



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**GENEROVANIE ČIAROVÝCH POŠKODENÍ DO SYN-
TETICKÝCH ODTLAČKOV PRSTOV**

LINE DAMAGES SIMULATION GENERATION INTO SYNTHETIC FINGERPRINT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VANESSA JÓRIOVÁ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KANICH, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce



Studentka: **Jóriová Vanessa**
Program: Informační technologie
Název: **Generování čárových poškození do syntetického otisku prstu**
Line Damages Simulation Generation into Synthetic Fingerprint
Kategorie: Bezpečnost

Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se rozpoznávání podle otisků prstů a syntetického generování otisků prstů. Seznamte se s možnými poškozeními, která mohou ovlivňovat kvalitu nasnímaného otisku prstu.
2. Navrhněte vhodné modely a posléze algoritmy pro generování minimálně tří poškození, která mají čárový charakter (např. vrásky, flekční rýhy, jizvy, praskliny na snímači). Vzniklá poškození integrujte do snímku syntetických otisků prstů.
3. Implementujte navržené algoritmy z předchozího bodu.
4. Otestujte algoritmy z předchozího bodu vygenerováním databáze syntetických otisků prstů s poškozeními. Analyzujte vzniklou databázi pomocí vhodných metod (např. IDkit, VeriFinger, FiQiVi, apod.). Prozkoumejte vliv poškození na porovnávání otisků prstů a na určení jejich kvality.
5. Dosažené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná rozšíření vašeho řešení.

Literatura:

- Maltoni, D., Maio, D., Jain, A.K. and Prabhakar, S.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, 2009, p. 512. ISBN 978-1-8488-2254-2.
- Kanich, O.: *Research in Fingerprint Damage Simulations*, Doctoral thesis, FIT BUT in Brno, Brno, 2018, p. 148.
- Dražanský, M.: *Hand-Based Biometrics: Methods and technology*, IET 2018, p. 430, ISBN 978-1-78561-224-4.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Kanich Ondřej, Ing., Ph.D.**

Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2021

Datum odevzdání: 11. května 2022

Datum schválení: 3. listopadu 2021

Abstrakt

Cielom tejto práce je generovanie čiarového poškodenia do syntetických odtlačkov prstov, pričom konkrétne poškodenia vybrané na implementáciu boli vrásky a iné ryhy, vlas na snímači a jazvy. Boli preskúmané prejavy daných poškodení v reálnych odtlačkoch, zhotovený návrh algoritmu na ich generovanie a tento algoritmus následne implementovaný v jazyku Python. Na vyhodnotenie kvality výsledných odtlačkov bol využitý nástroj FiQiVi, ktorého výstupom je percentuálna kvalita. Na určenie vplyvu na porovnateľnosť odtlačkov bol využitý nástroj VeriFinger, ktorého výstupom je skóre porovnania. Pridaním syntetického poškodenia kvalita odtlačku aj skóre porovnania preukázateľne klesli.

Abstract

The goal of this thesis is generation of line damage into synthetic fingerprint images. Creases, hair on sensor, and scars are specific damage chosen for generation. Attributes of all types of damage were analyzed in real fingerprint images and an algorithm for generation of this damage was proposed and implemented in Python. The quality of damaged fingerprints was evaluated by FiQiVi, the output of which is a percentage describing the quality of the fingerprint. VeriFinger was used to determine the effect on fingerprint matching, which is evaluated by a fingerprint matching score. Generation of damage into synthetic fingerprint images resulted in a decrease in both quality and fingerprint matching scores.

Klíčové slová

syntetické odtlačky prstov, generovanie syntetického poškodenia, vrásky, jazvy, vlas na snímači.

Keywords

synthetic fingerprints, generation of synthetic damage, creases, scars, hair on sensor

Citácia

JÓRIOVÁ, Vanessa. *Generovanie čiarových poškodení do syntetických odtlačkov prstov*. Brno, 2022. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich, Ph.D.

Generovanie čiarových poškodení do syntetických odtlačkov prstov

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracovala samostatne pod vedením pána Ing. Ondřeje Kanicha, Ph.D. Uviedla som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čepala.

.....

Vanessa Jóriová

9. mája 2022

Podakovanie

Ďakujem pánovi Ing. Ondřeji Kanichovi, Ph.D. za pomoc pri smerovaní a kontrole tejto práce.

Obsah

1	Úvod	2
2	Biometria a odtlačky prstov	4
2.1	Verifikácia a identifikácia	4
2.2	Biometrické charakteristiky	5
2.3	Odtlačky prstov	6
2.4	Syntetické odtlačky prstov	11
3	Snímanie a spracovanie odtlačkov prstov	15
3.1	Technológie snímania odtlačkov prstov	16
3.2	Postup spracovávania a rozpoznávania odtlačkov prstov	19
3.3	Faktory ovplyvňujúce kvalitu odtlačku prsta	20
3.4	Simulácia poškodení odtlačkov prstov	25
4	Návrh algoritmu na generovanie čiarových poškodení	30
4.1	Vrásky a iné ryhy	30
4.2	Vlasy a chlpy na snímači	33
4.3	Rany a jazvy	35
4.4	Poškodenie skla optického snímača	40
5	Implementácie simulácie poškodení	43
5.1	Detekcia plochy syntetického odtlačku	43
5.2	Generovanie rýh	44
5.3	Vlasy a chlpy na snímači	47
5.4	Rany a jazvy	48
6	Výsledky a testovanie	57
6.1	Vrásky a iné ryhy	58
6.2	Vlasy a chlpy na snímači	59
6.3	Rany a jazvy	60
6.4	Záver vyhodnotenia	66
7	Záver	67
	Literatúra	68
A	Obsah pamäťového média	72

Kapitola 1

Úvod

Na svete žije 7 miliárd ľudí a život v ľudskej spoločnosti si obvykle vyžaduje, aby sme denne prichádzali do kontaktu s desiatkami z nich nielen osobne, ale aj sprostredkované pomocou technológií ako mobilné telefóny, internet či televízia. Naše mozgy dokážu známych jedincov identifikovať automaticky - či už podľa fyzických črt, hlasu, spôsobu chôdze, písma atď. Využitie biologických charakteristík, ktoré sú u jedinca unikátne, sa ukázalo ako efektívny prístup pre ľudí aj stroje. Využitie biometrických charakteristík tak vo veľa oblastiach prekonal tradičnejšie metódy identifikácie, ako preukázanie sa *vlastníctvom* určitých objektov (rôzne doklady) či vedomosťou (heslo), keďže sa ukázali ako efektívnejšie, pohodlnejšie a bezpečnejšie.

Biometrických charakteristík, ktoré sú vhodné pre biometrickú identifikáciu človeka, je celá rada. Len na jednej špecifickej oblasti, ako napr. ruka, dokážeme zvoliť viacero prvkov, ktoré sú na tento proces vhodné: odtlačky prstov, odtlačky dlane, 2D či 3D sken ruky, štruktúra žíl dlane či prstov, štruktúra nechtov a podobne. Práve odtlačky prstov sú zo všetkých rysov v súčasnosti najpoužívanejšie a využitie si našli v celej škále sektorov. Rozmach vo vývoji technológií, ktoré ich využívajú, si však vyžaduje rozsiahle databázy vzoriek na trénovanie, optimalizáciu a overovanie podobných algoritmov. Získavať ich priamo od ľudí je však proces náročný na čas aj zdroje, navyše vystávajú rôzne bezpečnostné otázky. To podnietilo vývoj syntetických odtlačkov prstov, ktoré umožňujú rôzne problémy so zberom reálnych dát obchádzať či úplne eliminovať. Najvyužívanejšie generátory syntetických odtlačkov ale obvykle produkujú vysoko kvalitné odtlačky prstov, popr. len málo poškodené - to však nezodpovedá realite. Reálne nasnímané odtlačky nie sú perfektné, keďže na nich vplývajú faktory prostredia, stav či znečistenie senzoru samotného, rôzne poškodenia priamo na brušku snímaného prsta samotného a iné. Niektoré sú dočasné a dajú sa eliminovať, ako napr. rôzne znečistenia, zatiaľ čo iné sú dlhodobé, ak nie permanentné. Takto poškodené snímky sú z rôznych databáz často vyradené ako nesprávne nasnímané, algoritmy na nich nie sú trénované a často neumožňujú korektné využitie biometrických systémov. To je závažný problém, ktorému však v oblasti vývoja biometrických systémov nie je venovaná náležitá pozornosť. Je veľmi ťažké prejavy jednotlivých poškodení v odtlačkoch prstov čo i len naštudovať, keďže existuje len veľmi málo špecifických databáz, ktoré by ich obsahovali, a aj tie často majú menej vzoriek, ako by si problematika vyžadovala.

Táto práca je zameraná na simuláciu poškodení čiarového charakteru, či už vplyvom okolia, senzora či poškodenia bruška prsta samotného. Kapitola 2 predstavuje biometriu ako takú, odtlačky prstov z biologického aj biometrického hľadiska a motiváciu aj spôsob tvorby syntetických odtlačkov. Kapitola 3 sa zasa zameriava na snímanie a spracovanie týchto odtlačkov, a to na technológie snímania, spôsob spracovania a rozoznávania odtlač-

kov, faktory, ktoré ovplyvňujú kvalitu získaného odtlačku, rôzne poškodenia a spôsob ich simulácie. Kapitola 4 sa venuje analýze vybraných poškodení čiarového charakteru a návrhu ich implementácie, kapitola 5 zasa popisuje, ako boli tieto poškodenia implementované. Kapitola 6 komentuje výsledky a zistené poznatky práce.

Program, ktorý je výstupom tejto práce, bude schopný do syntetických odtlačkov prstov vygenerovať príslušné poškodenie podľa zadaných parametrov. To vygeneruje snímky čo najvernejšie pôsobiaceho syntetického poškodenia, ktoré môžu byť ďalej využité za účelom tréningu či testovania rôznych rozoznávacích algoritmov.

Kapitola 2

Biometria a odtlačky prstov

Biometrická autentizácia je veda, ktorá používa k zisteniu totožnosti alebo k overeniu zadanej identity osôb ich unikátne charakteristické rysy [35]. Biometrické autentizačné technológie sú bližšie definované ako automatizované metódy verifikácie alebo rozoznávania identity osôb na základe fyziologických alebo behaviorálnych charakteristík. Dôraz na automatizované metódy vyčleňuje biometriu od väčšieho vedného oboru identifikácie osôb [42].

Za rozmachom biometrie stojí najmä dopyt súčasnej doby po robustných systémoch schopných presnej identifikácie identity jedinca v kontexte rôznych aplikácií, rovnako ako po spoľahlivých systémoch schopných obslúžiť veľké množstvo individuí [22]. Príklady využitia biometrie v súčasnej dobe sú početné, [35] uvádza napr.:

- **Dochádzkové systémy** (komerčné organizácie, štátne inštitúcie, banky...).
- **Prístupové systémy** (elektrárne, výpočtové centrá, letiská, nemocnice, trezory...).
- **Ochrana počítačov a počítačových sietí** (prístup do počítačov, k počítačovým sieťam, k súborom, podpisové vzory...).
- **Identifikácia osôb** (náhrada podpisov a podpisových vzorov, cestovné pasy, zdravotné karty...).

2.1 Verifikácia a identifikácia

K pojmu identita sa viažu dva pojmy – identifikácia a verifikácia[14]. **Identifikácia** slúži k zisteniu identity osoby – tá systému zadá svoju biometrickú vlastnosť bez prezradenia identity. Získaná vzorka sa porovná s databázou uložených vzoriek a výstupom je buď identita nájdená, alebo identita neznáma. Jedná sa o 1:N porovnanie a tento proces je často kvôli rozsiahlosti databáz časovo náročný. Využíva sa najmä pri takzvanom *negatívnom rozpoznaní*, kedy systém vyhodnocuje, či sa daný užívateľ nachádza v systéme či v databáze, hoci túto skutočnosť užívateľ popiera – primárnym účelom je zamedzenie využitia viacerých identít. Na rozdiel od pozitívnej identifikácie, ktorú možno vykonať tradičnými metódami ako heslo, PIN či kľúč, negatívna identifikácia je výsadou výhradne biometrie [22].

Pri **verifikácii** osoba zdelí systému svoju elektronickú identitu a na jej základe dôjde k overeniu fyzickej identity. V databáze je vyhľadaný jeho záznam obsahujúci biometrické dáta. Jedná sa o 1:1 porovnávanie [14]. Neexistujúci záznam v databáze automaticky vedie na zamietnutý prístup, v prípade nájdenia dôjde k porovnaniu dát a následnému potvrdeniu či nepotvrdeniu identity. Príkladom verifikácie je napr. prístupový systém, databáza

azylantov atď. Verifikácia využíva tzv. *pozitívne rozpoznávanie*, kedy systém potvrdzuje, že je užívateľ tým, za koho sa vydáva. Primárnym využitím je predovšetkým zamedzenie prístupu neoprávnených osôb ku chráneným zdrojom [22].

2.2 Biometrické charakteristiky

Biometrické systémy snímajú, spracovávajú a vyhodnocujú celú škálu biometrických charakteristík, ktoré možno rozdeliť do dvoch kategórií [14]:

- **anatomické** (fyzické statické) charakteristiky,
- **behaviorálne** (dynamické) charakteristiky.

U anatomických charakteristík je jeden pevný rys jednou konkrétnou biometrickou charakteristikou, ktorá je vždy prítomná a nie je ovplyvniteľná stavom človeka. Patrí sem napr. odtlačok prsta, dľaň, geometria ruky, tvár, termogram tváre, termogram ruky, dúhovka oka, sietnica oka, tvar ucha atď. Metóda analýzy týchto charakteristík sa nazýva statická metóda.

Dynamické charakteristiky sú prepojené s akciou užívateľa a biometrická charakteristika je pomerne ľahko ovplyvniteľná stavom človeka – každé nasnímanie často vedie k odlišnej sade biometrických vzoriek. Medzi dynamické charakteristiky sa radí hlas/reč, mimika tváre a pohyb pier, podpis (dynamická forma), chôdza atď.

Biometrický systém je vo svojej podstate systém rozpoznávania vzorov, ktorý načíta biometrické dáta jedinca, porovná získané rysy so vzorovými dátami uloženými v databáze a na základe výsledku porovnania vykoná požadovanú akciu. Štandardný biometrický systém teda pozostáva zo štyroch modulov [22]:

- **Senzorický modul** - jeho primárnou úlohou je nasnímanie nespracovaných biometrických vzoriek jednotlivca. K tomu sa v závislosti od snímaného rysu využívajú rôzne skenery či senzory – väčšina snímaných charakteristík je obrazového charakteru, s niekoľkými výnimkami (napr. snímanie zvuku v súvislosti s ľudským hlasom). Kvalita nasnímaných dát je často ovplyvnená použitou technológiou. So senzorickým modulom prichádza do styku aj užívateľ, na jeho ochotu poskytnúť biometrické dáta a na ich kvalitu vplýva aj užívateľské rozhranie.
- **Modul určenia kvality a extrakcie rysov** - modul zhodnotí kvalitu senzorom nasnímanej vzorky a jej vhodnosť na ďalšie vyhodnocovanie. V prípade nevyhovujúcej kvality môže byť užívateľ požiadaný o opakované nasnímanie rysu. Získané vzorky sa pred ďalším spracovaním často upravujú (zmena kontrastu, odfiltrovanie šumu atď.). Z biometrického vstupu sú následne extrahované normované význačné biometrické rysy, využité na ďalšie porovnávanie.
- **Porovnávací a rozhodovací modul** - význačné rysy sú porovnávané so vzorovými rysmi už uloženými v databáze. Výstupom je číselné vyjadrenie zhody, na ktorého základe rozhodovací modul v závislosti od požadovanej akcie validuje údajnú identitu či poskytne predpokladanú identitu v prípade identifikácie.
- **Databázový modul** - obsahuje databázu význačných rysov extrahovaných z nasnímaných nespracovaných biometrických dát a prídavné informácie – meno, PIN, adresa atď.

Mnohé alternatívne spôsoby autorizácie vyžadujú kompletnú zhodu zadaného vstupu voči predpisovému – napr. verifikácia heslom vyžaduje úplnú zhodu dvoch porovnávaných reťazcov. Pri biometrických systémoch je však pravdepodobnosť úplnej zhody dvoch rovnakých rysov rovnakého užívateľa nasnímaných v rozličnej dobe minimálna. Môže za to nedokonalosť snímačej technológie (napr. šum senzora), zmeny okolitého prostredia (rozličné svetlo na snímku využívaného pri rozoznávaní tváre) či zmeny v biometrických rysoch používateľa samotného (napr. zmeny v hlase dôsledkom respiračnej choroby). Variabilita v biologických rysoch jednotlivca sa nazýva *vnútrotriadna variabilita*. Biometrické systémy teda v súvislosti s rozoznávaním osôb niekedy ukladajú pre jedného užívateľa viac predlôh [22].

Výsledkom porovnávania nasnímaného biometrického prvku s uloženým vzorom je *skóre porovnania*, hodnota udávaná v percentách (0 % pri absolútne rozdielnych až 100 % pri absolútne zhodných vzorkách). Ďalším významným parametrom je prah prijatia, ktorý stanovuje, od akej hodnoty bude snímok prijatý a pod akú zamietnutý [35].

Ako základné žiaduce vlastnosti identifikátora, ktorý možno využiť ako biometrickú charakteristiku, [9] uvádza:

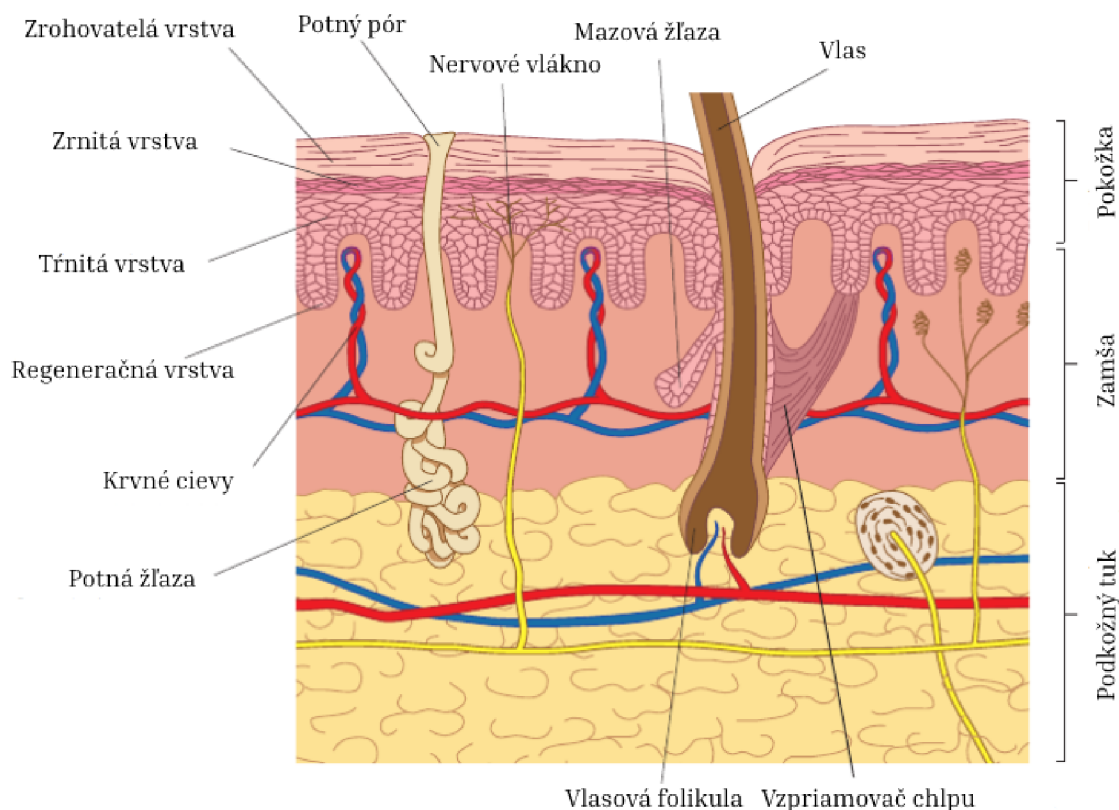
- **univerzálnosť** - každá osoba ním disponuje,
- **jedinečnosť** - nie je zhodný pre žiadne osoby,
- **konštantnosť** - zostáva nemenný v čase,
- **nepostrádateľnosť** - je dostupný každej osobe a v každej chvíli,
- **získateľnosť** - je kvantitatívne merateľný,
- **skladovateľnosť** - je skladovateľný v manuálnych aj automatizovaných systémoch,
- **exkluzivita** - nevyžaduje použitie žiadneho ďalšieho identifikátora,
- **presnosť** - je dostatočne odlišný od iného identifikátora,
- **jednoduchosť používania** - snímanie a prenos je jednoduché a nenáchylné k chybám,
- **cena** - nie je neúmerne nákladný na snímanie a ukladanie,
- **komfort** - snímanie a ukladanie nie je neúmerne nekomfortné,
- **akceptácia** - ľudia sú ochotní nechať si identifikátor nasnímať.

Žiaden biometrický rys neuspokojí požiadavky všetkých aplikácií a pred nasadením konkrétneho biometrického systému je nutné zvážiť vyššie spomínané vlastnosti.

2.3 Odtlačky prstov

Odtlačky prstov sú v súčasnej dobe najviac využívaným biometrickým rysom a technológii na jeho rozoznávanie sú v rámci biometrie najrozšírenejšie [14]. Využívajú sa v celej škále sektorov vrátane zdravotníctva, hotelierstva, vojenstva, finančného sektoru, priemyselného sektoru, vo výkone práva atď. Medzi aplikácie patrí napr. kontrola prístupu k chráneným priestorom/dátam, autentizácia transakcií, kontrola prístupu k zariadeniam ako laptopy či mobily, identifikácia osôb a iné [29].

2.3.1 Koža a jej anatómia



Obr. 2.1: Štruktúra kože. Obrázok prevzatý z [41] a modifikovaný.

2.3.2 Charakteristika odtlačku prsta

Získavanie odtlačkov prsta je proces skenovania kože – jej znalosť z biologického hľadiska je teda užitočná pre pochopenie charakteristík odtlačkov prsta a uvedomenie si, akým spôsobom naňho vplývajú rôzne deformácie (kožné ochorenia, poranenia atď.).

Koža je najväčší ľudský orgán, ktorý tvorí až 15 % hmotnosti dospelého človeka. Medzi jej funkcie patrí [11] [13]:

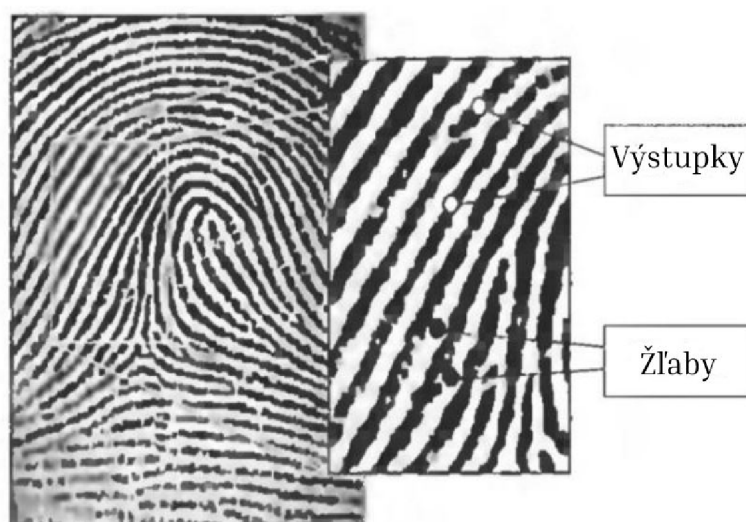
- **Hmat** - nervové zakončenia sú citlivé na vnímanie dotyku, tlaku, tepla, bolesti atď.
- **Regulácia telesnej teploty** - ochladzovanie tela potením v prípade prehriatia alebo uzatvorenie pórov („husia koža“) v prípade podchladenia.
- **Absorpcia** - absorpcia slnečného žiarenia napomáha tvorbe vitamínu D, čo je kľúčové pre formáciu kostí. Taktiež umožňuje vstrebanie látok rozpustných v tuku (ako napr. krémy či medikamenty) cez kožu do krvného obehu.
- **Ochrana** - produkciou melanínu chráni pred nadmernou absorpciou ultrafialového žiarenia. Taktiež predstavuje bariéru voči baktériám a mikroorganizmom a chráni pred drobnými poškodeniami.

- **Vylučovanie** - toxíny a odpadné látky sú prostredníctvom potných žliaz vylučované z tela.
- **Sekrécia** - hydropolický film udržovaný výlučkami potných a mazových žliaz napomáha udržiavať kožu vláčnu a vytvára mierne kyslé pH ideálne na množenie prirodzenej kožnej flóry a ničenie škodlivých mikroorganizmov [15].

Koža sa skladá z troch hlavných funkčných vrstiev, pričom každá sa skladá z ďalších vrstiev. Obrázok 2.1 znázorňuje jej anatómiu. Najvrchnejšou vrstvou je *epidermis* (**pokožka**). Je to jediná viditeľná vrstva pokožky a jej primárnou funkciou je ochrana pred toxínmi, baktériami a stratou vody. *Dermis* (**zamša**) je silná, pružná a pevná stredná vrstva kože, ktorá hrá kľúčovú rolu v ochrane tela pred vonkajšími živlami a dráždivými látkami. Vyživuje epidermis. *Subcutis* (**podkožie**) zasa tvorí najspodnejšiu vrstvu kože, ktoré obsahuje predovšetkým tukové bunky a funguje ako izolácia, tlmič nárazov a úschovňa energie [11].

Identifikácia osôb na základe odtlačkov prsta vychádza z existencie papilárnych línií na vnútornej strane prstov – funkčných útvarov spojených s hmatovými a uchopovacími schopnosťami končatiny, tvoriacich súvisle vyvýšené časti pokožky dosahujúce výšky 0,1-0,4 mm a šírky 0,2-0,7 mm. [36]. Vystupujúce línie tvoriace rozličné vzory na povrchu bruška prsta sa nazývajú výstupky a medzery medzi nimi žlaby (obrázok 2.2) [4].

Odtlačky prstov sa plne vyformujú okolo siedmeho mesiaca embrionálneho vývoja. Na ich diferencovanie nevlývajú len gény, ale aj mikroprostredie okolo plodu – jeho poloha v rámci maternice a obtekanie plodovej vody má tiež vplyv na vývoj jednotlivých buniek a vytvára rozdielne mikroprostredie okolo každej končatiny a každého prstu. To výrazne prispieva k faktu, že vyformovanie dvoch identických odtlačkov prsta je takmer nemožné [29].



Obr. 2.2: Výstupky tvoria tmavé vzory odtlačku prsta, priestory medzi nimi predstavujú žlaby. Obrázok prevzatý z [33] a modifikovaný.

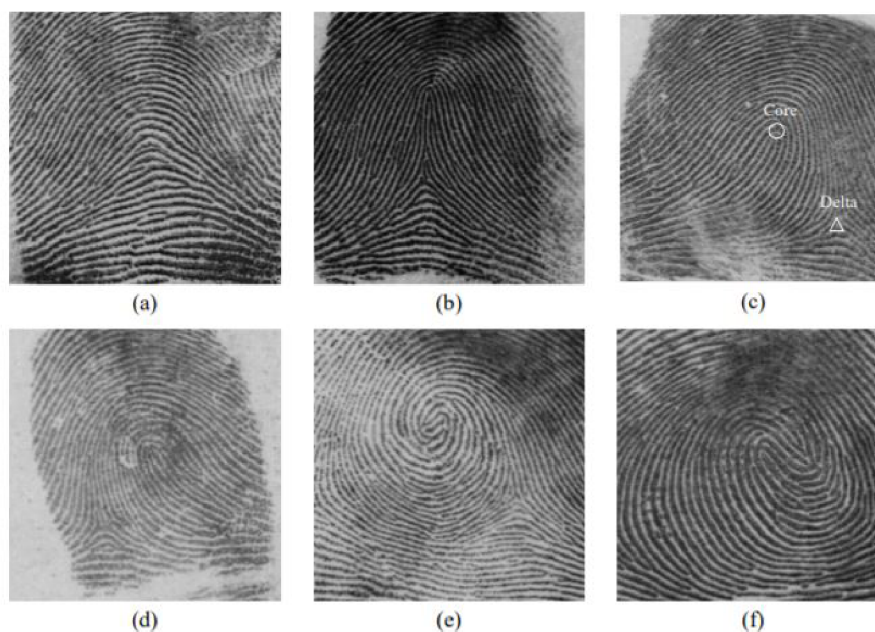
K vysokej atraktivite odtlačkov prstov ako biometrického rysu prispievajú nasledujúce vlastnosti [36]:

- **Na svete nie sú dvaja jedinci so zhodným obrazcom papilárnych línií** - nejedná sa síce o dokázaný fakt, ale o výsledok empirických pozorovaní počas niekoľko storočí. Pravdepodobnosť zhody papilárnych línií je minimálna.
- **Obrazce papilárnych línií zostávajú po celý život relatívne nemenné** - a to od vyformovania v rámci embryonálneho vývinu až po starobu, kedy ich môžu narušiť vrásky starnúcej kože.
- **Papilárne línie sú zranením neodstrániteľné, pokiaľ nie je odstránená aj zárodočná vrstva kože** - pokiaľ sa poruší len vrchná vrstva kože porezaním, popálením či zodretím, papilárne línie sa poškodia len dočasne a po čase sa prirodzene obnovia.

Tieto vlastnosti sa súhrnne nazývajú **daktyloskopické zákony** [14]. Na ich základe je zrejmé, že odtlačok prsta ako biometrický identifikátor spĺňa časť požiadavkov uvedených v kapitole 2.2, a to konkrétne *univerzálnosť, jedinečnosť, konštantnosť, nepostrádateľnosť a presnosť*.

Papilárne línie sa tvoria v *dermis* a ich viditeľnosť vo vrchnej časti pokožky je len projekciou hlbšej vrstvy, čo je dôvodom, prečo sa po poškodení pokožky časom obnovia. Avšak poškodenie zárodočnej vrstvy papilárne línie trvalo alteruje [27].

Odtlačky prstov sú každodenne snímané a ukladané v rozsiahlych databázach – IAFIS, Integrated Automated Fingerprint Identification System (v preklade Integrovaný automatizovaný systém identifikácie odtlačkov prsta) patriaci FBI (Federal Bureau of Investigation) obsahoval koncom apríla 2001 vzorky odtlačkov prsta viac ako 156 miliónov ľudí [38]. Automatická identifikácia na základe odtlačku prsta si vyžaduje porovnanie odtlačku voči obrovskému množstvu vzoriek v databáze, čo je časovo a výpočetne náročný proces [29].



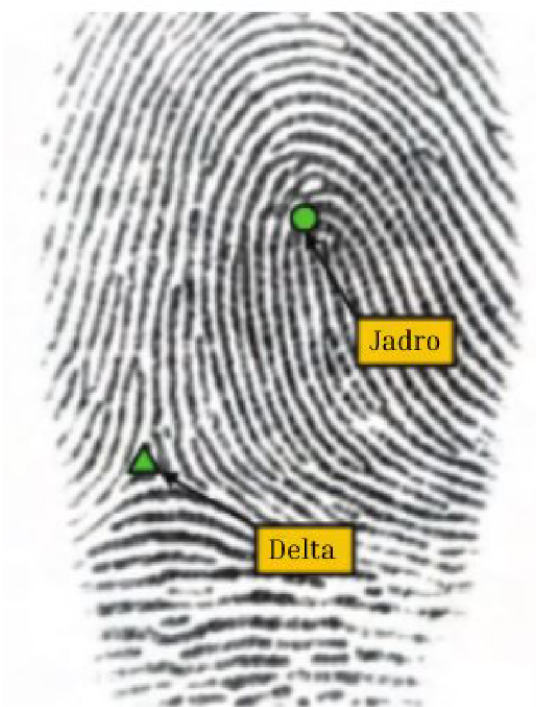
Obr. 2.3: Triedy odtlačkov prstov: a) oblúk, b) klenutý oblúk, c) ľavá slučka, d) pravá slučka, e) vír, f) dvojitá slučka. Obrázok prevzatý z [23].

Na redukcii náročnosti sa využíva klasifikácia odtlačkov do tried navrhnutá Henrym, ktorá rozčlení odtlačky do menších podtried, do ktorých je zaradený a v rámci ktorých porovnávaný skúmaný odtlačok – to odbúra nutnosť porovnávania odtlačkov s celou databázou, keďže odtlačky z iných tried sú okamžite vylúčené. Odtlačky sú kategorizované na základe vzorov vytváraných papilárnymi líniami do troch základných tried: **oblúk, slučka a vír**. Tie možno rozšíriť na [23] [29] [12]:

- **oblúk,**
- **klenutý oblúk,**
- **vír,**
- **ľavá slučka,**
- **pravá slučka,**

pričom jednotlivé triedy sú zachytené na obrázku 2.3. V rámci ľavej slučky (obrázok c) sú tiež zachytené dva význačné body - **jadro** a **delta**.

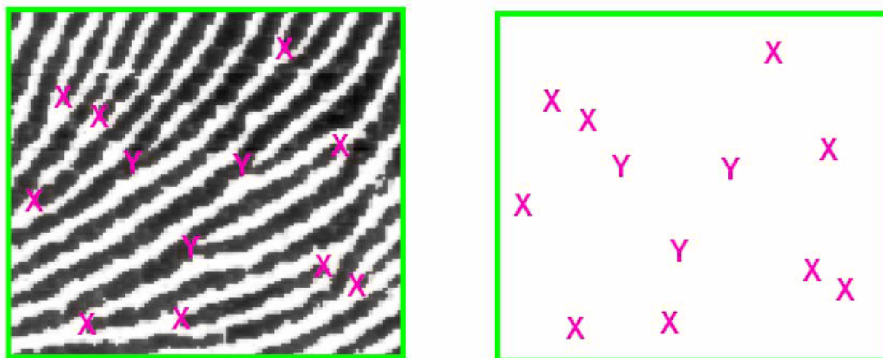
Jadro predstavuje ústredný bod odtlačku prsta a nachádza sa na najspodnejšom vykľutí v priebehu papilárnych líní [14]. Pozícia nemusí zodpovedať skutočnému strednému odtlačku prsta. Ako delta sa označuje bod, kde prebiehajú papilárne línie do troch smerov a tvoria tak trojuholníkovitý útvar [32] [14]. Obe singularities sú znázornené na obrázku 2.4. Počet a smer týchto singularít odtlačky klasifikuje do jednotlivých tried (napr. oblúk neobsahuje žiadne singularities, zatiaľ čo vír má obvyčajne dve delty a jedno či dve jadrá) [27].



Obr. 2.4: Singulárne body. Obrázok prevzatý a upravený z [32].

Singulárne body a triedy avšak nestačia na rozlíšenie jednotlivých odtlačkov prstov. K tomuto účelu sa pri automatickom rozoznávaní najviac využívajú tzv. *markanty* [29].

Jedná sa o špeciálne útvary tvorené papilárnymi líniami [14]. Markanty v rámci jednotlivých odtlačkov prstov vyjadrujú individualitu papilárných líní a líšia sa svojim tvarom, rozmiestnením a početnosťou výskytu [36]. V daktyloskopických systémoch sa využíva veľké množstvo markantov (*ukončenie, jednoduchá vidlička, dvojité vidlička, trojitá vidlička, hák, kríženie, bočný kontakt, bod, interval, jednoduchá slučka, dvojité slučka, jednoduchý most, dvojité most, priesečná línia atď.*), pri počítačovom rozoznávaní sa ale využívajú len dva: *ukončenie a vidlička* (miesto rozdvojenia papilárnej línie) [14] [29]. Tie sú znázornené na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Výsek odtlačku prsta a jeho markanty. Ukončenie je vyznačené ako X, vidlička ako Y. Obrázok prevzatý z [8].

Poslednou úrovňou rozoznávania odtlačkov prsta sú drobné detaily v rámci jednotlivých papilárných líní, ako napr. šírka, tvar, zakrivenie a iné. Jedinečná je tiež pozícia potných pórov, ich nasnímanie si však vyžaduje kvalitnú snímku s vysokým rozlíšením [29].

2.4 Syntetické odtlačky prstov

Rozmach vo vývoji algoritmov na rozpoznávanie odtlačkov prstov vyústil do potreby rozsiahlych databáz na ich tréning, testovanie, optimalizáciu a porovnávanie. Nutné zaistenie malej chybovosti si vyžaduje tisíce až desať tisíce vzoriek.

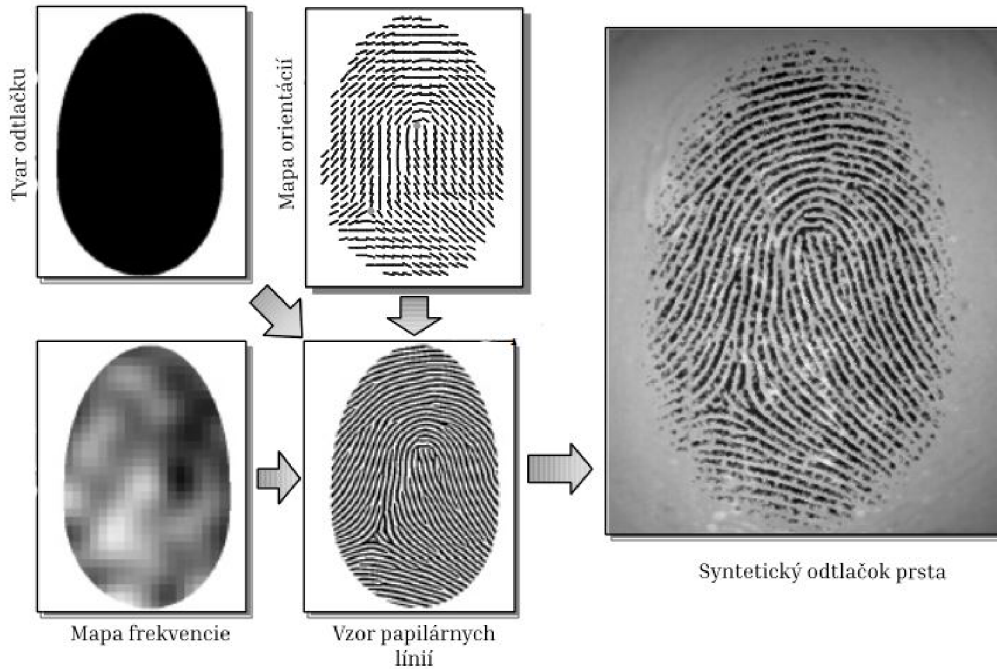
Výkon systémov založených na identifikácii či verifikácii odtlačkov prstov je priamo závislý od kvantity a kvality dostupných dát, väčšina výskumníkov však k podobne veľkým databázam prístup nemá, a to mimo iného kvôli nasledujúcim problémom [29] [6]:

- databáza nutného rozsahu je nákladná po finančnej aj časovej stránke,
- proces poskytovania dát je zdĺhavý pre technikov aj dobrovoľníkov dáta poskytujúcich,
- tvorbu komplikuje legislatíva chrániaca osobné údaje.

V prípade nedostupnosti veľkej databázy sú algoritmy často testované na menšej – takéto programy však často podliehajú vysokej dátovej závislosti. Syntetické odtlačky prstov umožňujú tieto problémy obchádzať – tvorba rozsiahlych databáz je rýchla a vyžadujúca len zanedbateľné náklady, navyše dokáže (v prípade realistických odtlačkov prstov) suplovať databázy reálnych vzoriek [29]. Zatiaľ čo únik databázy reálnych odtlačkov predstavuje výrazný bezpečnostný problém, syntetické odtlačky sú umelo generované a nepredstavujú riziko úniku reálnej identity. Tiež riešia problém s nerovnomerným rozdelením reálnych

ľudských odtlačkov do tried opísaných v kapitole 2.3 [11]. V súčasnej dobe existuje viacero metód generovania syntetických odtlačkov prstov, avšak najznámejšia je metóda SFinGe [6] [27].

2.4.1 Generovanie syntetických odtlačkov prsta



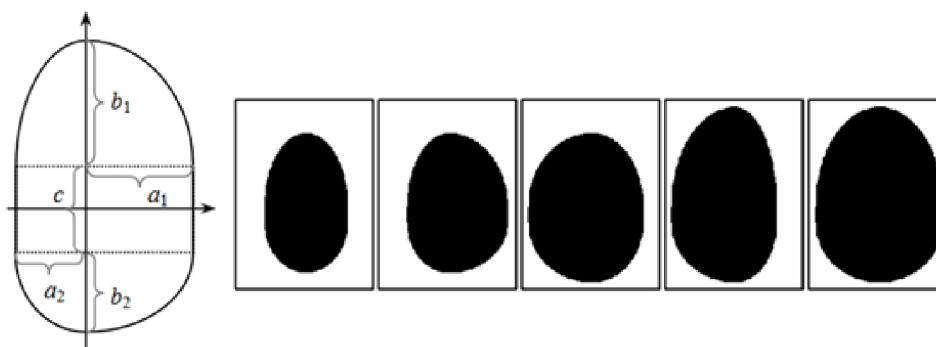
Obr. 2.6: Základný princíp generovania syntetického odtlačku pomocou SFinGe. Obrázok prevzatý z [6] a upravený.

Základný princíp generovania syntetických odtlačkov prstov pomocou generátora SFinGe možno charakterizovať štyrmi krokmi:

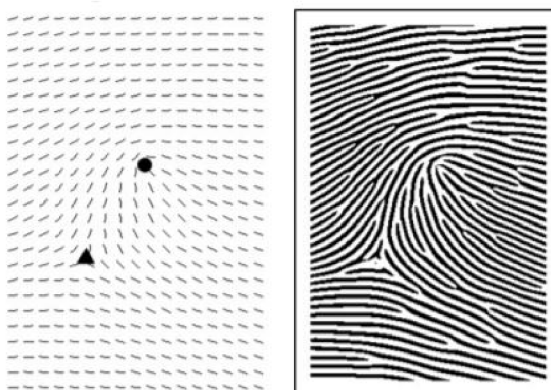
- generovanie tvaru odtlačku prsta,
- generovanie mapy orientácií,
- generovanie mapy frekvencie,
- generovanie vzoru papilárnych línií.

ktoré vidno na obrázku 2.6. Prvý krok, generovanie tvaru odtlačku prsta, určuje externú siluetu odtlačku. Tá sa môže líšiť v závislosti od veľkosti, pozície a tlaku priloženého prstu na snímač. Túto variáciu je možné celkom jednoducho dosiahnuť pomocou modelu odtlačku prsta v podobe obdĺžnika a štyroch eliptických oblúkov. Modifikáciou parametrov tak vieme dosiahnuť väčšinu variácií pozorovaných v tvaroch odtlačku prsta (obrázok 2.7)[29].

Základom druhého kroku, generovania mapy orientácií, je náhodné zvolenie triedy odtlačku prsta a náhodné vygenerovanie pozície singularít (dielt a jadier) v závislosti od zvolenej triedy (obrázok 2.8) [27]. Z týchto počiatočných bodov sú následne pomocou matematického modelu vytvorené orientácie jednotlivých papilárnych línií, čím vzniká pole papilárnych línií, využité v ďalšom procese [29] [6].



Obr. 2.7: Model tvaru odtlačku prsta a ukážky rôznych získateľných tvarov. Prevzaté z [29].



Obr. 2.8: Pole papilárnych línií (napravo) vzniknuté z počiatkovej pozície trojuholníkom označenej delty a kruhom označeného jadra (vľavo). Prevzaté z [1].

Frekvencia papilárnych línií v rámci reálnych odtlačkov prsta nie je konzistentná. Štúdiom reálnych odtlačkov sa zistilo, že tieto nekonzistentnosti nie sú náhodné, ale súvisia s pozíciou singularít - frekvencia papilárnych línií nad najvyšším jadrom a pod najspodnejšou deltou klesá [1]. Frekvencia papilárnych línií sa teda generuje na základe heuristických pravidiel odvodených od týchto poznatkov (obrázok 2.9) [29].



Obr. 2.9: Príklady rôznych frekvencií v rámci plochy odtlačku - svetlé plochy predstavujú vyššie frekvencie, tmavšie nižšie. Prevzaté z: [29].

Prvým krokom finálnej časti procesu, generovania vzoru papilárnych línií, je v rámci metódy SFinGe náhodné umiestnenie niekoľkých čiernych bodov, ktoré sú počiatkovým bodom generovania komplikovaného vzoru papilárnych línií. Iteratívnou aplikáciou Gáborovho filtra upraveného v závislosti od mapy orientácií a mapy frekvencií sa postupne tvorí

požadovaný vzor, vrátane náhodne generovaných markantov na náhodných pozíciách. To demonštruje obrázok 2.10. Výstupom tohto procesu je tzv. **hlavný odtlačok prsta**, z ktorého možno vygenerovať odvodené [29].



Obr. 2.10: Ukážka tvorby markantu počas splynutia dvoch regiónov tvorených z dvoch rôznych počiatočných bodov. Prevzaté z: [29].

Kapitola 3

Snímanie a spracovanie odtlačkov prstov

V daktyloskopickej praxi sa využívajú tri druhy odtlačkov prstov, ktoré sa líšia nielen vzhľadom a umiestnením, ale aj spôsobom snímania. Jedná sa o [14] [21] [34]:

- **váľaný** (alebo farbený či roľovaný),
- **pichaný** (alebo živý),
- **latentný** (skrytý).



Obr. 3.1: Tri typy odtlačku rovnakého prsta (z ľava na pravo) - váľaný, pichaný a latentný. Prevzaté z: [21].

Všetky tri typy zachytáva obrázok 3.1. Váľané odtlačky prstov sú získavané váľaním prstu zo strany na stranu tak, aby bol zachytený celý priestor bruška od nechtu k nechtu. Pichané odtlačky sa zasa vyhotovujú jednoduchým pritlačením povrchu prsta bez váľania — v porovnaní s váľaným odtlačkom je zachytená len menšia časť bruška, avšak odtlačok vykazuje menšiu mieru skreslenia, ktoré v predošlom type kvôli váľavému pohybu prsta vzniká [21] [34].

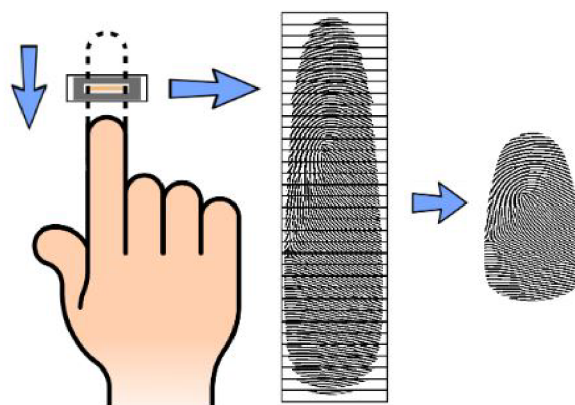
Oba tieto typy sú zvyčajne získavané odtlačkom atramentu alebo nasnímané senzorom za plnej spoluúčasti vlastníka týchto odtlačkov, obyčajne teda bývajú kvalitné a nesú množstvo informácií. Určitým opakom sú latentné odtlačky prstov, ktoré sú získavané z povrchov alebo objektov, ktorých sa osoba často nevedomky dotkne. Ich typické využitie je vo forenzej vede, kedy sa latentné odtlačky zanechané na mieste činu používajú k identifikácii páchatela [21].

3.1 Technológie snímania odtlačkov prstov

Tradičnou daktyloskopickou metódou získania odtlačku prsta je využitie atramentu, odtlačenie prsta na papierovú kartu a naskenovanie odtlačku – v dnešnej dobe sa však už tento postup až na výnimky (digitalizácia starších databáz uchovávajúcich odtlačky na papieri, získavanie odtlačkov z miesta činu...) nepoužíva a bol nahradený modernejšími, digitálnymi systémami.

Snímače odtlačkov prsta možno rozdeliť do troch kategórií: **dotykové, bezkontaktné a prietahové** senzory [27]. Najprístupnejší laickému užívateľovi je **dotykový** senzor – jeho použitie spočíva v jednoduchom priložení prsta na snímaciu plochu. Najväčším problémom pri použití je zlá rotácia prsta – už 20° pootočením môže spôsobiť zlyhanie rozpoznávacieho algoritmu. Užívateľ tiež nemusí správne odhadnúť plochu senzora a priložiť jadro odtlačku prsta k okraju plochy alebo za jej hranice [27]. Ďalší problém predstavuje zanechávanie latentných odtlačkov či zašpinenie plochy senzora pri snímaní.

Vyššie spomenované problémy dotykových senzorov sa podarilo čiastočne eliminovať **prietahovými** senzormi. Tieto snímače majú plochu širokú ako ľudský prst, avšak výšku len niekoľko pixelov. Samotné snímanie prebieha vertikálnym posúvaním prsta po ploche snímača, ktorý postupne zachytáva čiastkové snímky a z tých rekonštruuje finálny odtlačok prsta (obrázok 3.2) [11]. Menšia snímacia plocha značne znižuje aj cenu tohto senzora. Pohyb prsta pri snímaní navyše zotrie latentné odtlačky zanechané predošlým pohybom, k dispozícii zostane len ich časť [27]. Použitie tohto senzora so sebou však prináša nové problémy - v prvom rade komplikovanejší proces snímania, kde náhla zmena rýchlosti tiahnutia prsta či medzera môže zdeformovať finálny odtlačok [11].



Obr. 3.2: Princíp fungovania prietahového snímača. Prevzaté z: [27].

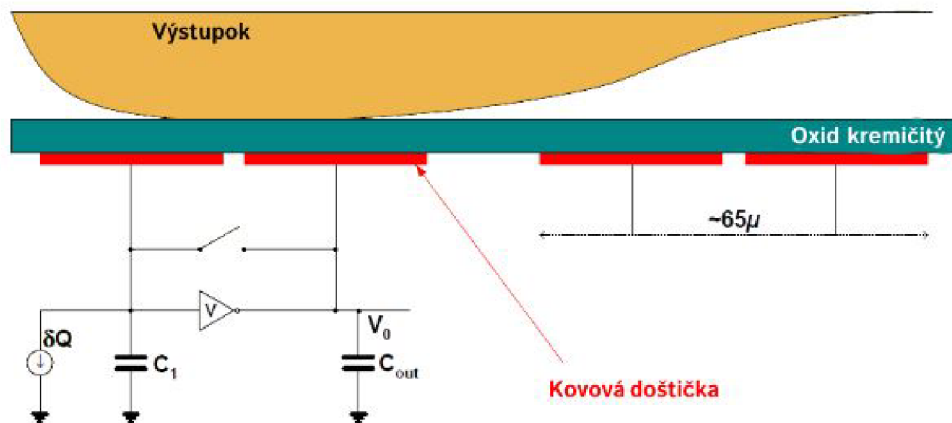
Bezkontaktné senzory efektívne riešia problém zašpinenia povrchu snímača a latentných odtlačkov už len skutočnosťou, že k vyhotoveniu snímku nie je nutné odtlačok prsta

prikladať k žiadnej ploche, keďže snímanie papilárnych línií prebieha bezkontaktné. Takéto zariadenie je však vďaka väčšej komplikovanosti drahšie a pre užívateľa môže byť správne polohovanie prsta v trojdimenzionálnom priestore náročné [27]. V súčasnosti rozlišujeme nasledujúce typy senzorov: *optické*, *kapacitné*, *ultrazvukové*, *e-field*, *tlakové* a *termické* [14], pričom nižšie sú popísané najvyužívanejšie z nich.

3.1.1 Kapacitná technológia

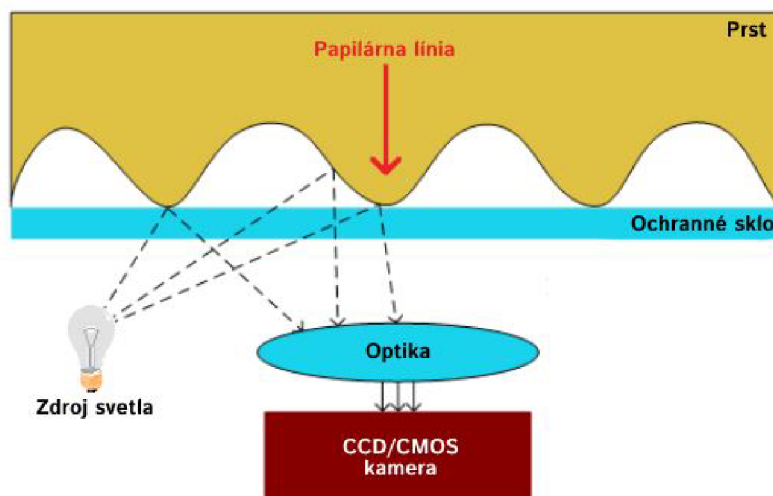
Základom tejto technológie je senzor zložený z matice malých vodivých plošiek, na ktorých je naparená vrstva nevodivého oxidu kremičitého (obrázok 3.3). Priložením prsta k ploškam vzniknú kondenzátory, ktorých jednou elektródou je papilárna línia v mieste styku so senzorom a druhou ploška samotná. Výstupom je hodnota odpovedajúca prekryvu plochy plôšky [14].

Kapacitné technológie sa dlho radili k najpoužívanejším a bežný užívateľ sa s nimi mohol stretnúť v rôznych formách, od relatívne nepohodlných a chybových tenkých prietahových snímačov, ktoré boli z dôvodu nižšej ceny integrované na starých prenosných počítačoch, po rýchle a spoľahlivé snímače zasadené do domovského tlačidla, ktoré dlho predstavovali primárny spôsob integrácie snímača do mobilných telefónov [40]. Kapacitné snímače však nemožno integrovať pod povrch displayu mobilného telefónu, z toho dôvodu sa výrobcovia v súčasnosti zamieravajú aj na iné riešenia.



Obr. 3.3: Princíp fungovania kapacitného snímača. Prevzaté a upravené z: [27].

3.1.2 Optická technológia

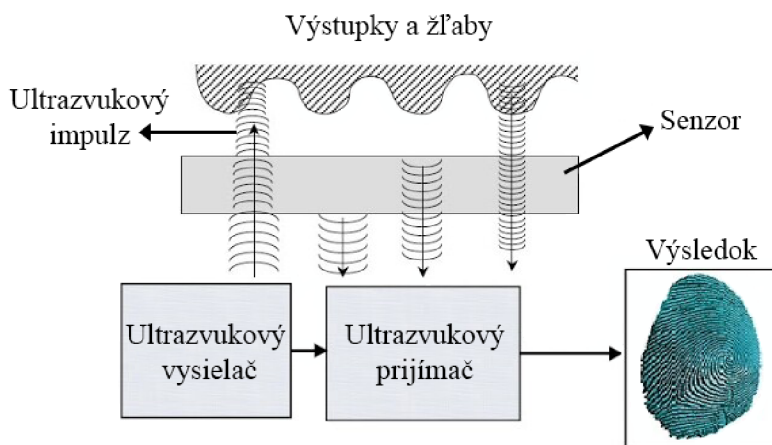


Obr. 3.4: Princíp fungovania optického snímača. Prevzaté a upravené z: [27].

Princíp technológie spočíva v priložení prsta na sklenenú plochu senzora, pričom výstupky sa dostanú do kontaktu so sklom. Následne je vyprodukovaný lúč svetla, ktorý sa od výstupkov odrazí, zatiaľ čo žľaby ho pohltia (obrázok 3.4). K tomuto snímaču existuje aj bezkontaktná alternatíva.

Schopnosť integrovať optické snímače pod displej mobilného telefónu v tomto odvetví čiastočne vytlačila kapacitné technológie. Väčšina snímačov prstov moderných mobilných telefónov vyššej cenovej kategórie tak spadá do tejto kategórie [18].

3.1.3 Ultrazvuková technológia

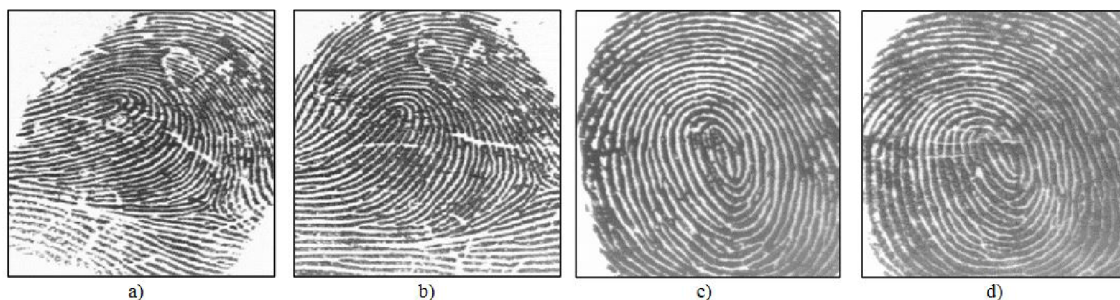


Obr. 3.5: Princíp fungovania ultrazvukového snímača. Prevzaté a upravené z: [17].

Štandardné ultrazvukové technológie fungujú na princípe vysielača, ktorý rotuje okolo prsta a vysiela ultrazvukové vlny (obrázok 3.5). Tie sú následne zachytávané prijímačom. Pokožka výstupkov a vzduch v oblasti žlabov majú rozdielny akustický odpor, čo vedie na rozdiely v odraze a difrakciu ultrazvukových vln [11]. Ultrazvukové vlny prenikajú aj pod povrch prsta, táto technológia teda dokáže odhaliť falošné prsty [14]. Navyše je menej citlivá na zašpinené, vlhké, masťné prsty či mierne poškodenia bruška samotného. V minulosti predstavovala hlavnú nevýhodu využitia týchto zariadení predovšetkým cena a veľké rozmery, avšak pokrok vo vývoji mobilných zariadení umožnil integráciu týchto snímačov pod displej mobilných telefónov a zníženie ich výrobných nákladov [18]. V porovnaní s konkurenčnou optickou technológiou sa jedná o užívateľsky prívetivejšiu a bezpečnejšiu alternatívu, dá sa teda očakávať jej rozmach.

3.2 Postup spracovania a rozpoznávania odtlačkov prstov

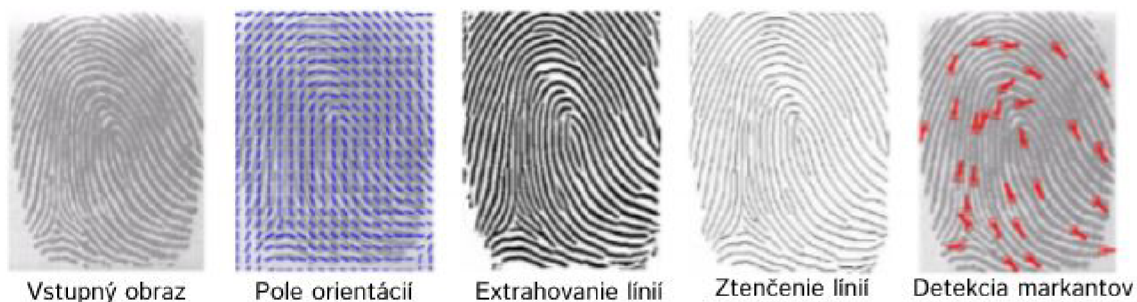
Proces porovnávania dvoch odtlačkov prstov je náročný vďaka vysokej vnútrotriednej variabilite (variabilite v rámci odtlačkov rovnakého prsta) spôsobenej priložením rozličnej časti prsta, rozličným pootočením prsta, rozličným tlakom, šumom senzora a iným. Dve rôzne snímky rôznych prstov sa môžu javiť relatívne podobne, zatiaľ čo rozličné snímky rovnakého prstu podobne pôsobiť nemusia [29]. To demonštruje obrázok 3.6.



Obr. 3.6: Snímky a) a b) pôsobia rozlične aj napriek tomu, že sa jedná o rovnaký prst, zatiaľ čo snímky c) a d) zachytávajú iný prst, no aj napriek tomu sú si relatívne podobné. Prevzaté a upravené z: [29].

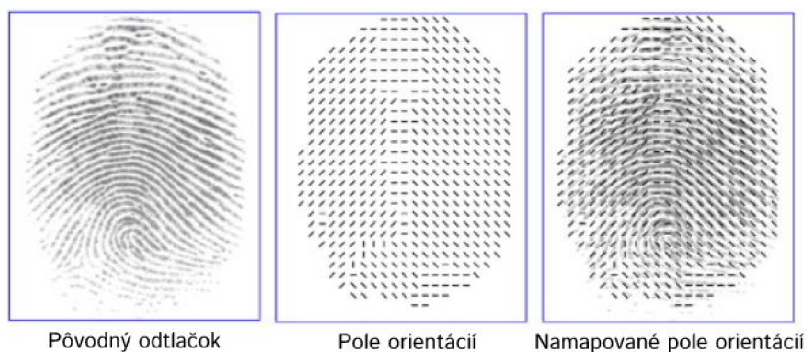
Existuje viacero možných prístupov k porovnávaniu odtlačkov prstov, no najpoužívanejšie je porovnanie založené na markantoch - jedná sa o najbežnejší spôsob porovnávania aplikovateľný na všetky druhy odtlačkov prstov. Spočíva v extrakcii ukončení a vidličiek a ich párovaní so vzorovým odtlačkom. Markanty a ich typy sú bližšie špecifikované v kapitole 2.3 [7] [29]. Výsledkom porovnávania je skóre, ktoré udáva podobnosť dvoch odtlačkov. Na toto skóre je následne aplikovaný prah, ktorý určí, či možno porovnávané odtlačky prstov považovať za zhodné. Nasledujúci úsek predstavuje popis procesu spracovania a vyhodnocovania odtlačku v prípade porovnávania na základe markantov.

Kompletný proces spracovania odtlačkov prsta je zachytený na obrázku 3.7. **Získanie obrazu** odtlačku prsta je prvým krokom spracovania snímok odtlačkov prsta a je bližšie popísaný v sekcii 3.1. Pomocou neho sa získa popis papilárnych línií, ktorý je kľúčový pre ďalšie spracovanie. Vo vstupnom obraze je však obsiahnuté veľké množstvo šumu, čo vyžaduje následnú úpravu. Je tiež nutné dbať na vplyvy ako znečistenie povrchu prstu, poranenia, choroby atď. Sensory niekedy kontrolujú aj živosť odtlačku prstov (či nebol nasnímaný falošný odtlačok) [14].



Obr. 3.7: Postup spracovania odtlačku prsta. Prevzaté a upravené z: [14].

V každom bode obrazu sa vypočíta smer papilárnych línií z okolia podľa tónu šedej farby (obrázok 3.8). Pokiaľ sa bod nachádza priamo na papilárnej línií, s veľkou pravdepodobnosťou určuje jej smer. Vypočíta sa **pole orientácií** pre každý bod obrazu, vytvorí sa blokované pole orientácií a to je následne namapované na pôvodný odtlačok prsta [14].



Obr. 3.8: Postup vytvorenia a mapovania poľa orientácií. Prevzaté a upravené z: [24].

Ďalším krokom je **extrakcia papilárnych línií**. Úprava obrazu a binarizácia vyústi v čiernobiely papilárne línie. Následne dochádza k filtrovaniu pomocou rôznych filtrov v závislosti od domény filtrovania a prahovaniu (využitá je mimo iného schéma Regional Average Thresholding) [14].

Výsledkom vyššie uvedených postupov je čiernobiely obrázok papilárnych línií, ktoré majú rozličnú hrúbku. Cieľom nasledujúcich úprav je **stenčenie papilárnych línií**, a to konkrétne zjednotenie hrúbky na úroveň jedného bodu, na čo sa používa rada jednoduchých algoritmov – napr. metóda Emyroglu. Papilárne línie však nesmú ubúdať v žiadnom smere, aby nedošlo k problémom s polohou markantov [14].

Posledným krokom je **detekcia a extrakcia markantov**. Využíva sa predovšetkým Hongova metóda. Detekujú sa dva základné typy markantov, ukončenie a vidlička, pričom ku každému markantu sa ukladajú nasledujúce informácie: jeho pozícia (súradnica x, y), typ a gradient (orientácia papilárnej línie) [14].

3.3 Faktory ovplyvňujúce kvalitu odtlačku prsta

Získanie obrazu odtlačku prsta je kľúčovým bodom vyššie procesu spracovania a rozoznávania prsta – pokiaľ je obraz nedostatočnej kvality, pravdepodobnosť, že tento proces dospeje

ku korektnému rozhodnutiu, sa znižuje – naopak sa zvyšuje pravdepodobnosť, že dôjde k falošnému odmietnutiu skutočného používateľa, alebo, naopak, falošnému prijatiu „podvodníka“ [11]. Obrázok 3.9 demonštruje variáciu kvality odtlačkov prstov.

Na kvalite výsledného snímku sa najvýraznejšie podieľajú snímače, ktoré vyhotovili obraz odtlačku prsta. Na ich presnosť vplýva [11]:

- **Rozlíšenie** - pohybuje sa medzi 250 DPI (*Dots Per Inch* - počet bodov na palec) až 1000 DPI.
- **Snímacia plocha** - menšia snímacia plocha zníži veľkosť a cenu snímania odtlačkov, no môže viesť k falošnému odmietnutiu snímky. Plocha snímania súčasných senzorov sa pohybuje od $0,7 \times 0,7$ do 10×6 cm (rolované odtlačky prstov či skenovanie viacerých prstov súčasne).
- **Počet bitov** - počet bitov pre zakódovanie farby pixelu – štandardom je 8, ale niektoré senzory používajú iba 2 či 3.
- **Geometrická presnosť** - geometrické skreslenie obrazu oproti skutočnosti, vyjadrené ako percento pre x a y osi.
- **Kvalita obrazu** - zložitá na jednoznačné určenie, vyjadrujú ju rôzne metriky.



Obr. 3.9: Ukážky odtlačkov prstov rôznych kvalít. Prevzaté z: [30].

3.3.1 Vplyv prostredia

Významný vplyv na odtlačok prsta má prostredie, v ktorom bol odtlačok prsta vyhotovený. Určité okolité vplyvy môžu predstavovať problém pre určitý typ senzora v závislosti od snímacej technológie, vo všeobecnosti za škodlivé vplyvy považujeme nasledujúce vymenované faktory [11].

Okolité svetlo je problematické najmä pri použití senzora na báze optickej či elektro-optickej technológie, pretože na získavanie odtlačku sa používa svetlo-citlivá jednotka, ktorá je citlivá aj na svetlo prichádzajúce z okolia. To býva problémom hlavne pri zariadeniach, ktoré skenujú viac ako jeden prst, váľaných odtlačkoch alebo bezkontaktných senzoroch – oblasť snímania, cez ktorú môže okolité svetlo preniknúť až k svetlo-citlivej jednotke, je väčšia ako v prípade klasických optických senzorov, kde má rovnakú veľkosť ako snímaný prst.

Elektro-magnetická radiácia neovplyvňuje iba senzor, ale aj všetky elektronické komponenty či káble snímača. Vplyv elektro-magnetickej radácie je úmerný intenzite elektro-magnetického poľa.

Vibrácie síce nepredstavujú priame poškodenie pre biometrický systém samotný (mimo krajných situácií, kedy môžu povoliť určité interné komponenty), no vibrovanie v procese snímania často spôsobí mierny posuv pozície prsta po povrchu snímača a následné rozmazanie obrazu.

Teplota za normálnych okolností na kvalitu odtlačku neovplyvňuje (s výnimkou termálnych senzorov), zmeny teploty počas vyhotovenia snímku nemajú na výsledný obraz žiaden efekt. Problematické ale môže byť použitie biometrického zariadenia v extrémnych podmienkach pri príliš vysokých alebo nízkych teplotách – to zavádza chyby aj do technológií, ktoré klasické výkyvy teplôt bežne neovplyvňujú – napr. spoľahlivosť ultrasonickéj technológie sa pri príliš nízkych teplotách znižuje.

3.3.2 Vplyv snímania a senzoru

Nasledujúce poškodenia sú kolekciami faktorov, ktoré súvisia s nesprávnym použitím senzoru alebo stavom samotného senzoru [11]. **Príliš suché alebo vlhké prsty** vedú k nejednoznačným papilárnym líniám (obrázok 3.10 – odtiene šedej vyvýšení a žliabkov papilárných línií splývajú), alebo k prekrývajúcim sa vyvýšeninám.



Obr. 3.10: Vlhký prst (naľavo) a príliš suchý prst (napravo). Prevzaté z: [30].

Zmena **tlaku** (obrázok 3.11) počas skenovania odtlačku môže spôsobiť zmenu hrúbky papilárných línií a tým viesť k nesprávnej extrakcii markantov, príliš silný tlak môže navyše senzor poškodiť.



Obr. 3.11: Vplyv tlaku na odtlačok prsta. Prevzaté z: [27].

Špina na povrchu senzora je jedným z najčastejších poškodení výslednej snímky. Pojem špina zahŕňa celú škálu poškodení vrátane prachu, hliny, atramentu, tukov, piesku, vlasov, tekutín atď. Na obrázku 3.12 je znázornený vlas. Môže sa jednať o nechcené zanesenie senzora, ale aj o vedomé poškodenie nespokupracujúcimi používateľmi. Veľké čiastočky na bruškách prstov sú problémom pre väčšinu typov sensorov, vodivé materiály alebo tekutiny zasa môžu poškodiť určité typy sensorov (napr. kapacitné).



Obr. 3.12: Vlas na povrchu snímača. Prevzaté z: [27].

Fyzické poškodenie senzora je vedomé poškodenie nekooperujúcimi užívateľmi, ktorí sa snažia biometrický systém vyradiť poškodením snímacej jednotky. Takémuto chovaniu je ťažké predchádzať, keďže využité technológie neodolávajú priamym útokom. Niektoré typy systémov (na optickej či ultrazvukovej báze) sú dostupné v robustnejších, na vandalizmus odolnejšej verzii.

Latentné odtlačky sú pozostatky priloženia bruška prstu k povrchu senzora. Mimo iného predstavujú aj bezpečnostné riziko - latentné odtlačky prstov zanechané na povrchu môžu byť ľahko zneužitú na výrobu umelého odtlačku prsta. Technológie ako optická či kapacitná je možné pomocou latentného odtlačku reaktivovať.

Nekooperácia užívateľov zahŕňa celú škálu chovaní, ktorým sa používateľ snaží zmiašť alebo zničiť senzor –priloženie nesprávnych prstov alebo správnych prstov pod nesprávnym uhlom, priloženie špinavého prstu či úmyselné poškodenie zariadenia.

3.3.3 Poškodenia bruška prsta



Obr. 3.13: Prejav vrások na povrchu bruška prsta. Prevzaté z: [44].

Nasledujúci úsek priblíži súvis povrchových poškodení bruška prstu (dočasných aj trvalých) na výslednú kvalitu odtlačku. Veľmi časté poškodenie predstavujú **ryhy** na povrchu bruška prsta. Tento pojem zahŕňa vrásky a iné ryhové útvary, ktoré sa prejavujú ako pásy, ktoré najčastejšie kolmo pretínajú papilárne línie. Tieto línie môžu byť permanentné (v dôsledku genetiky či starnutia) alebo len dočasné (napr. ako dôsledok manuálnej práce či popraskania kože) [28]. Ryhy často poškodzujú markanty, alebo ich rozpoznávajúce algoritmy vyhodnotia ako falošný markant. Porovnávanie založené na markantoch preto dosahuje pri starších ľuďoch, ktorých prsty prirodzene obsahujú viac rýh v podobe vrások, horšie výsledky [44]. Prejav záhybov na povrchu prsta znázorňuje obrázok 3.3.3.

Ďalším poškodením narušujúcim papilárne línie sú **zranenia a alterácie** rôzneho typu. Podobné zranenia môžu byť spôsobené náhodou, no vyskytujú sa prípady, kedy človek zranením či chirurgicky zámerne naruší povrch prsta za účelom vyhnutia sa identifikácii. Úmyselné alterácie [16] [37] delí do troch primárnych kategórií (obrázok 3.14) :

- **Znehodnotenie** - vzor papilárnych línií na povrchu bruška prsta je zničený aplikovaním chemikálií, spálením, rozsiahlym poranením a pod.
- **Skreslenie** - prirodzený vzor papilárnych línií je alterovaný chirurgickou procedúrou, kedy je časť kože odstránená a navrátená v novej polohe.
- **Imitácia** - na povrch bruška prsta je chirurgicky transplantovaná koža iného prsta či inej časti tela (dlane, prsty na nohách) takým spôsobom, že implantovaná koža pôsobí prirodzene.



Obr. 3.14: Prehľad alterácií (zľava doprava): znehodnotenie, skreslenie, imitácia. Prevzaté z: [16].

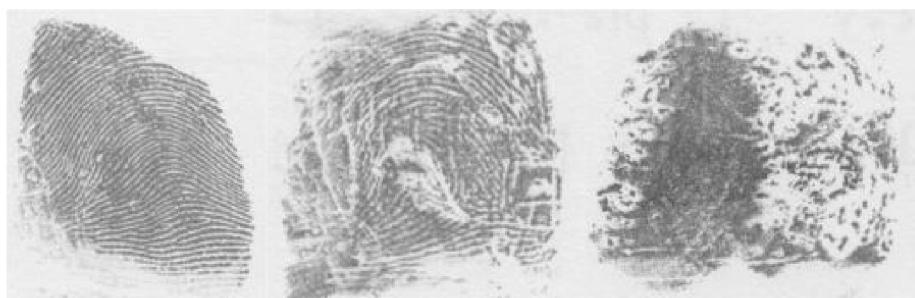
Ďalšou kategóriou poškodenia, ktoré je v praxi často zanedbávané, sú **kožné ochorenia**. Nejedná sa o ojedinelý jav – lekárska prax uvádza, že s kožnými problémami sa potýka 20 až 25 % pacientov, pričom časť týchto poškodení presahuje aj na povrch odtlačkov prsta. Problémy pritom môžu pretrvať aj po prekonaní tejto choroby – pokiaľ choroba napadla *epidermis* a *dermis*, papilárne línie sa nemusia obnoviť vôbec, alebo zostanú navždy zmenené [13]. Ochorenia kože je možné rozdeliť do troch kategórií [11]:

- **ochorenia postihujúce výhradne papilárne línie,**
- **ochorenia postihujúce výhradne farbu kože,**
- **ochorenia postihujúce papilárne línie aj farbu kože.**

Vplyvy chorôb postihujúcich bruško prsta bližšie skúma publikácia [13]. Tá zistila, že zatiaľ čo choroby postihujúce výhradne farbu kože predstavujú problém len pre niektoré druhy optických skenerov, zvyšné dve kategórie menia štruktúru papilárnych línií, čo vedie k nemožnosti extrahovať korektné markanty.

Niektoré choroby sú iba dočasné a po ich prekonaní sa pôvodná farba a štruktúra papilárnych línií navráti. Časť chorôb však spôsobuje nenávratné poškodenia - pokiaľ boli papilárne línie zmenené, je nemožné nasnímať pôvodné papilárne línie a tým správne určiť identitu používateľa.

To platí pre všetky typy senzorov – iba ultrasonické vlny technológie založenej na ultrasonickom princípe dokážu preniknúť vrchnou vrstvou pokožky k zakriveniam formujúcim papilárne línie a zachytiť ich štruktúru, no aj to len za predpokladu, že choroba túto vrstvu nepoškodila [11]. Obrázok 3.15 zachytáva brušká poškodené psoriózou a demonštruje závažnosť vplyvu niektorých kožných ochorení na papilárne línie.



Obr. 3.15: Ukážka ochorením (psoriózou) poškodeného odtlačku prsta. Prevzaté z: [26].

3.4 Simulácia poškodení odtlačkov prstov

Kapitola 2.4 popisuje motiváciu a spôsob generovania syntetického odtlačku prsta metódou generátoru SFinGe. Výstupom procesu je tzv. **hlavný** odtlačok prsta s nepoškodenými a neskreslenými papilárnymi líniami. To však nedostatočne reflektuje okolitý svet - v tom sú rôzne odtlačky rovnakého prsta čiastočne skreslené a zakaždým odlišné. To nazývame vnútrotriednou variabilitou, ktorá vzniká najmä vďaka [29] [6]:

- rozličným miestam priloženia prsta v rámci plochy senzora a variabilnej rotácii prstu,
- rozličnej časti prstu priloženej k senzoru,
- skresleniu odtlačku spôsobeným pritlačením prsta o povrch senzora,
- variácii v hrúbke papilárnych línií v závislosti od vlhkosti kože,
- drobným rankám, odreninám a iným narušeniam na povrchu prsta,
- šumu na pozadí.

Kapitola 3.3 zároveň spomína ďalšie faktory, ktoré ovplyvňujú výsledný odtlačok prsta, ako faktory okolitého prostredia či poškodenia bruška prsta (zranenia, kožné choroby atď.). Simulácie rôznych druhov poškodení teda možno zhrnúť do dvoch primárnych kategórií - **simulácie poškodení za účelom tvorby realistickejšieho syntetického odtlačku** a **simulácie za účelom vytvorenia konkrétneho, vzácnejšieho poškodenia**.

3.4.1 Simulácia poškodení za účelom tvorby realistickejšieho odtlačku

S ohľadom na vysokú mieru vnútrotriednej variability odtlačkov rovnakého prsta generátory syntetických odtlačkov z hlavného odtlačku prsta (2.4) ďalej generujú tzv. **odvodené**. Generátor SFinGe podrobí hlavný odtlačok nasledujúcim zmenám (v sekvenčnom poradí) [29] [6]:

- definícia kontaktnej plochy odtlačku so senzorom,
- variácia hrúbky papilárnych línií,
- skreslenie,
- perturbácia,
- globálny posuv/otočenie,
- generovanie pozadia.



Obr. 3.16: Vysoko kvalitný hlavný odtlačok prsta (naľavo) a realistickejší odtlačok vytvorený aplikáciou šumu a poškodení (napravo). Prevzaté z: [6] a upravené.

Vlhkosť pokožky aj tlak prsta na snímač sa navonok prejavujú podobne – v miestach suchej pokožky a mierneho tlaku sa papilárne línie javia tenšie, zatiaľ čo v prípade vyššej vlhkosti a vyššieho tlaku pôsobia hrubšie. Aj to sú dôvody, prečo je nutné alterovať hrúbku papilárnych línií. Tieto efekty sa simulujú pomocou morfológických operácií dilatácie a erózie.

Ďalším dôležitým krokom je simulácia plasticity kože a jej pokrčenia či natiahnutia v závislosti od spôsobu priloženia prstu k senzoru a rôzne pôsobenie síl na rôzne časti prstu. Na simulovanie týchto deformít sa využíva Lagrangeova interpolácia. Globálny posuv a rotácia zasa simuluje skutočnosť, že prst je k senzoru prikladaný rôznym spôsobom a nebýva vždy vycentrovaný. Fáza perturbácie predstavuje separáciu a samostatné uloženie bielych pixelov, ktoré v obrázku predstavujú žliabky. Následne je vygenerovaný šum v podobe bielych artefaktov rôznych veľkostí a tvarov, simulujúci menšie poškodenia znehodnocujúce odtlačok prsta. Odtlačok je vyhladený filtermi a separované žliabky sú navrátené späť [27].

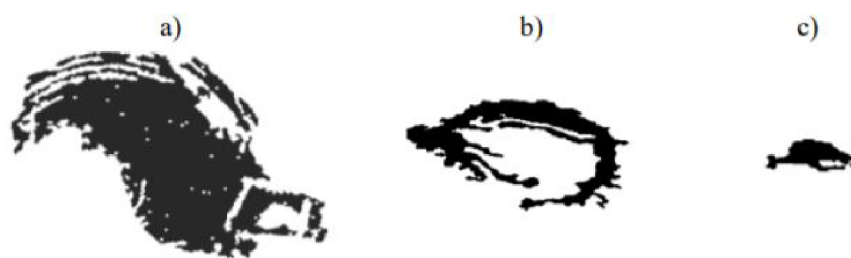
Výstupom týchto krokov je relatívne realisticky pôsobiaci odtlačok prsta, jeho pozadie je však stále biele. Pre simuláciu pozadia podobného takému, aké by sme získali snímaním reálneho odtlačku prsta, sa využíva matematická metóda založená na KL (Karhunen-Loeve) transformácii, ktorá z tréningového setu obrázkov pozadia vygeneruje syntetickému odtlačku prsta nové pozadie [29] [27]. Rozdiely medzi hlavným odtlačkom a odvodeným odtlačkom, na ktorý boli vyššie uvedené kroky aplikované, demonštruje obrázok 3.16.

3.4.2 Simulácia konkrétnych poškodení

Kapitola 3.3 predstavuje celú radu faktorov, ktoré ovplyvňujú výslednú kvalitu získaného odtlačku prsta. Zistiť, ako sa konkrétne poškodenie prejavuje v reálnom odtlačku prsta, nie je jednoduché - databázy vytvorené na tréning rozpoznávacích algoritmov takto poškodené odtlačky väčšinou neobsahujú. Pokiaľ je podobný odtlačok prsta v rámci procesu získavania odtlačkov nasnímaný, býva odmietnutý ako zle naskenovaný a z databázy vyradený [27].

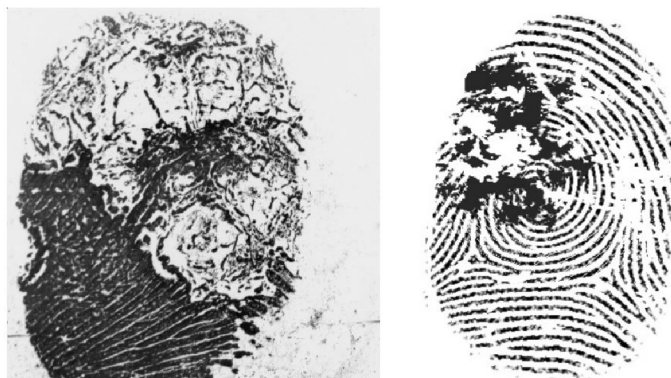
Algoritmy spracovávajúce a rozoznávajúce odtlačky prstov často nie sú schopné poškodený odtlačok prsta správne vyhodnotiť a užívateľovi je využitie biometrického systému odopreté. To predstavuje závažný problém. Napr. proces žiadania o víz pre vstup do krajiny často sprevádza získavanie odtlačkov prsta. Pokiaľ má však žiadateľ odtlačky prsta poškodené chorobou a systém ich neprijme, hrozí, že jeho žiadosť bude odmietnutá len kvôli nemožnosti prejsť procesom získania a vyhodnotenia odtlačkov. Je preto žiaduce, aby si vyhodnocovací proces vedel poradiť aj s poškodeným odtlačkom. V súčasnej dobe ale neexistujú dostatočne veľké databázy odtlačkov prstov postihnutých špecifickým poškodením, čo vedie na nemožnosť natréňovať tieto algoritmy na korektné spracovanie konkrétnych poškodení [3].

Určitým riešením tohto problému je simulovanie konkrétnych poškodení do odtlačkov prsta. Ukážkou simulácie konkrétneho poškodenia do odtlačkov prsta je napr. [26], ktorá demonštruje proces simulácie kožného ochorenia psoriózy. Popisovaná aplikácia z reálnych snímok poškodenia zdetekuje a extrahuje konkrétne artefakty, predstavujúce rôzne typy poškodenia (ilustrované obrázkom 3.17). Tie sú následne vložené do syntetického odtlačku prsta. Výsledné poškodenie je zobrazené na obrázku 3.18.

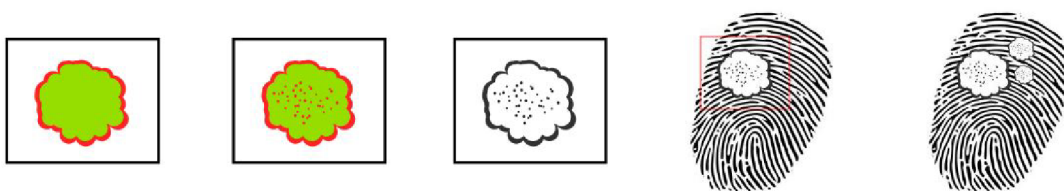


Obr. 3.17: Artefakty generované v rámci simulácie poškodenia psoriózou: a) čierne, b) veľké biele a c) malé biele subjekty. Prevzaté z: [26].

Ukážkou ďalšej publikácie, ktorá sa venuje generovaniu syntetického poškodenia do odtlačkov prstov, je [3]. Autor prejavy poškodenia nenačítal z už existujúcich snímok poškodení, ale vytvoril algoritmy, ktorý za využitia grafických metód poškodenie hodnoverne simulujú. V publikácii sa venuje simulácii bradavíc a atopického ekzému, pričom kroky simulácie bradavice demonštruje obrázok 3.19.



Obr. 3.18: Odtlačok prsta poškodeného psoriózou na daktyloskopickej karte (vľavo) a prejav psoriózy simulovaný do hlavného odtlačku prsta (vpravo). Prevzaté z: [26].



Obr. 3.19: Generovanie syntetickej bradavice za využitia vykreslenia poškodenia pomocou grafických metód. Obrázok bol prevzatý a upravený z [3].



Obr. 3.20: Syntetické odtlačky postihnuté atopickým ekzémom vygenerované pomocou GAN - reálne snímky použité na trénovanie modelu (vľavo) a vygenerované (vpravo). Obrázok prevzatý z [2].

Ďalším z možných prístupov je využitie na generovanie syntetických odtlačkov GAN (*generative adversarial network* alebo generatívna kontradiktórna sieť). Tá je využitá v publikácii [37] na generovanie syntetických alterovaných odtlačkov. Možnosť generovania odtlačkov poškodených kožnými chorobami bola skúmaná aj v práci [2], kde bol model natrénovaný na generovanie celých odtlačkov (vrátane štruktúry papilárnych línií) poškodených chorobami atopický ekzém, psoriáza a dyshidrotický ekzém. Jedným z výsledkov tohto procesu je obrázok 3.20.

Hoci metódy simulácie poškodení založené na extrakcii prvkov poškodenia z reálnych snímok či natrénovanie GAN na generovanie poškodených odtlačkov majú potenciál byť vierohodnejšie ako poškodenia simulované pomocou grafických metód, sú závislé (najmä v prípade GAN) od databáz reálnych poškodených odtlačkov.

Kapitola 4

Návrh algoritmu na generovanie čiarových poškodení

Kapitola 3.4.2 popisujúca motiváciu simulácie konkrétnych poškodení do odtlačku prstov načrta aj základný problém simulácie týchto poškodení, a to ťažké získavanie referenčných snímok obsahujúcich dané poškodenie. Mnou vybrané poškodenia, ktoré boli zvolené na simuláciu, konkrétne:

- vrásky a iné ryhy,
- vlas či chlp na snímači,
- drobné rezné rany a jazvy,

nie sú zhromaždené v žiadnej verejne prístupnej databáze, ktorá by špecificky obsahovala či aspoň označovala konkrétne poškodenia. Niektoré z týchto poškodení sú na snímkach relatívne bežné (napr. vrásky, ktoré sú prítomné v odtlačkoch starších ľudí), iné sú relatívne vzácne. Značnú časť práce teda tvorilo dohľadávanie ukážok konkrétnych poškodení. Keďže sa často jedná o pomerne obsiahle kategórie (napr. výraz *jazva* zahŕňa celú radu možných poškodení) a konkrétne snímky poškodenia sú často veľmi odlišné, bolo tiež nutné určiť všeobecné charakteristiky poškodení, ktoré sa simulovali. Táto kapitola popisuje analýzu konkrétnych poškodení, jej výsledky a návrh algoritmu, ktorý bude dané prvky simulovať. Všetky mnou nasnímané poškodenia uvedené v neskorších sekciách boli nasnímané optickým snímačom Secugen Hamster Pro 20 Usb HU20-A.

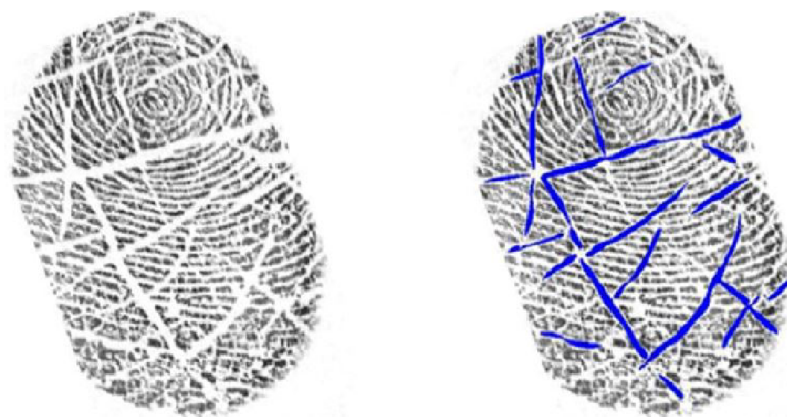
4.1 Vrásky a iné ryhy

Prvým poškodením, ktoré bolo zvolené na simuláciu, boli vrásky. Jedná sa o poškodenie, ktoré je relatívne bežné a často je viditeľné na snímkach odtlačkov starších ľudí - aj napriek tomu ale neexistuje databáza, ktorá by združovala iba odtlačky s vráskami, popr. vrásky akýmkoľvek spôsobom zvýrazňovala či označovala. Dohľadané teda museli byť z iných zdrojov.

4.1.1 Analýza prejavov poškodenia

Základným bodom analýzy vrások boli publikácie, ktoré sa venujú detekcii rýh v odtlačkoch prstov. Medzi tieto publikácie patria: [44], [28], [43]. Žiadna z týchto publikácií sa nevenovala

špecificky vráskam, ale útvaram, ktoré sa anglicky nazývajú *creases*, v približnom preklade *ryhy*. Všeobecná charakteristika týchto rýh je popísaná v kapitole 3.3.3. Publikácia [44] uvádza, že je ťažké odlíšiť vrásky, nachádzajúce sa na prstoch hlavne starých osôb, od napr. rýh vzniknutých v dôsledku popraskania suchej kože, keďže ich prejavy sú často podobné. Sama mám na prstoch ryhovitý tvar, ktoré vzhľadom k môjmu veku nie je vhodné označiť za vrásky, ale v odtlačkoch majú podobný prejav ako spomínané vrásky. Na základe pozorovania jednotlivých ryhovitých útvarov som sa rozhodla, podobne ako všetky spomínané publikácie, medzi jednotlivými subkategóriami záhybov nerozlišovať a pristupovať k nim ako k celku a po vzore publikácií ich označovať *ryhy*. V analýze tvaru rýh boli nápomocné aj ukážky detekcie rýh v spomínaných publikáciách, keďže často obsahovali obrázky s vyznačenými detegovanými ryhami, ktoré zvyrazňovali ich tvar (ako napr. obrázok 4.1).



Obr. 4.1: Odtlačok prstu s veľkým množstvom rýh a ich zvyraznenie po detekcii. Prevzaté z: [28].

Ďalším krokom bola vizuálna analýza jednotlivých snímok a hľadania parametrov generovania tohto poškodenia. Výsledné poškodenie predstavuje rôzne množstvo jednotlivých rýh rôznych orientácií (horizontálna, vertikálna, ale aj diagonálna orientácia), hrúbok a dĺžok. Túto variabilitu zachytáva obrázok 4.2. Rozhodla som sa preto, že interným parametrom každej ryhy bude jej hrúbka (tenká, stredná a hrubá), dĺžka (krátka, stredná a dlhá) a orientácia (horizontálna, vertikálna a diagonálna). Množstvo týchto rýh v jednotlivých poškodeniach je rôzne, ako je demonštrované obrázkom 4.3. Rozhodla som sa preto, že podľa počtu rýh rozdelím poškodenie do troch úrovní (pre užívateľa voliteľná v podobe parametra):

- **Prvá úroveň** - menšie množstvo (2-6) rýh, ktoré budú tenké. Najčastejšia orientácia bude horizontálna, s nižšou pravdepodobnosťou sa budú objavovať vertikálne a s ešte nižšou diagonálne ryhy. Jednotlivé ryhy budú môcť mať dlhú, strednú aj krátku dĺžku.
- **Druhá úroveň** - stredné množstvo (6-12) rýh menšej hrúbky. Vodorovná orientácia bude opäť bežnejšia ako horizontálna či zvislá, dĺžky budú rôzne.
- **Tretia úroveň** - väčšie množstvo (12-20) rýh, v malom množstve sa môžu vyskytovať výraznejšie, hrubšie ryhy či stredne hrubé ryhy a doplnené budú o tenšie. Hoci aj tu budú prevažovať horizontálne ryhy, vertikálne a šikmé budú častejšie.



Obr. 4.2: Rôzne tvary rýh. Prevzaté z: [44].



Obr. 4.3: Rôzne množstvo rýh v analyzovaných obrázkoch. Prevzaté z: [43] [44].

Jednotlivé ryhy majú čiarový charakter, nejedná sa však o rovnú čiaru. Zároveň nemajú jednotnú hrúbku, na rôznych miestach hrubnú a stenčujú sa. Ich okraje taktiež nie sú vizuálne úplne rovné. Všetky tieto fakty bude nutné zahrnúť do výslednej simulácie.

4.1.2 Návrh algoritmu generovania

Základným prvkom poškodenia je ryha. V závislosti na úrovni poškodenia (popísané v sekcii vyššie) sa bude generovať rôzny počet rýh rôznej dĺžky, hrúbky a orientácie, pričom tieto tri parametre budú pred generovaním predom určené. Jednotlivé kroky algoritmu teda boli načrtnuté takto:

1. **Načítanie syntetického odtlačku prsta.**
2. **Detekcia plochy syntetického odtlačku prsta** - samotné poškodenie bude generované práve do tejto plochy.
3. **Určenie počiatočného a koncového bodu ryhy** - náhodne sa zvolí počiatočný bod a na základe požadovanej dĺžky a orientácie čiary aj bod koncový. Vzhľadom

na to, že jednotlivé ryhy často vizuálne začínajú mimo plochy odtlačku prsta, alebo mimo tejto plochy končia (odtlačok presahujú), nie je nutné, aby boli oba body súčasťou plochy syntetického odtlačku. Presahujúce poškodenie sa však do plochy mimo odtlačku nesmie generovať a taktiež sa musí väčšinová časť poškodenia musí v ploche odtlačku nachádzať.

4. **Vytvorenie nepravidelnej čiary reprezentujúcej ryhu** - keďže ryhy nie sú rovné krivky, musí byť vygenerovaný vierohodný tvar, ktorý obsahuje zakrivenia a nepravidelnosti. To bude dosiahnuté vygenerovaním určitého počtu bodov medzi počiatočným a koncovým bodom, vhodným presunutím týchto bodov a následným vykreslením krivky, ktorá prechádza týmito bodmi.
5. **Realistická hrúbka ryhy a jej variácia** - podľa požadovanej hrúbky je vygenerovaná maximálna hrúbka ryhy, ktorá bude vierohodne variovať, aby sa dosiahlo realistického hrubnutia a stenčovania ryhy.
6. **Pridanie šumu okrajom ryhy** - pre dosiahnutie väčšej realismu poškodenia nebudú okraje rýh dokonale rovné, ale bude do nich pridaný šum, ktorý bude simulovať nedokonalosti snímania reálnymi snímačmi.
7. **Vykreslenie získaného poškodenia** - poškodenie bude vykreslené len do plochy odtlačku prsta, detegovanej v kroku 2. Hoci môže poškodenie odtlačok vizuálne presahovať, samotné generovanie ho presahovať nebude.
8. **Uloženie výsledného odtlačku.**

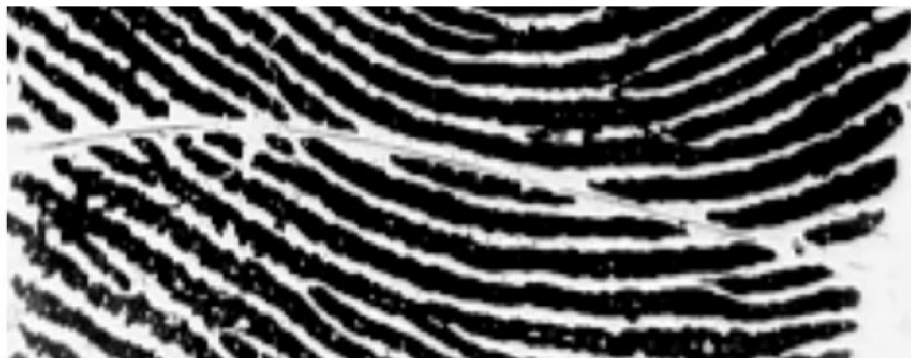
4.2 Vlasy a chlpy na snímači

Ako ďalšie poškodenie som zvolila vlas (popríklad kratší chlpy) na snímači. Keďže ani v tomto prípade neexistuje špecifická databáza, musela som poškodenie nasnímať. Vyhotoviť takto poškodené snímky však bolo relatívne jednoduché, keďže stačilo položiť na senzor vlas (v resp. chlpy).

4.2.1 Analýza prejavov poškodenia

Ako najvýraznejší prvok poškodenia sa ukázala biela krivka - záhyb, ktorý sa vytvorí na mieste, kde sa povrch prsta pritlačí na vlas zachytený medzi bruškom a senzorom. Samotný vlas je však často nezreteľný a niekedy ho ani nevidno - no vo všeobecnosti ho tvorí svetlo šedá, prerušovaná krivka v centre mierne výraznejšieho bieleho záhybu, ako je zachytené na obrázku 4.4. Väčšina vlasov a chlpov má nerovný, zakrivený tvar, najlepšie aproximovaný zahnutou krivkou. Tiež som experimentovala s tým, či vlas, ktorý často presahuje oblasť snímaného bruška prsta, je vidno aj mimo oblasti odtlačku. Na mnou vytvorených snímkach ho ale vidno nebolo, nebol zachytený ani pri snahe ho čo najviac priblížiť k povrchu snímača, bude teda generovaný len do oblasti odtlačku.

Výsledný generátor bude vedieť generovať ako aj vlasy (ktoré rozmermi často presahujú veľkosť odtlačku), tak aj menšie vlasy či chlpy, ktoré sa nachádzajú iba vo vnútri odtlačku. Príklad je zachytený na obrázku 4.5, kde sa presahujúci vlas nachádza vľavo, chlpy vpravo.



Obr. 4.4: Detail vlasu v rámci odtlačku prsta.



Obr. 4.5: Nasnímaný vlas (vľavo) a menší chl p (vpravo).

4.2.2 Návrh algoritmu generovania

Základným grafickým primitívom z dôvodu nerovného tvaru väčšiny vlasov, ktoré majú tendenciu skrúcať sa, bude krivka. Okolo krivky reprezentujúcej vlas vznikne biely záhyb s nerovnomernými okrajmi. Celé poškodenie (vrátane vlasu) bude viditeľné len v ploche odtlačku prsta. Algoritmus simulácie je preto navrhnutý takto:

1. **Načítanie syntetického odtlačku prsta.**
2. **Detekcia plochy syntetického odtlačku prsta** - z mnou vytvorených snímok sa zistilo, že vlas, ktorý síce presahuje plochu odtlačku prstu, nie je mimo odtlačku prstov viditeľný, poškodenie teda bude nagenované len do plochy odtlačku prsta.
3. **Definovanie krivky predstavujúcej vlas** - vlasy (popr. menšie vlasy a chlpy) mali viac či menej zakrivený tvar, žiaden z mnou nasnímaných vlasov nebol dokonale rovný. Vlas teda bude predstavovať krivka zahnutého tvaru, ktorá bude buď celá obsiahnutá v odtlačku, alebo jej začiatok a koniec budú rozmery odtlačku presahovať (v takom prípade sa však krivka mimo oblasť odtlačku nevykreslí)

4. **Určenie viditeľnosti vlasu** - vlasy na niektorých snímkach neboli takmer vôbec viditeľné a aj na tých, kde boli zreteľnejšie, neboli obvykle viditeľné po celej ich dĺžke, ale dochádzalo k rôznym prerušeniam. Krivka teda bude vykreslená vo vhodnej intenzite a bude do nej zakomponovaný aj určitý šum, ktorý čiastočne poškodí viditeľnosť časti vlasu.
5. **Vytvorenie záhubu okolo vlasu** - biely záhyb bude kopírovať tvar krivky, bude však širší a bude mať nepravidelné okraje.
6. **Vykreslenie získaného poškodenia** - podobne ako aj v prípade vrások a iných záhybov, aj toto poškodenie bude vykreslené len do bodom 2 detegovanej plochy syntetického odtlačku prsta.
7. **Uloženie výsledného odtlačku.**

4.3 Rany a jazvy

Jedná sa o kategóriu, ktorá bola najzložitejšia na analýzu, jednak z hľadiska dostupnosti referenčných odtlačkov a jednak z variability jednotlivých typov poškodenia. Oba pojmy zahŕňajú celú radu poškodení rôznych veľkostí, intenzít a tvarov. Napr. pojem *jazva* môže zahŕňať rôzne zranenia od drobného bodného zranenia po zranenie, ktoré osobu pripraví o väčšiu časť bruška prsta. V rozsahu mojej práce sa budem zaoberať iba zraneniami *čiarového* charakteru. Tie sú v oblasti bruška prsta relatívne bežné, najčastejšie bývajú dôsledkom rôznych rezných poranení.

4.3.1 Analýza prejavov poškodenia



Obr. 4.6: Rezná rana. Zdroj: databáza výskumnej skupiny STRaDe

Výskumná skupina STRaDe, ktorá vedie databázu rôznych poškodení na povrchu bruška prsta, mala k dispozícii len dve snímky, ktoré súviseli s reznými ranami, pričom charakteru *čiarového* poškodenia zodpovedala len jedna z nich. Tú je vidno na obrázku 4.6. Jedná sa o relatívne rovnú a úzku čiaru s hákovitým ukončením. Samotné hákovité ukončenie je však špecifické pre toto konkrétne poranenie a nedá sa zahrnúť ako konkrétna charakteristika

jaziev a rezných rán, pre účely simulovania všeobecnej jazvy čiarového charakteru som sa preto zamerala na čiarový úsek daného poškodenia.

Keďže žiaden ďalší referenčný obrázok sa v databáze nenachádzal a jedno rezné poranenie dostatočne nepokryje tak variabilné poškodenie ako *jazva*, referenčné odtlačky museli byť hľadané aj v iných zdrojoch. Voľne dostupnú databázu, ktorá by obsahovala verejne prístupné a označené poškodenia, som nedohľadala. Rôzne publikácie ukážky jaziev často obsahovali, no len ako referenčné obrázky, často veľmi nízkej kvality. Nižšie uvedené poškodenia predstavujú odtlačky, ktoré definovali zaujímavé prvky, charakteristické pre jazvy, ktoré som sa rozhodla obsiahnuť v simulácii poškodenia.



Obr. 4.7: Odtlačky s rôznymi tvarmi jaziev (v nižšej kvalite). Zdroj: [19] a [37]

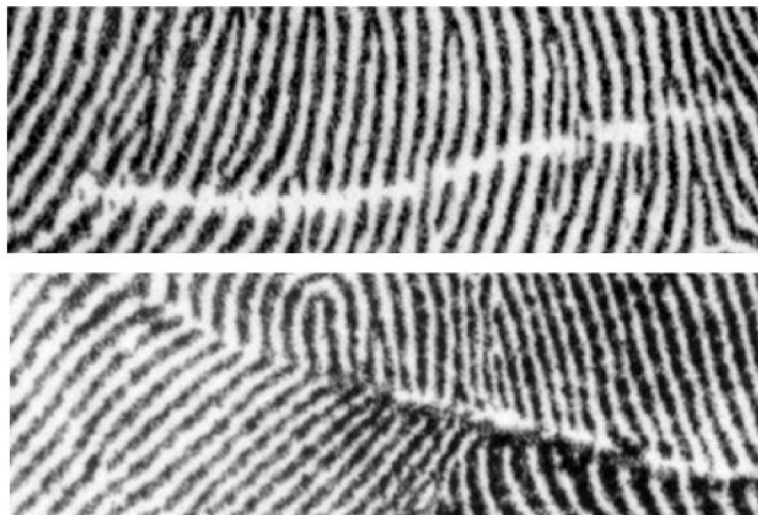


Obr. 4.8: Čierne artefakty vo vnútri jazvy a miesta ich vyššej intenzity. Zdroj: [19]

Publikácie [19] a [37] boli širšie zamerané na detekciu alterovaných odtlačkov prstov a nie na jazvy všeobecne, ponúkli však niekoľko ukážok jazvami alterovaných odtlačkov, hoci v nižšej kvalite. Aj nižšia kvalita je však dostačujúca na preskúmanie nepravidelného tvaru jaziev čiarového charakteru na obrázku 4.7. Odtlačky na obrázku 4.8 nemajú vyslovene čiarový charakter (v rámci prvého obrázku chyba, v resp. je výrazne poškodená časť bruška prsta a druhý obrázok je tvorený viacerými rezmi), ich zaujímavým prvkom sú ale

nepravidelné čierne útvary, ktoré sa v mieste jazvy nachádzajú. Tie majú tendenciu meniť svoju intenzitu, v červeným štvorcóm vyznačenej oblasti na obrázku 4.8 sú napr. zastúpené výraznejšie ako v iných plochách poškodenia. Vzhľadom na to, že tieto čierne útvary boli opakujúcim sa javom aj v ďalších ukážkach jaziev so širšou plochou, rozhodla som sa ich zahrnúť do simulácie ako voliteľný parameter generovania - jazva môže obsahovať **malé čierne útvary**, ktoré môžu mať v určitých bodoch jazvy vyššiu hustotu zastúpenia ako v iných.

Ďalší podstatný znak permanentných jaziev bol určený na základe obrázkov prítomných v [10], kde sa zvyrazňovali rozdiely medzi ryhou (konkrétne flekčnou ryhou) a permanentnou jazvou. Zatiaľ čo záhyb nenarušuje ani nijako nemení papilárne línie, permanentná jazva ich narúša a čiastočne deformuje ich smer. To je vidno na porovnaní oboch poškodení, obrázku 4.9. V prípade jazvy (spodný obrázok) sa papilárne línie v okolí jazvy prehnú a čiastočne zalomia, vytvárajúc tak ilúziu hĺbky. Táto skutočnosť bude zahrnutá v simulácii ako voliteľný znak **deformácia papilárnych línií**. Nie každé zranenie papilárne línie deformuje - pokiaľ dôjde len k poškodeniu vrchnej vrstvy (*epidermis*), zranenie sa po čase zacíli a papilárne línie sa štandardne obnovia. Pokiaľ sa však naruší aj stredná vrstva (*dermis*), vzor papilárnych línií sa nenávratne poškodí. [31].



Obr. 4.9: Porovnanie flekčnej ryhy (vyššie) a jazvy (nižšie). Zdroj: [10]

Počas štúdie ukážok poškodení bruška prsta rezným poranením, popr. jazvou z publikácií som zároveň hľadala ľudí, ktorých bruška prsta toto poškodenie obsahujú. Podarilo sa mi nasnímať odtlačky prstov dvoch subjektov z oboch kategórií - jeden predstavujúci čerstvé, nepermanentné rezné poranenie, zatiaľ čo druhé zranenie bola niekoľko rokov stará permanentná jazva.

Obrázok 4.10 znázorňuje rezné zranenie nasnímané optickým snímačom, ktoré sa nachádzalo na brušku prsta malíčka. Dobre je pozorovateľný nepravidelný tvar jazvy - čiarovitý tvar dopĺňajú kruhové útvary, ktoré vytvárajú **neprevidelné, zvlnené okraje**. Ďalším zaujímavým prvkom sú **tmavé, zrnité okraje**. Tmavšie okraje boli pozorované aj na prvom odtlačku na obrázku 4.7. Oba tieto pozorované javy budú zahrnuté do simulácie. Druhé nasnímané poškodenie je jazva, ktorá demonštruje to, ako dokáže permanentné poškodenie

nie bruška prsta navždy pozmeniť smer papilárnych línií. Toto poškodenie je zobrazené na obrázku 4.11.



Obr. 4.10: Čerstvé rezné zranenie na brušku malíčka nasnímané optickým snímačom.



Obr. 4.11: Permanentná jazva ovplyvňujúca papilárne línie nasnímaná optickým snímačom.

Na základe analýzy odtlačkov poškodených reznou ranou či jazvou bolo zistené, že hoci má jazva čiarový charakter, má výrazne nepravidelnejší tvar ako ryha - to je dobre viditeľné na obrázku 4.10. Mimo tohto faktu boli odhalené aj iné prvky, ktoré sa ale nemusia vyskytovať v každom poranení, a preto budú užívateľovi prístupné v podobe voliteľných parametrov poškodenia:

- **čierne útvary s rôznou mierou intenzity v rámci jazvy** - demonštrované na obrázku 4.8,
- **deformácia papilárnych línií** - zachytené na obrázku 4.9.

- **tmavé okraje** - zachytené na obrázku 4.10.

Simulátor bude schopný generovať rôzne veľkosti jaziev a rôzne hrúbky. Nie všetky vyššie uvedené znaky však budú kompatibilné so všetkými typmi jaziev - napr. poškodenie papilárnych línií bolo v dostatočnej kvalite pozorované len pri relatívne tenkých poraneniach. Keďže nie je úplne zrejmé, akým spôsobom by sa papilárne línie poškodili rozsiahlejším zranením, deformovať papilárne línie budú len tenšie jazvy.

4.3.2 Návrh algoritmu generovania

Algoritmus bude schopný vygenerovať základnú jazvu čiarového charakteru predom zvolenej dĺžky (krátka, stredná alebo dlhá) a hrúbky (krátka, stredná či hrubá). Deformácia papilárnych línií bude limitovaná na tenšie jazvy, keďže rozsah deformácie v prípade príliš hrubej jazvy nebol pozorovaný.

1. **Načítanie syntetického odtlačku prsta.**
2. **Detekcia plochy syntetického odtlačku prsta** - jazva bude viditeľná len v ploche syntetického odtlačku, jej tvar ale môže byť generovaný čiastočne mimo odtlačku, aby sa simuloval fakt, že jazva môže presahovať za hranice nansímaného odtlačku časti bruška prsta. Väčšia časť poškodenia sa však musí nachádzať v rámci odtlačku.
3. **Určenie počiatočného a koncového bodu jazvy** - podobne ako v prípade rýh, aj tu sa zvolí počiatočný bod a na základe požadovanej dĺžky vyberie aj koncový.
4. **Vygenerovanie tvaru jazvy** - medzi dvoma bodmi vygenerovanými v predošlom bode sa vykreslí nepravidelný čiarový tvar, ktorý bude základom pre tvar výslednej jazvy. Tvar musí byť relatívne nepravidelný a dostatočne variabilný.
5. **Realistická hrúbka** - v predošlom kroku sa získa všeobecný tvar jazvy, avšak ten nebude mať požadovanú variabilnú hrúbku. Na základe požadovanej hrúbky čiary sa teda určí hrúbka jazvy v jej jednotlivých úsekoch (tak, aby čiara vhodne hrubla a tenčila sa).
6. **Nepravidelný tvar jazvy** - čiara sa nebude zužovať a rozširovať pravidelne, na okrajoch budú vznikať rôzne tvarové nepravilnosti, tie však budú rešpektovať hrubnutie a stenčovanie sa čiary.
7. **Voliteľné - vykreslenie čiernych útvarov** - pokiaľ má jazva obsahovať nepravidelné čierne útvary, budú vykreslené do vzniknutého tvaru jazvy. Určí sa ich početnosť a oblasť, kde sa táto početnosť zvýši.
8. **Voliteľné - čierne okraje** - detegujú sa okraje vykresľovaného poškodenia. Tieto okraje sa zvýraznia šumom drobných čiernych bodov, ktorého intenzita bude smerom od jazvy klesať.
9. **Pridanie okrajov jazvy šumom** - v predošlých bodoch bol získaný základný tvar a hrúbka, následne budú okraje tohto tvaru mierne poškodené, aby poškodenie nebolo hladké a obsahovalo určitý šum, ktorý je pre snímané poškodenia bežný.
10. **Voliteľné - deformácia papilárnych línií v okolí poškodenia** - na základe pozície a hrúbky jazvy sa určí deformácia papilárnych línií v mieste, do ktorého bude

poškodenie vygenerované. Následne sa papilárne línie ohnú smerom k jazve, tak, aby sa vytvorila ilúzia hĺbky.

11. **Vykreslenie poškodenia** - v prípade deformácie papilárnych línií bude pôvodný odtlačok nahradený odtlačkom s modifikovanými papilárnymi líniami, v opačnom prípade sa poškodenie vykreslí do plochy pôvodného odtlačku (priestor mimo odtlačku modifikovaný nebude).
12. **Uloženie výsledného odtlačku.**

4.4 Poškodenie skla optického snímača

Nad rozsah zadania bolo analyzované ešte jedno prípadné poškodenie - a to poškrábané či rozbité sklo optického snímača. Toto poškodenie už bolo realizované v práci [27], odkiaľ pochádza aj obrázok 4.12. Praskliny skla snímača sa prejavujú ako čierne, tenké čiary. Všetky snímky prasklín ale pochádzali z rovnakého snímača a poškodenie teda bolo identické. Samotné poškodenie je navyše veľmi jednoduché a jeho simulácia by spočívala len v nakreslení tenkej čiernej čiarky. Iné snímky, ktoré by demonštrovali iné poškodenie, neboli dohľadné v žiadnej verejne prístupnej databáze. Hľadané boli predovšetkým snímky, ktoré by demonštrovali rozsiahlejšie poškodenia skla, vrátane roztrieštenia či rôznych pavúkovitých prasklín.



Obr. 4.12: Prasklina na snímači optického senzora na snímke odtlačku prsta (čierne tenké čiary pri rohoch). Prevzaté z [27].

Samostatná tvorba snímok by vyžadovala poškodenie snímacieho zariadenia. Tomu som sa snažila vyhnúť z dvoch dôvodov - jednak kvôli finančnému aspektu, no aj kvôli tomu, že poškodenie jedného senzora by tiež viedlo len k zachyteniu jedného tvaru poškodenia, popr. viacerých prasklín, no nezachytávalo by variabilitu možných poškodení. Tiež bolo veľmi pravdepodobné, že rozsiahlejšie poškodenie, ktoré by čiastočne roztrieštilo sklo, by viedlo k nefunkčnosti celého senzora a nemožnosti nasnímať odtlačky.

Ako alternatívne riešenie bolo testované prekrytie povrchu senzora ešte jednou vrstvou tenkého skla, ktorá by následne bola porušená. V prípade, že by dodatočná vrstva tenkého priehľadného sklíčka nebránila snímaniu prsta, bolo by možné tvorbou prasklín či trieštením vrchného sklíčka získať rozsiahlu databázu možných poškodení skla. Ako je vidno na obrázku 4.13, táto metóda nebola úspešná, keďže odtlačky prsta nebolo možné cez vrstvu sklíčka snímať.



Obr. 4.13: Priloženie tenkého sklíčka medzi snímač a prst. Zatiaľ čo časť prsta, ktorá neleží na sklíčku, je zachytená, časť odtlačku v oblasti sklíčka vidno nie je. Výsledná snímka je dôkazom, že tenké priehľadné sklíčko zabráni snímaniu odtlačku prsta.



Obr. 4.14: Vzory poškodeného skla vytlačené na priesvitnú fóliu a priložené medzi prst a snímač.

Vyskúšaný bol ešte jeden prístup - prekrytie povrchu senzora tenkou priehľadnou fóliou. Cez tú sa podarilo snímky vyhotoviť v celkom dobrej kvalite (mimo prípadných vzduchových bublín pri zlom nalepení). Následne boli získané rôzne vzory, ktoré tvorí prasknuté sklo, čiernou farbou boli vytlačené na priehľadnú samolepiacu fóliu a priložené na senzor. To by mohlo do snímok preniesť realistický tvar prasklín. Ako je však vidno na obrázku 4.14, vzor skla bol vo výsledných snímkach viditeľný ako biele, nie čierne poškodenie. Pokiaľ by sa aj poškodenie prejavovalo čiernou farbou, nesimulovalo by všetky prvky reálneho

roztriešteného skla - napr. v prípade poškodenia v podobe pavúkovitej praskliny s prerazeným stredom by snímač minimálne v oblasti s chýbajúcim sklom pravdepodobne nefungoval korektne, no v simulácii poškodenia pomocou vytlačených prasklín by oblasť vo vnútri poškodenia zostala nepoškodená. Keďže jedinou ďalšou možnosťou bolo senzor mechanicky poškodiť, no ani to by nevedlo na snímky s dostatočnou variabilitou a navyše by výraznejšie poškodenie mohlo senzor úplne znefunkčniť, od simulovania tohto typu poškodenia sa upustilo.

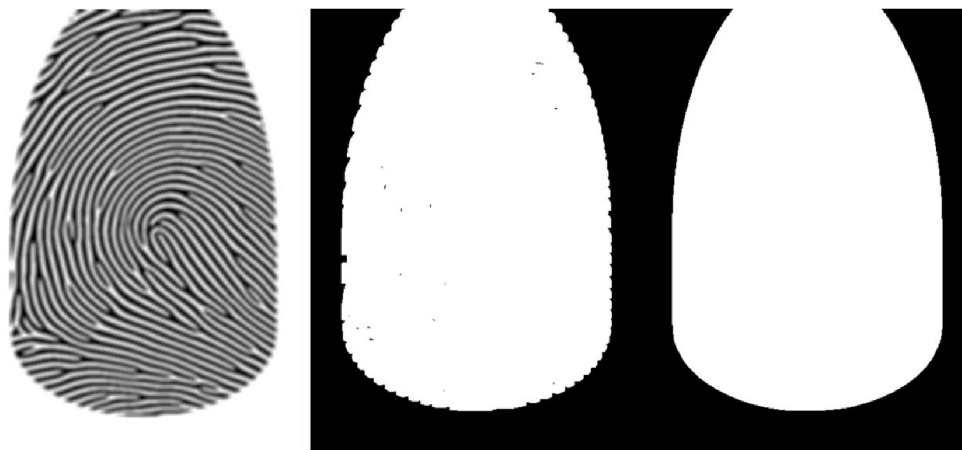
Kapitola 5

Implementácie simulácie poškodení

Táto kapitola popisuje implementáciu algoritmov poškodení načrtnutých v kapitole 4. ako jazyk implementácie bol zvolený Python, pričom na prácu s obrázkom sa využívala knižnica OpenCV.

5.1 Detekcia plochy syntetického odtlačku

Tento krok je spoločný pre všetky poškodenia. Za načítanie obrázku a detegovanie jeho plochy zodpovedá trieda **FingerprintImage**, ktorá v rámci svojich atribútov prechováva parametre potrebné pre výsledné generovanie, ako rozmery obrázka, plochu obrázka či masku. Maska reprezentuje plochu syntetického odtlačku prsta, pričom biele pixely predstavujú plochu odtlačku a čierne pixely zvyšok obrázka.



Obr. 5.1: Vizualizácia jednotlivých krokov získavania masky odtlačku.

Na začiatku procesu je obrázok rozmazaný pomocou vyhladzujúcej funkcie implementovanej knižnicou OpenCV, čím čiastočne splynú pôvodne biele papilárne línie s čiernymi a je možné jednotlivé prvky oddeliť pomocou prahovania. Maska získaná pomocou prahovania však nemá dostatočne hladké okraje a môže obsahovať tmavé diery v miestach, kde sa nepodarilo separovať plochu odtlačku od pozadia. Tento problém je vyriešený pomocou nájdenia kontúr obrázka a obalenie týchto kontúr v konvexnej obálke (ktorá kontúry vyhladí). Konvexná obálka je následne vyplnená bielou farbou a vzniká hladká maska, ktorá kopíruje tvar odtlačku prsta. Obrázok 5.1 na prvom obrázku zľava zachytáva proces rozmazania, stredný

obrázok výsledok prahovania a pravý obrázok zasa vyhladenie masky pomocou obalenia kontúr v konvexnej obálke.

Okolo detegovanej plochy odtlačku je vytvorený štvorec, ktorého rozmery aproximujú výšku a šírku odtlačku. Tieto hodnoty sú neskôr využívané pri generovaní rozmerov poškodenia a iných hodnôt, ktoré súvisia s veľkosťou odtlačku.

Ďalšou triedou, ktorá pracuje s maskou, je trieda **Generator**. Tá predstavuje základnú triedu, ktorá obsahuje základné atribúty všetkých generovaných poškodení a je dedená všetkými odvodenými poškodeniami. Mimo iného obsahuje metódu pre prácu s maskou, ktorá oreže vzniknuté poškodenia len na oblasť vnútri masky a zaručí tak, že poškodenia nebudú generované mimo odtlačku (pokiaľ to nie je žiaduce).

5.2 Generovanie rýh

Prvým implementovaným poškodením boli ryhy (vrásky, ryhy v prstoch, popraskaná suchá koža,...). Vznikla trieda **LineGenerator**, základná trieda, ktorá generuje nepravidelný čiarový tvar jednotlivých rýh. Táto trieda bola znovuvyužitá aj pri generovaní ďalších poškodení.

5.2.1 Generovanie tvaru

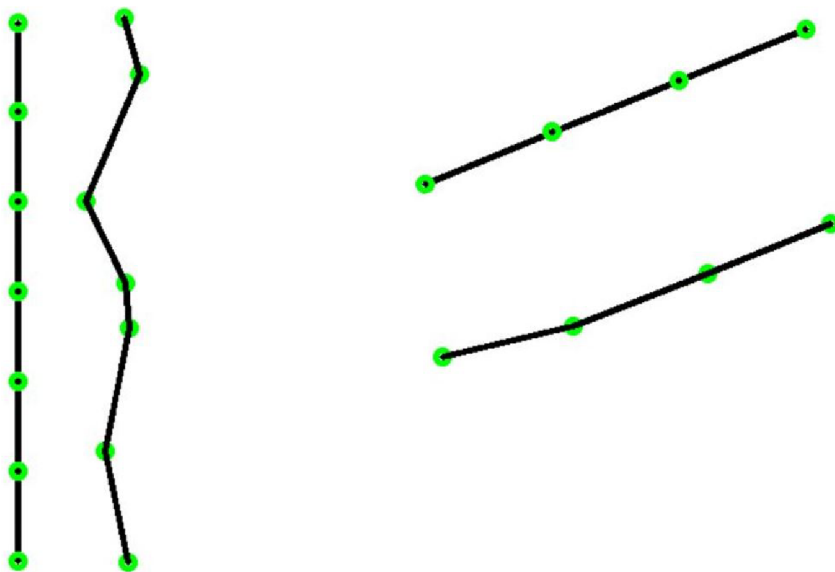
Za vytvorenie základného tvaru čiarového poškodenia zodpovedá trieda **LineGenerator**. Vstupnými parametrami hlavnej metódy, **generate_line()**, je dĺžka (krátka, stredná alebo dlhá čiara), orientácia (vodorovná, zvislá alebo diagonálna) a hrúbka (tenká, stredná alebo hrubá čiara). Tieto parametre môžu byť tiež určené ako náhodné, v takom prípade sa s rovnakou pravdepodobnosťou zvolí typ daného parametra.

Následne sa vygenerujú body, ktoré bude čiara interpolovať. Tieto body budem nazývať **kontrolné body**. Ako prvý sa určí počiatočný bod čiary. Koncový bod je určený na základe dĺžky čiary a uhlu medzi dvoma bodmi, podľa vzťahu:

$$(x_2, y_2) = (x_1 + l \cdot \cos(\alpha), y_1 + l \cdot \sin(\alpha)) \quad (5.1)$$

pričom l predstavuje dĺžku výslednej čiary a α predstavuje uhol čiary. Tieto hodnoty sú náhodne vygenerované na základe parametrov čiary. Rozsah dĺžky je odvodený od požadovanej dĺžky (krátka, stredná, dlhá) a rozmerov odtlačku, rozsah uhlov je zasa určený na základe požadovanej orientácie čiary. Z daného rozsahu povolených hodnôt je následne náhodne vybraná jedna hodnota. Pomocou metódy knižnice NumPy **linspace()** je na dĺžke týmito dvoma bodmi danej krivky získaný požadovaný počet rovnomerne rozmiestnených bodov (počet je opäť náhodne zvolený z intervalu, ktorého rozsah závisí od dĺžky čiary). Určité koncové či kontrolné body môžu byť vygenerované mimo plochy odtlačku, aby sa dosiahlo vizuálneho efektu, že poškodenie pokračuje za hranice odtlačku, avšak je kontrolované, či väčšina bodov leží v priestore odtlačku - pokiaľ nie, čiara je vygenerovaná znova.

Následne sú tieto body posunuté v ose x aj v ose y . Rozsah tohoto posunu je opäť udávaný dĺžkou danej čiary. Následne sa medzi každou dvojicou nových bodov vygeneruje čiara, čo dohromady tvorí nový, nepravidelný tvar čiarového poškodenia. Ukážka tohto procesu je zachytená na obrázku 5.2



Obr. 5.2: Tvorba nepravidelnejšieho tvaru čiary náhodným posunutím bodov.

5.2.2 Generovanie hrúbky

Následujúcim krokom je generovanie hrúbky čiary. Sú pridané nové kontrolné body - do prostriedku medzi dva kontrolné body je pridaný nový bod. Toto je možné zopakovať viac krát - čím viac kontrolných bodov sa bude na čiare nachádzať, tým viac bude hrúbka čiary variovať.

Následne je na základe parametrami požadovanej hrúbky (tenká, stredná, hrubá čiara) určená maximálna hrúbka čiary a bod, kde čiara túto maximálnu hrúbku dosiahne. Môže sa jednať o akýkoľvek kontrolný bod. Následne sú prechádzané všetky segmenty (úseky medzi dvoma bodmi) doľava aj doprava, pričom segment naľavo aj napravo od bodu najväčšej hrúbky má hrúbku rovnú maximálnej hrúbke, ostatné segmenty sa zasa pravidelne stenčujú. Čiara sa teda bude stenčovať smerom od bodu maximálnej hrúbky oboma smermi. Rôzne tvary, ktoré je možné týmto procesom vygenerovať, sú znázornené na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Čiary vytvorené variáciou hrúbky.

5.2.3 Šum na okrajoch

V skutočných snímkoch odtlačkov prstov nie sú ryhy hladké, keďže na ne vplýva šum prítomný pri snímaní. Z toho dôvodu sú okraje rýh poškodené, aby sa tento šum simuloval. Poškodenie je pred vykreslením do odtlačku bielou farbou vykreslené do čierneho odtlačka, aby bolo možné jednoducho nájsť všetky pixely poškodenia. Pomocou funkcie knižnice OpenCV sú detegované okraje poškodenia. Tieto okraje sú následne narušené čiernymi krúžkami, poškodenie teda príde o určité krajové pixely a vytvorí sa zrnitý efekt okrajov. To je vidno na obrázku 5.4.



Obr. 5.4: Nepravidelné, zašumené okraje, ktoré simulujú šum prítomný v reálnych nasnímaných poškodeniach.

5.2.4 Vykreslenie poškodenia

Poškodenie bolo najprv vykresľované na čierne pozadie z dôvodu potreby lokalizácie okrajov poškodenia. V poslednom kroku generovania sa vezmú súradnice všetkých bielych pixelov (to sú body, ktoré prislúchajú poškodeniu) a sú vykreslené do obrázka. Obrázok je následne podľa masky orezaný tak, aby poškodenie zostalo vykreslené len v oblasti masky a pozadie, ktoré nie je súčasťou odtlačku, zostalo nepoškodené.



Obr. 5.5: Vrásky vygenerované do syntetických odtlačkov prsta.

5.2.5 Generovanie vrások a iných rýh

Vyššie opísaný postup vygeneroval jednu ryhu, samotné poškodenie pozostáva z viacerých rýh. V závislosti od stupňa poškodenia sú do obrázku generované vrásky, ktorých dĺžka, hrúbka a orientácia je volená podľa určitej pravdepodobnosti v závislosti od požadovaných znakov danej úrovne. Znaky jednotlivých úrovní sú podrobnejšie opísané v kapitole 4.1.1.

Ukážku výsledného poškodeného odtlačku zobrazuje obrázok 5.5. V tomto kroku je tiež kontrolované, aby sa ryhy negenerovali na rovnaké miesta či výraznejšie neprekrývali. Čiasťotčný prekryv rýh je ale žiaduci, keďže aj v reálnych snímkach vertikálne orientované ryhy často pretínajú horizontálne a vytvárajú akúsi mriežku. Je teda kontrolované, či sa nová ryha negeneruje na pixeloch, na ktorých už bolo vykreslené poškodenie. V prípade, že sa prekrýva na časti väčšej, než je žiaduce, je vygenerovaná nová.

5.3 Vlasy a chlpy na snímači

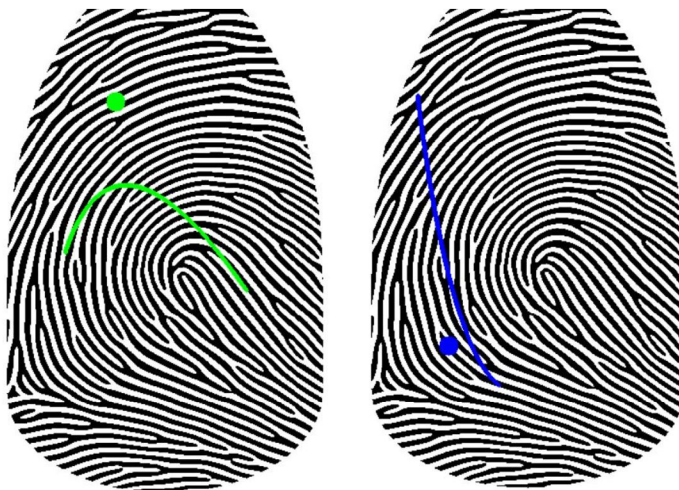
Za generovanie vlasu a chlpu na snímači je zodpovedná trieda **HairGenerator**, ktorá dedí potrebnú základnú funkcionalitu (ako napr. načítanie obrázka či detegovanie plochy odtlačku) od triedy **Generator**. Podobne ako v prípade vrások, je aj tu pred generovaním najprv načítaný potrebný odtlačok a vytvorená jeho maska, zmapovaná veľkosť odtlačku v obrázku a pod. Generátor umožňuje generovať vlasy a chlpy dvoch kategórií - vlasy, ktoré rozmermi presahujú rozmery odtlačku, a potom menšie vlasy alebo chlpy, ktoré sa celé nachádzajú vnútri odtlačku.

5.3.1 Generovanie tvaru

Zahnutý tvar vlasov a chlпов je aproximovaný Bézierovou krivkou druhého stupňa, alebo kvadratickou Bézierovou krivkou. Jedná sa o krivku, ktorá je definovaná tromi bodmi - začiatočným, koncovým a riadiacim. Riadiaci bod obvykle neleží na krivke a ovplyvňuje jej zakrivenie. Vzťah použitý pre výpočet bodov ležiacich na krivke je:

$$(1 - t)^2 \cdot P_0 + 2 \cdot (1 - t) \cdot t \cdot P_1 + t^2 \cdot P_2, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (5.2)$$

pričom P_0 predstavuje bod začiatočný, P_1 kontrolný bod a P_2 bod koncový [25]. Počiatočný a koncový bod je generovaný v závislosti od toho, či sa bude generovať vlas, ktorý presahuje rozmery odtlačku, alebo chlп, ktorý sa nachádza vo vnútri. Na základe toho sa vygenerujú dva body buď v priestore odtlačku, alebo mimo neho. Kontrolný bod je volený náhodne, keďže sú prípustné všetky možné zakrivenia krivky. Ukážky rôznych kriviek zobrazuje obrázok 5.6.



Obr. 5.6: Vygenerovaná oblúkovitá krivka a jej zakrivenie v závislosti od kontrolného bodu.

5.3.2 Generovanie vlasu a záhybu

Po tom, ako sú získané body krivky popísané vyššie, do obrázku je vygenerované poškodenie. V tvare danej krivky sú vykreslené celkom dva subjekty: najprv záhyb, predstavovaný hrubšou, bielou krivkou, ktorá kopíruje tvar vlasu, a na ňu vlas samotný. Vlas bol na pozorovaných snímkach sivý, náhodne sa teda určí jeho konkrétny odtieň, od výraznejšej sivej po takmer neviditeľnú jasnejšiu, takmer bielu farbu.

Záhyb predstavuje hrubšiu vykreslenú krivku, ktorej šírka je určená v závislosti na veľkosti odtlačku, s určitou náhodne generovanou variáciou. Záhyb sa najprv vykresluje na čierne pozadie, pre ľahšiu detekciu plochy poškodenia a jej okrajov. Keďže záhyb nie je regulárneho tvaru s hladkými okrajmi, okraje záhybu sú poškodené vykreslovaním bielych útvarov. Výsledný tvar je vidno na obrázku 5.7. Následne je záhyb vykreslený do obrázku. Samotný vlas je vykreslený do stredu tohto záhybu, pričom po povrchu vlasu sú v náhodných bodoch (v náhodne vybranej intenzite) vykreslené biele útvary. Biele útvary prekryjú určité úseky vykresleného vlasu a simulujú fakt, že nie všetky časti vlasu sú na snímkach zreteľné. To je vidno na obrázku 5.8. Následne sú obe poškodenia orezané tak, aby sa vykreslovali len do oblasti odtlačku prsta. Možné výsledky tohto procesu predstavuje obrázok 5.9.



Obr. 5.7: Záhyb, ktorý vznikne okolo vlasu, je vykreslený s nepravidelnými okrajmi.



Obr. 5.8: Detail prerušovaného, relatívne nezreteľného vlasu, ktorý sa vygeneruje do vzniknutého záhybu.

5.4 Rany a jazvy

Za generovanie rán a jaziev zodpovedá trieda **ScarGenerator**, ktorá čiastočne dedí funkcionality triedy **LineGenerator**, ktorá je však dodatočne upravená pre potreby generovania jaziev. Jazvy sú najprv vykreslené na čierne pozadie, aby bola možná detekcia okrajov a plochy, neskôr prekreslená do pôvodného obrázku. Ďalšia trieda, ktorá sa v prípade generovania jaziev, ktoré deformujú papilárne línie, podieľa na generovaní, je trieda **ImageDistortion**, ktorá pracuje s pôvodným odtlačkom a vytvára efekt prehnutia v okolí jazvy.

Rovnako ako v prípade predošlých poškodení, aj generovanie jazvy pracuje s pôvodným obrázkom a jeho maskou, ktorá vyznačuje plochu odtlačku prsta.



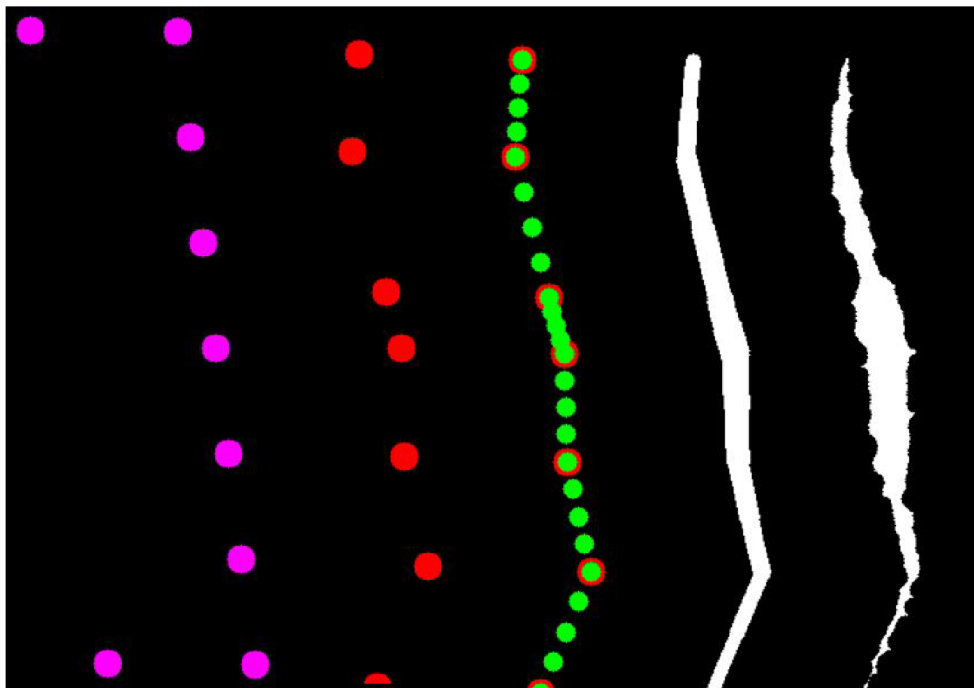
Obr. 5.9: Ukážka vygenerovaného poškodenia do syntetických odtlačkov prsta.

5.4.1 Generovanie tvaru a hrúbky jazvy

Generovanie základného tvaru a hrúbky jazvy je založené na základoch, ktoré boli implementované pri generovaní rýh. Kompletná postupnosť procesu je znázornená na obrázku 5.10. Najprv je vygenerovaný počiatočný bod a od neho je na základe požadovanej vzdialenosti (v závislosti od dĺžky čiary - krátka, stredná alebo dlhá) a uhla (v závislosti od orientácie čiary - horizontálna, vertikálna alebo diagonálna) koncový bod. Tým sa vygeneruje úsečka. Následne sa určí počet **kontrolných bodov**, ktoré budú na úsečke ležať v rovnomernej vzdialenosti. Počet týchto bodov je náhodne generovaný z intervalu, ktorého spodná hranica je 3 a horná určená dĺžkou čiary - dlhá čiara môže obsahovať viac kontrolných bodov ako krátka. Kontrolný bod zvykne bývať miesto ohybu čiarového tvaru, čím viac kontrolných bodov sa vygeneruje, tým nepravidelnejší tvar vo všeobecnosti bude. Táto prvá fáza je na obrázku znázornená fialovými bodmi - prvé dva fialové body predstavujú začiatkový a koncový bod, druhá postupnosť fialových bodov počiatočnú úsečku.

Tieto kontrolné body sú následne presunuté v ose x aj v ose y. Rozsah tohto pohybu je náhodný, no musí spadať do určitého intervalu, pričom horná hranica tohto intervalu je odvodená od výslednej dĺžky čiary (vzdialenosti začiatkového od koncového bodu). Posun kontrolných bodov je znázornený v obrázku 5.10 červenými bodmi. Vizualne je jeho výsledkom posun bodov do strán a bližšie/ďalej od seba, čím sa vzdialenosť medzi kontrolnými bodmi stane variabilnejšou, čo povedie k nepravidelnejšiemu tvaru čiary,

Vzájomným prepojením týchto kontrolných bodov by už mohol byť vykreslený základný tvar čiary. Hrúbka, s ktorou sa jednotlivé úseky vykreslia, bude určená v nasledujúcom bode algoritmu. Aby bola hrúbka variabilnejšia, k existujúcim kontrolným bodom sa pridajú nové, čím sa vytvorí viac úsekov čiary. Na obrázku 5.10 predstavujú menšie zelené body nové kontrolné body. Následne sa vyberie maximálna hrúbka čiary a bod, v ktorom sa tejto maximálnej hrúbky dosiahne. Pokiaľ existujú body naľavo aj napravo od bodu maximálnej hrúbky, pomocou funkcie knižnice OpenCV `line()` sa vykreslí medzi týmito dvoma bodmi úsečka v tejto maximálnej hrúbke. Ďalšie úseky (naľavo aj napravo od bodu maximálnej hrúbky) sa vykresľujú už v hrúbke o jedna menšej. Hrúbku takto získaného tvaru možno na obrázku 5.10 vidieť vykreslenú bielou farbou.



Obr. 5.10: Vizualizácia jednotlivých krokov generovania tvaru a hrúbky jazvy.

5.4.2 Nepravidelný tvar jazvy

Finálny útvar na obrázku 5.10 je výsledkom ešte jedného kroku. Behom vykreslovania jednotlivých úsekov čiary v rôznych hrúbkach dôjde aj ku generovaniu bielych kruhov. Ich počet je odvodený od dĺžky daného úseku, polomer zasa od hrúbky, ktorá čiara v danom úseku dosahuje. Veľkosť polomeru je síce najprv určená v závislosti od hrúbky úseku, zároveň sa môže zvýšiť o určitú variáciu, ktorá môže nadobúdať hodnoty od 0 do tretiny veľkosti pôvodného polomeru.

Podľa počtu kruhov generovaných na úseku, ktorý je daný začiatočným a koncovým bodom, sa vyberú body, ktoré ležia na úsečke spájajúcej začiatočný a koncový bod. Následne dôjde k posunu stredu generovaného kruhu v ose x aj v ose y, pričom konkrétna hodnota posuvu je náhodne udávaná v intervale, ktorý závisí od polomeru kruhu (a tak nepriamo od hrúbky daného úseku). Tieto kruhy sú následne vykreslené na čierne pozadie.

Na obrázku 5.11 je vidno jednotlivé kroky tohto procesu. Prvá čiara je hrúbka čiary pred pridaním tvarových nepravidielností, druhá čiara po vygenerovaní kruhov. Je vidno, že pridanie kruhov tvorí zvlnené okraje, ktoré boli na poraneniach v rámci analýzy pozorované. Hoci posun kruhov do jednej aj druhej strany hrúbku čiary zvyšuje, jej hrúbka stále rešpektuje hrubnutie/tenčenie čiary v smere k/od bodu maximálnej hrúbky. Posledným krokom je pridanie nepravidielností okrajom jazvy. Detegujú sa okraje poškodenia a na tých sa s určitou pravdepodobnosťou náhodne vygenerujú čierne kruhy (väčšie, ktoré vizuálne vytvárajú viac zvlnené okraje, a menšie, ktoré vytvárajú len dojem viac zašumených okrajov. To je vidno na pravej časti obrázku.



Obr. 5.11: Jednotlivé kroky, ktoré tvoria finálny nepravidelný tvar jazvy.

5.4.3 Čierne útvary s rôznou mierou intenzity

Čierne útvary s rôznou mierou intenzity sú ďalším voliteľným znakom jaziev. Po vygenerovaní základného tvaru jaziev sa dá pomocou získania nenulových pixelov jednoducho určiť plocha poškodenia - do jednotlivých bodov sa s určitou pravdepodobnosťou, ktorú udáva frekvencia čiernych útvarov, vygeneruje čierny útvar. Samotný čierny útvar pozostáva z náhodne určeného množstva kruhov (v počte 3 až 10), pričom každý sa vygeneruje s určitým posunom v súradnici x a súradnici y od stredového bodu, na ktorom sa útvar generuje. Tým sa získa nepravidelný tvar drobných útvarov. Následne sa určí oblasť vyššej intenzity, v ktorej sa budú čierne útvary generovať s vyššou pravdepodobnosťou, budú mať teda niekoľkonásobne vyššiu frekvenciu. Oblasť s vyššou frekvenciou je na obrázku 5.12 zvýraznená červeným obdĺžnikom.



Obr. 5.12: Jazva s čiernymi útvarmi vo vnútri svojej plochy. Zvýraznená oblasť vyššej intenzity útvarov.

5.4.4 Tmavé okraje

Ďalším voliteľným znakom jaziev sú **tmavé okraje**. Tie nie sú rovnomerne tmavé, ale tvorené čiernym zrnitím, ktoré smerom od jazvy stráca na intenzite. To je generované len na okrajových pixeloch už vygenerovaného poškodenia, ktoré sú detegované pomocou metódy knižnice OpenCV (*Canny()*), ktorá implementuje Cannyho detektor hrán). Na okrajových bodoch sa s určitou pravdepodobnosťou generujú čierne body s určitým posuvom, pričom čím väčší je tento posuv, tým menšia pravdepodobnosť je, že sa vygeneruje (teda body ďalej od jazvy budú mať nižšiu hustotu). Tieto čierne body sú vygenerované na pozadie (syntetický odtlačok) pred vykreslením samotnej jazvy, ktorá sa vykreslí do stredu. To je vidno aj na obrázku 5.13.



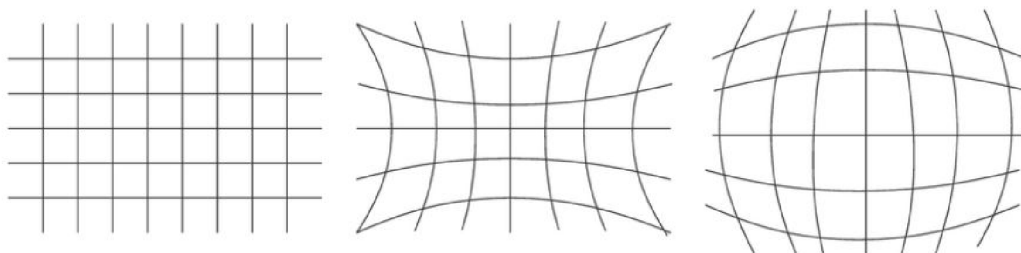
Obr. 5.13: Vygenerované tmavé, zrnité okraje samostatne (vľavo) a na okrajoch vygenerovanej jazvy, vsadenej do syntetického odtlačku.

5.4.5 Deformácia papilárnych línií

Permanentné jazvy, ktoré poškodia mimo povrchovej vrstvy aj *epidermis*, často permanentne deformujú papilárne línie. To sa vizuálne prejavuje prehnutím papilárnych línií v okolí jazvy, čím vzniká efekt hĺbky. Keďže sa nepodarilo dohľadať žiadne už existujúce riešenia tohto alebo podobného problému, musela som nájsť spôsob, ako toto skreslenie čo najvernejšie implementovať.

Tomu predchádzalo štúdium rôznych skreslení obrázkov. Ako potencionálne vhodné sa ukázalo poduškovité skreslenie (*pincushion distortion*), ktoré ohýba čiary podobným spôsobom, ako deformácia papilárnych línií. To simuluje skreslenie obrazu optickými šošovkami, ktoré skresľuje konfiguráciu bodov a spôsobuje nerovnomerné zväčšenie obrazu. V prípade poduškovitého zväčšenia sú stredné oblasti v pomere k vonkajším zmenšené - tento efekt aplikovaný na okolie jazvy sa javil ako vhodné riešenie.

Transformácia musí byť aplikovaná reverzne - za predpokladu, že by sa mapovali pôvodné pixely na nové, je veľmi pravdepodobné, že sa v dôsledku zaokrúhľovania vo výslednom obrázku ocitnú nedefinované pixely. Z toho dôvodu sa prechádzajú pixely v oblasti želananej transformácie a podľa príslušného vzorca sa nájde pixel z pôvodného obrázku, ktorý sa na novú pozíciu presunie. Súradnice je najprv treba previesť do normalizovaných súradníc (súradníc v intervale od -1 do 1). Pixel (i, j) je na normalizované súradnice pretransformovaný podľa vzťahu:



Obr. 5.14: Efekt distorzie (skreslenia) na štvorcovú sieť - poduškovité skreslenie (v strede) a súdkovité skreslenie (vpravo). Obrázok prebratý z: [39]

$$x = 2 \cdot i / (\text{width} - 1) \quad (5.3)$$

$$y = 2 \cdot j / (\text{height} - 1) \quad (5.4)$$

kde *height* predstavuje výšku a *width* šírku oblasti, v ktorej sú súradnice zisťované (napr. obrázku).

Z týchto súradníc sú následne podľa vzťahov:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5.5)$$

$$\varphi = \arctan(y, x) \quad (5.6)$$

získajú polárne súradnice, pričom r predstavuje vzdialenosť bodu od začiatku súradníc a φ uhol medzi spojnicou daného bodu a počiatku. Vyžadovaná transformácia mení r , a to konkrétne podľa vzťahu:

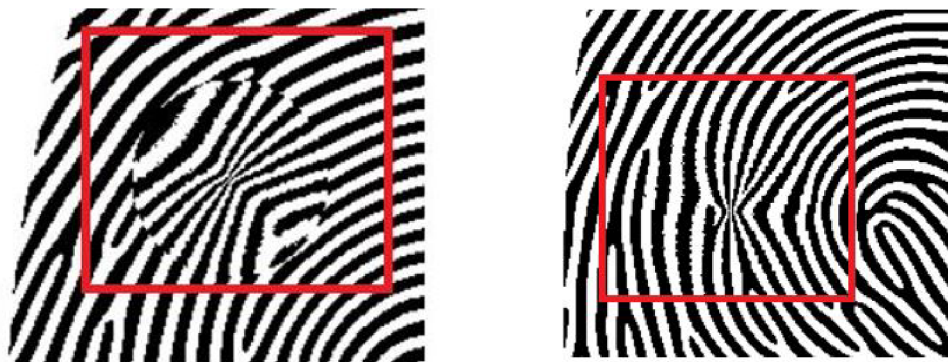
$$r_2 = \sqrt{r_1} \quad (5.7)$$

kde r_2 predstavuje r polárnej súradnice pixelu z pôvodného obrázka, ktorý sa ocitne na aktuálnej pozícii (transformácia totiž prebieha reverzne). Polárne súradnice hľadaného pixelu budú musieť byť opäť transformované na štandardné pixely, pomocou ktorých je dohľadaný konkrétny bod, ktorý sa na dané miesto presunie. Tento postup a potrebné vzťahy boli zistené z [5].

Ohnúť celý obrázok alebo jeho časť pomocou vyššie popísaného postupu je len priamočiarou implementáciou vyššie uvedených vzťahov. Prvé aplikácie poduškovitého skreslenia na kruhovú oblasť v rámci odtlačku pôsobili pozitívne - keďže hlavne v prostriedku kruhovej oblasti sa podarilo požadovaného zakrivenia papilárnych línií dosiahnuť. Avšak kraje oblasti boli skrivené tiež a nedoliehali na pôvodnú oblasť, čo je demonštrované v prvej časti obrázka 5.15 To bol problém, ktorý bolo treba vyriešiť.

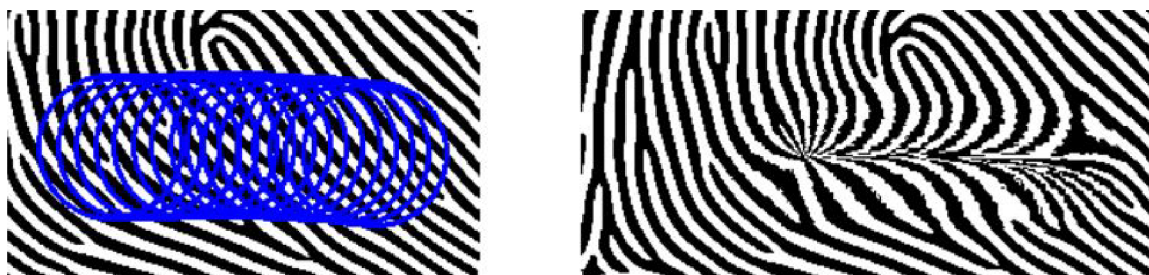
Riešenie bolo inšpirované [20]. Diskontinuitu pixelov na okraji aplikovanej transformácie a pôvodného obrázku rieši **lineárna interpolácia**. Na pixely vnútri oblasti je žiaduce aplikovať skreslenie v plnom rozsahu, zatiaľ čo na okrajové pixely by sa aplikovať nemala skoro vôbec. Keďže dané skreslenie transformuje súradnicu r (v polárnych súradniciach získaných z normalizovaných súradníc), je na získavané r aplikovaný vzťah:

$$r^2 + (1.0 - r) \cdot c \cdot \sqrt{r} \quad (5.8)$$



Obr. 5.15: Aplikácia poduškovitého skreslenia na kruhovú oblasť odtlačku prsta bez lineárnej interpolácie (vľavo) a s lineárnou interpoláciou (vpravo).

Vďaka tomu sa dosiahla plynulá náväznosť oblasti so skreslením na oblasť bez neho, ako je demonštrované na pravom obrázku 5.15. Keďže spomínaná interpolácia funguje v kruhovej oblasti, transformácia bola v rámci kruhovej oblasti viacnásobne aplikovaná pozdĺž oblasti, do ktorej bude neskôr vygenerovaná jazva, s určitými prekryvmi. To je vidno na obrázku 5.16, vrátane výslednej deformácie papilárnych línií, ktorá zodpovedá ohnutiu, aké spôsobujú permanentné jazvy. Dôsledkom zaokrúhľovania a prekryvu operácií však na zohnutých papilárnych líniách vzniklo výrazné zašumenie. Ďalšie úpravy teda viedli k eliminácii tohto šumu.



Obr. 5.16: Postupná aplikácia kruhového skreslenia a jej výsledok (bez úprav).

Otestovaných bolo niekoľko rôznych metód vyhladzovania, najlepšie výsledky dosiahla aplikácia metódy *medianBlur()* knižnice OpenCV, ktorá nahradí hodnotu prostredného pixelu oblasti, na ktorú je metóda aplikovaná, mediánom oblasti, spolu s prahovaním. To úspešne vyhladilo časť šumu. Obrázok 5.17 ukazuje rozdiel medzi nevyhladeným a vyhladeným obrázkom - nevyhladený obrázok je omnoho zrnitejší. Ľavý obrázok predstavuje obrázok bez jazvy, do ľavého je jazva už vygenerovaná, jedná sa teda o finálny krok generovania permanentnej jazvy, ktorá deformuje papilárne línie.

5.4.6 Generovanie výslednej jazvy

Generátor umožňuje nagerovať jazvy v troch veľkostiach (malá, stredná, veľká), troch hrúbkach (tenká, stredná, hrubá) a troch orientáciách (horizontálna, vertikálna, diagonálna). Navyše je možné k týmto jazvám pripojiť prídavné znaky tmavých zrnitých okrajov, čiernych útvarov (popr. ich kombináciu) alebo deformovať papilárne línie v okolí jazvy.



Obr. 5.17: Výsledok aplikácie skreslenia papilárnych línií (vľavo), ich vyhladenie a vykreslenie jazvy (vpravo).

Deformácia papilárnych línií bola v dostatočnej kvalite dohľadaná len na snímkoch, kde sa jednalo o tenkú permanentnú jazvu, a preto bola implementovaná s ohľadom na tenkú hrúbku poškodenia. Tenká hrúbka je preto odporúčaná. Hoci generátor technicky podporuje aj šírku hrubšiu, papilárne línie boli v takom prípade často nadmieru deformované a poškodenie nepôsobilo príliš realisticky, rozhodla som sa ho preto obmedziť na tenkú hrúbku jazvy. Obrázok 5.18 ukazuje možné výstupy pri generovaní jaziev bez deformácií papilárnych línií, obrázok 5.19 zasa jazvy, ktoré tieto línie deformujú.



Obr. 5.18: Ukážky jaziev nedeformujúcich papilárne línie.



Obr. 5.19: Ukážky jaziev deformujúcich papilárne línie.

Kapitola 6

Výsledky a testovanie

Behom implementácie algoritmov boli výsledné syntetické obrázky neustále porovnávané s reálnymi poškodeniami a modifikované jednotlivé parametre generovania tak, aby sa dosiahlo čo najrealistickejšieho výsledku. Každé neskôr uvedené poškodenie bude obsahovať porovnanie reálneho a syntetického poškodenia na demonštrovanie ich podobnosti.

Súčasťou práce bolo aj zhodnotenie vplyvu poškodenia na kvalitu odtlačku prsta a na ich porovnanie. Na vyhodnotenie kvality bol využitý nástroj FiQiVi (*Fingerprint Quality Visualizer* - vizualizér kvality odtlačkov prstov). Aplikácia umožňuje vyhodnotenie jedného konkrétneho odtlačku, rovnako ako aj hromadné vyhodnotenie viacerých zadaných odtlačkov. V prípade načítania jediného obrázku zobrazuje aj mapu kvality odtlačku prsta, z ktorej môže užívateľ detailnejšie analyzovať priebeh poškodenia. Analyzovaný obrázok je rozdelený na štvorcové sektory a kvalitu daného sektoru vyjadruje odtieň zelenej (tmavá zelená predstavuje najvyššiu kvalitu, so znižujúcou sa kvalitou odtieň bledne až na bielu). Výsledná kvalita celého odtlačku je uvedená v percentách, v rozmedzí od 0 % po 100 %.

Vplyv na porovnanie odtlačkov bol skúmaný prostredníctvom technológie NEURO-technology VeriFinger. Program umožňuje porovnať dva odtlačky prstov a vráti výsledok porovnania - skóre porovnania. Pri práci s týmto nástrojom bolo nutné najprv vyhodnotiť skóre porovnania nemodifikovaných odtlačkov a to porovnať so skóre odtlačkov so syntetickým poškodením. Výstupom je teda tiež percentuálna hodnota, ktorá vyjadruje percentuálny pomer skóre modifikovaného odtlačku voči skóre rovnakých syntetických nepoškodených odtlačkov. Vzťah použitý pre výpočet predstavuje vzorec 6.1.

$$\text{kvalitaOdtlacku} = \text{skorePoskodeneho} / \text{skoreNeposkodeneho} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Jednotlivé poškodenia uvedené nižšie boli generované do hlavných syntetických odtlačkov z generátora SFinGe, ktoré sú dokonalé a neobsahujú žiaden šum. Bolo vybraných 100 rôznych hlavných odtlačkov rôznych tvarov, pričom poškodenia sú generované do náhodne vybraného z nich. Kvalita odtlačkov pomocou metódy FiQiVi sa vyhodnocovala naprieč všetkými syntetickými odtlačkami. Najprv bola ohodnotená kvalita syntetických odtlačkov bez akejkoľvek úpravy, výsledky zobrazuje tabuľka 6.1. Tie poskytujú referenčný bod pri vyhodnocovaní zvyšných poškodení - kvalita nemodifikovaných syntetických snímkov totiž nie je 100 %, ale priemerne len 94 %. V rámci metódy VeriFinger sa odtlačky porovnávali voči ich nemodifikovaným ekvivalentom, pričom skóre porovnania dvoch nepoškodených odtlačkov predstavuje 100 %.

Tabuľka 6.1: Vyhodnotenie kvality syntetických odtlačkov bez modifikácie technológiou FiQiVi.

	Priemer [%]	Minimum [%]	Maximum [%]
Syntetické odtlačky	94	92	96

6.1 Vrásky a iné ryhy

Prvé testované poškodenie predstavovali ryhy. Porovnanie vygenerovaných rýh s reálnymi odtlačkami je vidno na obrázku 6.1. Vzory, ktoré tvoria jednotlivé vrásky, sú rozličné, no cieľom nie je porovnávať jednotlivé vzory, ale variabilitu a nepravidelnosť konkrétnych vrások. Tú vygenerované poškodenia skutočne dosahujú, simulované poškodenie sa teda reálnemu vizuálne podobá dostatočne.

Rôzne stupne poškodenia boli zjednotené do troch kategórií, v resp. troch úrovni, ktoré sa od seba popisujú počtom, hrúbkou a orientáciou jednotlivých záhybov. Z týchto troch úrovní boli teda vytvorené 3 testovacie sady so 100 syntetickými snímkami. Základné parametre týchto troch úrovní sú zobrazené v tabuľke 6.2. Predstavitelia jednotlivých kategórií sú zobrazení aj na obrázku 6.1, kde tri spodné odtlačky prislúchajú úrovni 1, úrovni 2 a úrovni 3 (zľava doprava).



Obr. 6.1: Ukážka rôznych úrovní zvrásnenenia na reálnych odtlačkoch (hore) a syntetických - úroveň 1, úroveň 2 a úroveň 3 (zľava do prava).

Tabuľka 6.2: Skupiny snímok pre vyhodnotenie kvality rýh

	Počet jednotlivých rýh	Hrúbka rýh
Úroveň poškodenia 1	1-6	tenké
Úroveň poškodenia 2	6-12	tenké
Úroveň poškodenia 3	12-20	tenké, stredné, hrubé

Kvalita týchto sád bola následne vyhodnotená metódou FiQiVi a vplyv na porovnanie odtlačkov metódou VeriFinger. Výsledky obsahuje tabuľka 6.3. Ako bolo očakávané, je vidno postupné znižovanie kvality v závislosti na stupni poškodenia - pri jemnom zvrásnení, aké je generované pri úrovni 1, je kvalita vyššia, ako pri vyššom množstve rýh pri poškodení úrovne 3. V rámci metódy VeriFinger klesla kvalita výraznejšie ako v rámci metódy FiQiVi. Je nutné mať na pamäti aj to, že priemerné skóre metódy FiQiVi pre nemodifikované syntetické odtlačky bolo 94 %.

Tabuľka 6.3: Vyhodnotenie kvality poškodenia: ryhy rôznych úrovní

	Priemerná kvalita FiQiVi [%]	Priemerná kvalita VeriFinger [%]
Úroveň 1	91	84
Úroveň 2	86	76
Úroveň 3	77	65

6.2 Vlasy a chlpy na snímači

Poškodenie bolo rozdelené do dvoch kategórií, a to vlasy, ktoré rozsahom presahujú odtlačok prsta (a teda pretínajú celý odtlačok) a menšie vlasy či chlpy, ktoré nepresahujú rozmer odtlačku, popr. začínajú mimo oblasti a v oblasti odtlačku končia. Predstavitel'ov oboch kategórií možno vidieť na obrázku 6.2, kde sú ukázané aj reálne poškodenia, z ktorých simulované vychádzali. Hoci umiestnenie vlasov nie je rovnaké, z obrázku je vidno, že sa poškodenie tvarom na reálne predlohy podobá. Z každého typu poškodenia bolo vygenerovaných 100 ukážok. Vyhodnotenie kvality týchto ukážok obsahuje tabuľka 6.4.

Metóda FiQiVi vyhodnotila priemernú kvalitu oboch typov poškodenia ako 92 %. Vzhľadom na to, že priemerná kvalita nemodifikovaných odtlačkov je 94 %, je zrejmé, že vlas ani chlpy významným spôsobom vyhodnotenie kvality neovplyvnili. V rámci metódy VeriFinger bol pokles kvality výraznejší, no rozdiely medzi dvoma typmi poškodenia boli tiež minimálne, dĺžka vlasu teda výraznejší vplyv na kvalitu odtlačku nemala.

Tabuľka 6.4: Vyhodnotenie kvality poškodenia: chlpy a vlasy na snímači

	Priemerná kvalita FiQiVi [%]	Priemerná kvalita VeriFinger [%]
Malý vlas/chlpy	92	82
Väčší vlas	92	81



Obr. 6.2: Reálne snímky vlasov a chlпов na snímači v porovnaní so syntetickými.

6.3 Rany a jazvy

Obrázok 6.3 zobrazuje ukážky reálnych jaziev a syntetických jaziev, ktoré sú umiestnením a smerovaním relatívne podobné. Nebolo cieľom dosiahnuť rovnaký tvar či umiestnenie, ale porovnať znaky poškodenia reálneho a vygenerovaného. Na treťom obrázku z ľava, ktoré predstavuje dvojicu jaziev v spodnej časti odtlačku, sú dobre znateľné nepravidelné okraje jazvy, ktoré sú čiastočne zvlnené a tvorené rôznymi výstupkami. Podobné okraje majú aj synteticky vygenerované jazvy. Tvarovú variabilitu jednotlivých jaziev sa teda podarilo zachytiť.



Obr. 6.3: Ukážky reálnych jaziev a náhodne vygenerovaných jaziev, ktoré im boli celkom podobné.

Jazvy možno generovať v troch základných dĺžkach (krátke, stredné a dlhé), šírkach (tenké, stredné, hrubé), orientáciách (horizontálna, vertikálna a diagonálna) a s prídavnými znakmi: čierne útvary, čierne zrnité okraje a narušenie papilárnych línií. V rámci generovania ale bola orientácia nastavená na náhodnú a sledovaná bola len hrúbka a dĺžka jazvy. Na začiatku bola vygenerovaná len základná jazva všetkých kombinácií dĺžok a hrúbok, takže vzniklo 9 rôznych kategórií po 100 náhodne vygenerovaných snímkach. Obrázok 6.4 ukazuje zástupcov tenkých jaziev všetkých troch dĺžok, 6.5 demonštruje stredné jazvy všetkých dĺžok a obrázok 6.6 robí to isté pre jazvy hrubé. Tieto ukážky sú uvedené pre predstavu, koľko plochy dané poškodenie zaberá.



Obr. 6.4: Ukážky tenkých jaziev troch dĺžok (zlava do prava): krátka, stredná, dlhá



Obr. 6.5: Ukážky stredných jaziev troch dĺžok (zlava do prava): krátka, stredná, dlhá



Obr. 6.6: Ukážky hrubých jaziev troch dĺžok (zlava do prava): krátka, stredná, dlhá

Následne boli dané sady ohodnotené metódou FiQiVi a metódou VeriFinger. Získané údaje pre FiQiVi predstavuje tabuľka 6.5, pre VeriFinger zasa 6.6. V oboch tabuľkách je vidno, že priemerné hodnoty klesajú kvality klesajú so zvyšujúcou sa šírkou jazvy aj so zvyšujúcou sa dĺžkou v rámci jedného typu hrúbky. Prekvapivé ale bolo, že kvalitatívny rozdiel medzi jazvou tenkou a hrubou nie je tak veľký, ako bolo vzhľadom na veľkosť plochy, ktoré

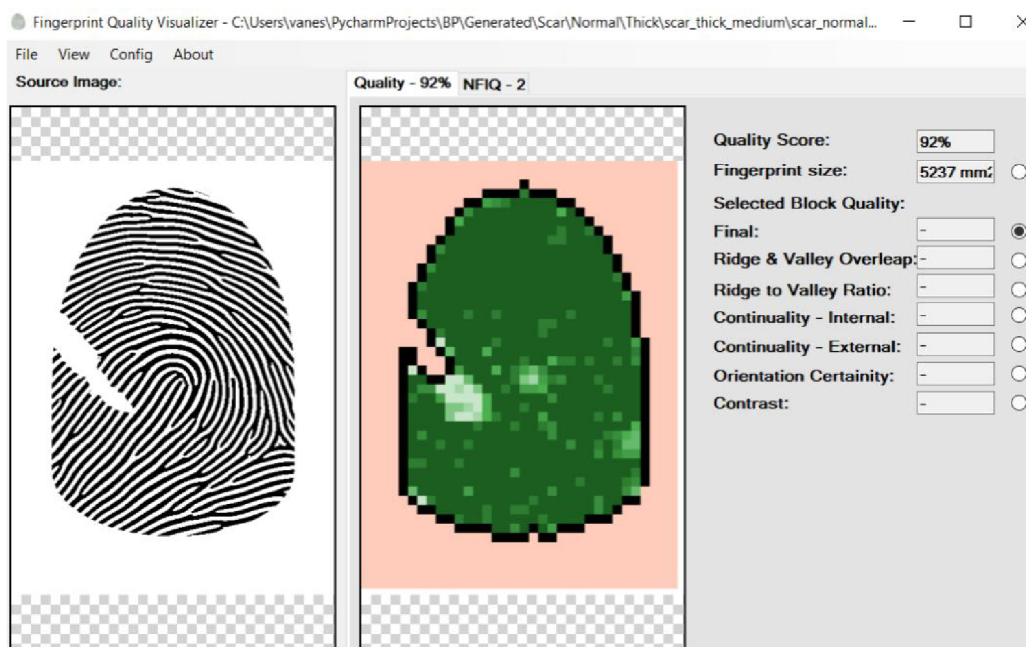
poškodenie zaberie, očakávané. Metóda FiQiVi dokonca vrátila rovnaké hodnoty pre dlhú jazvu strednej a hrubej hrúbky, rovnako ako aj dlhú jazvu strednej a hrubej hrúbky. To bolo teda preskúmané. Keďže pri ohodnotení väčšieho množstva poškodených odtlačkov poskytuje aplikácia FiQiVi ako výstup len číselné hodnoty, nie mapy kvality jednotlivých poškodení, bolo niekoľko jaziev analyzovaných jednotlivo. Obrázok 6.7 ukazuje, ako aplikácia považuje hrubšiu bielu časť poškodenia, ktorá narúša okraj odtlačku, chybné za pozadie. Výsledná kvalita odtlačku je teda vyššia, keďže veľká časť poškodenia nie je detegovaná. Namerané hodnoty teda nereflektujú skutočnú mieru poškodenia. Pri aplikácii VeriFinger nebola žiadna chyba vyhodnocovania nájdená.

Tabuľka 6.5: Vyhodnotenie kvality poškodenia pre rôzne jazvy rôznych typov aplikáciou FiQiVi

FiQiVi	Krátka	Stredná	Dlhá
Tenká jazva	94%	93%	93%
Stredne hrubá jazva	93%	91%	90%
Hrubá jazva	92%	91%	90%

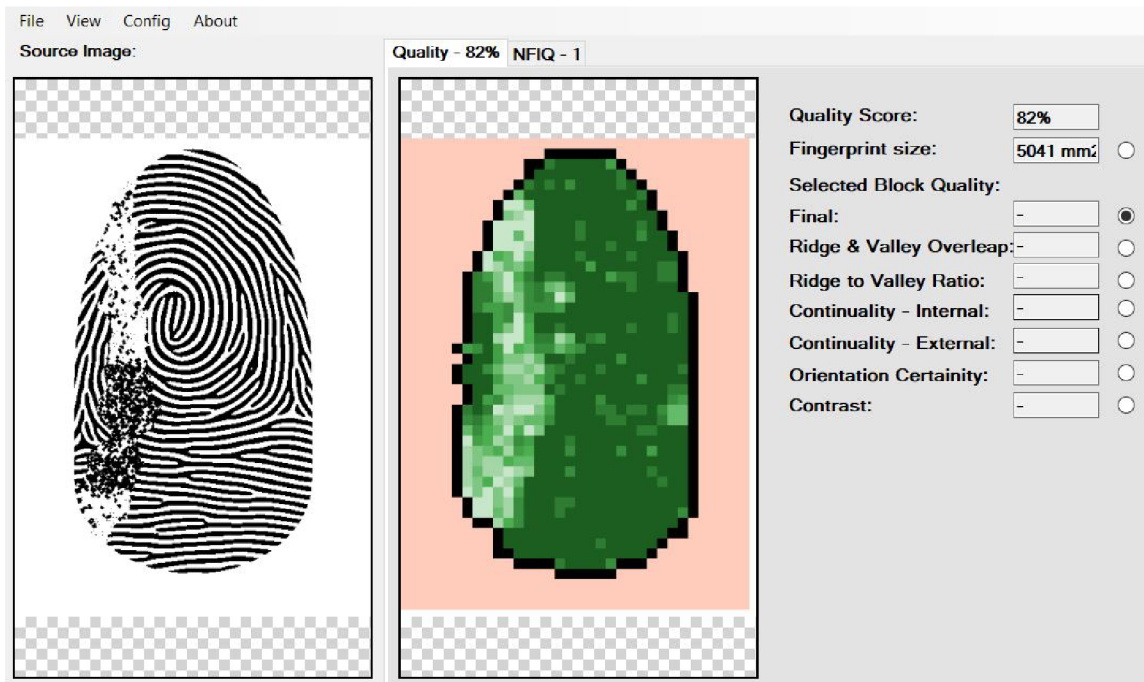
Tabuľka 6.6: Vyhodnotenie kvality poškodenia pre rôzne jazvy rôznych typov aplikáciou VeriFinger

VeriFinger	Krátka	Stredná	Dlhá
Tenká jazva	82%	81%	80%
Stredne hrubá jazva	80%	79%	75%
Hrubá jazva	79%	75%	73%



Obr. 6.7: Vyhodnotenie poškodenia aplikáciou FiQiVi vrátane mapy kvality - aplikácia považuje časť poškodenia za súčasť pozadia.

Ďalším krokom vyhodnocovania bolo pridanie jedného z voliteľných znakov. Ako prvé sa do jaziev pridali nepravidelné čierne útvary. Pred hromadným vyhodnotením som jednotlivu vyhodnotila niekoľko odtlačkov pomocou aplikácie FiQiVi, aby som zistila, či aplikácia označí oblasť s poškodením menšou kvalitou. Toto vyhodnotenie je zachytené na obrázku 6.8 a ukazuje, že aplikácia oblasť s prítomnosťou čiernych artefaktov už považuje za súčasť poškodenia a kvalita odtlačku náležite klesla. Z toho sa dá usúdiť, že za prítomnosti čiernych artefaktov v jazve už nebude k problému dochádzať.



Obr. 6.8: Vyhodnotenie jazvy s čiernymi útvarmi aplikáciou FiQiVi vrátane mapy kvality. Pôvodný problém s určením jazvy ako pozadia sa pridaním čiernych útvarov eliminoval.

Obrázok 6.9 porovnáva náhodne vygenerovanú jazvu s reálnou predlohou. Zvlnený tvar jazvy je predlohe celkom podobný. Obrázok 6.10 tiež demonštruje, že prídavné znaky *čierne okraje* a *čierne artefakty* zodpovedajú ich predlohe z reálnych snímkov. Porovnávané sú tvarovo rozličné jazvy, cieľom nebolo vygenerovať rovnakú jazvu, iba porovnať prídavné znaky s už existujúcimi predlohami.



Obr. 6.9: Porovnanie tvaru reálnej (vľavo) a náhodne vygenerovanej jazvy, ktorá jej je celkom podobná.

Aj keď by opäť mohli byť vyhodnotené všetky kombinácie tvarov a dĺžok, avšak cieľom bolo zistiť, ako prídavné prvky poškodenia ovplyvňujú kvalitu daného poškodenia. Vybral

sa teda jeden typ jazvy (stredná hrúbka a stredná dĺžka) a následne sa vygenerovali tri balíčky po 100 poškodených odtlačkov, z ktorých jeden obsahoval **čierne útvary**, druhý **zrnité tmavé okraje** a tretí **čierne útvary aj zrnité okraje**. Zástupcov týchto kategórií možno vidieť na obrázku 6.11.



Obr. 6.10: Porovnanie prídavných znakov s reálnymi predlohami. Čierne okraje (vľavo) a artefakty vnútri jazvy (vpravo).



Obr. 6.11: Jazva strednej veľkosti a hrúbky s rôznymi prídavnými znakmi poškodenia (zľava do prava): bez prídavných znakov, s čiernymi útvarmi, so zrnitými okrajmi a s čiernymi útvarmi aj zrnitými okrajmi.

Vyhodnotenie priemernej kvality týchto sád je zaznamenané v tabuľke 6.7. Zvolený rozsah poškodenia bola stredná hrúbka a stredná dĺžka. Tento rozmer až tak netrpel na chybné vyhodnocovanie kvality, ako hrubšie poškodenia, keďže jazva nezvykla presahovať tak často ako dlhé poškodenia a vďaka menšej hrúbke ju chybné nevyhodnocovalo ako pozadie. Pri pridaní čiernych útvarov vzrástla kvalita podľa FiQiVi o jednu percento. Podobný nárast možno vidieť aj pri poškodeniach s tmavými zrnitými okrajmi, ktoré o 2 % znížia kvalitu oproti poškodeniu bez prídavných znakov, po pridaní čiernych útvarov sa však kvalita zvýši na 90 %. U VeriFinger podobný nárast nebadáť, kvalita jaziev s prídavnými znakmi oproti jazve bez prídavných znakov klesla. Rozdiely ani v jednom prípade nie sú markantné.

Tabuľka 6.7: Vyhodnotenie kvality poškodenia: jazvy s prídavnými znakmi

	Priemerná kvalita FiQiVi [%]	Priemerná kvalita VeriFinger [%]
Bez prídavných znakov poškodenia	91	79
Čierne útvary	92	78
Tmavé zrnité okraje	89	79
Tmavé zrnité okraje a čierne útvary	90	77

Vzhľadom na podozrenie, že pri značnej časti väčších jaziev došlo pri vyhodnocovaní kvality aplikáciou FiQiVi k chybe, pri ktorej považovala aplikácia prečnievajúce jazvy za súčasť pozadia, a faktu, že čierne artefakty tento problém eliminovali, všetky typy jaziev boli aplikáciou FiQiVi vyhodnotené ešte raz s prídavnými znakmi - tmavým zrnitým okrajom a s čiernymi útvarmi. To zaručovalo najmenšiu pravdepodobnosť, že bude biely priestor útvaru jazvy chybné vyhodnotený ako pozadie. Výsledky zobrazené v tabuľke 6.8 už viacej zodpovedali očakávaniu, vzhľadom na to, že s narastajúcou hrúbkou a dĺžkou jazvy adekvátne klesá kvalita odtlačku. Pre aplikáciu VeriFinger nebolo vyhodnocovanie zopakované, keďže pri vyhodnocovaní touto aplikáciou neboli detegované žiadne chybné vyhodnotenia súvisiace s chybným vyhodnotením veľkých bielych plôch.

Tabuľka 6.8: Vyhodnotenie kvality poškodenia jaziev s tmavými okrajmi a čiernymi útvarmi aplikáciou FiQiVi.

FiQiVi	Krátka	Stredná	Dlhá
Tenká jazva	93%	92%	90%
Stredne hrubá jazva	92%	90%	88%
Hrubá jazva	89%	86%	84%

Nakoniec sa ohodnotila kvalita posledného typu poškodenia, a to permanentných jaziev, ktoré deformujú papilárne línie. Na obrázku 6.12 možno vidieť porovnanie reálnej jazvy (vľavo) so simulovanou (vpravo) - čiary síce majú iné uhly, no je vidno, ako simulované poškodenie stláča papilárne línie a vytvára tak dojem hĺbky. Keďže deformácie papilárnych línií boli z dôvodu realistikosti obmedzené len na čiary tenkého rozmeru, vygenerované boli tri sady po 100 poškodených odtlačkov každej dĺžky - krátka, stredná a dlhá. Výsledky sú zaznamenané v tabuľke 6.9. Podľa očakávania kvalita klesá zvyšovaním dĺžky čiary. U aplikácie FiQiVi nie je pokles nijako drastický, pre aplikáciu VeriFinger klesla porovnateľnosť výsledkov rapidnejšie. Zlú kvalitu vykazujú najmä dlhé jazvy, ktoré často pretínajú celý odtlačok a deformujú tak výraznú plochu papilárnych línií.

Tabuľka 6.9: Vyhodnotenie kvality poškodenia: jazva deformujúca papilárne línie

	Priemerná kvalita FiQiVi [%]	Priemerná kvalita VeriFinger [%]
Krátka tenká jazva	93	78
Stredne dlhá tenká jazva	91	71
Dlhá tenká jazva	90	65



Obr. 6.12: Skutočná jazva deformujúca papilárne línie (naľavo) a simulovaná (vpravo).

6.4 Záver vyhodnotenia

Na základe vizuálnej podobnosti syntetických poškodení s ich reálnymi predlohami, ktoré možno nájsť v príslušných sekciách, možno skonštatovať, že poškodenia zodpovedajú realite. V sekciách vyššie bol rozobratý vplyv syntetických poškodení na kvalitu odtlačku prstu (pričom tento vplyv bol vyhodnotený pomocou aplikácie FiQiVi) a na porovnateľnosť odtlačkov prstov (vplyv bol vyhodnotený pomocou aplikácie VeriFinger).

Priemerné skóre kvality nepoškodeného odtlačku pre aplikáciu FiQiVi činilo 94 %. Malé množstvo vrások viedlo k poklesu kvality na 91 %, stredné množstvo vrások na 86 % a výraznejšie zvrásnenie bruška kvalitu zhodilo na 77 %. Vlasy a chlpy na snímači nevedli k drastickému zníženiu kvality, klesla len na 92 %. Podobné jemné poklesy kvality spôsobovali aj jazvy bez prídavných tvarov všetkých tvarov a širok (najnižšia kvalita bola 90 % pre dlhú stredne hrubú či hrubú jazvu), no tam výsledky skresľovalo chybné vyhodnocovanie aplikácie väčších bielych plôch ako pozadia. Meranie teda bolo zopakované s jazvami s voliteľnými znakmi artefaktov a tmavých zrnitých okrajov, pri ktorých nemala aplikácia tendenciu považovať úseky jazvy za pozadie. Kvalita snímky tak klesla pri hrubej a dlhej jazve až na 84 %. Ako poškodenie, ktoré najväčšmi vplyva na kvalitu, sa tak ukázalo výrazné zvrásnenie, ktoré na od rozdiel jazvy, ktorá poškodzuje len časť plochy odtlačku prsta, poškodzuje celú plochu bruška.

Pri vyhodnocovaní porovnateľnosti odtlačkov prstov pomocou aplikácie VeriFinger mali aj menšie poškodenia výraznejší vplyv, pri pridaní najmenej výrazných poškodení ako malé množstvo vrások, tenké krátke jazvy či vlas klesla kvalita na hranicu 80 %. Kvalita jednotlivých poškodení podľa očakávania klesala s pridaním počtu poškodení (vrásky) či zväčšovaní dĺžky a hrúbky poškodenia (jazvy). Deformácia papilárnych línií sa ukázala omnoho väčším problémom ako pri aplikácii FiQiVi - zatiaľ čo pri tej klesla kvalita len o pár percent, pre VeriFinger znížilo pokrčenie papilárnych línií porovnateľnosť odtlačku až na hranicu 65 %. To činí z dlhej tenkej jazvy, ktorá krčí papilárne línie, najzávažnejšie poškodenie, ktoré najviac vplyvalo na porovnateľnosť, spolu s výrazným zvrásnením, ktoré tiež dosiahlo hodnotu 65 %.

Kapitola 7

Záver

Cieľom tejto práce bolo vybrať tri poškodenia čiarového charakteru, preskúmať ich vplyv na odtlačky prsta, navrhnúť a následne implementovať algoritmus, ktorý bude schopný dané poškodenia čo najvierohodnejšie generovať.

Implementácii simulátora predchádzalo štúdium literatúry a iných zdrojov o oblastiach, ktoré sa témy dotýkajú. Výstupom tohto procesu je teoretická časť práce. Veľkou časťou práce bola aj analýza vybraných čiarových poškodení (vrásky a iné ryhy, vlas či chlp na snímači a rany či jazvy). Keďže neexistovala žiadna databáza, ktorá by dané poškodenia združovala, museli byť vyhotovené a nasnímané (ako v prípade vlasu) alebo dohľadané v iných zdrojoch, ako v prípade vrások a jaziev.

Následne bola vytvorená programová realizácia simulátora daných poškodení, ktorá užívateľovi na základe výberu parametrov poškodenia umožní vygenerovať poškodenie vhodného typu a rozmeru. Program bol navrhnutý tak, aby na základe výsledkov analýzy čo najvernejšie simuloval dané poškodenia. Behom práce boli simulované poškodenia vizuálne porovnávané s reálnymi predlohami a algoritmus upravovaný, aby bol výsledok čo najrealistickejší. Dôraz bol kladený tiež na to, aby boli generované poškodenia aj s rovnakými parametrami dostatočne odlišné a dali sa vytvoriť variabilné databázy.

Prostredníctvom tohto simulátora boli do syntetických odtlačkov prstov vygenerovaných nástrojom SFinGe dané poškodenia. Tie boli rozdelené do príslušných kategórií podľa typu či rozsahu poškodenia a z každej bolo vygenerovaných 100 poškodených odtlačkov. V rámci vyhodnotenia bolo z hľadiska kvality a porovnateľnosti odtlačkov vyhodnotených viac ako 3000 odtlačkov so syntetickým poškodením. Kvalita odtlačkov bola vyhodnocovaná pomocou nástroja FiQiVi, vplyv na porovnateľnosť odtlačkov zasa pomocou nástroja VeriFinger. Kvalita odtlačkov vygenerovaním čiarových poškodení klesla až na 77 %, kvalita porovnávanie odtlačkov až na 65 %.

Generátor dokáže vygenerovať veľké množstvo relatívne variabilných poškodení určitého typu, ktoré môžu byť neskôr využité pre tréningové či testovacie rôznych rozpoznávacích, či inak s odtlačkami prstov pracujúcich algoritmov. Všetky body práce boli splnené. Ako možné rozšírenie sa dá navrhnúť zahrnutie generovania poškodenia skla snímača, ktoré nemohlo byť implementované z dôvodu nedostatku referenčných snímok, ktoré nemohli byť získané bez poškodenia vybavenia.

Literatúra

- [1] ANSARI, A. H. *Generation and storage of large synthetic fingerprint database*. Bangalore, 2011. 47 s. Diplomová práce. Indian Institute of Science.
- [2] BAK, A. *Simulation of Skin Diseases Effect Using GAN*. Brno, CZ, 2021. 86 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/24097/>.
- [3] BÁRTA, M. a DRAHANSKÝ, M. Generation of Skin Diseases into Synthetic Fingerprints. *International Journal of Image Processing*. 2016, zv. 10, č. 5, s. 229–248. ISSN 1985-2304. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/research/publication/11261>.
- [4] BOLLE, R., PANKANTI, S. a JAIN, A. K. *Biometrics, Personal Identification in Networked Society*. USA: Kluwer Academic Publishers, 1998. 421 s. ISBN 0-7923-8345-1.
- [5] BOURKE, P. *Image warping / distortion* [online]. December 2020 [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <http://paulbourke.net/miscellaneous/imagewarp/>.
- [6] CAPPELLI, R. SFinGe: an Approach to Synthetic Fingerprint Generation. *International Workshop on Biometric Technologies*. Január 2004, s. 8. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/266278652_SFinGe_an_Approach_to_Synthetic_Fingerprint_Generation.
- [7] CHANDANA, C., YADAV, S. a MATHURIA, M. Fingerprint Recognition based on Minutiae Information. *International Journal of Computer Applications*. Jún 2015, zv. 120, s. 39–42. DOI: 10.5120/21265-3862.
- [8] CHEN, J. a MOON, Y. A Statistical Study on the Fingerprint Minutiae Distribution. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1988. ICASSP-88., 1988 International Conference on*. Jún 2006, zv. 2, s. II – II. DOI: 10.1109/ICASSP.2006.1660306.
- [9] CLARKE, R. A. Human Identification in Information Systems. *Information Technology & People*. December 1994, zv. 7, s. 6–37. ISSN 0959-3845.
- [10] DAWSON, J. *Fingerprint Ridge Authorities*. [online]. 2006 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/10845114/>.
- [11] DRAHANSKÝ, M. *Fingerprint Recognition Technology - Related Topics*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. 172 s. ISBN 978-3-8443-3007-6.

- [12] DRAHANSKÝ, M. *Hand-Based Biometrics: Methods and Technology*. 1st edition. London: The Institution of Engineering and Technology, 2018. 430 s. ISBN 978-1-78561-224-4.
- [13] DRAHANSKY, M., DOLEZEL, M., URBANEK, J. et al. Influence of Skin Diseases on Fingerprint Recognition. *Journal of biomedicine & biotechnology*. 2012, s. 14. DOI: 10.1155/2012/626148.
- [14] DRAHANSKÝ, M., ORSÁG, F., DOLEŽEL, M. et al. *Biometrie*. 1. vydání. Computer Press, s.r.o, 2011. 294 s. ISBN 978-80-254-8979-6. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/research/publication/9468>.
- [15] EUCERIN. *Ako koža funguje – Štruktúra a funkcie kože*. [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.eucerin.sk/o-kozi/zakladne-informacie/struktura-a-funkcie-koze>.
- [16] FENG, J., JAIN, A. a ROSS, A. Detecting Altered Fingerprints. In: *20th International Conference on Pattern Recognition*. August 2010, s. 1622–1625. DOI: 10.1109/ICPR.2010.401.
- [17] GARROU, P. IFTLE 424: Fingerprint Sensors Are Going Ultrasonic. *3D InCites* [online]. August 2019 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.3dincites.com/2019/08/iftle-424-fingerprint-sensors-are-going-ultrasonic/>.
- [18] GRABHAM, D. In-display fingerprint readers: How they work plus optical vs ultrasonic. *Pocket-lint* [online]. Február 2021 [cit. 2022-27-01]. Dostupné z: <https://www.pocket-lint.com/phones/news/huawei/146063-in-display-fingerprint-readers-how-do-they-work>.
- [19] HARAKSIM, R., ANTHONIOZ, A., CHAMPOD, C. et al. Altered Fingerprint Detection – Algorithm Performance Evaluation INGRESS consortium – UNIL. In: *2016 4th International Conference on Biometrics and Forensics (IWBF)*. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/iwbf.2016.7449673. ISBN 9781467394482.
- [20] HIGUARO. *Liquify effect with Javascript* [online]. Január 2015 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://geekofficedog.blogspot.com/2015/01/liquify-effect-hello-swirl-2.html>.
- [21] JAIN, A. a FENG, J. Latent Fingerprint Matching. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. Január 2011, zv. 33, s. 88–100. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.59.
- [22] JAIN, A. K., FLYNN, P. a ROSS, A. A. *Handbook of Biometrics*. 1. vydání. Springer Publishing Company, Incorporated, 2010. 566 s. ISBN 978-0-387-71040-2.
- [23] JAIN, A., HONG, L., PANKANTI, S. et al. An identity-authentication system using fingerprints. *Proceedings of the IEEE*. Október 1997, zv. 85, s. 1365 – 1388. DOI: 10.1109/5.628674.
- [24] JI, L. a YI, Z. Fingerprint orientation field estimation using ridge projection. *Pattern Recognition*. 2008, zv. 41, č. 5, s. 1491–1503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2007.09.003>. ISSN 0031-3203.

- [25] KAMERMANS, M. *A Primer on Bézier Curves* [online]. 2020 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://pomax.github.io/bezierinfo/>.
- [26] KANICH, O., KOŠŤÁK, D. a DRAHANSKÝ, M. Psoriasis Damage Simulation into Synthetic Fingerprint. In: *Proceedings 18th International Conference of the Biometrics Special Interest Group*. GI - Group for computer science, 2019, s. 205–212. Lecture Notes in Informatics. ISBN 978-3-88579-690-9. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/research/publication/11258>.
- [27] KANICH, O. *Fingerprint damage simulation*. Brno, 2014. 48 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií.
- [28] LASEINDE, O. P. *Analysis and detection of fingerprint creases*. 2019. Diplomová práce. West Virginia University. Dostupné z: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/434>.
- [29] MALTONI, D., MAIO, D., JAIN, A. K. et al. *Handbook of Fingerprint Recognition*. 2nd edition. London: Springer Publishing Company, Incorporated, 2009. 494 s. ISBN 978-1-4471-6106-6.
- [30] MINHAS, F. A. A. *Fingerprint based person identification and verification*. Islamabad, 2005. 218 s. Dizertační práce. Pakistan Institute of Engineering and Applied Sciences.
- [31] MOZAYANI, A. Toxicology in the Crime Laboratory. In: *The Forensic Laboratory Handbook*. November 2007, s. 249–263. DOI: 10.1385/1-59259-946-X:249.
- [32] MSIZA, I., MISTRY, J., LEKE BETECHUOH, B. et al. On the Introduction of Secondary Fingerprint Classification. In: *State of the art in Biometrics*. InTech, 2011, s. 105–120. DOI: 10.5772/17634. ISBN 978-953-307-489-4.
- [33] OMRAN, S. a SALIH, M. Design and Implementation of Multi-model Biometric Identification System. *International Journal of Computer Applications*. August 2014, zv. 99, s. 14–21. DOI: 10.5120/17448-8255.
- [34] PATIL, S. G. a BHATT, M. A Classical Approach for Rolled, Plain to Latent Fingerprint Matching. In: *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. Jún 2014, sv. 3, s. 7020 – 7024. ISSN 2278-1021.
- [35] PAVLÍK, P. Biometrie jako základ současné i budoucí identifikace a autentizace. *Kontakt*. December 2007, zv. 9, s. 427–430. DOI: 10.32725/kont.2007.066. ISSN 1212-4117.
- [36] RAK, R., MATYÁŠ, V. a ŘÍHA, Z. *Biometrie a identita člověka ve forezních a komerčních aplikacích*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2008. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [37] TABASSI, E., CHUGH, T., DEB, D. et al. Altered Fingerprints: Detection and Localization. In: *2018 IEEE 9th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS)*. Máj 2018, abs/1805.00911, s. 1–9.

- [38] THALES. *Automated Fingerprint Identification System (AFIS) overview - A short history*. [online]. Január 2022 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/government/biometrics/afis-history>.
- [39] TYKKÄLÄ, T. *Real-time image-based RGB-D camera motion tracking and environment mapping*. 2013. 156 s. Dizertačná práca. Lappeenranta University of Technology.
- [40] URBAN, F. Cesta do útrov biometrických senzorov. *Touchit* [online]. August 2017 [cit. 2022-1-6]. Dostupné z: <https://touchit.sk/cesta-do-utrob-biometrickych-senzorov/127302>.
- [41] VOEGELI, D. Understanding the main principles of skin care in older adults. *Nursing standard (Royal College of Nursing (Great Britain) : 1987)*. November 2012, zv. 27, s. 59–60, 62. DOI: 10.7748/ns2012.11.27.11.59.c9414.
- [42] WAYMAN, J., JAIN, A., MALTONI, D. et al. *Biometric Systems: Technology, Design and Performance Evaluation*. 2005th edition. London: Springer Publishing Company, Incorporated, január 2005. 370 s. ISBN 1-85233-596-3.
- [43] WU, C., ZHOU, J., BIAN, Z.-Q. et al. Robust crease detection in fingerprint images. In: *2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings*. Júl 2003, sv. 2, s. II– 505. DOI: 10.1109/CVPR.2003.1211509. ISBN 0-7695-1900-8.
- [44] ZHOU, J., CHEN, F., WU, N. et al. Crease detection from fingerprint images and its applications in elderly people. *Pattern Recognition*. 2009, zv. 42, č. 5, s. 896–906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2008.09.011>. ISSN 0031-3203. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320308004020>.

Príloha A

Obsah pamäťového média

Zoznam súborov priložených na pamäťovom médiu:

- Písomná správa vo formáte PDF.
- Zdrojové súbory pre vytvorenie písomnej správy v $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}_{\text{e}}$.
- Zdrojové súbory programu.
- README.md pre popis použitia programu.
- Databáza poškodených odtlačkov prstov vygenerovaných programom.