



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**ÚTOK HRUBOU SILOU NA PŘÍSTUPOVÝ SYSTÉM
S POMOCÍ SYNTETICKÝCH OTISKŮ PRSTŮ**

BRUTE FORCE ATTACK ON ACCESS SYSTEM USING SYNTHETIC FINGERPRINTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DOMINIK POLEHŇA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KANICH, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce



Student: **Polehňa Dominik, Bc.**
Program: Informační technologie Obor: Bezpečnost informačních technologií
Název: **Útok hrubou silou na přístupový systém s pomocí syntetických otisků prstů**
Brute Force Attack on Access System Using Synthetic Fingerprints
Kategorie: Bezpečnost

Zadání:

1. Prostudujte literaturu týkající se rozpoznávání podle otisků prstů, zejména metody porovnávání a generování syntetických otisků prstů. Seznamte se se softwarem pro porovnání otisků prstů (Innovatrics nebo Neurotechnology).
2. Navrhněte metodu experimentálního zjištění odolnosti algoritmu (Neurotechnology nebo Innovatrics) na užití syntetických otisků prstů. Ty generujte na základě informací získaných z fragmentu vzorového otisku prstu.
3. Implementujte aplikaci pro navržené metody z předchozího bodu.
4. Využijte vytvořenou aplikaci k útoku hrubou silou na přístupový systém, využijte několika vstupních otisků prstů. Analyzujte časovou náročnost a skóre porovnání jednotlivých metodik.
5. Dosažené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná vylepšení a rozšíření Vašeho řešení.

Literatura:

- Dražanský, M.: *Hand-Based Biometrics: Methods and technology*, IET 2018, pages 430, ISBN 978-1-78561-224-4.
- Kanich, O.: *Fingerprint Damage Simulation*, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2014, p. 57. ISBN 978-3-659-63942-5.
- Maltoni, D., Maio, D., Jain, A.K. and Prabhakar, S.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, 2009, pages 512. ISBN 978-1-8488-2254-2.

Při obhajobě semestrální části projektu 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 2019

Datum odevzdání: 3. června 2020

Datum schválení: 30. května 2020

Abstrakt

Práce se zabývá odolností porovnávacího algoritmu VeriFinger vůči syntetickým otiskům. V práci jsou postupně rozebrány základy otisků prstů, porovnávacích algoritmů a generátorů syntetických otisků. Celkově byly navrženy tři experimenty, které měly pomoci syntetických otisků odolnost algoritmu vyzkoušet. Pro vyhodnocení jednotlivých experimentů byla implementována aplikace využívající algoritmus VeriFinger. Celkově bylo vygenerováno 2 800 000 syntetických otisků přes všechny experimenty. První experiment ukázal, že náhodné generování otisků není účinné v případě reálných otisků, avšak u syntetických otisků bylo do jisté míry dostačující. Druhý experiment dokázal, že lze pomocí porovnávání a skóre porovnání odhadnout třídu identifikovaného otisku a ve třetím experimentu se zúžením generování na jednu třídu zvedl celkový počet shodných otisků. Výsledky jednotlivých experimentů byly sepsány a navrženo jejich možné rozšíření.

Abstract

The work deals with the resistance of the VeriFinger comparison algorithm to synthetic fingerprints. The basics of fingerprints, comparison algorithms and synthetic fingerprint generators are gradually analyzed. In total, three experiments were designed to test the resistance of the algorithm using synthetic fingerprints. An application using the VeriFinger algorithm was implemented to evaluate individual experiments. A total of 2 800 000 synthetic fingerprints were generated across all experiments. The first experiment showed that random fingerprint generation was not effective for real fingerprints, but was somewhat sufficient for synthetic fingerprints. The second experiment proved that comparison and the comparison score could be used to estimate the class of the identified fingerprint, and in the third experiment, by narrowing the generation to one class, it raised the total number of matched fingerprints. The results of individual experiments were written and their possible extension was suggested.

Klíčová slova

otisky prstů, syntetické otisky prstů, porovnávací algoritmy, bezpečnost, útok hrubou silou, markanty, VeriFinger

Keywords

fingerprints, synthetic fingerprints, comparison algorithms, security, brute force attack, minutiae, VeriFinger

Citace

POLEHŇA, Dominik. *Útok hrubou silou na přístupový systém s pomocí syntetických otisků prstů*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich, Ph.D.

Útok hrubou silou na přístupový systém s pomocí syntetických otisků prstů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Kanicha, Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....

Dominik Polehňa

3. června 2020

Obsah

1	Úvod	2
2	Otisky prstů	3
2.1	Základní charakteristiky	3
2.2	Klasifikace otisků	5
2.3	FAR a FRR	7
3	Porovnání otisků prstů	10
3.1	Metody založené na markantech	11
3.2	Korelační metody	15
3.3	Metody založené na podobnosti	16
3.4	Metoda ACE-V	17
3.5	Komerční metoda VeriFinger	18
4	Syntetické otisky	19
4.1	SFinGe algoritmus	20
4.2	Generátory syntetických otisků	23
5	Návrh a analýza nástrojů k ověření odolnosti verifikačních metod	28
5.1	Popis experimentů	28
5.2	Výběr nástrojů	29
5.3	Příprava experimentů	31
6	Implementace pomocné aplikace	32
6.1	Extrakce šablon	32
6.2	Identifikace otisků	34
7	Vyhodnocení jednotlivých experimentů	37
7.1	Metodika vyhodnocení	37
7.2	První experiment „náhodný“	38
7.3	Druhý experiment „analýza třídy“	42
7.4	Třetí experiment „levá smyčka“	45
7.5	Shrnutí	49
8	Závěr	51
	Literatura	53
A	Paměťové médium	56

Kapitola 1

Úvod

Biometrie se využívá již poměrně dlouhou dobu, avšak její využití pro běžné uživatele začalo stoupat až v posledním desetiletí. Využívají se různé biometrické charakteristiky člověka. Nejvíce se však využívá duhovka oka, otisk prstu či obličej. Běžný občan se může nyní s biometrií setkat na úřadech, kde při vyřizování dokladů bývají žadateli snímány otisky prstů. Postupně se také biometrie zavádí v oblasti letecké dopravy, kde se využívá k ověření totožnosti cestujícího při vstupu do bezcelní zóny. Dnes již téměř všechny mobilní telefony obsahují čtečku otisků prstů, kterou využívají k jeho odemčení, a otisky prstů se tak stávají nejrozšířenější a nejpoužívanější biometrickou charakteristikou. Nově se také v mobilních telefonech začíná využívat rozpoznávání uživatele pomocí obličeje. To vše vede k tomu, že firmy investují do rozvoje těchto technologií, jelikož s větším využitím roste i větší zodpovědnost a stoupají nároky. Lidé na biometrické zabezpečení spoléhají, a tak je třeba řešit všechny vzniklé problémy.

K tomu, aby bylo otisky možné využívat pro biometrické systémy, je zapotřebí zajistit, aby je systém dokázal porovnat a jednoznačně rozlišit. Jedna z předních firem v oblasti biometrie, Neurotechnology, se tímto problémem zabývá a disponuje tak jedním z nejlepších porovnávacích algoritmů na trhu, který se nazývá *VeriFinger*. Všechny porovnávací algoritmy je zapotřebí před jejich samotným použitím řádně otestovat, avšak takové testování vyžaduje velké množství otisků, se kterými přicházejí různé právní problémy. Jelikož je biometrická charakteristika člověka chráněna jistými zákony, její využití je možné pouze v případě svolení jejího vlastníka. Aby došlo k vyhnutí se právním problémům, tak se začaly využívat syntetické otisky prstů, které jsou generovány pomocí programu a můžou se tak volně využívat i šířit.

Práce je ze všech biometrických charakteristik zúžena právě na otisky prstů. Je zaměřena na testování odolnosti porovnávacího algoritmu *VeriFinger* vůči syntetickým otiskům. Hlavním cílem je pokusit se vygenerovat syntetický otisk, který bude algoritmem shledán za shodný s jistým konkrétním reálným otiskem. Jde o to zjistit, zdali je možné takový syntetický otisk vygenerovat v rozumné časové době. Případně experimentovat s dostupnými informacemi o reálném otisku a zjistit, kolik je toho zapotřebí o otisku vědět, aby bylo možné ho v dostatečné míře replikovat a využít tak k nežádoucímu přístupu v biometrickém systému.

Druhá kapitola přináší základní znalosti o samotných otiscích prstů. Ve třetí kapitole jsou rozebírány vybrané porovnávací metody. Čtvrtá kapitola představuje syntetické otisky a jejich způsob generování. V páté kapitole je analýza dostupných nástrojů, na kterou navazuje kapitola šestá, která představuje implementovanou aplikaci pro usnadnění experimentů. V sedmé kapitole jsou sepsány výsledky provedených experimentů.

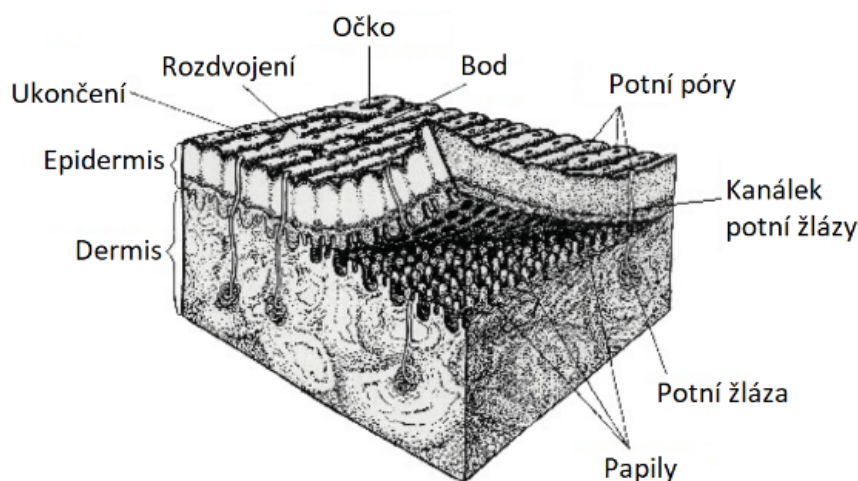
Kapitola 2

Otisky prstů

Přestože používání otisků prstů se pro běžné lidi jeví jako moderní technologie, tak již po více než 2000 let si je lidstvo vědomo toho, že otisky prstů poskytují vzácnou vlastnost a to, že lze pomocí nich odlišit jedince od jedince. Již v dobách Říše Tchang, která existovala v letech 618-907, byly otisky prstů využívány čínskými řemeslníky, kteří pomocí nich „podepisovali“ svou práci [15]. Ve stejné době se v Japonsku otisky využívaly k podepisování úředních dokumentů. Na dlaních každého člověka, ale i na jeho chodidlech, se nacházejí útvary kůže, pomocí kterých lze člověka odlišit od všech dalších žijících na zemi. Nicméně až v roce 1880 Henry Faulds vydal vůbec první článek, který poukazyval na využitelnost otisků prstů k identifikaci osob, a zároveň jejich využití jako důkazní materiál. Postupně se v 20. století začaly otisky k identifikaci osob používat a staly se tak standardem ve forenzní analýze [15].

2.1 Základní charakteristiky

Tak jako celé tělo, tak i ruce a konečky prstů jsou pokryty kůží, která se skládá ze tří vrstev: *epidermis*, *dermis* a *hypodermis* [22]. Struktura kůže je znázorněna na obrázku 2.1. tyto vrstvy dohromady tělu poskytují ochranu těla, regulaci teploty, cit, vylučování, imunitu a syntézu vitamínu D [15]. Na povrchu se nachází *epidermis*. Tato vrstva tělu slouží k ochraně



Obrázek 2.1: Řez kůží zobrazující jednotlivé vrstvy. Obrázek převzat z [11].

před odpařováním vody, zároveň se chová jako receptor a poskytuje ochrannou vrstvu pro vrstvy nižší. Ochranu zajišťuje nejen před fyzickým poraněním, ale také před slunečním zářením. Míra ochrany před slunečním zářením je dána pigmentovou buňkou, která zároveň určuje barvu kůže, a je zodpovědná za syntézu vitamínu D. Povrch vrstvy *epidermis* neustále rohovatí a odumírá. To je způsobeno tím, že buňky ve spodních vrstvách kůže se neustále dělí, a tak vytlačují svrchní vrstvy. Tím je způsobena neustálá obnova kůže.

Druhou vrstvou je *dermis*. Jedná se o elastickou a vazivovou vrstvu, která zajišťuje svrchní vrstvě *epidermis* stavební podporu a výživu. Vrstva zároveň slouží jako krevní „nádrž“ a obsahuje nervová zakončení, která slouží k vnímání hmatu a tepla. Dále také obsahuje vlasové folikuly (tkáň, z níž vyrůstá vlas), potní žlázy, mazové žlázy a krevní cévy. Krevní cévy pak mají za úkol právě zmíněnou výživu vrstvy *epidermis*, ale zároveň i samotné vrstvy *dermis*. Díky vrstvě *dermis* je kůže pružná a odolná.

Poslední zmíněná vrstvy *hypodermis* se nachází pod *dermis*. Skládá se převážně z podkožního tuku, který je velmi důležitý pro ukládání energie. Kromě toho je tuková vrstva velmi důležitá pro ochranu těla, propojení vrchních vrstev s kostmi či chrupavkami, regulaci teploty v těle, kde slouží jako izolátor, který zajišťuje ochranu proti mrazu, ale i vysokým teplotám. Mimo jiné produkuje hormon *leptin*, který tělu dává signál, že je čas přestat jíst [10].

Otisky prstů jsou tvořeny papilárními liniemi, které se nachází na povrchu spodní strany prstů, na rukou i nohou. Papilární linie se formují v prostřední vrstvě *dermis*. Jedná se o vyvýšené reliéfy o výšce 0,1-0,4 mm a šířce 0,2-0,7 mm. Struktura papilárních linií je pro každého člověka jedinečná a právě ona umožňuje jednoznačnou identifikaci člověka. O její unikátnosti poprvé informoval Johann Christoph Andreas Mayer v roce 1788 [11].

Tvorba papilárních linií je započata již při vývoji plodu a k jejich úplnému vytvoření dojde přibližně již v sedmém měsíci [16]. Pokud nedojde k trvalému poškození, které může být způsobeno závažnějším poraněním zárodečné části kůže, tedy vrstvy *dermis*, nebo v případě vážných kožních onemocnění [14], tak si papilární linie zachovávají stejný tvar po celou dobu života člověka. Nicméně existují studie, které poukazují na to, že s časem k postupné změně dochází. Například studie [38] zkoumá postupnou změnu skóre porovnání, které je výsledkem porovnávacího algoritmu, u otisku prstu, který je pořízen v delších časových intervalech. Výsledkem studie je, že postupně dochází k nepatrné změně papilárních linií a výsledné skóre porovnání se tak snižuje. Nicméně změna je tak malá, že i přes ni je stále možné provést identifikaci člověka. Zajímavostí je, že ke shodě otisků nedochází ani u jednovaječných dvojčat. Jistá podobnost se u dvojčat však nachází, jelikož sdílí DNA. Avšak i přes shodnou DNA má každý plod jiné podmínky pro vývoj, a tím pak dochází k drobným změnám, podle kterých lze dvojčata rozlišit [16]. V knize [14] pana Galtona se uvádí, že pravděpodobnost nalezení dvou osob se shodnými otisky je 1 ku 64 miliardám. Článek [12] pojednává o tom, za jak dlouho by mohlo k nalezení shody dojít. Udávají, že k nalezení by nemělo dojít v průběhu nejbližšího milionu let. tyto čísla vycházejí ze statistických údajů nasbíraných ve Velké Británii. Nicméně uvádí, že i kdyby byly v úvahu vzaty všechny databáze otisků, které se na světě nachází, tak by se hranice nalezení posunula z milionu let na řádově stovky tisíc let. Průměrná doba života člověka je přibližně 75 let, a tak je vysoce nepravděpodobné, že se jedinci se shodnými otisky potkají.

Nauka, která se zabývá právě o kožní papilární linie na prstech, dlaních a ploskách nohou, se nazývá *daktyloskopie* nebo též *dermatoglyfika* [30]. Daktyloskopie se opírá o tři základní zásady. „Počítá se s tím, že na světě neexistují dva jedinci, kteří mají naprosto shodné obrazce papilárních linií; papilární linie jsou po celý život neměnné; obrazce papilárních linií jsou trvale neodstranitelné, pokud nedojde k poškození zárodečné vrstvy kůže“ [1].

Nejvíce známá je pravděpodobně kriminalistická daktyloskopie, pomocí které se hledají pachatelé, ale i identifikují neznámá těla. Daktyloskopické stopy zanechává člověk při kontaktu kůže s předmětem. To je způsobeno tím, že povrch kůže je trvale jemně zpoceny a tento pot pak zůstává na povrchu předmětů, které člověk uchopil. V Česku se nachází daktyloskopická databáze AFIS, která v současnosti obsahuje přibližně 600 tisíc osobních karet [1].

Daktyloskopie přináší tři druhy otisků, které se liší svým vzhledem a umístěním, ale i způsobem snímání. Jedná se o otisk válený, někdy též nazývaný jako rolovaný [11]. Dále otisk píchaný a jako poslední otisk latentní. Rozdíl mezi jednotlivými otisky je zobrazen na obrázku 2.2.

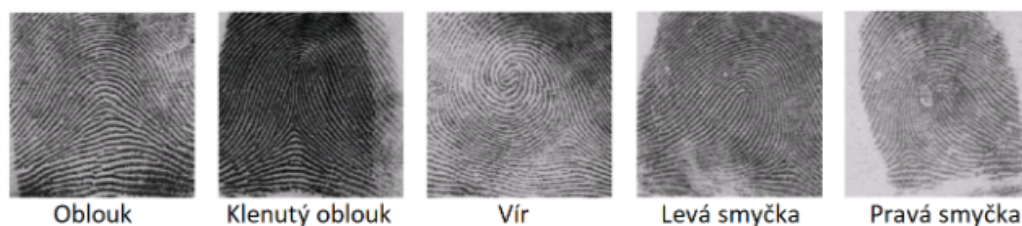


Obrázek 2.2: Otisky prstů: a) latentní, b) píchaný, c) válený.

Válený otisk lze získat přiložením prstu, který byl předem namočen v inkoustu, k daktyloskopické kartě, a postupným přetočením prstu z jedné strany na druhou, přičemž prst se musí po celou dobu dotýkat karty. Píchaný otisk má obdobný způsob, avšak nedochází k přetáčení prstu, nýbrž pouze k jednoduchému přitlačení prstu ke kartě. Za latentní otisky se pak označují ty, které jsou člověkem zanechány při kontaktu s předmětem. tyto otisky nemusejí být na první pohled viditelné a k jejich odhalení se využívá daktyloskopický prášek. Ten je nanesen na povrch předmětu, kde se latentní otisk nachází, a jelikož je otisk zanechán díky potu, který je kůží neustále vylučován, tak se daktyloskopický prášek zachytí právě na místě doteku. Pokud se přes zachycený prášek přelepí lepicí materiál, obvykle průhledná lepicí fólie, zůstane prášek přilepen na fólii. Přilepený prášek pak tvoří nasnímaný latentní otisk prstu.

2.2 Klasifikace otisků

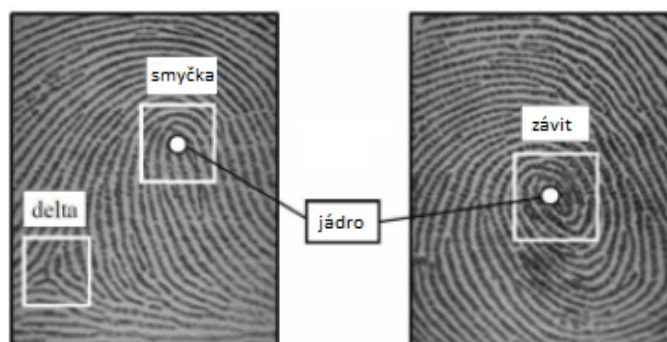
V roce 1823 publikoval Jan Evangelista Purkyně dílo [11], které se zabývalo klasifikací otisků do 9 tříd. Později pak ve svém díle [14] Francis Galton uvedl rozdělení otisků do třech základních tříd: oblouk, vír a smyčka. Dnes se převážně používá rozdělení do pěti tříd a to oblouk, klenutý oblouk, vír, levá smyčka a pravá smyčka. Jedná se o Henryho klasifikační systém, který vytvořil Edward Henry na konci 19. století. Jednotlivé třídy jsou zobrazeny na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Jednotlivé třídy Henryho klasifikačního systému. Obrázek převzat z [11].

Existují i další typy, které se odvíjí od těch základních. Jsou to například plochý oblouk, ulnární smyčka, radiální smyčka a dvojsmyčka. Nejčastěji se na lidských prstech vyskytuje smyčka, která tvoří přibližně 60 % výskytů. Zatím co spirála zastupuje přibližně 35 % a oblouk je tak nejvzácnější s pouhými 5 % [25]. Co vedlo k zavedení klasifikačního systému, je to, že při vyhledávání v rozsáhlé databázi otisků bylo potřeba celkový počet otisků snížit na co nejmenší počet, aby bylo vyhodnocení možné v co nejkratší době.

Rozdělení do jednotlivých tříd umožňují tzv. singulární body. Singulární body jsou oblasti, kde obvykle dochází k většímu zakřivení papilárních linií. Rozlišujeme dva typy singulárních bodů. Jedním z nich je *delta* [11]. Je to místo, kde se papilární linie rozbíhají do tří směrů. Většinou se nachází na okraji prstu. Může se stát, že otisk obsahuje delty dvě [11]. Druhý singulární bod se nazývá jádro, které tvoří střed otisku a nachází se na nejspodnějším vyklenutí v průběhu papilárních linií [27]. Rozlišujeme dva typy jádra a to závit a smyčku. Na obrázku 2.4 jsou jednotlivé singulární body vyobrazeny.



Obrázek 2.4: Na otisku vlevo lze vidět jádro typu smyčka a deltu. Na otisku vpravo je vidět jádro typu závit. Obrázek převzat z [27].

K detekci singulárních bodů se využívají různé algoritmy. Pravděpodobně jeden z nejpopulárnějších je *Poincare index*. Algoritmus byl poprvé k detekci singulárních bodů využit v roce 1984. Je založen na jednoduchém součtu rozdílů úhlů mezi jednotlivými pixely. Přestože je algoritmus jednoduchý, může vést k chybné detekci singulárních bodů v případě špatné kvality otisku. K předejití chybných detekcí se zavádí různá předzpracování, díky kterým pak vznikají různé modifikace algoritmu [27].

Na první pohled lze vidět, že papilární linie nejsou po celé své délce nepřerušené. Místu, kde dochází k nějaké změně papilární linie se nazývá markant. Existuje velké množství markantů, které se mohou na otiscích prstů vyskytovat. Mezi základní dva patří ukončení a rozdvojení. Ty se také využívají při porovnání otisků v biometrických systémech [11]. V daktyloskopii se však využívá mnohem více markantů jako je dvojitá vidlička, trojitá

vidlička, hák, křížení, boční kontakt, bod, interval, jednoduchá smyčka a jiné. Některé z uvedených, případně i jiné, jsou uvedeny na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Ukázka různých druhů markantů odvozených od základních.

Ze základních dvou, tj. ukončení a rozdvojení, lze odvodit řadu dalších. Kriministická daktyloskopie spočívá v lokalizaci markantů v otisku a jejich následné porovnání s markanty z jiného otisku. V případě počítačového zpracování je postup obdobný, nicméně existuje více způsobů, které se k porovnání dvou otisků používají. Více o porovnávacích algoritmech je napsáno v kapitole 3.

Kromě klasifikace do tříd by nejednoho mohlo napadnout, zdali je možné rozlišit otisky mužů a žen. Tím se zabývala studie [2]. Pokud by šlo s jistotou říci, že daný otisk patří muži, či ženě, tak by se teoreticky doba identifikace člověka snížila na polovinu, pokud by poměr otisků žen a mužů byl 1:1. Studie se zabývala hustotou papilárních linií a tvrdí, že u žen je hustota papilárních linií výrazně vyšší než je tomu u mužů. Domnívá se, že tento fakt je způsoben tím, že ženské papilární linie jsou jemnější a tenčí než u mužů. Jiné studie se zaměřují na typy markantů přítomných v jednotlivých otiscích a tvrdí, že u žen je daleko častější výskyt markantu typu vidlice, než je tomu u mužů [17] [26].

2.3 FAR a FRR

Později se bude v práci mluvit o porovnávání otisků prstů, jak je tomu v případě biometrického systému. Pro porovnání otisku s biometrickou šablonou se využívá skóre porovnání. Čím větší je skóre, tím větší je i shoda mezi porovnávanými objekty. V případě biometrického přístupového systému je přístup osobě umožněn tehdy, pokud při verifikaci nebo identifikaci je nalezena shoda se skóre větším, než je zadaný určitý práh. Teoreticky skóre oprávněné osoby, která má mít umožněn přístup do systému, by mělo být vždy větší než skóre osoby neoprávněné. Pokud by Tato podmínka byla zaručena, stačilo by zvolit pro každou osobu individuální práh a oddělit tak oprávněné osoby od neoprávněných. Existují však případy, kdy je Tato podmínka porušena a neoprávněná osoba dosahuje vyššího skóre.

Díky tomu nelze zvolit práh takový, aby nedocházelo k výskytu žádné chybovosti, ale je třeba zajistit, aby byla co nejmenší.

Pokud by byl tedy práh zvolen příliš vysoký, tak aby žádná z neoprávněných osob nedosahovala takového skóre, poté by nebyly žádné osoby chybně akceptovány systémem. Nicméně v tomhle případě by byl přístup odmítnut i oprávněným osobám, které dosahují menšího skóre než je největší skóre neoprávněných osob. Kdyby byl práh zvolen opačně, tedy aby žádná z oprávněných osob nebyla nesprávně přijata, tak by docházelo k přijetí neoprávněných osob s vyšším skóre než je největší skóre oprávněné osoby.

Pro lepší vysvětlení si lze představit biometrický systém, který obsahuje pouze jeden registrovaný otisk ve své databázi. Pokud se pokusí o přístup do systému osoba s neoprávněným přístupem, bude se její výsledné skóre porovnání vůči otisku v databázi nacházet v první křivce, označené jako skóre útočnicka, znázorněné na grafu vlevo na obrázku 2.6. Úkolem systému je zajistit, aby nedošlo u útočnicka k povolení přístupu do systému. Reálně se práh pohybuje mezi těmito extrémů a pro představu, jak je systém nastavený se využívají FAR a FRR. Zavádí se tedy pojem pravděpodobnost chybného přijetí, který se ve zkratce píše jako FAR z anglického False Acceptance Rate [33]. Pravděpodobnost chybného přijetí je vypočítána jako [32]:

$$FAR = \frac{\text{Pocet chybných přijetí různých otisků}}{\text{Celkový počet pokusu o přijetí různými otisky}}. \quad (2.1)$$

Hodnota FAR je obvykle udávána v procentech. Graf vpravo na obrázku 2.6 znázorňuje hodnotu FAR. Čím větší je hodnota na vodorovné ose, tedy hodnota prahu, tím je menší šance na přijetí útočnicka do systému.

Na druhou stranu, při využití stejného biometrického systému, kdykoliv se snaží o přístup osoba, která je vlastníkem otisku registrovaného v databázi, tak její výsledné skóre porovnání leží v hodnotách v druhé křivce označené jako skóre klienta na grafu vlevo na obrázku 2.6. Zde přichází na řadu druhý pojem a to pravděpodobnost chybného odmítnutí, neboli FRR z anglického False Rejection Rate [33], kde jeho hodnota se vypočítá vztahem [32]:

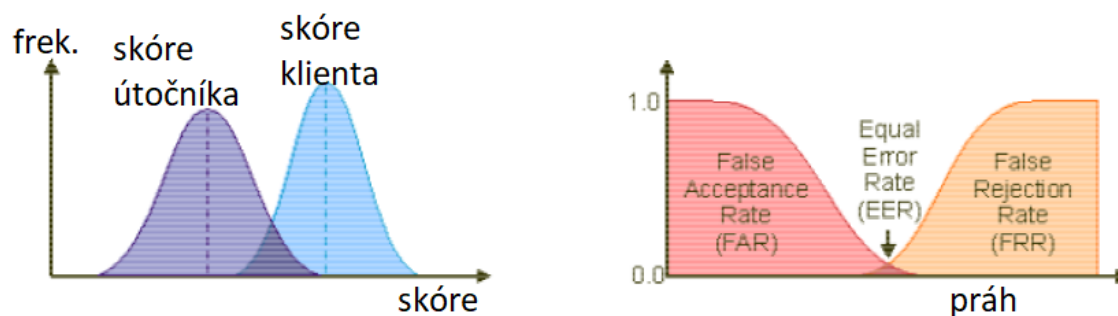
$$FRR = \frac{\text{Chybně odmítnuté oprávněné otisky}}{\text{Celkový počet oprávněných otisků}}. \quad (2.2)$$

Aby nedošlo k chybnému odmítnutí oprávněné osoby, musel by práh být nastaven na nejnižší hodnotu skóre, kterou biometrický systém dosáhne při porovnání otisku oprávněné osoby s otiskem v databázi. V takovém případě by výsledná hodnota FRR byla 0 %. Na grafu vpravo na obrázku 2.6 je znázorněno, jak se hodnota FRR zvětšuje zároveň se zvyšujícím se prahem.

Na grafu vlevo na obrázku 2.6 lze vidět, že se skóre útočnicka a klienta překrývají. V takovém případě nelze za žádných okolností dosáhnout hodnoty 0 % jak pro FAR tak pro FRR. Zde nastává problém s výběrem vhodného prahu pro biometrický systém. Lze nastavit systém do stavu, kdy je vyváženost mezi chybným přijetím a chybným odmítnutím vyvážená a tomuto bodu se říká stejná míra chybovosti a využívá se zkratka ERR z anglického Equal Error Rate [33].

Pomocí hodnot FAR a FRR se pak dá určit míra zabezpečení systému. Pokud je hlavním cílem vytvořit co nejbezpečnější systém, je nejdůležitější, aby byla hodnota FAR co nejnižší. V takovém případě pak dochází k tomu, že jsou oprávněné osoby chybně odmítnuty a musejí se při verifikaci prokázat vícekrát, než se biometrickému systému podaří nasnímat jejich otisk v dostatečné kvalitě, aby při porovnání byl překonán práh. Na druhou stranu pokud je biometrický systém nasazen v místě, kde dochází k častému přístupu mnoha lidí,

je nežádoucí, aby docházelo k chybnému odmítnutí. Proto takový případ je pak daleko vhodnější systém s vyšší hodnotou FRR. Vždy záleží na tom, kde je daný systém nasazen a jaké jsou kladeny bezpečnostní požadavky.



Obrázek 2.6: Graf vlevo znázorňuje rozložení skóre útočníka a klienta. Graf vpravo ilustruje, jak se s nastavením prahu mění FAR a FRR.

Kapitola 3

Porovnání otisků prstů

Existuje velká řada porovnávacích algoritmů, které jsou vyvíjeny každým dnem. Stále více se kladou na porovnávací algoritmy větší a větší požadavky, jelikož se biometrické systémy využívají k zabezpečení osobních dat, ale i k přístupu do budov s různým stupněm utajením, aj. To vše vede k neustálému vývoji.

Mimo biometrické systémy se využívá princip, který se již dlouhá léta nezměnil. Zvýšily se pouze nároky na přesnost a dodržování pracovních postupů. To vedlo k zavedení standardu popisující pracovní postup, který vychází z metody ACE (Analysis Comparison Evaluation), kterou zavedl Roy Hubert [7]. Jedná se o definovaný postup porovnávání dvou věcí nezávisle na tom, o jaké objekty se jedná. Následně David R. Ashbaugh na začátku osmdesátých let přidal k postupu verifikační fázi a název metody tak přešel k dnes používanému ACE-V. Jedná se o nejběžnější metodu využívanou k porovnávání otisků prstů ve forenzní analýze [7].

Všechno, co je potřeba řešit při identifikaci člověka ve forenzní analýze, je zapotřebí automatizovat algoritmicky, aby porovnání mohl provádět počítač. Nejčastěji se využívá rozdělení algoritmů do tří základních skupin [21]. Jednou ze skupin jsou algoritmy, které k využívají korelačního porovnávání. Další skupinou jsou algoritmy, které detekují v otiscích markanty, a ty pak porovnávají mezi sebou již bez přítomnosti šedotónového obrázku s otiskem. Poslední skupinou jsou pak algoritmy, které využívají jiné charakteristické vlastnosti papilárních linií, nikoli však markanty.

Výsledkem algoritmického porovnání pak obvykle bývá tzv. skóre porovnání. V případě algoritmů založených na markantech je výsledné skóre porovnání vypočítáno z celkového počtu shodných markantů, kde se bere v úvahu i jejich pozice, případně i typ. To, jakým stylem je výsledné skóre porovnání vypočítáno, se může u konkrétních implementací algoritmů lišit.

Nicméně porovnání není jednoduchou záležitostí. Otisky prstů mají velkou vnitrotřídní variabilitu [15], to znamená, že pokud je jeden a tentýž otisk nasnímán vícekrát za sebou, tak se každý otisk bude od druhého nějakou částí lišit. Snímání otisku ovlivňuje příliš mnoho faktorů. Může se měnit tloušťka papilárních linií, která je ovlivněna tlakem prstu při snímání na senzor, případně na daktyloskopickou kartu či jiný materiál, který se využívá. Další ovlivňující faktory mohou být různá natočení prstu, stav kůže, okolní šum nebo třeba chybovost snímacího zařízení. Na obrázku 3.1 jsou vidět dva shodné otisky prstů. Na první pohled nemusí být zřejmé, že se jedná o shodné otisky. Lze si všimnout, že píchaný otisk má ořezanou oblast delty a působí více „poškozeně“.



Obrázek 3.1: Dva shodné otisky prstů. Otisk vlevo je rolovaný, kdežto otisk vpravo je píchaný.

Obdobný problém se nachází i v mezitřídní variabilitě. Na obrázku 3.2 jsou dva rozdílné otisky prstů, které jsou si na první pohled velmi podobné. Problémy s mezitřídní a vnitrotřídní variabilitou vedou k problému správného výběru biometrického systému podle FAR a FRR, o kterých bylo psáno v sekci 2.3.



Obrázek 3.2: Dva odlišné otisky prstů, které jsou si velmi podobné. Obrázek převzat z [3].

3.1 Metody založené na markantech

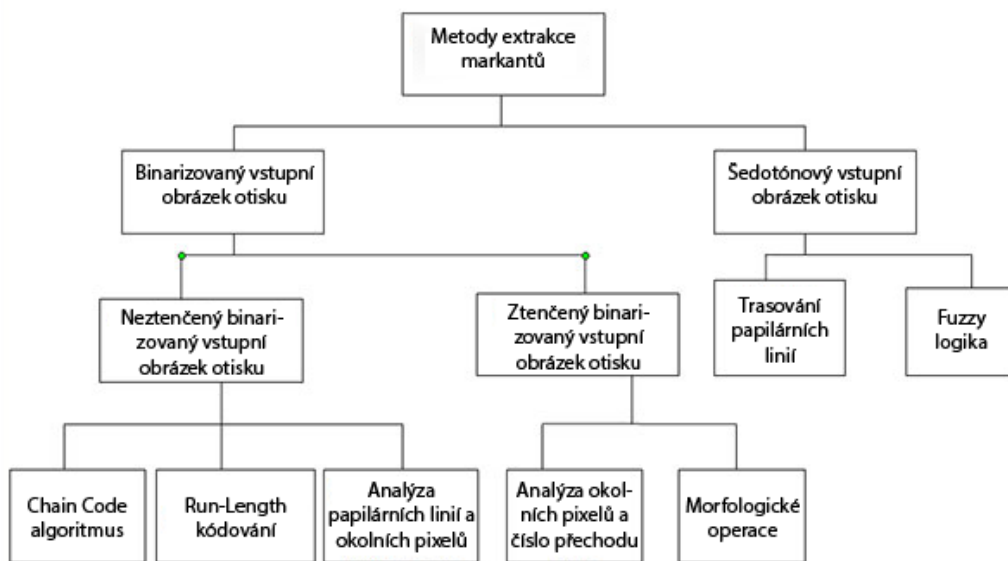
Metody využívající markanty, jsou pravděpodobně jedny z nejrozšířenějších a nejspolehlivějších, jelikož markanty jsou výraznou částí unikátnosti každého otisku [4]. U těchto metod probíhá porovnání ve dvou fázích. Nejdříve je zapotřebí ze vstupního šedotónového obrázku otisku, který je získán pomocí čtečky, extrahovat množinu markantů. To je zapotřebí udělat u obou porovnávaných otisků. Obecný postup je následující. Nejprve dojde k lokalizaci otisku v obrázku a k jeho extrakci z pozadí. Následně se vytvoří pole orientací a mapa, která udává hustotu papilárních linií. Ze získaných informací dojde k předzpracování obrázku, které usnadní lokalizaci markantů. Předzpracování a extrakce se může lišit podle druhu implementace. Dále se již pracuje pouze s množinou získaných markantů a provádí se jejich vzájemné párování. Z počtu shodných markantů je poté vypočítáno výsledné skóre porovnání, které určuje, zdali je otisk považován za shodný či nikoli. To vše záleží na nastá-

vení FAR v biometrickém systému. V případě porovnání 1:N se často považuje za shodný otisk ten, který dosáhl největšího skóre porovnání.

Algoritmy v první fázi, extrakci markantů, lze rozdělit do dvou skupin. Rozdělení do skupin se odvíjí od toho, s jakým formátem vstupního otisku algoritmy pracují. Rozdělení je následující:

- Algoritmy, které pracují nad binárním obrázkem,
- algoritmy, které pracují přímo nad šedotónovým obrázkem.

Ze dvou zmíněných skupin se pak odvíjí další typy, které využívají různé způsoby při práci s binarizovaným vstupním obrázkem či s šedotónovým obrázkem. Na obrázku 3.3 je výčet základního rozdělení podle publikace [28].



Obrázek 3.3: Rozdělení algoritmů pro extrakci markantů.

3.1.1 Předzpracování a extrakce markantů

Algoritmy pro extrakci markantů byly rozděleny do dvou základních skupin. Levá část obrázku 3.3 převádí vstupní šedotónový obrázek do binární podoby. Prvním krokem algoritmů v levé části je tedy binarizace. Ta se provádí zjednodušeným způsobem tak, že všechny pixely ležící v oblasti papilární linie mají přiřazenou hodnotu, která reprezentuje černý pixel (většinou hodnota 1) a ostatním pixelům je přiřazena hodnota bílého pixelu (většinou 0). Rozdíl mezi původním a binarizovaným otiskem lze pozorovat na obrázku 3.4. Kde otisk a) je původní vstup a otisk b) je po binarizaci. Některé algoritmy dále pracují s čistým binarizovaným otiskem, avšak některé zavádí další krok, kde dochází ke ztenčení papilárních linií na jeden pixel. Pro ztenčení se využívají například algoritmy *Stentiford thinning algorithm* nebo *Holt thinning algorithm* [13]. V případě ztenčení pak dochází často ke vzniku falešných markantů, které je zapotřebí detekovat a odstranit [28]. Otisk po fázi ztenčení je na obrázku 3.4c.

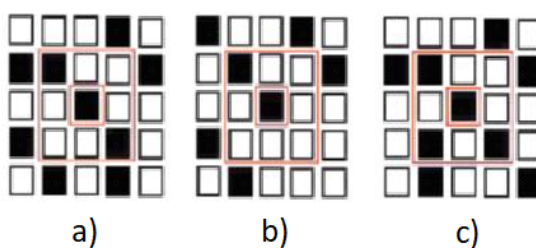


Obrázek 3.4: Otisk a) představuje původní vstupní obrázek. Otisk b) je vstupní obrázek po binarizaci c) je po fázi ztenčení. Obrázek převzat z [36].

Nejjednodušší z algoritmů využívající binarizovaný vstupní obrázek je pravděpodobně ten, který využívá číslo přechodu. Anglicky se nazývá *Crossing number* [28]. Je založen na jednoduchém principu analýzy okolních pixelů. Algoritmus postupuje pixel po pixelu a v každém kroku analyzuje jeho okolí v okně 3×3 . Podle počtu sousedních pixelů je pak určeno, zdali se na pozici právě analyzovaného pixelu nachází markant či nikoli. K jednoduchému rozhodnutí postačí následující výčet [28]:

- 0 sousedních pixelů - izolovaný bod,
- 1 sousední pixel - ukončení,
- 2 sousední pixely - papilární linie,
- 3 sousední pixely - rozdvojení,
- 4 sousední pixely - křížení.

Na obrázku 3.5 je vidět vyznačené okno 3×3 a tři různé situace, které reprezentují pokračování papilární linie, ukončení a rozdvojení.



Obrázek 3.5: Obrázek a) 2 sousední pixely - papilární linie; b) 1 sousední pixel - ukončení; c) 3 sousední pixely - rozdvojení.

Druhou částí algoritmů jsou ty, které využívají při své práci šedotónový obrázek. Jejich převážná výhoda spočívá v tom, že fáze binarizace a ztenčování zavádí nové problémy. Při binarizaci může dojít ke ztrátě velkého množství informací z obrázku. Obě fáze jsou časově náročné a na některé biometrické systémy je kladen velký důraz na jejich rychlou odezvu. Dále je vysoká pravděpodobnost zanesení chybných markantů, které při fázích vznikají. To

pak zavádí již zmíněnou potřebu detekce a odstranění chybně označených markantů, což vede k větší časové náročnosti. Podle článku [28] jsou algoritmy pracující s šedotónovým obrázkem spolehlivější při nižší kvalitě vstupu.

Poté, co jsou markanty získány některou z metod, je otisk reprezentován vektorem různé délky, kde jeho délka je rovna počtu získaných markantů ze vstupního obrázku otisku. Každý prvek vektoru nese určité informace o daném markantu. Hlavními informacemi je trojice [21]. To je pozice markantu reprezentována souřadnicemi x a y a úhel, kterým by pokračovala papilární linie.

3.1.2 Porovnání markantů

Při fázi porovnávání se již pracuje se zmíněným vektorem obsahující informace o jednotlivých markantech. Markanty jsou reprezentovány matematicky tak, jak je uvedeno v rovnici 3.1.

$$T = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}, m_i = \{x_i, y_i, \theta_i\}, i = 1..m \quad (3.1a)$$

$$I = \{m'_1, m'_2, \dots, m'_n\}, m'_j = \{x'_j, y'_j, \theta'_j\}, j = 1..n \quad (3.1b)$$

Jeden prvek vektoru, tedy markant, je reprezentován souřadnicemi x , y a úhlem pokračování papilární linie. Některé algoritmy navíc využívají další informace, jako je typ markantu (například rozdvojení, ukončení) nebo váha markantu, která je vypočítána na základě kvality vstupního obrázku v oblasti daného markantu. V rovnici 3.1 jsou uvedeny dva vektory, kde \mathbf{T} reprezentuje šablonu, tedy již jeden z registrovaných otisků, vůči kterému bude prováděno porovnání a \mathbf{I} reprezentuje vstupní otisk [21].

Následně k tomu, aby byly dva vybrané markanty, kde jeden je vybrán z vektoru \mathbf{T} a druhý z vektoru \mathbf{I} , označeny za shodné, je zapotřebí vypočítat následující dvě rovnice. Rovnice 3.2 slouží k výpočtu prostorové vzdálenosti a její výsledek musí být menší než je tolerance, která je označena r_0 . Pomocí druhé rovnice 3.3 se pak vypočítá rozdíl úhlů dvou markantů, který musí spadat do úhlové tolerance θ_0 .

$$sd(m'_j, m_i) = \sqrt{(x'_j - x_i)^2 + (y'_j - y_i)^2} \leq r_0 \quad (3.2)$$

$$dd(m'_j, m_i) = \min(|\theta'_j - \theta_i|, 360^\circ - |\theta'_j - \theta_i|) \leq \theta_0 \quad (3.3)$$

V případě rovnice 3.3 je zapotřebí vybrat menší ze dvou výsledků. To je způsobeno tím, že úhly se kruhově opakují a rozdíl úhlů 5° a 355° je tedy pouze 10° nikoli 350° . Tolerance r_0 a θ_0 musí být nastavena s ohledem na možnost vnitřní variability, která byla popsána na začátku kapitoly 3, ale zároveň tak, aby byla brána v úvahu i mezitřídní variabilita.

Nedílnou součástí je také fáze zarovnání otisků. K tomu je zapotřebí získat posun na osách x a y , a také úhel pootočení. Je zapotřebí brát v úvahu i rozlišení vstupního obrázku otisku, jelikož dva porovnávané otisky mohou být nasnímány pomocí jiných senzorů, kde každý z nich pracuje v jiném rozlišení [3]. Algoritmů pro zarovnání existuje velká řada. Například v článku [9] využívají k zarovnání algoritmus *RANSAC*, kdežto v článku [18] představují algoritmus, který využívá histogram orientací markantů.

Tak jako existuje velké množství zarovnávacích algoritmů, je tomu i s porovnávacími algoritmy. Zde přestavený základ byl převzat z knihy [21], nicméně existují různé způsoby. V článku [39] využívají k porovnání následující postup.

Nejprve jsou vybrány dva náhodné markanty, každý z jednoho z otisků. Následně je vypočítána jejich podobnost pomocí rovnice 3.4, kde $x_1, x_2..x_n$ a $X_1, X_2..X_n$ jsou souřadnice

na ose x pro papilární linie dvou vybraných markantů.

$$S = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i X_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i^2 X_i^2)}} \quad (3.4)$$

Pokud vyjde dostatečně velká podobnost mezi dvěma vybranými otisky, pokračuje se v algoritmu dále, jinak je zapotřebí vybrat nové dva markanty a výpočet provést znovu. Co znamená „dostatečně velká“ záleží na implementaci a požadované přesnosti. Dalším krokem je označení jednoho ze dvou vybraných markantů za referenční, podle kterého se budou dále zarovnávat ostatní markanty. Pro zarovnání všech markantů se využije transformační matice uvedená v rovnici 3.5.

$$TM = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Následně je kolem každého markantu vytvořen imaginární ohraničení a pokud se dva markanty z rozdílných otisků nachází uvnitř ohraničení a zároveň mají rozdíl úhlů menší, než je požadovaná přesnost, tak můžou být označeny za shodné. Následně je z celkového počtu shodných markantů vypočítáno skóre porovnání dvou porovnávaných otisků a podle zvoleného prahu je rozhodnuto, zdali byl nalezen dostatečný počet shodných markantů či nikoli.

Metody využívající markanty jsou široce používány [39]. Jejich výhodou není jen vyšší přesnost, ale i reprezentace otisků, která zabírá méně místa než v případě ukládání šedotónového obrázku, jelikož jsou otisky ve většině případů uloženy v šablonách obsahující vektor markantů. To by mělo zajistit i vyšší bezpečnost, jelikož rekonstrukce otisku z pouhého vektoru pravděpodobně není úplně nemožná, ale alespoň složitější než v případě uložení šedotónového obrázku, kde není potřebná vůbec.

3.2 Korelační metody

Narozdíl od metod využívajících markanty, jsou korelační metody ušetřeny kroku extrakce markantů. Pracují přímo s šedotónovým obrázkem otisku. Korelační metody využívají hodnot jednotlivých pixelů.

Pokud se provádí verifikace otisku, tedy porovnání 1:1, jsou jednotlivé pixely otisku **A** porovnány s odpovídajícími pixely otisku **B**. Hodnota jejich podobnosti je vypočítána jako součet mocnin rozdílů mezi intenzitami jednotlivých odpovídajících pixelů [21] [6]. Výpočet udává celkovou podobnost otisků, avšak k rozhodnutí, zdali jsou otisky stejné či nikoli, je zapotřebí určení určité prahové hodnoty. Pokud je celková podobnost vyšší než prahová hodnota, jsou otisky označeny za shodné. V případě identifikace, porovnání 1:N, je postup obdobný. Otisk je porovnán korelací stejným způsobem jako v případě 1:1 a jako výsledek může být vrácen ten otisk, který dosáhl nejvyššího skóre.

Výpočet podobnosti se může provádět globálně pro celý otisk naráz, ale častěji se využívá segmentace otisku. V takovém případě je hodnota podobnosti vypočítána pro každý segment a nazývá se tak lokální výpočet podobnosti. To, jakým stylem je vstupní otisk rozdělen na segmenty, se může lišit v různých implementacích. Je možné využít například následující tři způsoby. Prvním z nich je rozdělení vstupního obrázku na segmenty, které se nikdy nepřekrývají a zároveň pokrývají celou plochu obrázku. Druhou možností je využít částečné překrytí segmentů. Poslední možnost je složitější, jelikož dochází k výběru pouze

určitých segmentů obrázku [21]. Ty mohou být vybrány například na základě pravděpodobnosti výskytu markantů. Největší výskyt markantů je obvykle v oblasti jádra a delty, a tak je vysoká pravděpodobnost, že právě tyto segmenty budou vybrány pro porovnání. Možné výsledky korelační metody jsou vyobrazeny na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Horní polovina obrázku zobrazuje dva otisky, které při korelaci vyšly za shodné. V dolní polovině obrázku jsou otisky, které jsou sice shodné, avšak z důvodu velkého zkreslení a kondice kůže jsou vyhodnoceny za neshodné. Obrázek převzat z [21].

Už z toho, že metoda pracuje přímo s šedotónovým obrázkem, lze odhadnout, že její výsledek je náchylný na kvalitu vstupního obrázku otisku. Nicméně v případě, že je kvalita obrázku tak nízká, že selhává extrakce markantů, nachází korelační metoda výhodu. Je také výrazně méně výpočetně náročná než ostatní metody, jelikož neprovádí tolik přípravných kroků [6]. Statisticky však nedosahuje lepších výsledků než metody založené na markantech. Existují i varianty, které nevyužívají pouze jeden obrázek, ale databázový otisk je lineární kombinace více obrázků stejného otisku [21]. Takový přístup zvyšuje pravděpodobnost označení správného otisku za shodný a naopak snižuje pravděpodobnost označení špatného otisku za správný. Podle článku [23] korelační metody selhávají při pootočení otisku, které je větší než 10° .

3.3 Metody založené na podobnosti

Do téhle skupiny spadají všechny metody, které neprovádí extrakci markantů. Dalo by se říct, že sem spadají i zmíněné korelační metody, ale ty většinou bývají uváděny samostatně. Metody v téhle skupině využívají jiných charakteristických vlastností. Jsou to například lokální orientace a frekvence obrázku, tvary papilárních linií a informace o struktuře otisku. Jejich výhodou je, že nemusí provádět různé předzpracování otisku, jako je binarizace nebo ztenčování, a ani následné odstraňování falešně vzniklých markantů.

Využívají se různé metody. Některé metody využívají *Gaborovy filtry*, které se osvědčily svou efektivností pro zachycení lokálních charakteristik. V tomhle případě jsou metody neschopny pracovat s pootočenými otisky. Aby byla zajištěna možnost porovnávat pootočené otisky, využívá se toho, že jsou otisky v databázi uloženy ve více reprezentacích, kde každá z nich je jinak natočená. To způsobuje vysoké nároky na úložné prostory, ale zároveň i na výpočetní čas. Dále se využívají metody *DWT* (Diskrétní vlnová transformace) nebo *DCT* (Diskrétní cosinová transformace) [37].

Metod existuje celá řada a kromě hlavního algoritmu se liší převážně tím, jakým stylem provádí zarovnání obrázků a jak provádí porovnání. Některé metody zarovnávají podle jádra otisku, jiné podle markantů, a nebo podle referenčního bodu. Více o dostupných metodách a jejich výsledcích se lze dočíst v článku [37].

3.4 Metoda ACE-V

Když se opominou veškeré biometrické systémy a jejich porovnání provádí člověk, většinou se drží postupů metody ACE-V. Písmena ve zkratce stojí za slovy analýza (Analysis), porovnání (Comparision), vyhodnocení (Evaluation) a ověření (Verification), což jsou hlavní čtyři fáze prováděné při porovnávání otisků.

Analýza otisku prstu se zaměřuje na zkoumání jeho kvality a množství informace, které je schopen otisk poskytnout pro práci v následujících fázích. Informace lze rozdělit do tří úrovní [31]. První úroveň se zaměřuje na celkovou strukturu papilárních linií a jeho zařazení do jedné z charakteristických tříd. Druhá úroveň zkoumá prostory v okolí jednotlivých papilárních linií, jejich vztahy a charakteristické vlastnosti, které mohou být dále využity. Jedná se tedy o různá ukončení, rozdvojení a jiné. Poslední třetí úroveň je zaměřena přímo na vlastnosti papilárních linií, což se vztahuje na tvary linií, pozice pórů a šířku papilárních linií [34]. Při analýze otisku je zapotřebí vzít v úvahu množství faktorů, které ovlivňují kvalitu otisku, jako je například zakřivení, které výrazně ovlivňuje rozhodování, zda-li je otisk vhodný k dalšímu rozboru.

Z názvu další fáze, tedy porovnávání, vyplývá, že dojde k porovnání analyzovaných informací, které otisky poskytly. Porovnání obvykle probíhá se známým otiskem prstu, který bývá vysoké kvality, jelikož byl pořízován za příznivých podmínek. Druhým otiskem je ve většině případů latentní otisk. Porovnání opět probíhá postupně podle zmíněných tří úrovní. Nejdříve se porovnají informace získané v první úrovni a pokud se shodují, teprve se pokračuje na porovnávání druhé úrovně. Druhá úroveň již porovnává charakteristické vlastnosti a nalezené markanty jednotlivých otisků. Tato část je jedna z nejtěžších a nejdůležitějších v celé fázi. Třetí úroveň porovnání obvykle probíhá zároveň s úrovní druhou, jelikož se jedná pouze o detailnější vlastnosti, avšak na ty odborník naráží již v průběhu [31].

Předposlední fáze je již „pouhé“ vyhodnocení výsledků, které se rozhoduje na základě předchozích dvou fází. Výsledek téhle fáze může vést pouze ke třem různým závěrům. Prvním z nich říká, že informace dostupné ve dvou porovnávaných otiscích se shodují a otisky jsou prohlášeny za shodné. Druhý výsledek je pravý opak, kdy není v otiscích dostatečná podobnost, případně celkový proces porovnávání byl ukončen již v některé z předchozích fází pro závažné neshody. Otisky jsou tedy označeny za neshodné. Poslední možností je ta, že získaný latentní otisk má nedostačující kvalitu, aby poskytl dostatečné množství informací k porovnání, a tak není možné rozhodnout, zda-li jsou otisky shodné či nikoli.

Poslední fáze celé metody ACE-V je verifikace. Nicméně verifikace není součástí porovnávání, ale v určitých právních situacích je zapotřebí nejen výsledku, ale také důvěryhodnost v daný výsledek. Proto se provádí verifikační část, kdy je celý proces metody proveden od počátku jiným odborníkem, aby došlo k ověření správnosti předchozího výsledku. Podstatné je, aby jeden či druhý odborník nebyl ovlivněn názorem toho druhého.

3.5 Komerční metoda VeriFinger

Porovnávací algoritmus *VeriFinger* byl vyvinut firmou Neurotechnology. Firma Neurotechnology byla založena v roce 1990 a jejím záměrem bylo využití neuronových sítí pro aplikace jako jsou biometrické identifikační systémy, počítačové vidění, robotika a umělá inteligence. Jejich výrobky zažily největšího rozmach v roce 2012, kdy došlo k velkému rozvoji využívání neuronových sítí, čehož firma využila a se svými zkušenostmi se lehce dostala do popředí trhu.

Neurotechnology nabízí své SDK (Software Development Kit), které lze využít při vývoji aplikace. Algoritmus *VeriFinger* umožňuje vytvoření šablony z otisku. Vytvořením šablony se rozumí extrakce markantů a její následné uložení. Otisk lze vložit jako obrázek nebo případně využít čtečku otisků. Podporované čtečky otisků jsou uvedeny v dokumentaci [24]. Následně lze jednotlivé šablony vůči sobě porovnávat, případně z nich vytvořit databázi, vůči které je pak možnost identifikovat konkrétní otisk. Celý proces porovnávání je založen na hlubokých neuronových sítích a využívá metody pracující s markanty. Poskytuje porovnání píchaných i válených otisků, a to i kříženě.

Udává se, že extrakce markantů ze vstupního otisku je schopen algoritmus zvládnout za 1,34 sekundy a porovnává přibližně 40 000 otisků za sekundu. V sekci 3.1, která popisuje obecný princip metod založených na markantech, bylo psáno, že jejich výhodou je menší velikost uloženého otisku, jelikož se ukládají pouze informace o markantech. Pro představu velikosti, je tedy v konkrétním případě u algoritmu *VeriFinger*, výsledná velikost jednoho otisku se pohybuje od 800 do 8 000 bajtů.

Kapitola 4

Syntetické otisky

Nedílnou součástí vývoje porovnávacích algoritmů, je jejich trénování a následné testování. V takové situaci bývá velkým problémem velikost databáze otisků. Pro řádné natrénování a otestování porovnávacího algoritmu je zapotřebí velké množství vstupních otisků. To je z toho důvodu, aby byl algoritmus připraven na co nejodlišnější podmínky v plném nasazení, a aby bylo možné zhodnotit jeho výsledky. Otisky se zásadně liší jeden od druhého, jelikož pro každý biometrický systém může být použit jiný senzor, který je zaveden v jiném prostředí a ovlivňován jiným okolím. Problém při získání velkého množství otisků nastává z právního hlediska. Otisky jsou chráněny zákonem a bez souhlasu vlastníka je nelze dále šířit, a tak končí nasbíraná databáze jako privátní pro danou instituci či organizaci. Bez sdílených databází je téměř nemožné porovnávat mezi sebou porovnávací algoritmy. Kromě právních problémů je sběr otisků i časově náročný, jelikož musí být otisk nasnímán od každé osoby individuálně, a v případě povolení k jeho sdílení je zapotřebí být kryt písemným souhlasem vlastníka. Pro představu, jak velká databáze je zapotřebí, aby bylo možné prohlásit o porovnávacím algoritmu, že dosahuje FAR 0.01 % (to znamená, že pravděpodobnost přijetí nesprávného otisku za správný je 1 ku 10 000), je zapotřebí provést přibližně 1 000 000 pokusů porovnání vůči nesprávným otiskům. Poté lze teprve o algoritmu říci, že skutečná chyba leží v rozmezí 0.006 % - 0.014 % [20]. Pokud se dostatečně velká databáze podaří nasbírat, nastává další problém, kdy po jejím sdílení, je již nemožné ji využít k opětovnému porovnání algoritmů. To je zapříčiněno tím, že algoritmy lze nad touhle množinou natrénovat.

To vedlo k vývoji generátorů syntetických otisků. Ty slouží k neomezenému generování nových a nových otisků, které mohou být použity pro řešení zmíněných problémů. Hlavním cílem generátorů je, aby byly otisky co nejvíce podobné reálným otiskům. Generování pak stojí čas a výpočetní výkon, nicméně osvobozuje od ostatních problémů. Jedním z takových generátorů je *SFinGe*, který využívá stejnojmennou metodu pro generování. Udává se, že za pomoci generátoru *SFinGe* lze vygenerovat přibližně 100 000 otisků za 24 hodin, pokud generování probíhá na jednom počítači [20]. Jedná se však o komerční aplikaci. Jako náhrada lze využít generátor *Anguli*, který taktéž implementuje algoritmus *SFinGe*.

Poprvé byly syntetické otisky použity na soutěži FVC2000¹ (Fingerprint Verification Competition), která proběhla v roce 2000. Později také na FVC2002², FVC2004³ a FVC2006⁴. Jedná se o soutěž, kde jsou mezi sebou porovnávány porovnávací algoritmy otisků. Při vy-

¹<http://bias.csr.unibo.it/fvc2000/>

²<http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/>

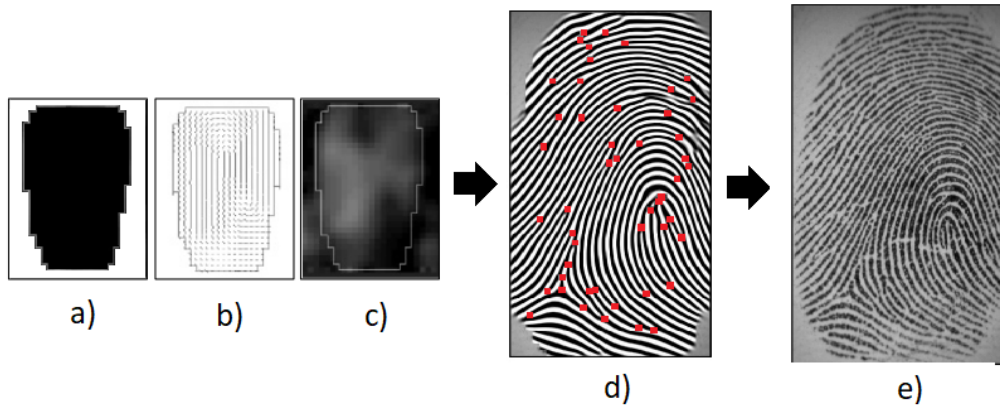
³<http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/>

⁴<http://bias.csr.unibo.it/fvc2006/>

hodnocování se využívají čtyři databáze otisků, kde jedna z nich byla pokaždé vytvořena pomocí generátoru *SFinGe*. Ukázalo se, že porovnávací algoritmy dosahují obdobných výsledků jako při použití reálných otisků, což potvrzuje jejich podobnost [19].

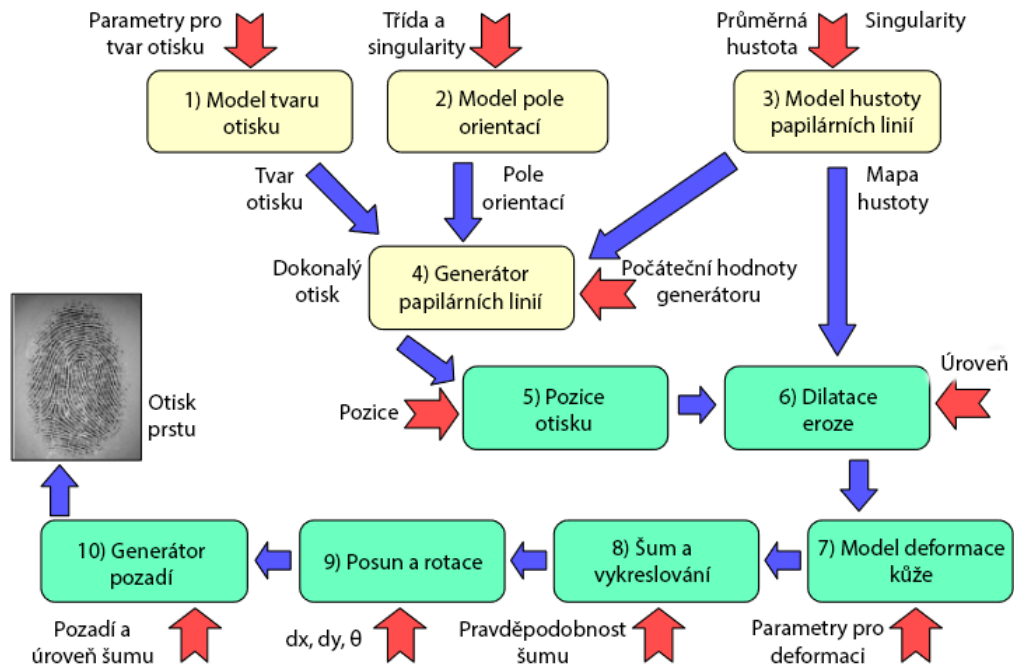
4.1 SFinGe algoritmus

Postup algoritmu se odráží od obecného postupu porovnávacích algoritmů využívající markanty. Ten byl nastíněn v prvním odstavci v sekci 3.1. Pro zopakování tedy při fázi porovnání dojde nejdříve k lokalizaci otisku na obrázku, následně se vytvoří pole orientací a mapa s hustotou papilárních linií. Získané informace se využijí k předzpracování otisku a následné extrakci markantů. Při generování syntetických otisků jsou využity obdobné fáze, avšak v jiném pořadí. Nejdříve se určí tvar otisku. Následně se nastaví pole orientací a hustota papilárních linií na požadované hodnoty. Z těchto informací je algoritmus schopen vytvořit papilární linie. Výsledkem je pak *dokonalý otisk*. Posledním krokem, který má však mnoho částí, je přidání šumu, který by vznikl například nepřesností čtečky otisků, špatným přiložením prstu, či jiným poškozením prstu. Na obrázku 4.1 je vyobrazen nyní popsáný postup.



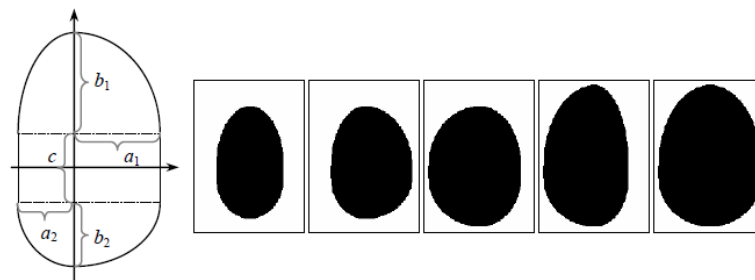
Obrázek 4.1: Obrázek zobrazující postup generování syntetického otisku. Část a) představuje vytvořený tvar otisku, b) pole orientací a c) hustotu papilárních linií. Z těchto informací dojde k vygenerování otisku zobrazeného v části d). Po přidání různých poškození je výsledný otisk ve stavu otisku e).

Celý postup algoritmu SFinGe je na obrázku 4.2. Na obrázku červené šipky představují vstup pro danou fázi a modrou šipkou jsou označeny výstupy fáze, které mohou být zároveň vstupem další fáze. Obrázek je rozdělen do dvou částí. V první části dojde k vygenerování *dokonalého otisku*. Do téhle části jsou zahrnuty čtyři fáze. Vytvoří se tvar otisku, pole orientací a mapa hustoty papilárních linií, které jsou vstupem pro generátor papilárních linií. Ten využívá generátor náhodných čísel, pro který lze nastavit počáteční hodnotu. Následné fáze 5) až 10) simulují různá poškození otisku.



Obrázek 4.2: Jednotlivé kroky algoritmu SFinGe. Obrázek převzat z [20].

Nyní budou popsány první čtyři kroky generátoru. Kompletní popis lze najít v knize [21]. Prvním krokem je vytvoření tvaru otisku. U reálného otisku je tvar dán velikostí prstu, pozicí a tlakem vzhledem k sezoru. V knize [21] bylo při zkoumání reálných otisků zjištěno, že za pomoci čtyř eliptických oblouků a obdelníku, které jsou velikostně nastavitelné pomocí dalších pěti parametrů, lze vytvořit téměř všechny možné tvary, které by byly dosaženy při snímání otisku pomocí senzoru. Na obrázku 4.3 lze vidět pět nastavitelných parametrů a_1, a_2, b_1, b_2, c . Pomocí různých nastavení bylo vygenerováno pět tvarů otisku na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Vlevo vyobrazeny čtyři eliptické oblouky a obdelník. Lze vidět, které parametry je možné nastavit. Vpravo pak výsledné tvary otisku. Obrázek převzat z [20].

Následuje krok vytvoření pole orientací. Původ algoritmu využitého v tomto kroku pochází z modelu od Sherlocka a Monroe [29]. Ten využívá znalosti o pozici singularit otisku. Model byl časem upraven od Vizcaya a Gerhardta [35]. Ti zavedli větší volnost při vyrovnání s růzností orientace papilárních linií. Nicméně v původním znění není využit ani jeden z modelů. Použita byla upravená varianta druhého modelu, kde autoři experimentovali s parametrem pro korekci orientace a podařilo se jim dosáhnout lepších výsledků.

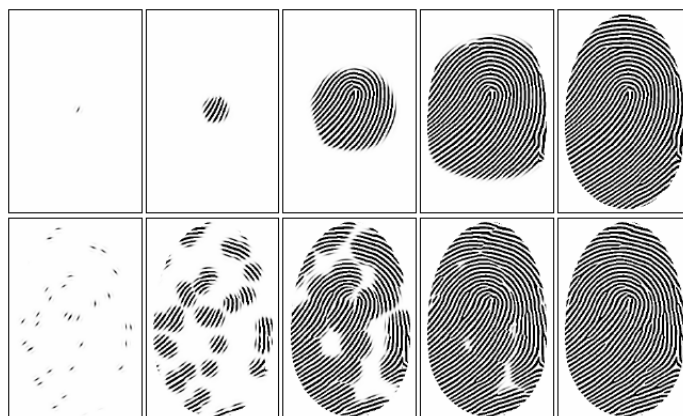
Třetím krokem je mapa hustoty papilárních linií. Pouhým pozorováním otisku lze zjistit, že oblasti vzdálenější od singularit mají nižší hustotu papilárních linií. Zvolený postup v tomto kroku je následující:

- Náhodně je vybrána celková hustota papilárních linií tak, aby korespondovala s reálnými vzory. Používá se průměrně 9 pixelů na periodu papilární linie.
- Následně je hustota v oblastech, kde se nacházejí markanty, mírně snížena.
- Do celého obrazu je zanesen náhodný šum pro vytvoření realističtějšího dojmu.
- Použití 3×3 filtru pro vyhlazení. Výstup bodu je znázorněn na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Vyobrazeny jsou dva otisky prstů a jejich příslušné mapy s hustotou papilárních linií.

V posledním kroku se pak generují papilární linie. Je využita poměrně jednoduchá metoda, která spočívá v tom, že dojde k vykreslení malého počtu černých bodů na bílém pozadí. Poté iterativně za pomoci *Gaborových filtrů* dojde k postupnému vykreslení papilárních linií, které jsou upraveny podle mapy hustoty a pole orientací. Díky spojování papilárních linií z více počátečních bodů, dochází k automatickému generování markantů na náhodných místech v otisku. To je bráno jako žádoucí chování, jelikož při vykreslování z jednoho bodu neobsahuje otisk dostatečné množství markantů [20]. Rozdíl mezi vykreslením otisku z jednoho bodu a z více bodů je znázorněn na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5: U vykreslení z jednoho bodu je značné, že počet markantů je výrazně nižší než u vykreslení z více bodů. Obrázek převzat z [20].

Nicméně autoři uvádí i některé nedostatky algoritmu. Prvním z nich je tloušťka papilárních linií, která je v syntetickém otisku stejná po celé její délce. Tím lze odlišit syntetický otisk od reálného. V prvotní verzi algoritmu byl problém s tvorbou šumu. Ten byl jednotně rozložen po celé oblasti otisku a na okrajích byl výraznější. V reálném otisku lze pozorovat, že šum je náhodně rozprostřen a lze nalézt kvalitní i nekvalitní části otisku. Řešení tohoto problému již bylo zavedeno v novějším vydání, kde byl využit nový model při vytváření šumu. Posledním uvedeným problémem jsou nedokonalosti papilárních linií, které vznikají vlivem přítomnosti póru v kůži. Algoritmus generuje tyto nedokonalosti náhodně. Při generování databáze otisků, kdy každý otisk má být považován za jiný, to není výrazný problém. Problém nastává, kdykoli je zapotřebí vygenerovat stejný otisk vícekrát. Například s různým poškozením. Při každém generování budou póry na náhodných místech, přestože by měly být jednotné [20].

4.2 Generátory syntetických otisků

Dostupných generátorů na internetu není takové velké množství. Většinou se po generátoru vyžaduje, aby dokázal vytvořit jeden samostatný otisk, ale zároveň i databázi otisků, o které bylo psáno, že je velmi důležitá při vývoji porovnávacích algoritmů. Důležité je, aby výsledné otisky byly co nejvíce podobné reálným, jinak by moc nápomocné nebyly. Celkově byly vybrány tři různé generátory. Tím je již zmíněný generátor *SFinGe*, dále *Anguli* a *SyFDaS*.

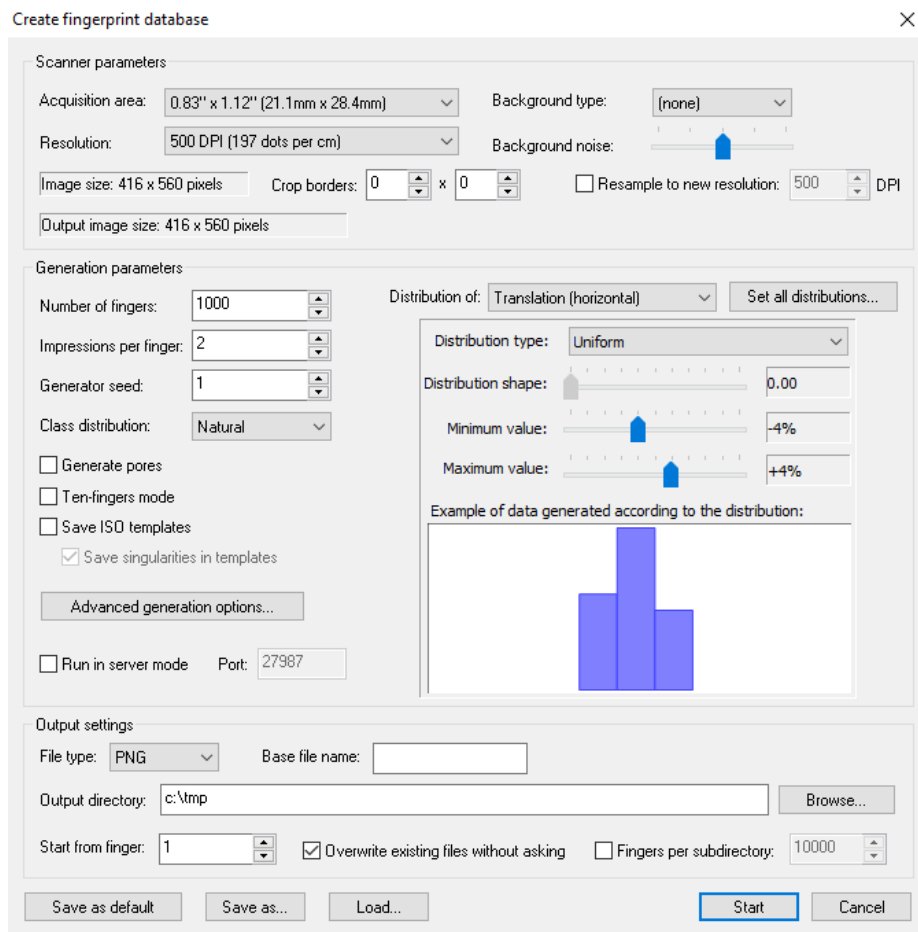
4.2.1 SFinGe

Program umožňuje generování jednotlivých otisků prstů [20], u kterého lze nastavit všechny parametry, které zastupují jednotlivé kroky algoritmu uvedené v obrázku 4.2 uvedeného v sekci 4.1 popisující algoritmus. Hlavní okno pro generování databáze otisků je na obrázku 4.6. Je rozděleno do třech částí, kde v první části lze nastavit parametry pro čtečku otisků. Lze nastavit velikost snímací plochy, rozlišení čtečky, pozadí a jeho šum. Možností je také ořezat okraje nebo případně změnit rozlišení na vlastní, jelikož ve výběrové nabídce jsou pouze tři a to 250, 500 a 1 000 DPI.

Druhou částí je nastavení pro samotný generátor, kde lze nastavit celkový počet otisků a kolik různých imitací se má vygenerovat. Dále je pak velmi podstatné nastavit inicializační hodnotu generátoru, jinak dojde k vytvoření shodných otisků při každém generování při ponechání původní hodnoty. Je také možnost vybrat třídu generovaných otisků, zdali se mají simulovat póry nebo mód pro generování deseti otisků. Individuálně pak lze nastavit maximální a minimální hodnoty pro pootočení, zkrácení, poškození, šum, tlak a jiné. Jednotlivé generační fáze se dají v rozšířeném nastavení generování vypnout, čímž lze urychlit celkový proces. Možnost je také nastavit pevnou pozici delty a jádra otisků.

Poslední částí je pak nastavení výstupu, kde je možnost vybrat ze čtyř formátů a to PNG, WSQ, TIFF a BMP. Dále pak lze vybrat složku, do které se mají otisky uložit a jaký text mají mít všechny otisky v názvu. Vybrat lze i od kterého otisku se má začít generovat a zdali mají být rozděleny do jednotlivých složek a po jakém počtu.

V případě generování jednoho otisku na uživatele čeká průvodce, při kterém lze nastavit všechny potřebné parametry. Při prvním kliknutí lze nastavit velikost senzoru a jeho rozlišení, následuje pak maska, která určuje tvar otisku. V nabídce jsou předpřipravené masky pro všech 5 prstů, ale pomocí posuvníků lze nastavit vlastní hodnoty. V dalším okně lze vybrat jednu ze tříd, podle které je vygenerováno pole orientací. Ručně lze nastavit pozici jádra a delty otisku. Následuje nastavení hustoty papilárních linií a počet počátečních bodů,



Obrázek 4.6: Hlavní okno pro generování databáze otisků prstů, kde lze vidět všechny parametry, které lze nastavit.

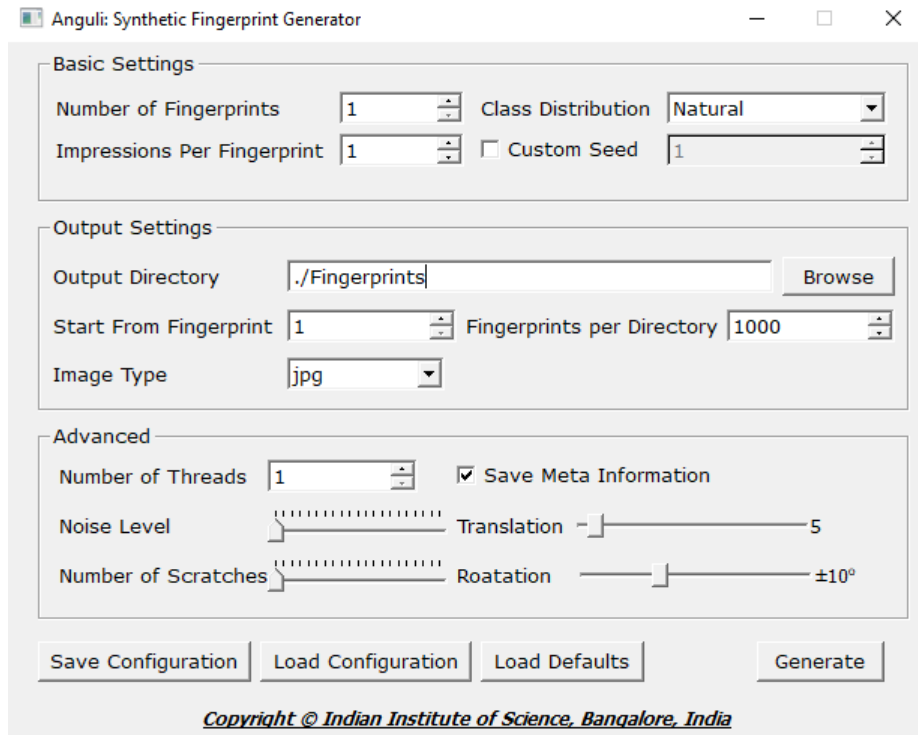
ze kterých se začne generovat otisk. Lze také určit, zdali se mají přidat póry k papilárním liniím pro větší podobu k reálnému otisku. V tuhle chvíli je otisk vygenerován a následné kroky přidávají pootočení, poškození, sílu tlaku při snímání, nastavení pozadí a jiné.

4.2.2 Anguli

Jako druhý generátor byl zvolen *Anguli* [5]. Algoritmus, který aplikace implementuje je inspirován právě popisovaným *SFinGe* algoritmem. Byl vytvořen pro účely studia otisků prstů a pro testování porovnávacích algoritmů. Udává se, že algoritmus je schopný vygenerovat 1 milion otisků za méně než 4 dny, při přidělení 7 vláken na 8 jádřovém procesoru běžícím na frekvenci 2GHz [5]. Při generování nelze nastavit tolik parametrů, jako je tomu v případě *SFinGe* aplikace. Nicméně lze vybrat ty nejdůležitější, jako je třída otisku, formát výstupu, šum, natočení a posun otisku a jeho poškození. Lze nastavit počet vláken, ve kterých se má generování provádět a tím tak urychlit generování. Dále je možné z již vygenerovaných otisků generovat různé úrovně jejich poškození. Kde lze opět nastavit šum, natočení, posun a poškození. Na obrázku 4.7 je vidět okno pro generování databáze otisků. Okno je opět rozděleno do tří částí.

V první lze nastavit celkový požadovaný počet otisků a kolik různých poškození jednoho otisku se má vygenerovat. Při generování jsou ukládány jak *dokonalé otisky*, tak i ty, do kterých je zaneseno různé poškození a šum. Možností je i výběr generované třídy a dále počáteční hodnota generátoru. Druhá část nastavuje parametry pro výstup, a to umístění otisků a jejich rozdělení do podsložek podle počtu. Dále pak číslo prvního otisku a v jakém formátu mají být otisky uloženy.

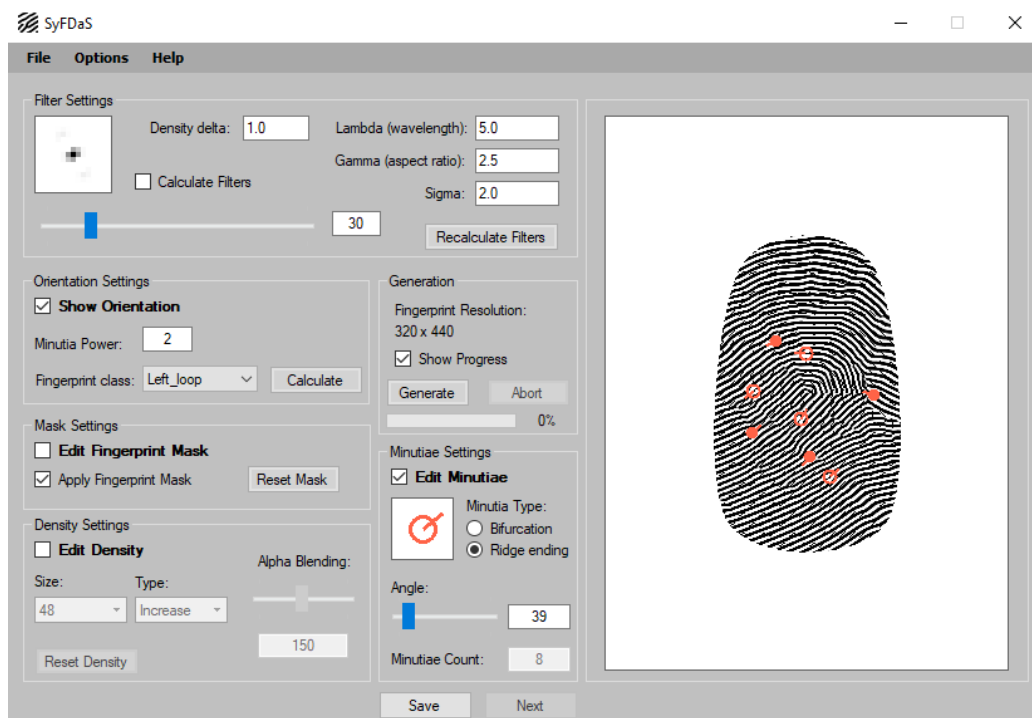
V poslední části lze programu přiřadit více vláken pro urychlení celkového procesu. Nastavit lze míru šumu, poškození, posunu a rotace. tyto informace lze nechat uložit zvlášť do souboru pro pozdější znovupoužití.



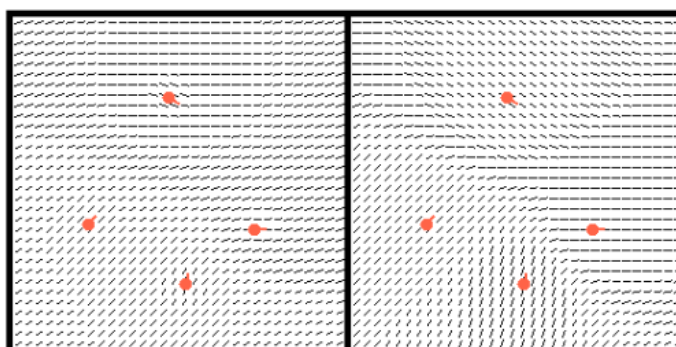
Obrázek 4.7: Hlavní okno pro generování databáze otisků prstů, kde lze vidět všechny parametry, které lze nastavit.

4.2.3 SyFDaS

Posledním generátorem je SyFDaS [8] vytvořený na Fakultě informačních technologií Vysokého učení technického v Brně. Aplikace disponuje pouze jedním hlavním oknem, které je vidět na obrázku 4.8, odkud lze nastavit všechny parametry ovlivňující generování. Okno má tentokrát 6 částí. V první části lze nastavit parametry pro *Gaborův filtr*, který ovlivňuje generování papilárních linií. Dalším možným nastavením je pole orientací, kde lze vybrat z pěti základních tříd Arch (oblouk), Tended Arch (klenutý oblouk), Whorl (vír/spirála), Left Loop (levá smyčka) a Right Loop (pravá smyčka). Dále lze nastavit mocninu, která v poli orientací ovlivňuje, jak jednotlivé markanty působí na své okolí. Názorněji je to vidět na obrázku 4.9. Podle zdroje je na obrázku 4.9 vlevo použita první mocnina a vpravo mocnina čtvrtá. Lze pak vidět, jak markanty v pravé části obrázku výrazně více rozšiřují svoje natočení, než markanty v levé části obrázku.

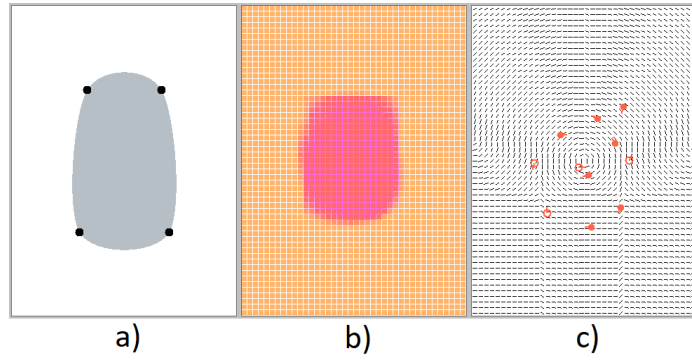


Obrázek 4.8: Hlavní okno aplikace SyFDaS umožňující nastavení parametrů před generováním otisku.



Obrázek 4.9: Ukázka vlivu mocniny na pole orientací.

Následnuje nastavení masky, kde se v podstatě jedná pouze o ořezání obrázku. To je vyobrazeno na obrázku 4.10a. Dále je možnost nastavit hustotu papilárních linií, pomocí grafického režimu viz obrázek 4.10b, které funguje jednoduše na ztmavování a zesvětlování vybraných částí obrázku. Jako poslední je zapotřebí přidat markanty do otisku, jelikož bez nich nelze spustit generování. Musí tedy být umístěn alespoň jeden markant. Vybrat lze ze dvou typů a to rozdvojení a ukončení. Nastavení směru neboli úhlu markantu se provádí buď pomocí posuvníku a nebo lze napsat přesnou hodnotu. Vložení markantu na určitou pozici se pak provádí dvojklikem přímo v obrázku viz 4.10c. Po všech krocích lze spustit samotné generování a otisk uložit. Narozdíl od předchozích dvou zmíněných generátorů není dostupná možnost generování databáze otisků.



Obrázek 4.10: Jednotlivé zobrazení pravé části programu viz 4.8, při úpravách různých parametrů. Podobrázek a) ukazuje výběr masky otisku, b) nastavení hustoty papilárních linií a c) pro úpravu markantů.

Kapitola 5

Návrh a analýza nástrojů k ověření odolnosti verifikačních metod

Cílem práce je ověřit odolnost porovnávacího algoritmu vůči syntetickým otiskům. K tomu je zapotřebí vygenerovat dostatečné množství syntetických otisků, a proto musí být zvoleny správné generátory. K tomu poslouží generátory *SFinGe* a *Anguli*, které byly popsány v sekci 4.2. Jako porovnávací algoritmus byl zvolen *VeriFinger* od Neurotechnology. Podrobnější popis algoritmu a jeho výběru bude popsán níže. Celkově byly navrženy tři experimenty, které na sebe částečně navazují. V prvním experimentu probíhalo generování náhodných otisků, v dalším byl proveden pokus o odhadnutí třídy otisku a v posledním experimentu byly otisky generovány pouze pro jednu konkrétní třídu.

5.1 Popis experimentů

V experimentech se provádí identifikace otisků vůči vygenerované databázi syntetických otisků. Celkově pro identifikaci byly vybrány čtyři otisky. Dva z nich jsou reálné a pocházejí ze stejného prstu. Nicméně jeden z otisků je nasnímán jako píchaný a druhý jako válený. Otisk píchaný je na obrázku 5.1a a otisk válený je na obrázku 5.1b. Další dva otisky jsou syntetické. Otisk na obrázku 5.1c byl vygenerován za pomoci *Anguli* a otisk na obrázku 5.1d za pomoci *SFinGe*. Ve výsledcích práce se na otisky bude často odkazovat a to podle popisků uvedených pod obrázkem 5.1.



Obrázek 5.1: Otisky použité v rámci experimentů. Otisk a) píchaný, b) válený, c) syntetický Anguli, d) syntetický SFinGe.

První experiment byl proveden za použití obou generátorů. Celkově byl vygenerován 1 000 000 otisků, kde každý generátor měl na starosti polovinu. Všechny vygenerované

otisky byly bez jakéhokoliv šumu a poškození, tedy *dokonalé otisky*. Bylo využito rovnoměrné rozložení při generování, takže poměr jednotlivých tříd by měl být vyvážený. Následně proběhlo jejich porovnání se čtyřmi uvedenými otisky na obrázku 5.1. Každý otisk byl porovnán při čtyřech různých nastavení FAR, které určuje minimální potřebné skóre porovnání, pro označení otisku za shodný. FAR bylo nastaveno na hodnoty 10 %, 1 %, 0.1 % a 0.01 %.

Druhý experiment byl zaměřen na odhad třídy identifikovaného otisku. Cílem bylo vygenerovat 400 000 otisků generátorem *Anguli* a 400 000 otisků generátorem *SFinGe*. Nicméně tentokrát nedošlo k rovnoměrnému rozložení tříd, ale byly vybrány 4 třídy a to oblouk, spirála, levá smyčka a pravá smyčka. Bylo tedy vygenerováno vždy 100 000 otisků z každé z uvedených tříd. Představa byla taková, že bude nalezeno více shod s otisky stejné třídy. Vygenerované otisky byly opět *dokonalé* a identifikace všech čtyř otisků z obrázku 5.1 byla provedena se stejným nastavením FAR jako v prvním experimentu.

Třetí experiment navazuje na druhý. Po odhadnutí třídy byl vygenerován 1 000 000 otisků, které byly opět rozděleny na polovinu mezi generátory *Anguli* a *SFinGe*. Tentokrát byly všechny otisky třídy levá smyčka, do které spadají všechny čtyři otisky představené na obrázku 5.1. Výsledkem by teoreticky měl být vyšší počet shod, nicméně porovnání probíhá na základě markantů, nikoli tříd. Třída však výrazně ovlivní pozici markantů, jelikož v okolí singularit bývají markanty častěji. Nastavení FAR bylo zvoleno jako v předchozích experimentech. V případě generátoru *SFinGe* došlo k nechtěnému vygenerování 400 000 otisků i se simulací poškození. To však vedlo k neočekávaným výsledkům.

5.2 Výběr nástrojů

Pro vykonání experimentů bylo zapotřebí vybrat porovnávací algoritmus. Rozhodování probíhalo mezi *VeriFinger* od firmy Neurotechnology a *Identix* od firmy Innovatrics. Byl zvolen algoritmus *VeriFinger* a to z prostých důvodů. Při rozhodování bylo k tomuto algoritmu dostupných daleko více informací na webu výrobce. Kromě dostupné dokumentace byla možnost stažení demonstrační aplikace, která dokázala registrovat otisky do databáze a následně identifikovat/verifikovat vůči ní otisky. Bylo zřejmé, že aplikace umí zobrazit výsledné skóre porovnání, což byl jeden z hlavních faktorů pro výběr tohoto algoritmu. *Identix* nepochybně tyto věci umí také, nicméně na webu vývojáře je málo dostupných informací.

Pro generování syntetických otisků bylo rozhodnuto, že budou využity generátory *Anguli* a *SFinGe*, kde všechny experimenty budou prováděny duplicitně, aby mohly být generátory mezi sebou zároveň porovnány. Generování bylo nejprve provedeno s programem *Anguli*, jelikož byl výrazně rychlejší než druhý zvolený generátor. U *Anguli* lze určit počet vláken, které mají generování provádět. Při využití 6 jádrového procesoru s frekvencí 3.70 GHz a s vytvořením 5 vláken, bylo vygenerováno 100 000 otisků přibližně za 7 hodin. Generátor *SFinGe* možnost nastavení vláken nemá, nicméně lze generování provádět vzdáleně na serveru. Ten však k dispozici nebyl. Vygenerovat 100 000 otisků se *SFinGe* tak trvalo přibližně 20 hodin. Důvod výběru rychlejšího generátoru byl, aby došlo k rychlejšímu získání výsledných dat, a mohla tak být data průběžně zpracována.

Generátor *SyFDaS* nebyl vybrán z důvodu chybějících funkcí. Jelikož bylo zapotřebí generovat poměrně velké množství otisků, byla požadována funkčnost hromadného generování, kterou program *SyFDaS* nedisponoval.

Při generování otisků docházelo k problému, kdy výsledné otisky neměly dostatečné rozlišení, aby je algoritmus *VeriFinger* dokázal zpracovat. Bylo zapotřebí hromadně změnit jejich DPI. Byl vyzkoušen program *Adobe Photoshop*, avšak pro tuhle práci byl naprosto nevhodný, jelikož každý z otisků musel být otevřen, konvertován a zavřen. I když vše pro-

bíhalo automaticky přes dávkový soubor, došlo k řádnému vytížení procesoru a počítač se stal nevyužitelným po dobu konvertování. Nakonec byl zvolen program *Pixillion Image Converter* pro svou jednoduchost. Dokáže jednoduše načíst označené otisky a následně je hromadně konvertovat.

5.2.1 VeriFinger

Neurotechnology SDK přichází s 2 502 stránkovou dokumentací¹. Nicméně dokumentace je společná s ostatními nástroji, které slouží pro jiné biometrické charakteristiky.

Hlavní částí SDK je sekce 4.1.1 „NBiometricEngine“. Jedná se o třídu, která poskytuje biometrické operace, jako je extrakce šablony z otisku, registraci do databáze, identifikaci nebo verifikaci. Všechny hlavní operace pracují se třídou `NSubject`, která reprezentuje osobu. Ke třídě je pak možné přiřadit například otisk prstu a zároveň obsahuje i výsledky porovnání. V případě extrakce markantů dojde k jejich uložení do třídy `NTemplate`, která může být uložena na disk pro pozdější použití při registraci otisku, identifikaci či verifikaci.

Další podstatná část dokumentace je v sekci 5.2 „Matching Threshold and FAR/FRR“. Pomocí parametru `MatchingThreshold` třídy `NBiometricEngine` lze nastavit požadovanou přesnost porovnávacího algoritmu. Podle obrázku 5.2 lze `MatchingThreshold` nastavit od 0 až po 96, kde čím vyšší číslo, tím více musí být nalezeno shodných markantů mezi porovnávanými otisky.

FAR (false acceptance rate)	Matching threshold (score)
100 %	0
10 %	12
1 %	24
0.1 %	36
0.01 %	48
0.001 %	60
0.0001 %	72
0.00001 %	84
0.000001 %	96

Obrázek 5.2: Tabulka určující vztah mezi FAR a hodnotou parametru `MatchingThreshold`.

Čím větší číslo bude v parametru nastaveno, tím menší bude FAR, ale zároveň se zvýší FRR. `MatchingThreshold` by měl být nastaven podle požadovaného FAR, nicméně FAR je vypočítána pro jednotlivé porovnání otisků, tedy 1:1 a při identifikaci 1:N se pravděpodobnost chybného přijetí akumuluje. Pravděpodobnost chybného přijetí při 1:N lze vypočítat pomocí vzorce 5.1, kde N je počet otisků v databázi.

$$(1 - (1 - FAR/100)^N) \cdot 100 \quad (5.1)$$

Tedy v případě nastavení FAR 0,001 % a $N = 10\,000$ by byla pravděpodobnost chybného přijetí $1 - (1 - 0.00001)^{10000} = 9.52$ %. Pokud by bylo zvoleno přísnější nastavení, tedy FAR 0,0001 %, snížila by se pravděpodobnost na 1 %.

Dalším důležitým parametrem je `FingersQualityThreshold` ze třídy `NBiometricEngine`. Porovnávací algoritmus při extrakci šablony kontroluje kvalitu otisku, zdali je dostatečná pro tento krok. Hodnota kvality je udávána v čísle od 0 do 100, kde základní nastavení algoritmu je, že minimální hodnota kvality otisku je 40. Syntetické otisky často

¹https://download.neurotechnology.com/Neurotec_Biometric_SDK_Documentation.pdf

dosahovaly nižší kvality, a proto bylo zapotřebí tuhle hodnotu snížit. Jelikož v případě práce se nejedná o biometrický systém, avšak o pomocnou aplikaci při experimentování, je jisté, že vkládané obrázky budou vždy otisky. Není tedy zapotřebí testovat kvalitu, ale zajistit extrakci markantů u všech vygenerovaných otisků.

Posledním důležitým parametrem je `FingersFastExtraction` opět u třídy `NBiometricEngine`. Pomocí parametru lze ovlivnit rychlost extrahování šablony, nicméně při testování nebyl naměřen žádný výrazný rozdíl. Avšak při použití rychlé extrakce dojde ke snížení velikosti šablon. Při rychlé extrakci zabírá šablona přibližně 1-2 kb, zatím co při běžné extrakci 6-12 kb. Použití rychlé extrakce snižuje také kvalitu v následném porovnání, jelikož může dojít k chybné extrakci markantů. V rámci experimentů je zapotřebí provádět porovnání co nejpřesněji, a proto byla rychlá extrakce vypnuta.

5.3 Příprava experimentů

Nejprve probíhalo generování samotných syntetických otisků. Ty byly generovány postupně v pořadí, v jakém byly uvedeny jednotlivé experimenty. Po vygenerování bylo zapotřebí otisky upravit pomocí zmíněného programu *Pixillion Image Converter* a zvednout rozlišení na 300 DPI, jinak algoritmus *VeriFinger* odmítl přijmout otisky s hláškou „Invalid sample resolution“. Následné porovnání mohlo být provedeno 1:1, nicméně pro případné opakování experimentů bylo vhodnější z otisků vytvořit šablony, které lze uložit a znovu použít. Otisky byly tedy zpracovány do šablon, které měly stejný název jako otisk, pro případné pozdější dohledání konkrétního otisku, jelikož ze šablon již lze načíst pouze jednotlivé markanty, nikoli vykreslené papilární linie. Poté byly vygenerované šablony načteny do databáze algoritmem *VeriFinger* a následně porovnány se všemi čtyřmi otisky uvedenými na obrázku 5.1 v sekci 5.1.

5.3.1 Časová náročnost experimentů

Jednotlivé kroky experimentů mají různou časovou náročnost a jsou velmi závislé od výkonnosti počítače, na kterém jsou prováděny. Zde uvedené hodnoty jsou vztaženy vzhledem k počítači, který byl zmíněn v sekci 5.2. Časová náročnost jednotlivých kroků je uvedena vždy pro 100 000 otisků. Časové údaje jsou uvedeny pro představu v případě opakování experimentů. Případně jak dlouho by útočníkovi trvalo zpracovat určité množství syntetických otisků, které by mohl k útoku využít. Tabulka 5.1 představuje jednotlivé kroky a jejich časovou náročnost. Ta se liší s ohledem na použitý generátor otisků, jelikož generátor *Anguli* je o několik hodin rychlejší než generátor *SFinGe*. Další kroky jsou změna rozlišení, vytvoření šablon a samotná identifikace otisku. Do kroku identifikace otisku je započítána i doba, kterou trvá načtení otisků do databáze. Samotné porovnání bez načítání je v řádech sekund.

Tabulka 5.1: Časová náročnost jednotlivých kroků přípravy.

Činnost	Anguli	SFinGe
Generování otisků	7 hodin	20 hodin
Změna rozlišení	2,5 hodiny	
Vytvoření šablon	31 hodin	
Identifikace	2,5 hodiny	
Celkem na 100 000 otisků	43 hodin	56 hodin

Kapitola 6

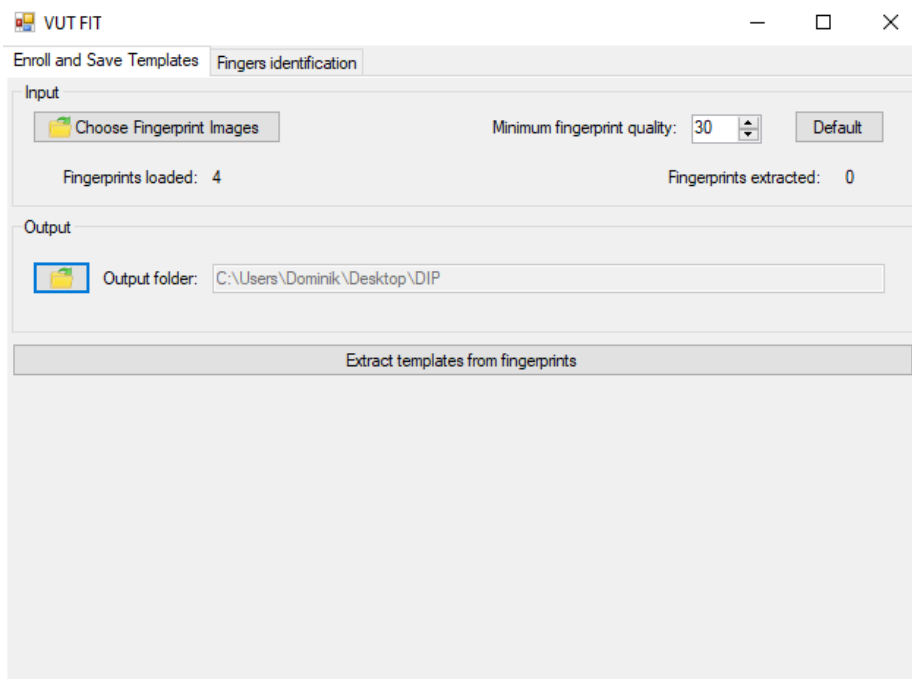
Implementace pomocné aplikace

Jelikož bylo zapotřebí pracovat s otisky a využít tak Neurotechnology SDK a jejich algoritmus *VeriFinger*, bylo zapotřebí implementovat aplikaci, která poslouží k usnadnění práce a vyhodnocení výsledků. Ukázkové aplikace k SDK jsou dostupné v jazycích C++, C#, Java a VB.NET. Jako implementační jazyk byl zvolen C# pro svou jednoduchost při práci s UI.

Bylo zapotřebí implementovat funkci, která ze vstupního obrázku otisku extrahuje markanty, vytvoří šablonu a uloží ji na disk. Tato funkce tvoří první část aplikace. Poté, co jsou všechny otisky převedeny na šablony, je zapotřebí je využít jako databázi otisků, vůči které pak proběhne identifikace čtyř zmíněných otisků na obrázku 5.1.

6.1 Extrakce šablon

Na obrázku 6.1 lze vidět výsledný vzhled části aplikace, ve které se provádí extrakce šablon a jejich uložení.



Obrázek 6.1: Okno aplikace pro extrakci a uložení šablon otisků.

Okno aplikace je rozděleno do tří částí, kde první část se týká vstupu. Pomocí tlačítka „Choose Fingerprint Images“ lze vybrat otisky. V pravé části nastavení vstupu je možné nastavit, jaké minimální kvality musí otisk dosahovat. Kvalitu otisku porovnává sám algoritmus *VeriFinger*. Možnost je použít tlačítko „Default“, které nastaví hodnotu na 40, která je podle dokumentace výchozí hodnotou.

Druhou částí je výběr výstupní složky. Při výstupu je pro uložení šablony použito stejné jméno, jaké nese sám otisk, aby šlo jednoduše dohledat, která šablona patří ke kterému otisku.

Poslední částí je tlačítko „Extract templates from fingerprints“, které provede zpracování otisků. Následující úsek kódu provádí zpracování jednotlivých otisků, které byly vybrány v první části obsluhující vstup.

```
foreach (String file in openFileDialog.FileNames)
{
    String fileName = Path.GetFileNameWithoutExtension(file);

    if (_image != null)
    {
        _image.Dispose();
        _image = null;
    }

    _image = NImage.FromFile(file);
    var finger = new NFinger { Image = _image };
    await ExtractFeaturesAsync(fileName, finger);
    labelExtracted.Text = (int.Parse(labelExtracted.Text) + 1).ToString();
}

```

Obrázek je načten ze souboru pomocí třídy *NImage*, která slouží pro práci s obrázky. Následně je vytvořen objekt třídy *NFinger*, který reprezentuje otisk. Konstruktoru je předán načtený obrázek, aby byl otisk spojen s daným obrázkem. Hlavní proces poté probíhá ve funkci *ExtractFeaturesAsync()*.

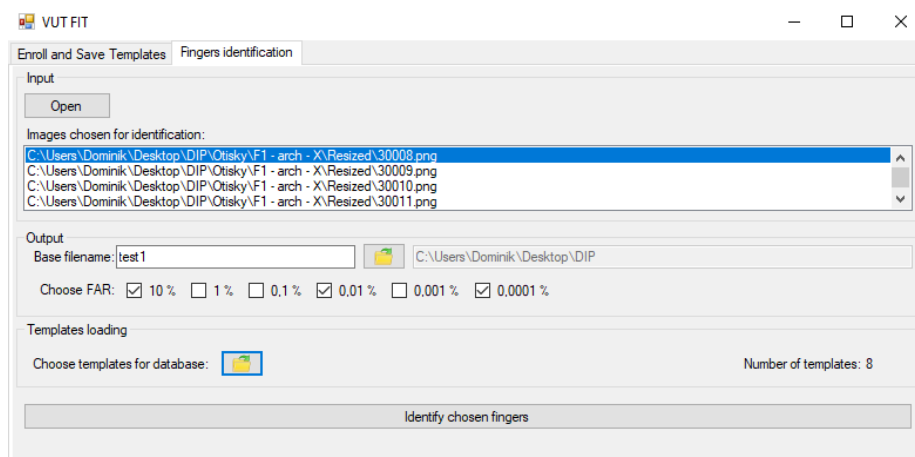
```
_subject = new NSubject();
_subject.Fingers.Add(finger);
try
{
    status = await _biometricClient.CreateTemplateAsync(_subject);
    //Handlers for extraction failure
}
....
finally
{
    if (status == NBiometricStatus.Ok)
    {
        string outputFile = Path.Combine(textBoxOutputFolder.Text, fileName);
        File.WriteAllBytes(outputFile, _subject.GetTemplateBuffer().ToArray());
    }
    ....
}

```

Úsek kódu nad odstavcem představuje metodu `ExtractFeaturesAsync()`. Jelikož všechny základní funkce algoritmu pracují se třídou `NSubject`, která reprezentuje osobu, je zapotřebí vytvořit její instanci a přiřadit jí načtený otisk z obrázku. Operace pro extrakci markantů má na starosti třída `NBiometricClient`, nad kterou je zavolána metoda `CreateTemplateAsync()` a jako parametr je předána proměnná reprezentující osobu. Implementace této metody je pro uživatele skryta a vrací tak pouze `NBiometricStatus`, podle kterého lze určit výsledek provedení. Pokud extrakce šablony proběhla v pořádku, uloží se šablona do předem vybrané složky. V opačném případě program zahlásí chybu a je pozastaven. Po odkliknutí chybové hlášky pokračuje.

6.2 Identifikace otisků

Druhou potřebnou částí je identifikace otisků. Finální verze této části aplikace je vyobrazena na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Okno aplikace pro identifikaci otisků.

Okno je tentokrát rozděleno na 4 části. V první části se provádí výběr otisků, které budou identifikovány vůči databázi. Otisků může být vybráno více a může se jednat buď o obrázek, a nebo již o šablonu otisku. Pod výběrem je zobrazen výčet otisků. Pokud je nad některým z vybraných otisků proveden dvojklik, dojde k jeho zobrazení v novém okně.

V druhé části je opět výběr pro výstup. Kromě výběru výstupní složky se dá nastavit také základní část názvu výstupního souboru. Lze vybrat, při jakém nastavení FAR se má identifikace otisků provádět. Počet výstupních souborů je poté stejný, jako počet vybraných FAR. Výstup je uložen jako CSV soubor. Jako oddělovač je použit středník. Jako identifikátor šablony je použit její název souboru, z jakého byla načtena. Výstupní soubor je automaticky vytvořen, pokud ještě neexistuje. V případě, že již soubor existuje, provádí se konkatence vstupu.

Třetí část sestává z pouhého výběru šablon otisků, které budou tvořit pro aktuální identifikaci databázi.

Poslední část tvoří tlačítko „Identify chosen fingerprints“, které volá metodu `IdentifyFingers()`. Metoda zpracovává vybrané šablony po 500. Důvodem postupného zpracování bylo, že v případě zpracování všech otisků najednou, nebylo možné získat všechny výsledky. Třída `NSubject` obsahuje `MatchingResultCollection`, do které jsou po identifikaci uloženy

výsledky. Nicméně velikost téhle kolekce nelze nastavit a při testování bylo zjištěno, že jakmile je více než 1000 shodných otisků, dojde k přetečení paměti a program vyhodí chybovou hlášku. Aby byl tento problém vyřešen, a bylo možné získat všechny výsledky, bylo zvoleno zpracování po částech, což zobrazuje následující úsek kódu. Cyklus se řídí podle proměnné `howManyCreate`, která nese hodnotu, kolik otisků se bude zpracovávat. Hodnota proměnné je 500, až na poslední krok, který nemusí obsahovat všech 500 otisků. Vybrané otisky jsou v poli číslovány v souvislé řadě čísel, a tak pro označení aktuálně zpracovávaného otisku slouží proměnná `aTP`, která je zde uvedena ve zkratce z důvodu nežádoucího zalomení řádku. Otisk je načten do třídy `NSubject` a vložen do vytvořené úlohy, která zastupuje registraci otisku do databáze. Po přidání všech otisků je úloha provedena a vůči vytvořené databázi je provedena identifikace otisků pomocí metody `Identify()`.

```
NBiometricTask task;
task = _biometricClient.CreateTask(NBiometricOperations.Enroll, null);
for (int i = 0; i < howManyCreate; ++i){
    aTP++;
    _subjects[i] = NSubject.FromFile(openFileDialog.FileNames[aTP - 1]);
    _subjects[i].Id = Path.GetFileName(openFileDialog.FileNames[aTP - 1]);
    task.Subjects.Add(item);
}
var performedTask = await _biometricClient.PerformTaskAsync(task);
Identify();
```

Zobrazený úsek kódu provádí identifikaci. Ta je jako předchozí operace prováděna třídou `NBiometricClient`. Otisky, které dosáhly nenulového skóre porovnání, jsou uloženy do kolekce `_subject.MatchingResults`, kde `_subject` je objekt, který reprezentuje aktuálně identifikovaný otisk prstu. Pro získání otisků s nulovým skóre, je zapotřebí projít celou kolekci `_subjects` a u každého objektu kontrolovat, zdali se nenechází i v kolekci obsahující otisky, které byly shledány za shodné.

```
try
{
    var status = _biometricClient.Identify(_subject);
    if (status == NBiometricStatus.Ok ||
        status == NBiometricStatus.MatchNotFound)
    {
        foreach (var result in _subject.MatchingResults)
        {
            //Handle output
        }
        foreach (var subject in _subjects)
        {
            //Handle output
        }
    }
}
```

V průběhu textu bylo zmíněno, že výstup aplikace je uložen do CSV souboru na zvolené umístění. Výsledný CSV soubor obsahuje dva sloupce. První sloupec slouží jako identifikátor otisku. Ten je vždy roven názvu souboru, který obsahoval šablonu otisku při její registraci do databáze. To znamená, že pokud šablona byla načtena ze souboru `otisk`,

tak odpovídající řádek pro šablonu v níže uvedeném výpisu 6.1 bude 4. Druhý sloupeček pak zastupuje výsledné skóre porovnání identifikovaného otisku vůči dané šabloně. CSV soubor je vytvořen pro každé zvolené FAR a každý zvolený otisk k identifikaci. Název CSV souboru pak obsahuje FAR a název identifikovaného otisku. V programu lze také nastavit základ jména výstupního souboru. Výsledný soubor má tedy název `BASE-FILENAME_FAR_IDENTIFIED-FINGERPRINT`. Tedy například `Sada1_10%_pichany`.

```
1 500;20
2 257;17
3 98;12
4 otisk;0
5 2;0
6 3;0
```

Výpis 6.1: Ukázka CSV souboru.

Kapitola 7

Vyhodnocení jednotlivých experimentů

V následující kapitole budou rozebrány jednotlivé výsledky experimentů. Experimenty jsou rozděleny do sekcí, které jsou pak dále členěny podle použitého generátoru. Zpracování otisků probíhalo původně na jednom počítači. Proběhl pokus o urychlení tvorby šablon ze syntetických otisků, nicméně proces se nepodařilo urychlit. Algoritmus nebyl limitován výpočetním výkonem, ale dobou výpočtu. Pokud bylo spuštěno více instancí aplikace a následně tedy probíhala extrakce šablon paralelně, došlo ke zpomalení obou aplikací na polovinu a výsledný čas byl stejný. Řešením bylo pouze využití druhého počítače. Využití rychlé extrakce, která byla popsána v sekci 5.2.1 nepřipadala v úvahu, kvůli snížení kvality celkového porovnání.

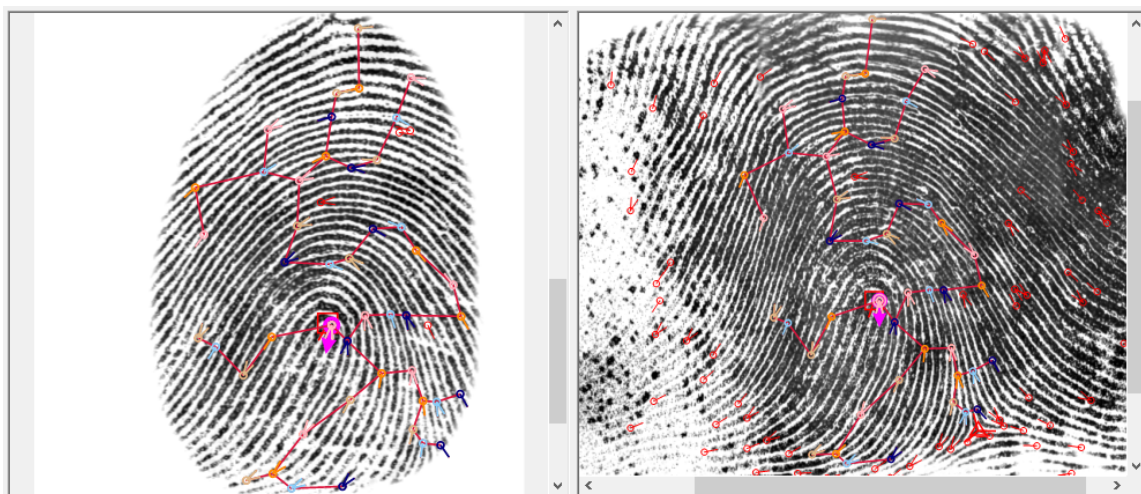
K vytváření šablon, indentifikaci a verifikaci byla využita aplikace, která byla implementována pro tyto účely a popsána v sekci 6. Aplikace automaticky zpracuje vybrané otisky a případně je rozdělí do složek po požadovném počtu. V druhé části aplikace lze vybrat složku se šablonami otisků, která má být použita jako databáze pro identifikaci. Lze vybrat více identifikovaných otisků naráz, které jsou následně identifikovány vůči databázi, a to za použití čtyř nastavení FAR: 10 %, 1 %, 0.1 %, 0.001 %. Výsledky jsou uloženy ve formátu CSV pro snadnější zpracování.

7.1 Metodika vyhodnocení

U jednotlivých experimentů budou vyobrazeny grafy, které mají na vodorovné ose rozsahy skóre porovnání pro jednotlivé FAR. Rozsahy jsou zvoleny podle tabulky uvedené v sekci 5.2.1. Svislá osa udává četnost a je v upraveném logaritmickém měřítku, které obsahuje i hodnotu 0. Jednotlivé identifikované otisky jsou barevně odlišeny pokaždé stejnou barvou. Syntetický otisk z *Anguli* je vždy modrou barvou, syntetický otisk ze *SFinGe* oranžovou, píchaný otisk šedou a válený žlutou.

Dále se v textu objeví obrázky samotného porovnání dvou otisků. Jedno z takových je na obrázku 7.1. Jedná se o ukázkou shodných markantů píchaného a váleného otisku. Shodné markanty jsou spojeny do „pavouka“. Markanty jsou spojeny do pavouka, pouze pokud splňují určitou toleranci. Tolerance se vztahuje převážně na pozici markantu a úhlu natočení, jelikož tyto dvě hodnoty nejvíce ovlivňují výsledek. V případě možnosti přiblížení lze u jednotlivých markantů rozpoznat i jejich typ, kde se využívá pouze rozdvojení a

ukončení. Jelikož je ve výsledcích odkazováno na skóre porovnání, tak pro představu tyto dva otisky dosáhly skóre 289.



Obrázek 7.1: Shodné markanty píchaného otisku a váleného.

7.2 První experiment „náhodný“

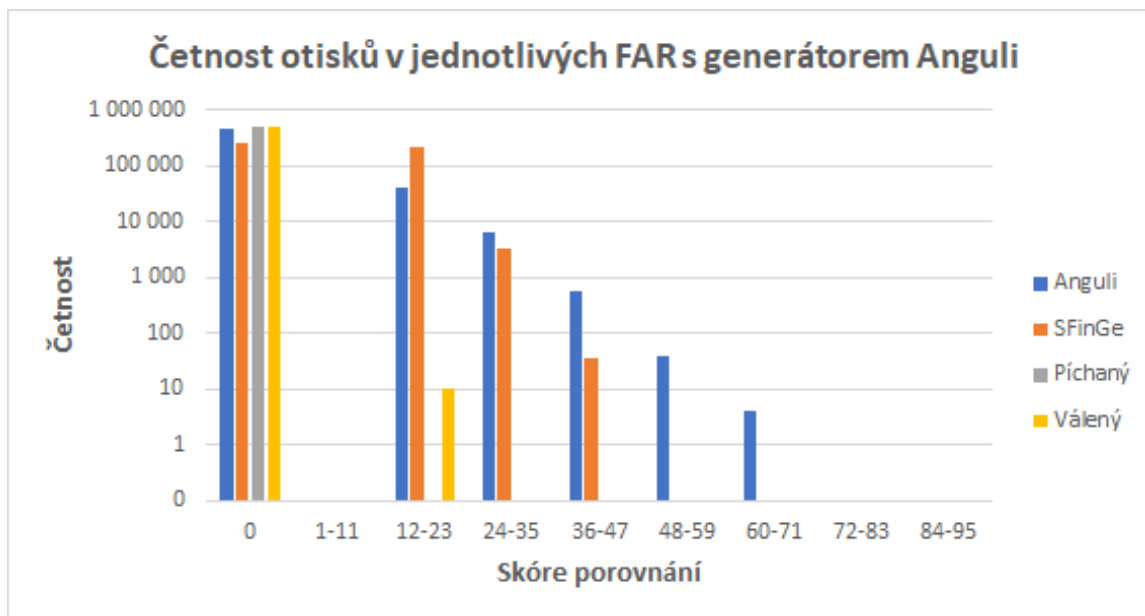
V rámci prvního experimentu byl vygenerován 1 000 000 otisků s náhodným rozložením do všech tříd. Výsledné otisky jsou tedy ze tříd levá smyčka, pravá smyčka, spirála a oblouk. Ke generování byl využit generátor *Anguli* i *SFinGe*. Všechny otisky byly porovnány se čtyřmi otisky, které byly představeny na obrázku 5.1.

7.2.1 Anguli

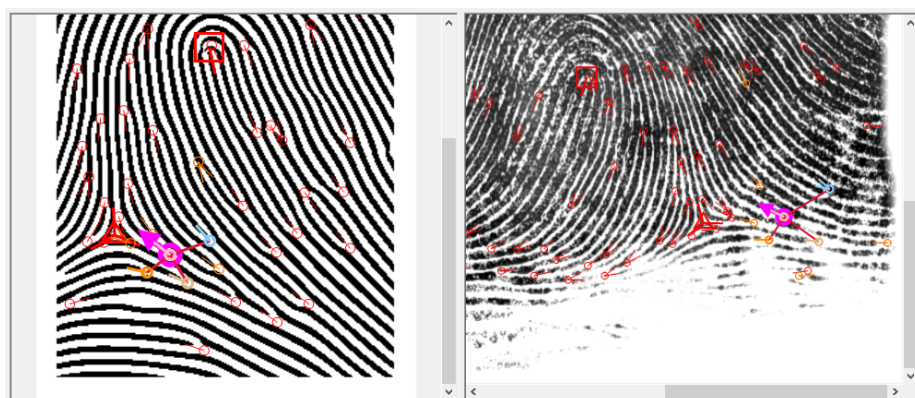
Nejprve tedy výsledky pro generátor *Anguli*. Nejdříve proběhlo porovnání píchaného otisku. Ten však ani při nastavení FAR 10 % nenalezl žádný otisk, který by měl jistou podobnost. Tím pádem pro nižší FAR byly výsledky obdobné.

Druhým otiskem byl otisk válený. U váleného otisku se při nastavení FAR 10 % podařilo najít shodu s 10 otisky. Četnost skóre porovnání je uvedena na grafu v obrázku 7.2, kde válený otisk je zastoupen žlutou barvou. Výsledná skóre porovnání jsou však velmi nízká, ale při tomhle nastavení by algoritmus přijal za shodný otisk s nejvyšším dosaženým skóre. Nejvyšší dosažené skóre bylo 14, které dosáhl pouze jeden otisk pravé smyčky. Následně pak 4 otisky dosáhly skóre 13 a zbylé 12. V 10 shodných otiscích se vyskytují všechny třídy, které byly generovány. Nejvíce však spirála, která je zastoupena hned 5 otisky, přestože válený otisk spadá do levé smyčky.

Na obrázku 7.3 je zobrazeno, kde byla nalezena shoda mezi otiskem s nejvyšším skóre a rolovaným otiskem. Co je však zajímavé, že 8 otisků našlo shodu právě ve stejné oblasti váleného otisku a to v oblasti delty, která na píchaném otisku není. V případě nižšího nastavení FAR již nevyhovovaly žádné z otisků, jelikož pro FAR 1 % by muselo být minimální skóre porovnání 24. Nejvyšší dosažené skóre bylo v tomhle případě pouze 14.



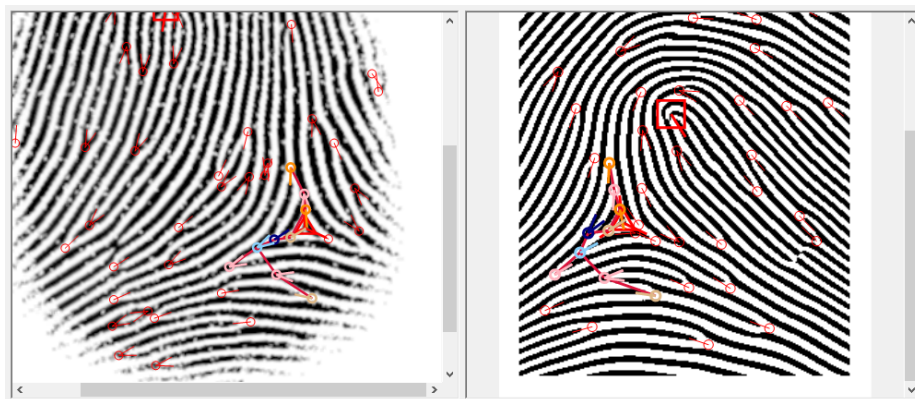
Obrázek 7.2: Četnost skóre porovnání pro 500 000 otisků z generátoru *Anguli*.



Obrázek 7.3: Shodné markanty váleného otisku a otisku s nejvyšším dosaženým skóre 14.

Dále bylo provedeno porovnání syntetického otisku ze *SFinGe*. Při nastavení FAR 10 % byla nalezena shoda v tisících otisků. Celkově se jednalo o 225 518 otisků, které by spadaly do FAR 10 %. Při nižším FAR, a to 1 %, bylo nalezeno 3 368 shodných otisků. Syntetický otisk vůči syntetickým otiskům našel shody i při FAR 0,1 %. Do této třídy jich celkem spadalo 36. Četnost jednotlivých FAR tříd je na obrázku 7.2, kde výsledky syntetického otisku ze *SFinGe* jsou oranžovou barvou. Ukázalo se, že náhodnost syntetických otisků je nízká a mají mezi sebou jistou podobnost.

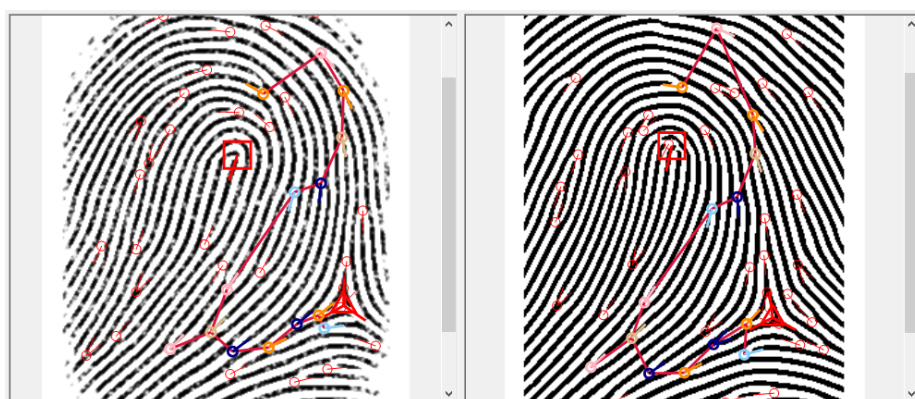
Jelikož je celkový počet shodných otisků velký, byly prozkoumány pouze ty, které spadaly do FAR 0,1 %. Pozorována byla třída jednotlivých otisků. Nyní v zastoupení tříd výrazně převažovala smyčka. Celkově 27 otisků spadalo do třídy smyčka. Nejvyšší dosažené skóre bylo 45, kterého dosáhl otisk třídy smyčka. Nicméně otisk byl pravé smyčky, což je opačná smyčka, než je identifikovaný otisk. Shodné markanty otisku s otiskem, který dosáhl skóre 45 je vidět na obrázku 7.4. Shoda byla opět v oblasti delty, přestože se delta nachází na opačné straně.



Obrázek 7.4: Shodné markanty syntetického otisku z generátoru *SFinGe* a otisku s nejvyšším dosaženým skóre 45.

Posledním testovacím otiskem byl syntetický otisk z *Anguli*. Četnost skóre porovnání je vidět na obrázku 7.2, kde je otisk zastoupen modrou barvou. Ihned na první pohled je vidět, že bylo dosaženo vyššího skóre, než tomu bylo v případě předchozího syntetického otisku. Nicméně celkový počet shodných otisků je nižší. Při FAR 10 % jsou rozdíly největší, kde bylo shodných otisků 42 766. Při jiném FAR jsou již výsledky opačné, kde si otisk z *Anguli* vedl daleko lépe. Při FAR 1 % bylo celkově 6 625 shodných otisků a při 0,1 % 564. Zde se potvrdilo, že jsou si otisky ze stejného generátoru do jisté míry podobné. Co je však překvapivé, že buď dojde k velmi nízké shodě, a nebo k poměrně velké. Podle výsledků na obrázku 7.2 z předchozího syntetického otisku, kde do FAR 10 % spadala téměř polovina otisků, by bylo více očekávané, kdyby tomu tak bylo i při syntetickém otisku z *Anguli*. Nejvyšší dosažené skóre bylo 74 a byl to jediný otisk, který spadl do FAR 0,0001 %. Byla nalezena poměrně přesná shoda se 14 markanty, které lze vidět na obrázku 7.5.

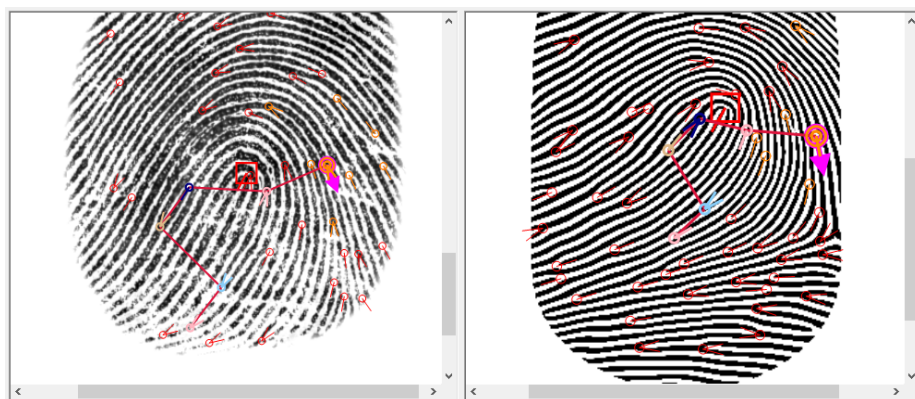
Početně dosáhl nejlepších výsledků syntetický otisk ze *SFinGe*, avšak nejvyšší dosažené skóre porovnání bylo pouze 45. Otisk z generátoru *Anguli* mezi „svými“ otisky našel méně shodných otisků, avšak daleko vyšší maximální skóre porovnání. Zdá se, že generátor *Anguli* do jisté míry opakuje určité oblasti v otiscích. Píchaný a válený reálný otisk na tom byly o poznání hůře. Válený otisk našel shodné otisky pouze při FAR 10 %, což by u žádného biometrického systému nestačilo. Píchaný otisk pak nenašel žádnou shodu.



Obrázek 7.5: Shodné markanty syntetického otisku z generátoru *Anguli* a otisku s nejvyšším dosaženým skóre 74.

7.2.2 SFinGe

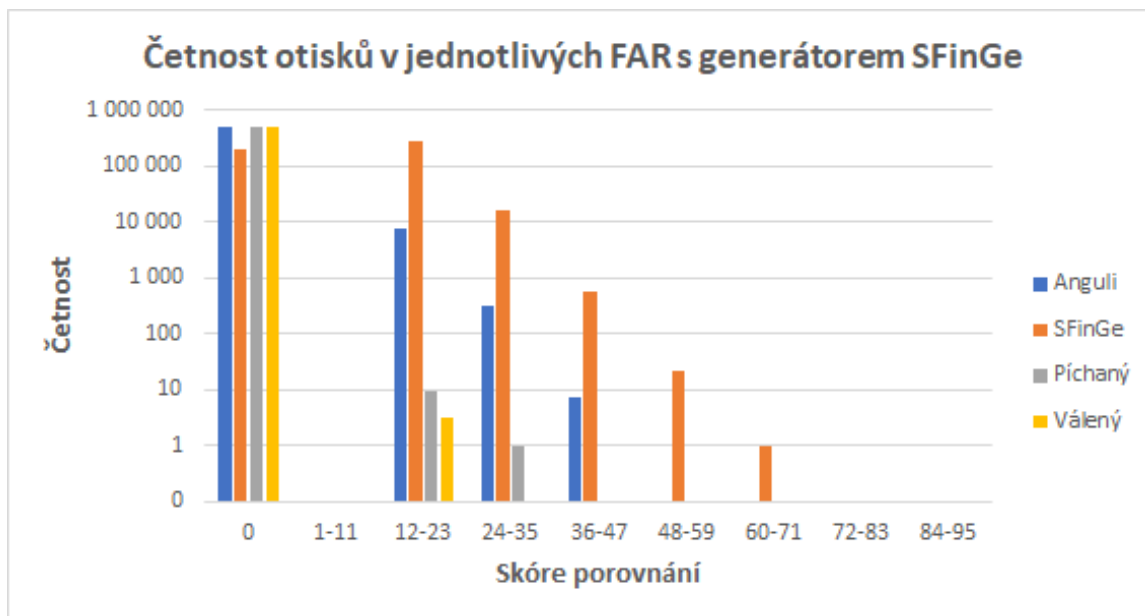
Generátorem *SFinGe* bylo vygenerováno stejné množství otisků jako generátorem *Anguli*. Tentokrát byl píchaný otisk úspěšný a celkově bylo nalezeno 10 shodných otisků. Četnost jednotlivých FAR je na obrázku 7.7. Celkem 9 otisků dosáhlo skóre v rozmezí 12-23, což je dostatečné pro FAR 10 %. Zastoupeny byly všechny třídy a to tak, že smyčka se objevila čtyřikrát, spirála třikrát a oblouk dvakrát. Ve většině případů se jednalo o shodu přes 3 až 5 markantů, což při dané toleranci stačilo k dosažení skóre mezi 12 až 15. Některé otisky měly shodu s více markanty, avšak jejich pozice byly naprosto nepřesné, což vede pravděpodobně k nízkému skóre. Nejvyšší dosažené skóre však bylo 25, které již spadá do FAR 1 %. Shodné markanty tohoto otisku s otiskem píchaným jsou vyobrazeny na obrázku 7.6. Otisk má shodnou třídu s píchaným otiskem a bylo nalezeno 6 shodných markantů. Na obrázku 7.6 lze vidět, že shodné markanty jsou na obou otiscích na podobných pozicích. Nicméně si lze povšimnout, že některé markanty nejsou stejného typu. Algoritmus tak spojí markant typu rozdělení s markantem typu ukončení za shodné.



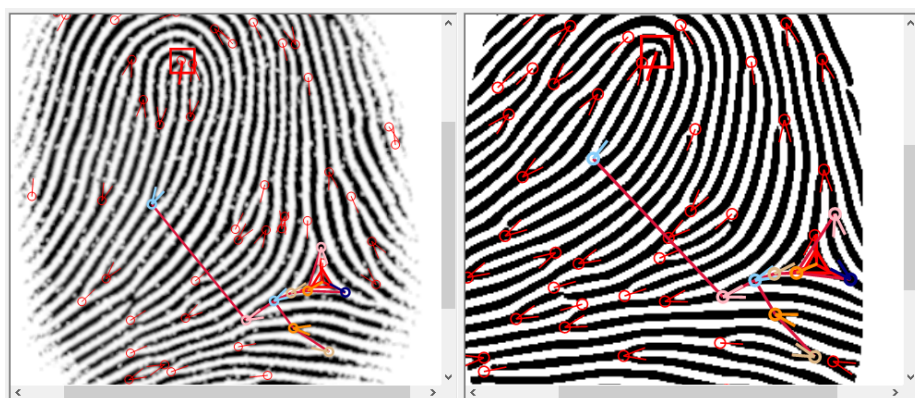
Obrázek 7.6: Shodné markanty píchaného otisku a otisku s nejvyšším dosaženým skóre 25.

Válený otisk tentokrát našel pouze 3 shody. Výsledky porovnání jsou na obrázku 7.7. Všechny otisky stačily na shodu pouze při nastavení FAR 10 %. Přesná výsledná skóre porovnání byla 13, 16 a 20. V případě otisku, který dosáhl skóre 20, byla shoda se 6 markanty, kde všech 6 markantů bylo opačného typu a otisk byl třídy smyčka. Z toho vyplývá, že algoritmus *VeriFinger* typ markantu příliš nezapočítává při výpočtu výsledného skóre. Nejvíce tak záleží na pozici a směru. Zbylé dva otisky s dosaženým skóre 13 a 16 našly shodu vždy někde na okraji otisku a oba byly ze třídy spirála.

Syntetický otisk ze *SFinGe* nyní dosáhl lepších výsledků než v jeho předchozím porovnání. Výsledná četnost skóre porovnání je na obrázku 7.7. Otisk opět našel řadu shodných otisků při různém FAR. Při FAR 10 % bylo nalezeno 283 195 otisků a je to více než otisků s nulovým skóre. Pro FAR 1 % bylo nalezeno 15 810 otisků, dále při FAR 0,1 % bylo 577 shodných otisků. V předchozím porovnání, kde databázi tvořili otisky z *Anguli*, zde otisk končil a při nižším FAR již neměl žádné shodné otisky. Nyní, když se jednalo o otisky ze stejného generátoru však našel 22 shodných otisků při FAR 0,01 % a 1 pak i v případě FAR 0,001 %. K porovnání výsledků, jsou na obrázku 7.8 vyobrazeny shodné markanty s otiskem, který dosáhl nejvyšší skóre a to 67. Celkově byla shoda s 9 markanty, kde si lze opět všimnout, že některé markanty nejsou stejného typu. Počet shodných markantů není nijak vysoký, nicméně to stačilo na dosažení skóre 67, jelikož pozice markantů jsou víceméně shodné. Celkově lze s výsledků porovnání vidět vysoká podobnost syntetických otisků.



Obrázek 7.7: Četnost skóre porovnání pro 500 000 otisků z generátoru *Anguli*.



Obrázek 7.8: Shodné markanty syntetického otisku ze *SFinGe* a otisku s nejvyšším dosaženým skóre 67.

Poslední syntetický otisk z *Anguli* měl výrazně nižší počet shod než druhý syntetický otisk. Četnost jednotlivých FAR je na obrázku 7.7. Celkově dosáhl při FAR 10 % 7 367 shod. Při nižším FAR, a to 1 %, pak již pouhých 318 shod a při 0,1 % 7 shod. To je značně méně než tomu bylo při porovnávání s otisky ze stejného generátoru, jako je původ otisku.

7.3 Druhý experiment „analýza třídy“

Účelem druhého experimentu bylo odhadnout třídu identifikovaného otisku z počtu shodných otisků v jednotlivých třídách. Celkově bylo tedy vygenerováno 400 000 otisků tak, aby vždy 100 000 otisků náleželo jedné třídě. Mezi generované třídy byla zařazena pravá i levá smyčka, dále oblouk a spirála. Jako v předchozím experimentu bylo generování provedeno za pomoci generátoru *Anguli* i *SFinGe*.

7.3.1 Anguli

Nejdříve tedy výsledky pro píchaný otisk vůči syntetický otiskům z generátoru *Anguli*. Píchaný otisk nenašel shodný otisk v žádné ze čtyř tříd, a to při žádném nastavení FAR. Z takových výsledků je nemožné třídu odhadnout, a tak pro píchaný otisk skončil experiment neúspěšně.

V případě váleného otisku v předchozím experimentu došlo k více shodám, než tomu bylo u píchaného otisku. Alespoň v případě generátoru *Anguli*. To bylo způsobeno převážně tím, že shodné markanty byly nalezeny v oblasti delty, která na píchaném otisku chybí. Obdobně tomu tak bylo i v druhém experimentu. Oblast delty zajistila shodu celkem u 4 otisků. Tabulka 7.1 ukazuje počet shod v jednotlivých třídách. Shodné otisky byly nalezeny pouze v případě FAR 10 %. Nejvíce shod bylo nalezeno ve třídě spirála. Vychází tedy, že identifikovaný otisk spadá do třídy spirála, nicméně otisk je levé smyčky. V tomhle případě je shodných otisků příliš málo, aby šlo s jistotou říci, do které třídy otisk spadá, a tak experiment končí neúspěšně i pro druhý reálný otisk.

Tabulka 7.1: Počet nalezených shod pro rolovaný otisk při různém nastavení FAR ve všech třídách.

FAR [%]	Oblouk	Spirála	L-Smyčka	P-Smyčka
10	1	2	1	0
1	0	0	0	0
0,1	0	0	0	0

Nyní na řadu přichází první ze syntetických otisků, vygenerovaný pomocí *SFinGe*. Opět se ukázalo, že podobnost mezi syntetickými otisky je vysoká, jelikož celkový počet shodných otisků přesáhl stotisícovou hranici. Výsledky jednotlivých tříd jsou v tabulce 7.2. Na první pohled lze jednoznačně určit, že při všech nastavení FAR bylo nalezeno nejvíce shodných otisků ve třídě levá smyčka, do které spadá i identifikovaný syntetický otisk. V případě syntetického otisku ze *SFinGe* se jednoznačně podařilo pomocí experimentu odhadnout třídu otisku.

Tabulka 7.2: Počet nalezených shod pro syntetický otisk ze *SFinGe* při různém nastavení FAR ve všech třídách.

FAR [%]	Oblouk	Spirála	L-Smyčka	P-Smyčka
10	26600	37163	65678	35248
1	206	233	1459	218
0,1	2	2	16	4

Poslední syntetický otisk z generátoru *Anguli* byl, co se do počtu týče, výrazně méně úspěšný než otisk předchozí. Celkové počty jednotlivých tříd jsou uvedeny v tabulce 7.3. Nicméně v případě nastavení FAR 10 % jsou nyní výsledky daleko přesvědčivější, jelikož levá smyčka převažuje několikanásobně počty ostatních tříd. Poměr počtů je přibližně zachován i v případě nižšího FAR. Z výsledků lze tak jednoznačně určit třídu identifikovaného otisku.

S generátorem *Anguli* dopadl druhý experiment nejlépe pro syntetický otisk ze stejnojmenného generátoru. U syntetického otisku vygenerovaného pomocí *SFinGe* lze nicméně třídu odhadnout také, avšak přesvědčivější výsledky přináší až nastavení FAR na 1 %, kde

se počty liší v celém řádu. V případě reálných otisků experiment neuspěl a nebylo možné u identifikovaného otisku odhadnout třídu.

Tabulka 7.3: Počet nalezených shod pro syntetický otisk z *Anguli* při různém nastavení FAR ve všech třídách.

FAR [%]	Oblouk	Spirála	L-Smyčka	P-Smyčka
10	2483	3446	30168	4352
1	135	173	3816	341
0,1	4	9	310	31

7.3.2 SFinGe

Generátor *SFinGe* se pro tento experiment osvědčil daleko více. Ihned při prvním otisku, a to píchaném, došlo ke kladným výsledkům. V tabulce 7.4 jsou sepsány výsledky. Při nastavení FAR 10 % došlo ke shodě pouze ve dvou třídách a to oblouk a levá smyčka. Levá smyčka mnohonásobně převyšuje počty ve třídě oblouk. Z výsledků by odhad třídy dopadl pro identifikovaný otisk správně. Výsledky nižšího FAR již moc využitelné nejsou.

Válený otisk byl stejně úspěšný jako píchaný. Tabulka 7.5 zobrazuje výsledky experimentu. Opět bylo nejvíce shod nalezeno ve třídě levá smyčka. Pro správný odhad lze opět využít výsledky pouze při nastavení FAR 10 %.

Tabulka 7.4: Počet nalezených shod pro píchaný otisk při různém nastavení FAR ve všech třídách.

FAR [%]	Oblouk	Spirála	L-Smyčka	P-Smyčka
10	3	0	444	0
1	0	0	1	0
0,1	0	0	0	0

Tabulka 7.5: Počet nalezených shod pro válený otisk při různém nastavení FAR ve všech třídách.

FAR [%]	Oblouk	Spirála	L-Smyčka	P-Smyčka
10	0	0	541	1
1	0	0	0	0
0,1	0	0	0	0

Syntetický otisk ze *SFinGe* dopadl obdobně jako v případě použití druhého generátoru. Při použití FAR 10 % bylo shodných otisků více než polovina z celkového počtu vygenerovaných otisků. Počtem opět převládá třída levá smyčka, která má téměř jedenkrát více shod než ostatní třídy. Při nižším FAR se pak jiné třídy počtem propadají. Šlo by teda jednoznačně určit, do které třídy identifikovaný syntetický otisk spadá. Přesné výsledky jsou v tabulce 7.6.

U druhého syntetického otisku byl experiment taktéž úspěšný. Výsledky jsou podobné, jako tomu bylo v případě předchozího generátoru. Shody byly nalezeny při všech testovaných

FAR a ve všech případech bylo nejvíce shod ve „správné“ třídě. Tedy i v tomhle případě by bylo možné určit třídu identifikovaného otisku. Všechny výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.7.

Tabulka 7.6: Počet nalezených shod pro syntetický otisk ze *SFinGe* při různém nastavení FAR ve všech třídách.

FAR [%]	Oblouk	Spirála	L-Smyčka	P-Smyčka
10	38420	52203	90306	51227
1	442	1767	52075	1648
0,1	4	47	5893	34

Tabulka 7.7: Počet nalezených shod pro syntetický otisk z *Anguli* při různém nastavení FAR ve všech třídách.

FAR [%]	Oblouk	Spirála	L-Smyčka	P-Smyčka
10	881	930	38210	1412
1	32	30	1324	83
0,1	0	1	28	3

7.3.3 Závěr

Pomocí experimentu se podařilo v případě využití generátoru *Anguli* i *SFinGe*, jednoznačně určit třídu u syntetických otisků. Generátor *Anguli* však nebyl vhodný při experimentu u reálných otisků. Na druhou stranu generátor *SFinGe* ukázal zcela jiné výsledky a shodné otisky se našly i v případě reálných otisků, a to v poměrně velkém počtu, ze kterého lze již vyvodit nějaké výsledky. Výsledky experimentu tedy ukázaly, že daným procesem lze odhadnout třídu identifikovaného otisku.

7.4 Třetí experiment „levá smyčka“

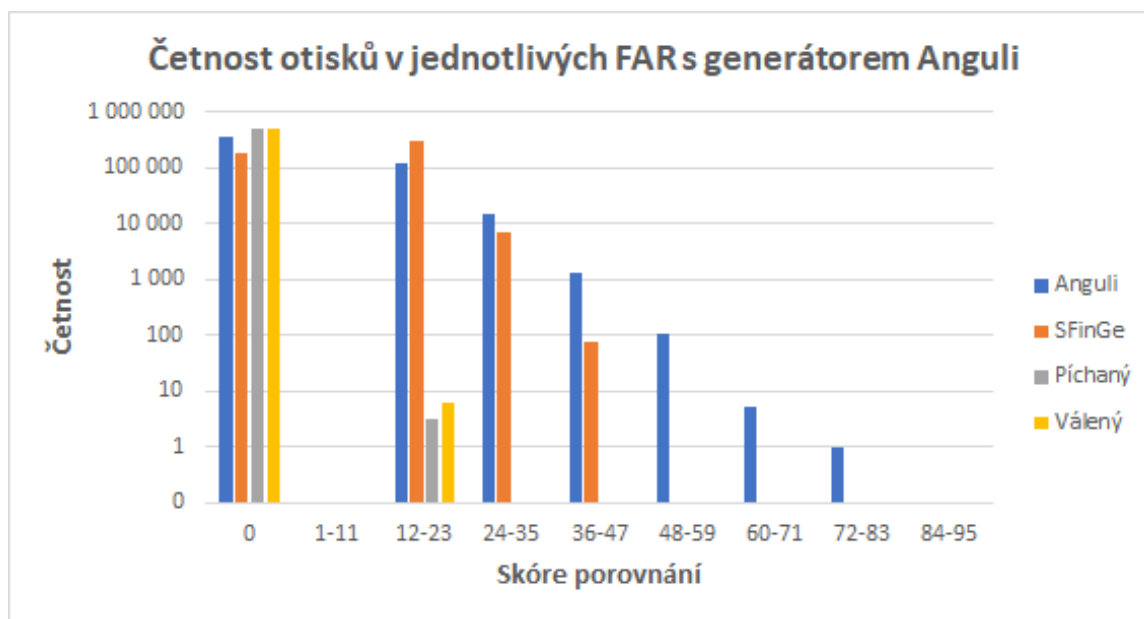
Odhadnutí třídy se v předchozím experimentu u reálných otisků podařilo pouze při využití generátoru *SFinGe*. Nicméně i v následujícím experimentu byly využity oba dva generátory. Generovány byly nyní pouze otisky ze třídy levá smyčka, do které spadají všechny čtyři otisky, které se využívají při identifikaci. Vygenerováno bylo 500 000 otisků každým z generátorů. Jelikož se generování zúžilo pouze na jednu třídu, měla by se teoretická šance na nalezení shodného otisku zvýšit. Nicméně v dřívějších výsledcích se ukázalo, že shodné otisky byly nalezeny i v jiných třídách, a to i s nejvyšším skóre porovnání.

7.4.1 Anguli

Píchaný otisk našel celkově pouze 3 shodné otisky ze všech vygenerovaných. Na obrázku 7.9 lze vidět výsledky píchaného otisku šedou barvou. Všechny dosáhly stejného skóre porovnání a to 12, což je hraniční skóre pro FAR 10 %. Později se ukázalo, že všechny tři otisky byly naprosto totožné. Generátor *Anguli* byl tedy schopen vygenerovat 3 shodné otisky v 500 000. Z toho 2 z nich byly vygenerovány v rámci jednoho generování, které probíhalo vždy po

100 000 otiscích. Shodný otisk měl celkově 4 shodné markanty. Typy markantů byly u všech odlišné, než na druhém otisku, avšak jejich pozice byly poměrně přesné, což pravděpodobně vyneslo výsledné skóre 12. Takové skóre je však nedostačující pro běžný biometrický systém.

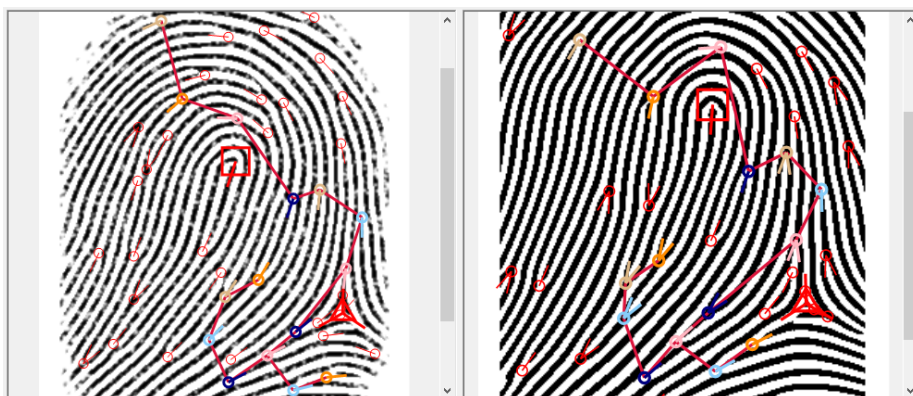
Výsledky rolovaného otisku jsou znázorněny žlutě na grafu v obrázku 7.9. Rolovaný otisk byl úspěšný také pouze při FAR 10 %. Celkově byla nalezena shoda s 6 otisky. Zajímavé je, že se mezi nimi nevyskytuje otisk, který byl shodný s píchaným otiskem, přestože oblast shody je na obou otiscích. Nyní bylo nejvyšší dosažené skóre 15 s jedním otiskem. Dále pak dva otisky dosáhly skóre 14 a zbylé tři 12. Otisk s nejvyšším skóre našel shodné markanty v oblasti delty. U ostatních otisků byly shodné markanty nalezeny po okrajích váleného otisku, a to ještě s přetočením až o 180°. Tedy tolerance při FAR 10 % je vysoká.



Obrázek 7.9: Četnost skóre porovnání pro 500 000 otisků z generátoru *Anguli*.

Syntetický otisk ze *SFinGe* byl shledán, jako v předchozích experimentech, za shodný se statisíci otisky. Četnost otisků v jednotlivých FAR je na obrázku 7.9. Nejvíce otisků spadá opět do FAR 10 % a to 307 416. Dále pak 6 827 otisků při FAR 1 % a celkem 77 otisků bylo shledáno za shodné i při FAR 0,1 %, kde nejvyšší dosažené skóre bylo 44. Jelikož syntetické otisky vyhazují po celou dobu vysokou podobnost, tak skóre 44 není nijak zvlášť vysoké.

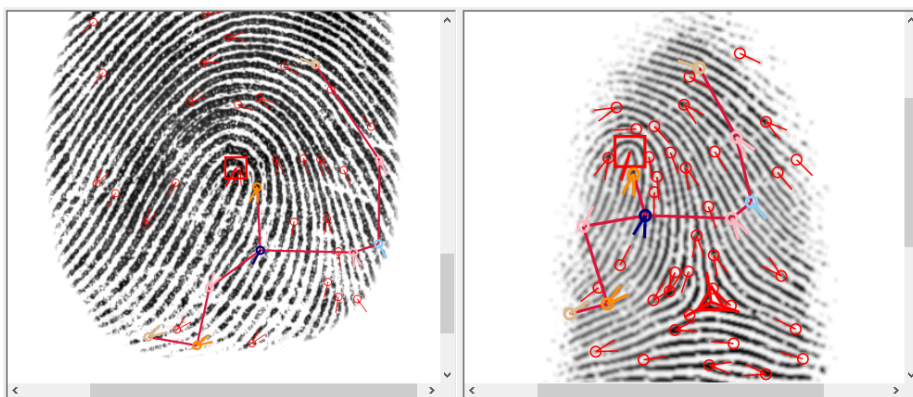
Syntetický otisk z *Anguli* byl na tom o poznání lépe, co se týče maximálního dosaženého skóre. Mezi „svými“ našel shodný otisk i při nastavení FAR 0,0001 %, který dosáhl skóre 76. Četnost jednotlivých FAR tříd je na obrázku 7.9. Při FAR 10 % bylo shodných otisků celkově 121 180, při FAR 1 % 15 553 a při FAR 0,1 % 1 324. Porovnání bylo úspěšné i za hranicí FAR 0,01 %, kde bylo celkově 107 otisků. Na obrázku 7.10 jsou vidět shodné markanty syntetického otisku z *Anguli* a otisku, který dosáhl zmíněného nejvyššího skóre. Celkově bylo označeno 15 markantů za shodné. Na první pohled je vidět, že vrchní část shodných markantů si příliš podobná není, přesto byly markanty označeny za shodné. Opět se část markantů liší i svým typem. Taková shoda otisků by již uspěla i u některého z biometrických systémů, nicméně se jedná o syntetické otisky, které běžně nebudou v biometrickém systému registrovány.



Obrázek 7.10: Shodné markanty syntetického otisku z *Anguli* a otisku s nejvyšším dosaženým skóre 76.

7.4.2 SFinGe

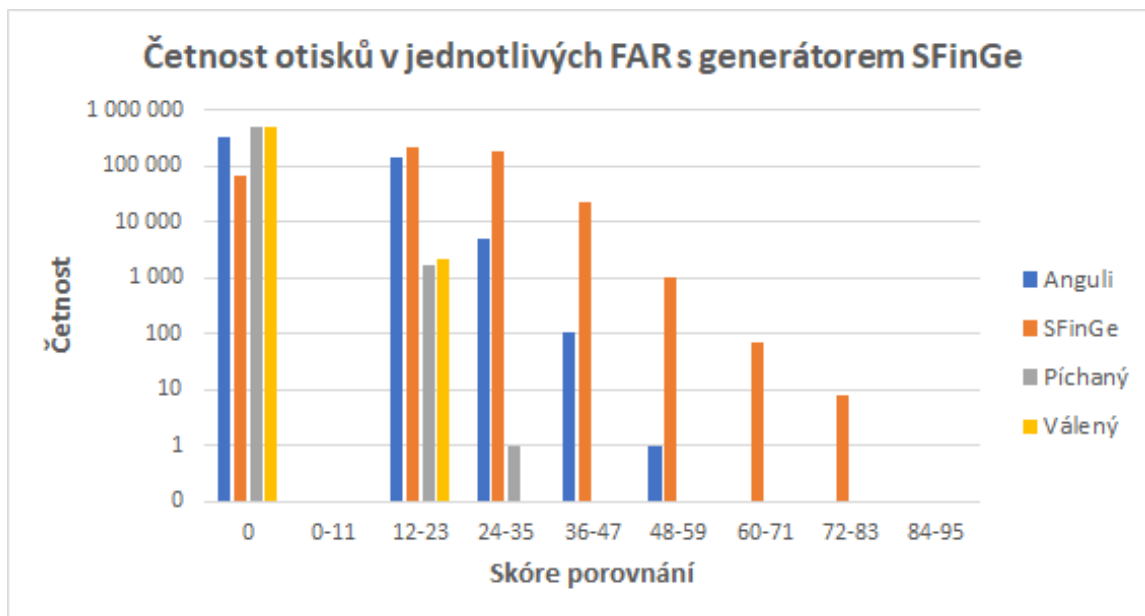
Při použití syntetických otisků z druhého generátoru bylo shodných otisků v případě píchaného otisku daleko více. Při FAR 10 % bylo nalezeno 1 650 shod. Pouze jeden otisk dosáhl hraničního skóre 24 a byl tak úspěšný i při FAR 1 %. Shodné markanty jsou na obrázku 7.11. Celkově bylo nalezeno 9 shodných markantů. Na první pohled se zdají být pozice markantů odlišené, jelikož delta syntetického otisku je v levé horní polovině otisku. Nicméně pozice shodných markantů jsou poměrně přesné. Porovnání četností shodných otisků v jednotlivých FAR je na obrázku 7.9.



Obrázek 7.11: Shodné markanty píchaného otisku s otiskem s nejvyšším dosaženým skóre 24.

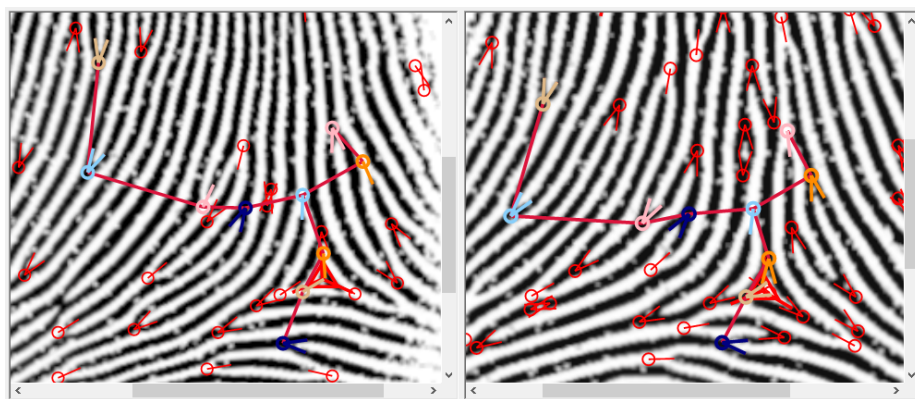
Válený otisk dosáhl opět vyššího počtu shodných otisků, než otisk píchaný, nicméně všechny stačily pouze na FAR 10 %, a tak nejvyšší dosažené skóre bylo 22. Celkově bylo nalezeno 2 141 shodných otisků. Výsledné četnosti skóre porovnání jsou na obrázku 7.12.

Syntetický otisk ze *SFinGe* nyní ukázal ještě větší podobnost mezi ostatními syntetickými otisky ze stejnojmenného generátoru. Výsledná četnost jednotlivých skóre porovnání je na obrázku 7.12. Při FAR 10 % jich bylo 222 145 a při FAR 1 % 187 914. Celkem 8 otisků mělo dostatečné skóre pro FAR 0,0001 %, kde jeden z nich dosáhl skóre 83, což je maximální hranice pro dané FAR. Kdyby dosáhl o jedna větší skóre, spadal by již do nižšího FAR a byl by to tak jediný ze všech porovnávaných otisků v experimentech, který by daného FAR



Obrázek 7.12: Četnost skóre porovnání pro 500 000 otisků z generátoru *SFinGe*.

dosáhl. Porovnání otisků je na obrázku 7.13. Celkem bylo shledáno za shodné 10 markantů, což je o 5 méně, než tomu bylo při porovnání syntetického otisku z *Anguli* na obrázku 7.10, nicméně jejich pozice jsou nyní daleko přesnější. Shodné markanty byly nalezeny v oblasti delty a opět se vyskytují shodné markanty opačného typu.



Obrázek 7.13: Shodné markanty syntetického otisku ze *SFinGe* a otisku s nejvyšším dosaženým skóre 83.

Posledním otiskem je tedy syntetický otisk z *Anguli*, který sice dosáhl poměrně velkého počtu shodných otisků, avšak nejvyšší dosažené skóre je nižší v porovnání s druhým generátorem. Nejvíce shod je opět při FAR 10 % a to 146 514. Dále pak 5 205 shodných otisků při FAR 1 %. Nejvyšší dosažené skóre je 50, které jako jediné stačí na FAR 0,01 %.

7.5 Shrnutí

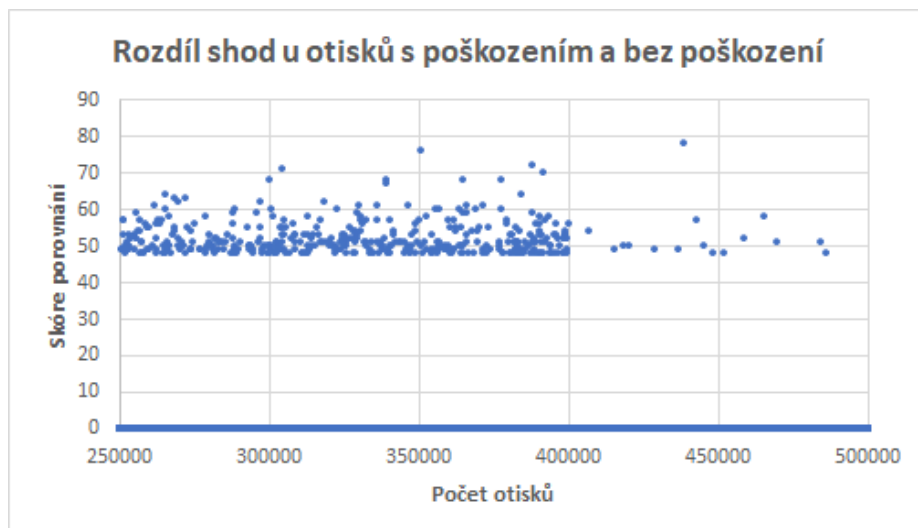
Celkově bylo přes všechny experimenty vygenerováno 2 800 000 otisků. V prvním experimentu, kde byly otisky rozloženy do všech tříd, byl pícháný otisk úspěšný pouze v případě využití generátoru *SFinGe*, kde jeden otisk dosáhl dostatečně velkého skóre, aby byl otisk shledán za shodný i při FAR 1 %. Rolovaný otisk našel jistou podobnost v databázích z obou generátorů, nicméně pouze při FAR 10 %, které je příliš tolerantní, a stačí přibližně 3 markanty na to, aby byl otisk již shledán za shodný. U syntetického otisku ze *SFinGe* bylo nalezeno shodných otisků již statisíce při FAR 10 %, a dokonce některé otisky stačily na FAR 0,1 %. Zde byla zjištěna chyba, že pokud při identifikaci otisku dojde k nalezení shody u více než 1 000 otisků, program nahlásí nedostatečně velkou paměť. Proto bylo nakonec porovnání upraveno tak, aby probíhalo po dostatečně malých částech. Syntetický otisk z *Anguli* pak vykázal vyšší podobnost mezi syntetickými otisky ze stejnojmenného generátoru. Celkový počet shodných otisků byl nižší než v případě druhého syntetického otisku, avšak maximální dosažené skóre bylo mnohem vyšší a jeden z otisků byl úspěšný při FAR 0,0001 %.

V druhém experimentu šlo o odhadnutí třídy jednotlivých identifikovaných otisků. Bylo tedy vygenerováno celkem 400 000 otisků každým generátorem, které byly rozděleny po 100 000. Zastoupené třídy byly oblouk, spirála a levá a pravá smyčka. Generátor *Anguli* byl při tomhle experimentu úspěšný pouze v případě syntetických otisků, kde šlo jednoznačně určit, která ze tříd převyšuje ostatní. U reálných otisků byly výsledné počty nulové a nebo tak nízké, že z nich nešlo udělat žádný odhad. Generátor *SFinGe* se prokázal při experimentu vhodnější, jelikož s jeho syntetickými otisky byly nalezeny shody i při reálných otiscích, a tak se podařilo správnou třídu otisku odhalit i u nich. U syntetických otisků to dopadlo obdobně jako v předchozím případě, kde bylo možné jednoznačně třídu otisku odhadnout.

Třetí experiment byl pak zaměřen na generování otisků pouze ze třídy levá smyčka, aby se zvýšila šance na nalezení shodných otisků. U generátoru *Anguli* se při reálných otiscích počet shodných otisků nijak výrazně nezvedl a u syntetických stoupl počet celkových shod dle očekávání. V případě generátoru *SFinGe* byl u reálných otisků vyšší počet shodných otisků, které však stačili pouze při FAR 10 %.

V průběhu práce byly zjištěny jisté zajímavosti. Otisky z generátoru *SFinGe* se podle výsledků zdají být daleko blíže reálným otiskům, než je tomu tak u syntetických otisků z *Anguli*. Dále pak vyhodnocování skóre porovnání algoritmus *VeriFinger* nebere příliš velký ohled na jednotlivé typy markantů, jelikož označuje za shodné markanty jiného typu. Nejvíce tedy nejspíše záleží na pozici markantu a úhlu papilární linie, jelikož i při menším počtu shodných markantů, s vyšší přesností pozice a úhlu, bylo výsledné skóre porovnání větší, než v případě vyššího počtu shodných markantů.

Dále ve třetím experimentu při použití generátoru *SFinGe* došlo k vygenerování 400 000 otisků se všemi možnými fázemi poškození otisku. Při posledních 100 000 byly tyto fáze vypnuty. Při zpracování výsledků bylo zjištěno, že bylo nalezeno daleko více shodných otisků mezi těmi, které byly vygenerovány s poškozením. Jednotlivá poškození pravděpodobně vedla při extrakci markantů ke vzniku chybných markantů, takže se jich v otisku v konečné fázi nacházelo více než v případě využití *dokonalého otisku*. V případě snahy vygenerování shodného otisku je tedy lepší zvolit generování s poškozením. Rozdíl počtu shodných otisků lze pozorovat na obrázku 7.14. Mezi otisky se simulací poškození bylo nalezeno 414 shodných otisků a mezi otisky bez simulace pouze 16.



Obrázek 7.14: Rozdíl počtu shodných otisků při generování otisků se všemi možnými fázemi simulací poškození otisku a bez těchto fází. Do 400 000 jsou otisky se simulací a za hranicí 400 000 jsou otisky bez simulace.

Kapitola 8

Závěr

Cílem této práce bylo zjištění odolnosti porovnávacího algoritmu *VeriFinger* od firmy Neutechnology vůči syntetickým otiskům. Byly splněny všechny body zadání. Princip porovnávacích algoritmů byl nastudován pro lepší pochopení celé problematiky. Dále bylo zapotřebí analyzovat dostupné generátory syntetických otisků vhodných pro danou práci. Byly využity generátory *SFinGe* a *Anguli*, které jsou založeny na stejném generačním algoritmu.

Celkově byly provedeny tři experimenty a vybrány čtyři otisky, které byly použity při verifikaci jako testovací. První experiment byl pouhý útok hrubou silou a to tak, že došlo k vygenerování náhodných otisků a následně k identifikaci zvolených otisků vůči těmto vygenerovaným. Druhý experiment byl proveden za účelem odhadnutí třídy identifikovaného otisku. Vygenerované otisky byly klasifikovány do jednotlivých tříd a byla provedena identifikace otisků. Ve třetím experimentu pak byly generovány otisky pouze z jedné konkrétní třídy.

V prvním experimentu byly nalezeny jisté shody pro reálné otisky, avšak jejich skóre porovnání bylo dostačující převážně pouze při FAR 10 %. U syntetických otisků pak bylo počet shodných otisků daleko více. Druhý experiment ukázal možnost odhadnutí třídy otisku v případě využití generátoru *SFinGe*, a to jak u reálných otisků, tak i u syntetických. Poslední experiment, který měl původně zajistit větší šanci na nalezení shodného otisku, nakonec dosáhl pouze výsledků takových, že bylo nalezeno více shodných otisků při FAR 10 %. Přesné výsledky jednotlivých experimentů jsou uvedeny v kapitole 7.

Z výsledků experimentů bylo zjištěno, že porovnávací algoritmus *VeriFinger* je v dostatečné míře odolný vůči syntetickým otiskům. V případě porovnání syntetického otisku vůči reálnému, nedošlo nikdy k vyššímu skóre porovnání, než je 24, které spadá do FAR 1 %. Při tak nízkém FAR nepracují žádné biometrické systémy. Pokud by však byly v systému registrovány z nějakých důvodů syntetické otisky, je již riziko vstupu útočníka daleko vyšší, jelikož v tomto případě se podařilo vygenerovat otisky, které spadaly do FAR 0,0001 %.

V průběhu práce bylo zjištěno, že generátor *Anguli* dokázal vygenerovat shodné otisky i při jednom souvislém generování databáze. Stálo by tedy za zjištění, kolik shodných otisků se celkově nachází mezi všemi vygenerovanými. Dalším možným rozšířením práce je bližší zkoumání vlivu generačních fází na výsledné skóre porovnání. V generátoru *SFinGe* lze nastavit, které fáze se mají vynechat. Některé z nich mají výrazný vliv na chybnou detekci markantů. Jelikož lze jednoduše vygenerovat stejný otisk, pokud je inicializační hodnota generátoru náhodných čísel nastavena vždy na stejnou hodnotu, tak lze jednoduše vygenerovat totožný otisk při různém nastavení generátoru. Posledním navrženým rozšířením by byla příprava generátoru schopného generovat otisky s přesnou pozicí singularit a markantů.

Literatura

- [1] Wikipedie [online]. *Daktyloskopie* [cit. 2019-12-09]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Daktyloskopie>.
- [2] ACREE, M. A. *Is there a gender difference in fingerprint ridge density?* Forensic Science International. 1999, roč. 102, č. 1, s. 35 – 44. ISSN 0379-0738.
- [3] AFSAR, F. A. *Fingerprint based person identification and verification*. Nilore-45650, Islamabad, 2005. Disertační práce. Pakistan Institute of Engineering and Applied Sciences. Doi: 10.13140/RG.2.2.30439.96165.
- [4] ALSHEHRI, H., HUSSAIN, M., ABOALSAMH, H. a ALZUAIR, M. *A Large-Scale Study of Fingerprint Matching Systems for Sensor Interoperability Problem*. College of Computer and Information Sciences. 2018. Doi: 10.3390/s18041008.
- [5] ANSARI, A. H. *Generation and storage of large synthetic fingerprint database*. 2011. Disertační práce. Indian Institute of Science Bangalore.
- [6] BAZEN, A., VERWAALJEN, G., GEREZ, S., VEELTURF, L. a ZWAAG, B. J. van der. *A correlation-based fingerprint verification system*. Proceedings of the ProRISC2000 Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing. Prosinec 2000.
- [7] BREWER, S. B. *ACE-V Examination method training manual*. Sacramento, CA, 2014. Master thesis. California State University, Sacramento. Dostupné z: <http://dspace.calstate.edu/bitstream/handle/10211.3/121583/Masters%20Project1.pdf?sequence=3>.
- [8] CHALOUPKA, R. *Generátor otisků prstů*. Brno, CZ, 2007. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/14894>.
- [9] CHAO, G., JENG, S. a LEE, S. *A fingerprint matching algorithm based on alignment using LPD and GCD minutia descriptors*. First IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications, and Systems. 2007, s. 1–5. Doi: 10.1109/BTAS.2007.4401957.
- [10] CUNHA, M. G. da, REZENDE, F. C. a kol. *Anatomical, Histological and Metabolic Differences Between Hypodermis and Subcutaneous Adipose Tissue*. International Archives of Medicine. 2017. Doi: 10.3823/2422.
- [11] DRAHANSKÝ, M., ORSÁG, F. a kol. *Biometrie*. 1. vydání. Computer Press, s.r.o., 2011. ISBN 978-80-254-8979-6.

- [12] EVANS, D. a PARISH, S. *Predicting the First Recorded Set of Identical Fingerprints*. Journal of Interdisciplinary Science Topics. Březen 2015, roč. 4. ISBN: 978-1-326-31276-3.
- [13] FERRER, R., CARNEIRO, L., BESSA, J., MORAES, J. a kol. *Techniques of Binarization, Thinning and Feature Extraction Applied to a Fingerprint System*. International Journal of Computer Applications. Říjen 2014, roč. 103, s. 1. Doi: 10.5120/18107-9291.
- [14] GALTON, F. *Fingerprints*. Londýn: Macmillan & Co., 1892. ISBN: 978-1591024125.
- [15] HIMPTON, H. E., ROBINSON, L. O. a LAUB, J. H. *The Fingerprint Sourcebook*. Washington, DC: U.S. Dept. of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice, 2011. ISBN: 978-1502828422.
- [16] JAIN, A. K., PRABHAKAR, S. a PANKANTI, S. *On the similarity of identical twin fingerprints*. Pattern Recognition. 2002, roč. 35, č. 11, s. 2653 – 2663. ISSN 0031-3203.
- [17] JANTZ, R. L. *Sex and race differences in finger ridge-count correlations*. American Journal of Physical Anthropology. 1977, roč. 46, č. 1, s. 171–176. Doi: 10.1002/ajpa.1330460122.
- [18] KRIVOKUCA, V. a ABDULLA, W. *Fast Fingerprint Alignment Method based on Minutiae Orientation Histograms*. Proceeding of the 27th Conference on Image and Vision Computing New Zeland. 2012, s. 486–491. Doi: 10.1145/2425836.2425928.
- [19] LABORATORY, B. S. *Fingerprint* [online]. Biometric System Laboratory, DISI - University of Bologna [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <http://biolab.csr.unibo.it/research.asp>.
- [20] MALTONI, D., MAIO, D., JAIN, A. a PRABHAKAR, S. *Synthetic Fingerprint Generation*. Duben 2006, s. 203–231. Doi: 10.1007/0-387-21587-5_6.
- [21] MALTONI, D., MAIO, D., JAIN, A. a PRABHAKAR, S. *Handbook of Fingerprint Recognition*. 2. vyd. Springer, 2009. ISBN 978-1-84882-254-2.
- [22] MONTEIRO RIVIERE, N. *Structure and Function of Skin*. Sv. 29. Leden 2006, s. 1–19. Doi: 10.1201/9780203020821.ch1.
- [23] NAGPAL, B., KUMAR, M., PANDEY, P. a kol. *Minutiae vs. Correlation: Analysis of Fingerprint Recognition Methods in Biometric Security System*. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). Říjen 2015, roč. 5, č. 1. ISSN: 2249-8958.
- [24] NEUROTECHNOLOGY. *Fingerprint identification for stand-alone or Web solutions, VeriFinger SDK* [online]. Zář 2019 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: https://download.neurotechnology.com/VeriFinger_SDK_Brochure_2019-10-09.pdf.
- [25] NFSTC. *A Simplified Guide To Fingerprint Analysis*. National Forensic Science Technology Center. 2013, [cit. 28.01.2020]. Dostupné z: <http://www.forensicsciencesimplified.org/prints/Fingerprints.pdf>.

- [26] OKAJIMA, M. *Frequency of forks in epidermal-ridge minutiae in the finger print*. American Journal of Physical Anthropology. 1970, roč. 32, č. 1, s. 41–48. Doi: 10.1002/ajpa.1330320106.
- [27] PAULO, R. P. S., ARNALDO, G. A. S., JOAO, J. B. P. a kol. *A Novel Approach for Fingerprint Singularities Detection*. 2017, s. 102–107. Doi: 10.1109/WVC.2017.00025.
- [28] ROLI BANSAL, P. B. *Minutiae Extraction from Fingerprint Images - a Review*. IJCSI International Journal of Computer Science Issues. roč. 8, č. 3, s. 74–85. ISSN 1694-0814.
- [29] SHERLOCK, B. a MONRO, D. *A model for interpreting fingerprint topology*. Pattern Recognition. 1993, roč. 26, č. 7, s. 1047–1055. Doi: 10.1016/0031-3203(93)90006-I. ISSN 0031-3203.
- [30] SINGH, A., GUPTA, R., ZAIDI, S. a SINGH, A. *Dermatoglyphics: A Brief Review*. International Journal of Advanced and Integrated Medical Sciences. Leden 2016, roč. 1, s. 111–115. Doi: 10.5005/jp-journals-10050-10039.
- [31] SWGFAST. *Standard for the Documentation of Analysis, Comparison, Evaluation, and Verification (ACE-V)* [online]. 2009 [cit. 2020-01-11]. Dostupné z: https://www.nist.gov/system/files/documents/2016/10/26/swgfast_standard-documentation-ace-v_2.0_121124.pdf.
- [32] SYRIS, T. C. *About FAR, FRR and ERR*. 1. vydání. Syris Technology Corp., 2004.
- [33] THAKKAR, D. *False Acceptance Rate (FAR) and False Recognition Rate (FRR) in Biometrics* [online]. Bayometric [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.bayometric.com/false-acceptance-rate-far-false-recognition-rate-frr/>.
- [34] VANDERKOLK, J. R. *Fingerprint Sourcebook - Chapter 9: Examination Process*. National Institute of Justice/NCJRS. 2011. ISBN: 978-1502828422. Dostupné z: <https://www.ncjrs.gov/pdffiles1/nij/225329.pdf>.
- [35] VIZCAYA, P. a GERHARDT, L. *A nonlinear orientation model for global description of fingerprints*. Pattern Recognition. 1996, roč. 29, č. 7, s. 1221–1231. Doi: 10.1016/0031-3203(95)00154-9. ISSN 0031-3203.
- [36] XUNQIANG, T., CHEN, X., YANG, X. a TIAN, J. *Fingerprint Recognition with Identical Twin Fingerprints*. PloS one. Duben 2012, roč. 7. Doi: 10.1371/journal.pone.0035704.
- [37] YANG, J. *Non-minutiae based fingerprint descriptor*. červen 2011. Doi: 10.5772/21642. ISBN 978-953-307-618-8.
- [38] YOON, S. a JAIN, A. K. *Longitudinal study of fingerprint recognition*. Proceedings of the National Academy of Sciences. National Academy of Sciences. 2015, roč. 112, č. 28, s. 8555–8560. Doi: 10.1073/pnas.1410272112. ISSN 0027-8424.
- [39] ZAFAR, W., AHMAD, T. a HASSAN, M. *Minutiae based fingerprint matching techniques*. 17th IEEE International Multi Topic Conference 2014. 2014, s. 411–416. Doi: 10.1109/INMIC.2014.7097375.

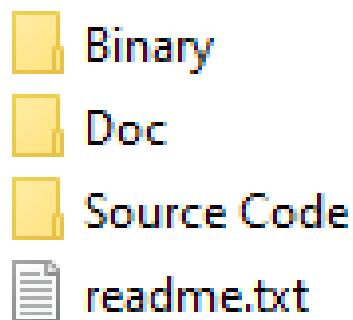
Příloha A

Paměťové médium

Obsahem závěrečné práce je i přiložené paměťové médium, které obsahuje text práce ve formátu PDF, ale i zdrojové kódy pro vytvoření textu. Dále pak spustitelné soubory k implementované aplikaci a její zdrojové kódy pro přeložení. Na obrázku [A.1](#) je vidět obsah kořenového adresáře paměťového média.

- Binary - spustitelné soubory implementované aplikace
- Doc - zdrojové kódy technické zprávy
- Source Code - zdrojové kódy implementované aplikace
- readme.txt - návod pro spuštění aplikace
- xpoleh00.pdf - text technické zprávy

Název



Obrázek A.1: Obsah paměťového média.