kvalitu. Princip spočívá v tom, že pro každý pixel v obraze se vezme hodnota okolních pixelů a tyto hodnoty se seřadí do vzestupného pořadí. Poté se jako nová hodnota pro daný pixel použije medián, což je hodnota nacházející se uprostřed seřazeného seznamu. Tento postup je opakován pro každý pixel v obraze. [37]

Výpis 3.2: Aplikace mediánového filtru

```
cv::medianBlur(inputImage, outputImage, kernelSize);
```

Metoda `cv::medianBlur` je součástí knihovny OpenCV. Při použití této funkce jsou definovány tři parametry. Prvním z nich je vstupní obrázek (`inputImage`), na který se má aplikovat mediánové rozmazání. Druhým parametrem je výstupní obrázek (`outputImage`), který slouží k uložení výsledku mediánového rozmazání. Posledním parametrem je velikost jádra (`kernelSize`), která určuje rozsah okolních pixelů, z nichž se určuje medián. Aby bylo možné vždy jednoznačně nalézt medián, parametr `kernelSize` musí být vždy liché číslo.

Na obr. 3.7 je obrázek před a po aplikaci mediánového filtru, kde byla použita hodnota parametru `kernelSize = 3`.



(a) Výstup metody CLAHE



(b) Aplikace mediánového filtru

Obr. 3.7: Aplikace mediánového filtru.

3.3.7 Normalizace

Normalizace obrázků má za cíl zajistit konzistenci a standardizaci hodnot pixelů v obrázku. Tento proces zahrnuje několik kroků. Jedním z nich je výpočet statistických charakteristik obrázku, jako je průměr a standardní odchylka. Dále dochází k transformaci hodnot pixelů tak, aby odpovídaly požadovaným vlastnostem. Normalizace pomáhá zdůraznit rozdíly mezi hřebeny a údolími, jak je znázorněno na obr. 3.8.

V práci je normalizace aplikována na obrázky pomocí funkce 3.3.

Výpis 3.3: Funkce provádějící normalizaci

```
normalize_image(inputImage, reqMean, reqVar),
```

která má jako parametry vstupní obrázek (*inputImage*), požadovaný průměr (*reqMean*) a požadovaný rozptyl (*reqVar*). Požadovaný průměr určuje hodnotu, kterou má mít průměr intenzit pixelů v normalizovaném obrázku. Požadovaný rozptyl udává míru variability hodnot pixelů v normalizovaném obrázku.



(a) Výstup mediánového filtru



(b) Normalizace obrázku

Obr. 3.8: Normalizace obrázku.

3.3.8 Odhad orientace a výpočet frekvence hřebenů

Funkce *orient_ridge* zajišťuje odhad orientace hřebenů v otiscích prstů pomocí Gaborových filtrů a konvoluce gradientů obrazu. Nejprve se provádí výpočet gradientů obrazu a aplikace Gaborových filtrů, což je provedeno pomocí konstrukce Gaussových jader a jejich následné konvoluce s obrazem. Tento proces generuje gradienty obrazu ve směru x a y .

Poté se provádí výpočet sinusového a kosinového směru pro odhad hlavního směru orientace hřebenů. Tento odhad je založen na vztazích mezi gradienty obrazu.

Dále je aplikována metoda na výpočet místní frekvence hřebenů, což je realizováno pomocí průměrného počtu pixelů mezi dvěma po sobě jdoucími vrcholy v místním okně k orientaci místního hřebene. [38]

3.3.9 Aplikace Gaborova filtru

Funkce *filter_ridge* aplikuje Gaborův filtr pro zlepšení kvality otisků prstů. Využívá předem získanou orientaci a frekvenci hřebenů. Proces začíná vytvořením banky Gaborových filtrů pro různé orientace, které jsou následně aplikovány na vstupní obraz otisku prstu.

Využitím konfigurace rovnoběžných hřebenů a údolí s přesně definovanou frekvencí a orientací je dosaženo efektivního odstranění nežádoucího šumu z obrazu otisku prstu. Tato konfigurace poskytuje důležité informace, které umožňují vytvořit pásmovou propust, která je laděna na odpovídající frekvenci a orientaci. Tímto způsobem dochází k efektivnímu zvýraznění hřebenových struktur v obrazech otisků prstů a současně je minimalizována úroveň šumu. [39]



(a) Původní obrázek



(b) Výsledný vylepšený obrázek

Obr. 3.9: Výsledný vylepšený obrázek.

3.3.10 Zhodnocení kvality výsledných otisků

Po procesu vylepšení jsou výsledné otisky prstů posuzovány z hlediska kvality pomocí stejných algoritmů jako v kapitole 3.3.3.

Například výsledný převedený otisk na obr. 3.9b byl ohodnocen kvalitou 60 podle NFIQ 2 a 73 pomocí algoritmu od Innovatrics. Dosáhlo se tedy vylepšení kvality o 19 (z původních 41 na 60) podle NFIQ 2 a podle algoritmu Innovatrics došlo ke zlepšení kvality o -3 (z původních 76 na 73), což znamená, že podle Innovatrics došlo ke zhoršení kvality.

4 Zhodnocení dosažených výsledků

Celkem bylo vyfoceno 26 rukou. U každé ruky se použily 4 prsty, celkem tedy bylo získáno 104 otisků prstů, na které se aplikoval algoritmus vylepšení.

4.1 Vyhodnocení kvality podle NFIQ 2

V tabulce 4.1 jsou dosažené výsledky zhodnoceny pomocí algoritmu NFIQ 2. U každé ruky (označené jako inX) byly vysegmentovány 4 prsty (označené jako ROI_X). U těchto vysegmentovaných prstů byla zhodnocena kvalita a následně na ně byl aplikován algoritmus vylepšení. U výsledných šedotónových otisků (označených jako $outX$) byla rovněž zhodnocena kvalita.

Vynechaná místa v tabulce jsou prsty, u kterých došlo k chybě při posuzování kvality a při kterých algoritmus NFIQ 2 nedokázal vyhodnotit kvalitu. Algoritmus vracel návratový kód chyby, která signalizovala, že plocha otisku prstu je příliš malá.

Dále je v tabulce uvedeno u každé ruky průměrné vylepšení (označené jako prům. vylepšení), které udává, o kolik bodů se průměrně vylepšil každý vysegmentovaný prst.

Průměrná hodnota kvality původních neupravených otisků byla 41,56. Po aplikaci algoritmu na vylepšení dosáhly otisky průměrné kvality 53,53. Celkové průměrné vylepšení podle NFIQ 2 tedy vyšlo 11,97, což znamená, že každý prst se průměrně vylepšil o 11,97 jednotek.

4.2 Vyhodnocení kvality podle Innovatrics

V tabulce 4.2 jsou dosažené výsledky zhodnoceny pomocí algoritmu Innovatrics. Značení buněk v tabulce je stejné jako v 4.1.

Průměrná hodnota kvality původních neupravených otisků byla 58,15. Po aplikaci algoritmu na vylepšení dosáhly otisky průměrné kvality 56,95. Celkové průměrné vylepšení podle Innovatrics vyšlo $-1,20$. Z toho vyplývá, že vysegmentované prsty bez použití algoritmu jsou ohodnoceny vyšší kvalitou než ty, které byly upraveny pomocí algoritmu. Algoritmus Innovatrics je schopen rozpoznat více rozlišovacích prvků na snímcích prstů než na převedených otiscích.

Dostatečná kvalita pro porovnávání, jak je uvedeno v kapitole 2.4.2, je 40. Průměrné skóre kvality vylepšených otisků je 56,95 jednotek, což by měla být stále dostatečná hodnota pro spolehlivé porovnávání.

Tab. 4.1: Zhodnocení výsledků pomocí NFIQ 2.

in	ROI0	ROI1	ROI2	ROI3	out0	out1	out2	out3	prům. vylepšení
1	40	–	40	29	51	44	51	46	11,67
2	36	33	–	43	61	52	39	58	15,17
3	50	41	48	46	58	57	57	46	8,25
4	–	50	41	56	57	62	43	64	7,5
5	17	60	40	42	61	53	58	51	16
6	–	52	32	51	41	66	45	61	8,25
7	45	48	–	19	53	54	56	57	17,67
8	43	32	37	41	52	53	60	58	17,5
9	–	–	–	–	42	35	48	44	–
10	32	45	–	51	57	59	40	54	9,83
11	42	50	39	42	49	57	59	48	10
12	–	34	35	–	55	59	54	45	18,75
13	22	28	38	42	41	55	51	43	15
14	–	40	38	35	46	45	43	43	6,58
15	–	24	32	49	30	55	51	61	14,25
16	53	46	29	59	57	59	53	58	10
17	50	39	51	53	57	55	58	71	12
18	47	53	43	62	63	64	61	53	9
19	39	54	20	58	61	50	60	50	12,5
20	–	42	36	32	53	52	55	50	15,83
21	45	–	38	40	54	43	42	52	6,75
22	46	34	–	34	59	51	47	65	17,5
23	39	53	54	23	50	51	51	45	7
24	38	45	47	36	52	73	47	55	15,25
25	48	45	47	–	57	52	49	49	5,08
26	–	–	–	–	47	48	48	47	–
celkové průměrné vylepšení podle NFIQ 2:									11,97

Tab. 4.2: Zhodnocení výsledků pomocí Innovatrics.

in	ROI0	ROI1	ROI2	ROI3	out0	out1	out2	out3	prům. vylepšení
1	50	50	42	44	52	49	56	48	4,75
2	51	42	42	47	53	53	50	51	6,25
3	65	60	70	60	59	63	63	60	-2,5
4	51	63	59	75	58	65	56	70	0,25
5	56	59	51	54	55	56	59	60	2,5
6	61	60	58	56	49	57	57	56	-4
7	62	56	50	52	66	62	58	50	4
8	57	68	65	65	56	58	52	64	-6,25
9	60	54	66	58	64	59	70	66	5,25
10	63	62	59	60	63	66	48	66	-0,25
11	50	64	48	50	54	68	59	54	5,75
12	55	48	50	46	66	54	49	45	3,75
13	49	52	66	61	54	55	59	58	-0,5
14	55	72	68	71	55	50	55	56	-12,5
15	51	66	62	73	41	57	55	60	-9,75
16	66	64	57	81	58	60	57	58	-8,75
17	57	60	64	64	54	58	59	68	-1,5
18	73	77	70	71	67	72	70	64	-4,5
19	63	74	61	72	72	60	61	64	-3,25
20	39	33	35	34	48	55	52	48	15,5
21	45	62	45	37	50	44	49	51	1,25
22	57	56	54	57	49	53	48	63	-2,75
23	61	60	63	38	55	52	54	56	-1,25
24	72	66	76	58	51	51	60	56	-13,5
25	67	68	78	58	53	57	63	52	-11,5
26	53	43	65	54	55	58	55	56	2,25
celkové průměrné vylepšení podle Innovatrics:									-1,20

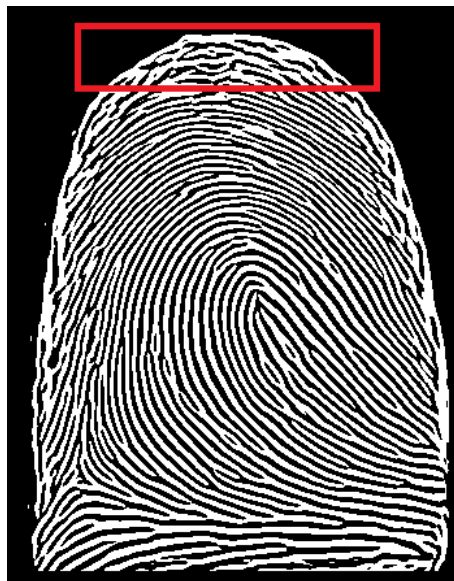
4.3 Možná vylepšení algoritmu

Nekontrolované podmínky

Jednou z možností vylepšení je rozšíření algoritmu pro snímání prstů tak, aby fungoval spolehlivě i v nekontrolovaných podmínkách. V této práci byly všechny snímky rukou snímány v tmavém prostředí za použití externího světla a segmentace prstů byla provedena pomocí barevné segmentace. Pro zvýšení univerzálnosti algoritmu, umožňujícího snímání prstů v jakémkoli prostředí a za jakýchkoli podmínek, by bylo nutné zvolit jinou metodu segmentace než barevnou, například metodu prahování, nebo jinou techniku.

Falešné markanty

V rozmazaných místech obrázku, nejčastěji se jedná o okraje prstu, kde není jasně vidět kontrast mezi papilárními liniemi, algoritmus může chybně zpracovat obrázek a vytvořit falešné markanty, jak je znázorněno na obr. 4.1. V těchto případech, kdy algoritmus nedokáže spolehlivě odhadnout tok papilárních linií, by bylo lepší, aby tam zůstalo prázdné místo nebo byl zvolen jiný vhodný přístup pro danou oblast.



Obr. 4.1: Falešné markanty.

Závěr

Biometrická identifikace prostřednictvím otisků prstů je v dnešní době běžně využívána pro zabezpečení zařízení a autentizaci uživatelů. Přestože dotykové snímače stále dominují, bezdotykové systémy, zvláště během pandemie COVID-19, získaly na popularitě díky minimalizaci rizika přenosu nákazy prostřednictvím dotyku.

V rámci této bakalářské práce byla provedena studie literatury zaměřená na problematiku bezdotykového zpracování a rozpoznávání otisků prstů. Na základě této analýzy byl navržen algoritmický postup pro obrazovou transformaci otisků prstů nasnímaných mobilním zařízením do standardizovaného formátu.

Navržený algoritmus byl implementován v jazyce C++ s využitím knihovny pro zpracování obrazu OpenCV. Dále byla použita natrénovaná neuronová síť pro detekci posledních článků prstů na ruce, která po úpravě dokázala spolehlivě vysegmentovat oblasti zájmu (ROI), na něž byl aplikován algoritmus vylepšení.

Následně proběhlo snímání databáze obsahující 26 rukou, na nichž byl algoritmus vylepšení testován. Experimentálně bylo zkoumáno nastavení různých parametrů a po zvolení vhodných parametrů byla ověřena kvalita před a po použití algoritmu na vylepšení na všech 104 prstech. Výsledky byly zhodnoceny podle algoritmu NFIQ 2 a algoritmu na hodnocení kvality od společnosti Innovatrics, který je součástí licencovaného IDKitu.

Výsledky ukázaly, že realizovaný algoritmus průměrně zlepšuje kvalitu podle algoritmu NFIQ 2 o 11,97 jednotek (průměrná kvalita původních otisků byla 41,56, po vylepšení dosáhla 53,53). Avšak podle algoritmu Innovatrics se kvalita zhoršila o 1,20 jednotek (z původních 58,15 na 56,95). Nicméně podle obou algoritmů dosahují výsledky dostatečné kvality pro spolehlivé porovnávání.

V závěru práce byla navržena možná rozšíření algoritmu, která by mohla přispět ke zlepšení kvality výsledků, nebo by mohla udělat algoritmus více univerzální.

Literatura

- [1] MALTONI, Davide; MAIO, Dario; JAIN, Anil K. a PRABHAKAR, Salil. *Handbook of fingerprint recognition*. Second edition. Berlin: Springer, 2009. ISBN 978-1-4471-6106-6.
- [2] JAIN, Anil K; FLYNN, Patrick a ROSS, Arun A. *Handbook of Biometrics*. New York, NY: Springer-Verlag, 2008. ISBN 9780387710402.
- [3] MALTONI, Davide; MAIO, Dario; JAIN, Anil K a FENG, Jianjiang. *Handbook of Fingerprint Recognition*. 3. Cham: Springer International Publishing, 2022. ISBN 9783030836238. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83624-5>.
- [4] JAIN, Anil K.; NANDAKUMAR, Karthik a ROSS, Arun. 50 years of biometric research: Accomplishments, challenges, and opportunities. [online]. *Pattern recognition letters*. 2016, roč. 79, s. 80–105. ISSN 0167-8655. [cit. 2023-11-30]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.12.013>.
- [5] DRAHANSKÝ Martin, BŘEZINOVÁ Eva, ORSÁG Filip a LODROVÁ Dana. Dermatologické faktory ovlivňující snímání otisků prstů pro biometrické účely. *Kriminalistika*, vol. 43, No. 3, 2010, s. 196–206. ISSN 1210-9150.
- [6] RAK, Roman; MATYÁŠ, Vašek a ŘÍHA, Zdeněk. *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [7] DONIDA LABATI, Ruggero; GENOVESE, Angelo; PIURI, Vincenzo a SCOTTI, Fabio. A Scheme for Fingerphoto Recognition in Smartphones. In: *Selfie Biometrics*. Cham: Springer International Publishing, s. 49–66. ISBN 303026971X. ISSN 2191-6586. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-26972-2_3.
- [8] PARZIALE, Geppy. Touchless Fingerprinting Technology. In: *Advances in Biometrics*. London: Springer London, s. 25–48. ISBN 1846289203. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-1-84628-921-7_2.
- [9] SONG, Yeegahnng; LEE, Chulhan a KIM, Jaihie. A new scheme for touchless fingerprint recognition system. [online]. In: *Proceedings of 2004 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2004. ISPACS 2004*. IEEE, 2004, s. 524–527. ISBN 9780780386396. [cit. 2023-10-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ISPACS.2004.1439111>.

- [10] LABATI, R. Donida, et al. *Touchless fingerprint biometrics: a survey on 2D and 3D technologies*. *Journal of Internet Technology*. 2014, s. 325–332. [cit. 2023-10-24].
- [11] MIL'SHTEIN, Sam a PILLAI, Anup. Perspectives and limitations of touchless fingerprints. [online]. In: *2017 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*. IEEE, 2017, s. 1–6. [cit. 2023-10-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/THS.2017.7943479>.
- [12] KHALIL, M. S. a WAN, F. K. A review of fingerprint pre-processing using a mobile phone. [online]. In: *2012 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. IEEE, 2012, s. 152–157. ISBN 9781467315340. ISSN 2158-5695. [cit. 2023-11-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICWAPR.2012.6294770>.
- [13] PRIESNITZ, Jannis; RATHGEB, Christian; BUCHMANN, Nicolas; BUSCH, Christoph a MARGRAF, Marian. An overview of touchless 2D fingerprint recognition. [online]. *EURASIP journal on image and video processing*. 2021, roč. 2021, č. 1, s. 1–28. ISSN 1687-5281. [cit. 2023-10-30]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s13640-021-00548-4>.
- [14] PIURI, V. a SCOTTI, F. Fingerprint Biometrics via Low-cost Sensors and Webcams. [online]. In: *2008 IEEE Second International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems*. IEEE, 2008, s. 1–6. ISBN 9781424427291. [cit. 2023-10-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/BTAS.2008.4699379>.
- [15] PARZIALE, Giuseppe a CHEN, Yi. Advanced Technologies for Touchless Fingerprint Recognition. In: *Handbook of Remote Biometrics*. London: Springer London, s. 83–109. ISBN 1848823843. ISSN 1617-7916. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-1-84882-385-3_4.
- [16] ZHANG, David Y; JAIN, Anil K a KITTLER, Josef. *Advances in Biometrics*. 3832. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2005. ISBN 9783540311119.
- [17] IDloop. *CONTACTLESS FULL 3D FINGER IMAGE CAPTURE* [online]. 2023. [cit. 2023-11-30]. Dostupné z: <https://www.idloop.com/>

- [18] ZAGHETTO, Caue; MENDELSON, Mateus; ZAGHETTO, Alexandre a DE B. VIDAL, Flavio. Liveness detection on touchless fingerprint devices using texture descriptors and artificial neural networks. [online]. In: *2017 IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB)*. IEEE, 2017, s. 406–412. [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/BTAS.2017.8272724>.
- [19] Encord. *Image Thresholding in Image Processing* [online]. 2023. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://encord.com/blog/image-thresholding-image-processing/>
- [20] STEIN, C.; NICKEL, C. a BUSCH, C. Fingerphoto recognition with smartphone cameras. [online]. In: *2012 BIOSIG – Proceedings of the International Conference of Biometrics Special Interest Group (BIOSIG)*. IEEE, 2012, s. 1–12. ISBN 1467310107. ISSN 1617-5468. [cit. 2023-11-14].
- [21] JAWADE, Bhavin; MOHAN, Deen Dayal; SETLUR, Srirangaraj; RATHA, Nalini a GOVINDARAJU, Venu. RidgeBase: A Cross-Sensor Multi-Finger Contactless Fingerprint Dataset. [online]. In: *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE) Conference Proceedings*. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), 2023. [cit. 2023-11-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IJCB54206.2022.10007936>.
- [22] CARNEY, Lewis A.; KANE, Josiah; MATHER, Jonathan F.; OTHMAN, Asem; SIMPSON, Andrew G. et al. A multi-finger touchless fingerprinting system: Mobile fingerphoto and legacy database interoperability. [online]. In: *ACM International Conference Proceeding Series*. 2017, s. 139–147. ISBN 145035484X. [cit. 2023-11-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/3168776.3168800>.
- [23] SAGIROGLU, Seref; ULKER, Mehtap a ARSLAN, Bilgehan. Mobile Touchless Fingerprint Acquisition And Enhancement System. [online]. In: *2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. IEEE, 2020, s. 1–8. [cit. 2023-11-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185870>.
- [24] GUPTA, Saksham; ANAND, Sukhad a RAI, Atul. Fingerprint Extraction Using Smartphone Camera. [online]. *ArXiv.org*. 2017. [cit. 2023-11-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.48550/arxiv.1708.00884>.
- [25] TABASSI, Elham; OLSEN, Martin; BAUSINGER, Oliver; BUSCH, Christoph; FIGLARZ, Andrew et al. *NFIQ 2 NIST Fingerprint Image Quality: NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)*. NIST, Washington, D.C, 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8382>.

- [26] INNOVATRICES. *Innovatrics* [online]. 2024. [cit.2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.innovatrics.com/>
- [27] INNOVATRICES. *IDKit SDK*. Verze 9.1.7.0. c2006–2020.
- [28] OpenCV. *OpenCV* [online]. 2023. [cit.2023-12-07]. Dostupné z: <https://opencv.org/>
- [29] Unite AI. *10 Best Image Processing Libraries in Python* [online]. 2023. [cit.2023-12-10]. Dostupné z: <https://www.unite.ai/10-best-image-processing-libraries-in-python/>
- [30] Neptune AI. *Top 8 Image-Processing Python Libraries Used in Machine Learning* [online]. 2023. [cit.2023-12-10]. Dostupné z: <https://neptune.ai/blog/image-processing-python-libraries-for-machine-learning>
- [31] BRAHMBHATT, Samarth. *Practical OpenCV*. 2013. Berkeley, CA: Apress L. P, 2013. ISBN 9781430260790.
- [32] GeeksforGeeks. *Introduction to C++ Programming Language* [online]. 2023. [cit.2024-03-22]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-c-programming-language/>
- [33] W3Schools. *C++ Introduction* [online]. 2024. [cit.2024-03-22]. Dostupné z: https://www.w3schools.com/cpp/cpp_intro.asp
- [34] Digital Photography School. *Digital Photography Tips and Tutorials for Beginners* [online]. 2024. [cit.2024-03-26]. Dostupné z: <https://digital-photography-school.com/digital-photography-tips-for-beginners/>
- [35] GitHub. *TensorFlow 2 Detection Model Zoo* [online]. 2021 [cit.2024-05-19]. Dostupné z: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md
- [36] MathWorks. *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* [online]. 2024. [cit. 2024-03-26]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/visionhdl/ug/contrast-adaptive-histogram-equalization.html>
- [37] LEONDES, Cornelius T. *Multidimensional Systems: Signal Processing and Modeling Techniques*. 69. Academic Press, 1995. ISBN 9780120127696.
- [38] YIN, Xuefei; ZHU, Yanming a HU, Jiankun. A Survey on 2D and 3D Contactless Fingerprint Biometrics: A Taxonomy, Review, and Future Directions.

- [online]. *IEEE open journal of the Computer Society*. 2021, roč. 2, s. 370–381. ISSN 2644-1268. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/OJCS.2021.3119572>.
- [39] HONG, Lin; WAN, Yifei a JAIN, A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. [online]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1998, roč. 20, č. 8, s. 777–789. ISSN 0162-8828. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/34.709565>.
- [40] GitHub. *Fingerprint Image Enhancement Using OpenCV* [online]. 2021 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: https://github.com/Ekberjan/Fingerprint_Image_Enhancement

Seznam symbolů a zkratek

ANSI	American National Standards Institute
CLAHE	Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
dpi	Dots Per Inch
DFT	Discrete Fourier Transform
DNA	Deoxyribonucleic Acid
FBI	Federal Bureau of Investigation
FTIR	Frustrated Total Internal Reflection
HSV	Hue Saturation Value
IDKit	Identification Kit
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
JPG	Joint Photographic Experts Group
LED	Light Emitting Diode
NFIQ	NIST Fingerprint Image Quality
NIST	National Institute of Standards and Technology
OpenCV	Open Source Computer Vision Library
px	pixel
PIN	Personal Identification Number
PNG	Portable Network Graphics
RGB	Red Green Blue
ROI	Region of Interest
SOM	Self-Organizing Map
SDK	Software Development Kit

STFT	Short-Term Fourier Transform
TBS	Touchless Biometric Systems
WSQ	Wavelet Scalar Quantization
2D	Two-Dimensional
3D	Three-Dimensional

A Obsah elektronické přílohy

V přiložené elektronické příloze jsou 3 programy. První z nich slouží pro segmentaci oblastí zájmu (ROI) z obrázku, druhý pro vylepšení otisků prstů a třetí slouží pro hodnocení kvality otisků.

A.1 Segmentace oblastí zájmu (ROI) z obrázku

Neurovová síť byla vytvořena s pomocí [35] a následně dotrénovaná společností TBS. Soubory `tipsAndJointsY3.cfg` a `tipsAndJointsY3.weights` nebyly zveřejněny z důvodu vlastnictví firmou TBS.

```
NN ..... kořenový adresář přiloženého programu
├── src ..... adresář obsahující zdrojové soubory
│   ├── main.cpp ..... spouštění programu, extrakce ROI a následné uložení
│   ├── YoloDetector.cpp ..... detekce ROI pomocí YOLO
│   ├── YoloDetector.h ..... hlavičkový soubor detektoru
│   └── DnnDetector.h ..... hlavičkový soubor
├── tipsAndJointsY3.cfg ..... konfigurační soubor
└── tipsAndJointsY3.weights ..... soubor obsahující předtrénované váhy
```

A.2 Algoritmus pro vylepšení otisků prstů

Při vytváření algoritmu se vycházelo z řešení dostupného z [40] a čerpalo se také z [28].

```
fingerPrint ..... kořenový adresář přiloženého programu
├── main.cpp ..... soubor pro spuštění a uložení výsledků
├── fpenhancement.cpp ..... soubor obsahující potřebné funkce na vylepšení
├── fpenhancement.h ..... hlavičkový soubor obsahující deklarace funkcí
└── common.h ..... hlavičkový soubor obsahující potřebné knihovny
```

A.3 Innovatrics algoritmus na kontrolu kvality

Přiložený program provádí hodnocení kvality otisků prstů. Pro spuštění je potřeba mít platnou licenci od Innovatrics.

```
Inn ..... kořenový adresář přiloženého programu
├── main.cpp ..... spuštění a zobrazování kvality
└── idkit.h ..... převzatý soubor
```