



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**ALGORITMICKÉ VYHODNOCENÍ KVALITY
DAKTYLOSKOPICKÝCH STOP**

ALGORITHMIC EVALUATION OF THE QUALITY OF DACTYLOSCOPIC TRACES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

KATEŘINA NEPRAŠOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MARTIN DRAHANSKÝ, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce



Studentka: **Neprašová Kateřina**
Program: Informační technologie
Název: **Algoritmické vyhodnocení kvality daktyloskopických stop**
Algorithmic Evaluation of the Quality of Dactyloscopic Traces
Kategorie: Zpracování obrazu

Zadání:

1. Prostudujte dostupnou literaturu v oblasti kriminalistické daktyloskopie a algoritmického hodnocení kvality otisků prstů.
2. Vyberte vhodné existující algoritmy pro vyhodnocení kvality daktyloskopických stop a porovnejte je.
3. Navrhněte, proveďte a vyhodnoťte experimenty s degradací kvality daktyloskopických stop v různých prostředích a na různých materiálech.
4. Vhodné vybrané metody z bodu 2 aplikujte na vytvořenou sadu stop.
5. Dosažené výsledky zhodnoťte a diskutujte závěry, i příp. rozšíření.

Literatura:

- MALTONI, Davide, et al. *Handbook of fingerprint recognition*. Springer Science & Business Media, 2009.
- DRAHANSKÝ, Martin (ed.). *Hand-based biometrics: methods and technology*. Institution of Engineering and Technology, 2018.
- DRAHANSKÝ, Martin, et al. *Biometrie*, 2011.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

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

Vedoucí práce: **Drahanský Martin, prof. Ing., Dipl.-Ing., Ph.D.**

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

Datum zadání: 1. listopadu 2021

Datum odevzdání: 11. května 2022

Datum schválení: 13. května 2022

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou degradace daktyloskopických stop. Mimo souhrnu metod zpracování a využití daktyloskopických stop v běžné kriminalistické praxi, výčtu vlivů na degradaci stop, popisu způsobů počítačového zpracování a charakteristiky algoritmů ohodnocujících kvalitu otisků prstů obsahuje práce i tvorbu vlastních sad otisků prstů, které byly vytvořeny na různých materiálech a zkoumány v různých prostředích v závislosti na čase. Vzorky jsou vyhodnocovány jak v laboratořích Odboru kriminalistické techniky a expertiz Policie ČR, tak algoritmicky. K tomu byl vyvinut nástroj, který využívá algoritmů NFIQ 2.1, MINDTCT, FingerJetFX OSE a knihovny Innovatrics SDKit, jehož výstupem je přehledná vizualizace výsledků algoritmické analýzy. Pozorováním i algoritmickou analýzou byla prokázána problematičnost určení míry degradace ze snímků otisků prstů.

Abstract

The bachelor thesis deals with the problem of the degradation of dactyloscopic traces. Apart from the summary of the methods of processing and use of dactyloscopic traces in common criminalistic practice, enumeration of influences on the degradation of traces, description of computer processing methods and description of algorithms evaluating the quality of the fingerprints, the thesis includes the creation of sets of fingerprints, which were created on different materials and examined in different environments depending on time. The samples are evaluated both in the laboratories of the Department of Criminalistics and Expertise of the Police of the Czech Republic and algorithmically. For this purpose, a tool that uses the NFIQ 2.1, MINDTCT, FingerJetFX OSE algorithms and the Innovatrics SDKit library has been developed. The output of this is a clear visualization of the results of the algorithmic analysis. The difficulty of determining the degree of degradation from fingerprint images was demonstrated by observation and algorithmic analysis.

Klíčová slova

Daktyloskopické stopy, otisk prstu, Odbor kriminalistické techniky a expertiz Policie České republiky, markant, degradace daktyloskopické stopy

Keywords

Dactyloscopic traces, fingerprint, Department of Criminalistics and Expertise of the Police of the Czech Republic, minutiae, degradation of the dactyloscopic trace

Citace

NEPRAŠOVÁ, Kateřina. *Algoritmické vyhodnocení kvality daktyloskopických stop*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce prof. Ing. Martin Dražanský, Ph.D.

Algoritmické vyhodnocení kvality daktyloskopických stop

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně pod vedením pana prof. Ing. Martina Drahanského, Ph.D. Další informace mi poskytli pan kpt. Jaroslav Kubinger a pan Ing. Marco Micheletto. Uvedla jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpala.

.....

Kateřina Neprašová

16. května 2022

Poděkování

Děkuji Fakultě informačních technologií VUT Brno za poskytnutí prostor a nástrojů pro vedení výzkumu. Dále děkuji panu Jaroslavu Kubingerovi za konzultace experimentů a panu Martinovi Blahákovi a Odboru kriminalistické techniky a expertíz PČR Brno za přístup do fotoateliéru. Také děkuji za podporu a pomoc přátelům a rodině.

Obsah

1	Úvod	2
2	Otisk prstu v daktyloskopii	3
2.1	Otisk prstu	3
2.2	Daktyloskopická stopa	6
2.3	Proces zajišťování a zpracování daktyloskopických stop policíí České republiky	7
2.4	Vlivy na kvalitu a degradaci daktyloskopických stop	9
3	Počítačové zpracování otisků prstů	14
3.1	Biometrické systémy	14
3.2	Počítačové rozpoznávání otisků prstů	16
3.3	Existující algoritmy pro vyhodnocení kvality daktyloskopických stop	18
4	Experimenty s degradací kvality daktyloskopických stop	27
4.1	Tvorba vzorků	28
4.2	Fotografování	30
4.3	Pozorování	31
5	Programové řešení	35
5.1	Implementace	35
5.2	Testování na umělé sadě	40
5.3	Výsledky analýzy vzniklých datasetů	43
6	Závěr	48
	Literatura	50
A	Srovnání vzorků před a po prášení odebraných pět měsíců od vzniku	53
B	Výsledky analýzy fotografovaných sad na skle ze všech prostředí	55
C	FiQSA Manuál	72
D	Obsah přiloženého DVD	75

Kapitola 1

Úvod

Otisky prstů na místě činu jsou velmi důležitým ukazatelem informací o spáchaném trestném činu, pachateli, který čin spáchal, a způsobu provedení daného trestného činu. Stopy jsou klíčem během vyšetřování a dokazování v trestním řízení. Jednou z největších výzev, kterým dnes forenzní odvětví čelí, je určit konkrétní dobu, kdy byl na místě otisk prstu vytvořen pomocí ověřené metodiky, která bude akceptována soudy. Jelikož neexistují žádné pochybnosti o všeobecném uznání otisků prstů pro osobní identifikaci, určení okamžiku, kdy otisk vznikl, je zásadní, a to zejména v situacích, kdy měl člověk podezřelý ze spáchání trestného činu předchozí nebo následný legitimní přístup na místo činu.

Určení míry degradace daktyloskopických stop je sporné už kvůli četným faktorům ovlivňujícím jejich stárnutí, jako je charakteristika donora, povaha podkladu, fyzikální a chemické interakce mezi donorem a podkladem a podmínky prostředí, ve kterých je otisk uchováván [10]. Tato bakalářská práce je praktickým experimentem založeným na metrikách reálných případů a vrhá světlo na problematiku zkoumání degradace daktyloskopických stop a algoritmické určení kvality stop a neexistenci standardizovaných protokolů na určování této kvality mezi existujícími algoritmy.

Pro pochopení této problematiky je nejprve nutné pochopení využití a zpracování otisků prstů, což je shrnuto v kapitole číslo 2, kde jsou probrány a vysvětleny i vlivy na kvalitu a degradaci daktyloskopických stop. Na to navazuje popis vybraných existujících algoritmů zabývajících se kvalitou otisku prstu v kapitole třetí, která se také zabývá biometrickými systémy a počítačovým zpracováním otisků prstů obecně. Čtvrtá kapitola se věnuje vlastnímu výzkumu, konkrétně tvorbě vzorků otisků prstů na různých materiálech v různých prostředích a jejich zajišťování a pozorování v průběhu času.

Stanoviska nastíněná při popisu pozorování v kapitole čtvrté pak potvrzuje programové řešení, jehož popis a výsledky shrnuje kapitola číslo 5. Výsledky analýzy vzniklých setů vzorků otisků prstů shrnuje také webová aplikace, která je též součástí programového řešení a její demo verze je dostupná online na <https://fiqsa.herokuapp.com/>.

Kapitola 2

Otisk prstu v daktyloskopii

Stopy na místě trestného činu slouží jako zdroj informací o spáchaném činu. Z umístění stop je mnohdy možné odvodit sled událostí i způsoby spáchání objasňovaného činu. Rozsáhlou skupinu kriminalistických stop tvoří daktyloskopické stopy. Tyto stopy jsou materiálním zdrojem informací a lze z nich vyčíst pohlaví, přibližné stáří pachatele, až přímo jeho identitu, nachází-li se v policejní databázi. V každém případě jsou stopy otisků prstů jedním z hlavních identifikátorů účastníků trestného činu. Co se (ne)popiratelnosti týče, je potřeba se v jistých případech zabývat pravostí těchto stop.

2.1 Otisk prstu

Lidská kůže je důležitý orgán chránící naše tělo. Vzor kůže je tvořen hřebeny a rýhami, které nejsou geneticky řízené. To znamená, že otisky prstů jsou jedinečné a přirozeně neměnné vzory tvořené třecími rýhami (vyvýšené) a brázdami (prohloubené), které se objevují na polštářcích prstů. Unikátní jsou také otisky dlaní, prstů na nohou a chodidel, jejichž použití k identifikaci však není tak časté. Méně výrazné třecí rýhy se vyskytují i na lidských rtech. Otisky prstů jsou ještě unikátnější než DNA, genetický materiál v každé naší buňce. Existuje šance jedna ku 64 miliardám, že se otisky prstu dvou různých lidí budou přesně shodovat. Ačkoli jednovaječná dvojčata mohou mít stejnou DNA (nebo alespoň její většinu), nemohou mít stejné otisky prstů. A proč tomu tak je? Vzor otisků prstů se plně vytvoří přibližně v 16. týdnu vývoje plodu. [16]



Obrázek 2.1: Otisky prstů ruky. Převzato z [5].

Předtím se během procesu diferenciacce mění proudění plodových tekutin kolem plodu a jeho poloha v děloze. Buňky na konečcích prstů tak rostou v mikroprostředí, které se ruku od ruky a prst od prstu mírně liší. To znamená, že otisky prstů, jak je k vidění na obrázku 2.1, jsou dokonce odlišné na každém prstu. [18]

Vzhledem k jejich jedinečnosti není jejich použití k rozpoznávání identity osob žádným překvapením. Například v systému AFIS (Automatic Fingerprint Identification System) FBI jsou uloženy otisky prstů a trestní historie 70 milionů osob v hlavním souboru trestních spisů, 31 milionů občanských otisků a otisky prstů 73 000 známých a podezřelých teroristů, které zpracovávají americké nebo mezinárodní donucovací orgány. V České republice je dle [26] daktyloskopický identifikační systém AFIS využíván od října 1994.

Otisky prstů jsou pochopitelně jedním z nejvyužívanějších rysů pro identifikaci člověka biometrickými systémy. Se zvětšující se poptávkou po automatickém rozpoznávání osob v boji proti podvodům s identitou a bezpečnostním hrozbám s důrazem na bezdotyková zařízení se však pozornost oproti průběhu v minulosti více přesouvá také na identifikaci osob na základě rozpoznávání obličeje a hlasu.

2.1.1 Historie používání otisků prstů k identifikaci osob

Tato sekce krátce vyzdvihuje významné milníky v historii lidstva z hlediska zkoumání otisků prstů a jejich používání. Informace jsou převzaty z [9] a kapitoly *HISTORY* z knihy *The fingerprint sourcebook* viz [28].

Za nejstarší dosud nalezené otisky jsou sice považované otisky třecích hřebenů na keramice staré asi 6000 let nalezené na archeologickém nalezišti v severozápadní Číně, ale první použití otisků prstů jako prostředku identifikace přišlo podle důkazů o tisíce let později – opět však z Číny. Jedná se o čínský dokument nazvaný *Svazek o vyšetřování na místě činu – vloupání*, z období dynastie Čchin (221 až 206 př. n. l.) a popisuje to, jak se otisky rukou používaly jako typ důkazů. Po vynálezu papíru Číňany v roce 105 n. l. začalo být běžné podepisovat dokumenty otiskem prstu.

V Evropě došlo k prvním použitím otisků prstů k rozeznání osob až na začátku druhého tisíciletí našeho letopočtu. Výrazným milníkem je zde článek *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* z roku 1684, kde Dr. Nehemiah Grew poprvé podrobně popsal vzhled otisku prstu. Tento popis v roce 1687 s využitím nově vynalezeného mikroskopu zdokonalil italský fyziolog Marcello Malpighi. Jako uznání jeho práce po něm byla pojmenována vrstva kůže – stratum Malpighi. Na popisy otisků prstu navazuje německý lékař a anatom J. C. A. Mayer, který ve své práci v roce 1788 jako první stanovil, že vzory třecích hřebenů na konečcích prstů jsou jedinečné.



Obrázek 2.2: Purkyňových devět typů vzorů (A: Příčné křivky, B: Centrální podélná rýha, C: Šikmá rýha, D: Šikmá dutina, E: Mandle, F: Spirála, G: Elipsa nebo eliptický závit, H: Kruh nebo kruhový závit a I: Dvojitá vrstevnice). Převzato z [28].











V 19. století už dochází k rozsáhlejším studiím, např. dr. Purkyně rozdělil a pojmenoval vzory otisků, toto rozdělení demonstruje obrázek 2.2. Jeho devět typů vzorů bylo předchůdcem Henryho klasifikačního systému. Na konci tohoto století došlo také k prvnímu studiu permanence otisků. Od 20. století následuje využívání otisků vládami, vznik evidencí, kriminalistických zápisů s otisky prstů a s nástupem technologií také zpracování otisků prstů biometrickými systémy.

2.1.2 Vzory otisků prstů

Hlavní obrazec papilárních linií, tedy vzor otisku prstu, je vzorem třecích rýh na daném prstu. Tyto vzory lze rozdělit dle jejich tvarů do několika kategorií, přičemž existuje více možností tohoto dělení. Nejčastěji je dnes možné se setkat s následující klasifikací vzorů papilárních linií, která je označována jako tzv. *Henryho systém* [18]:

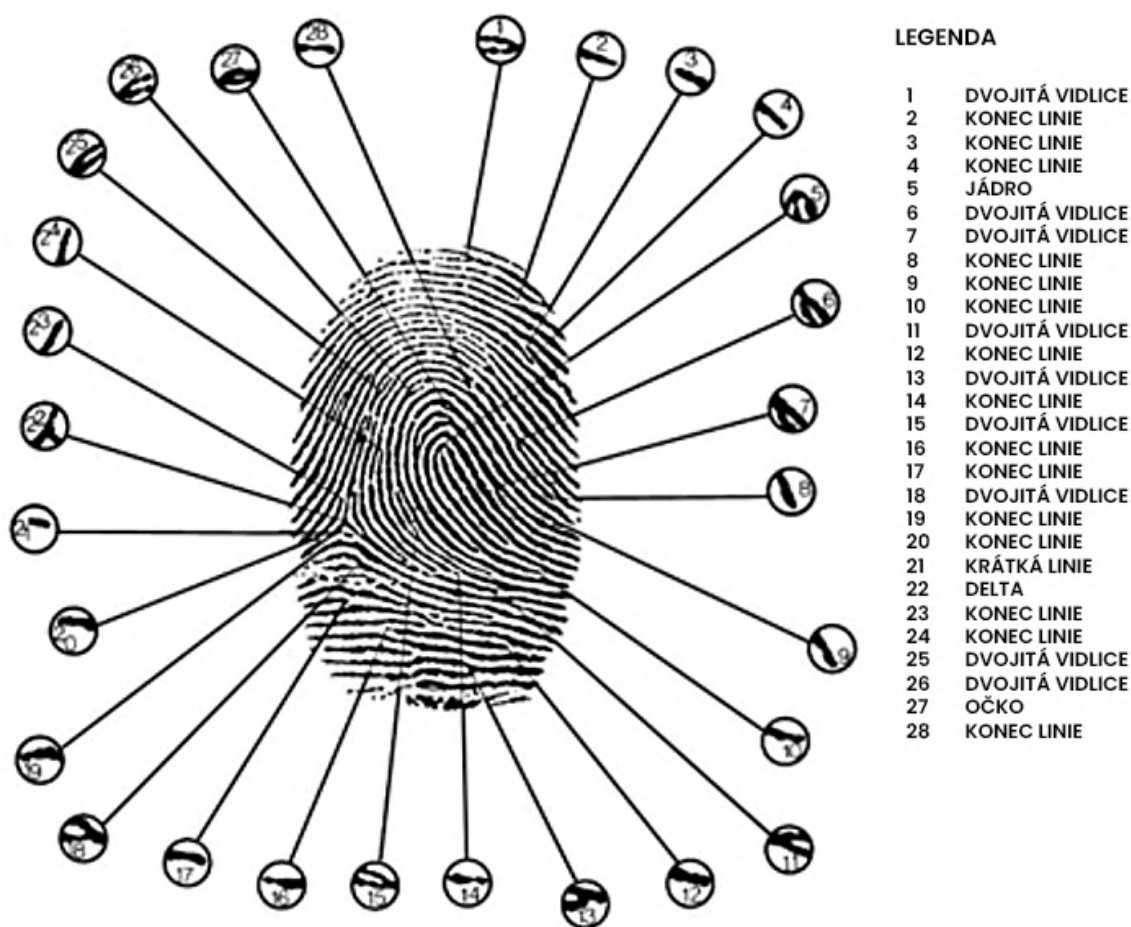
- Levá smyčka (left loop).
- Pravá smyčka (right loop).
- Závit (whorl).
- Oblouk (arch).
- Klenutý oblouk (tented arch).

Vzory jsou tvořeny body singularity, což jsou místa se zvýšeným výskytem výrazně zakřivených papilárních linií a větším počtem zakončení. Dochází zde k vyšší koncentraci znaků na malé ploše. Každý vzor otisku prstu pak nese určité znaky – markantní body. Počet, umístění a kombinace právě těchto znaků určuje unikátnost každého otisku prstu. Různé markanty mají jistou identifikační hodnotu, která závisí na četnosti výskytu v populaci – čím vyšší výskyt, tím menší identifikační hodnota. Pro identifikaci pak není použit pouze prostý počet markantních bodů ale součet jejich identifikačních hodnot. [30]

Označení markantu		Identifikační hodnota
Trojité vidlice		3,7
Křížení		3,1
Zdvojení		2,6
Posunutí		2,4
Očko		2,4
Mústek		2,3
Háček		2,1
Krátká linie		2,0
Tečka	•	1,7
Dvojitá vidlice		1,3
Začátek ukončení		1,0

Tabulka 2.1: Markantní body a jejich identifikační hodnota [29]

Obrázek 2.3 demonstruje nasázené markanty na otisku. Každý otisk, tím že je struktura prstu jedinečná, má různý počet těchto identifikačních bodů. Běžně se počet markantních bodů v otisku prstu člověka pohybuje okolo sedmdesáti, k identifikaci osoby jich však stačí i deset. [39]



Obrázek 2.3: Popis markantních bodů na konkrétním otisku prstu.

2.2 Daktyloskopická stopa

„Daktyloskopická stopa je každý vtisk, nebo otisk na předmětu schopném jeho obraz nebo tvar přijmout, po určitou dobu jej uchovat a je zjištělná, zajištělná a využitelná.“ [13]

Daktyloskopické stopy vznikají v okamžiku bezprostředního působení člověka na jiný předmět, který je schopen přijmout a uchovat odraz papilárních linií. Stopa může vzniknout [30]:

- (a) Vytvořením zrcadlově obráceného reliéfu povrchové struktury papilárních linií, tyto daktyloskopické stopy je možné označit jako *plastické*.
- (b) Na papilární linii se přenese látka z povrchu předmětu, čímž dojde k porušení povrchové struktury nosiče stopy, stopy se označují jako *odvrstvené*.
- (c) Na nosič se přenese látka, která se nachází na povrchu papilárních linií, říká se jim *navrstvené* daktyloskopické stopy a dělí se na viditelné a skryté, jinak řečeno latentní.

Většina daktyloskopických stop zajišťovaná na místech trestných činů vznikla přenosem potu, který vylučuje pokožka, z vrcholků papilárních linií na předmět dotyku. Tyto stopy jsou označeny jako potně-tukové.

2.3 Proces zajišťování a zpracování daktyloskopických stop policií České republiky

Po ohlášení trestného činu jsou na místo jeho spáchání vyslány jednotky Policie ČR, mezi které patří i kriminalističtí technici. Ti z pravidla provádějí ohledání trestného činu a zajištění stop.

2.3.1 Ohledání místa trestného činu

Z hlediska kriminalistiky je místo trestného činu takové místo, kde daný pachatel zčásti či zcela zrealizoval jednání, které charakterizuje kriminální událost a místo, které souvisí bezprostředně s místem spáchání trestného činu. [4]

Ohledání místa trestného činu je definováno v § 113 zákona č. 141/1961 Sb., trestního řádu, ve znění pozdějších předpisů:

- (1) *Ohledání se koná, mají-li být přímým pozorováním objasněny skutečnosti důležité pro trestní řízení. K ohledání se zpravidla přibere znalec.*
- (2) *Protokol o ohledání musí poskytovat úplný a věrný obraz předmětu ohledání; mají se proto k němu přiložit fotografie, náčrty a jiné pomůcky.*

Ohledání, jakožto procesní úkon, je vykonáváno policejním orgánem zastupovaným na místě policistou. Policista může ohledání provést sám, často si však vyžádá součinnost specialistů, např. kriminalistických techniků, potápěčů, pyrotechniků nebo spolupráci civilistů, zejména lékařů, statiků apod.

Při ohledání podle [4] vzniká kriminalisticko-technická dokumentace, která prezentuje průběh a výsledek vyšetřované události a identifikaci veškerých relevantních skutečností z místa činu. Jedná se tudíž o celkový popis události i s celkovým obrazem situace.

2.3.2 Zviditelňování a zajišťování daktyloskopických stop

Dle [39] jsou rozeznávány tyto metody zviditelňování latentních daktyloskopických stop:

- (a) Fyzikální – založeny na poznatku, že odparek potu, který tvoří vlastní stopu má adhezivní charakter, a tak na něm ulpívají jemné práškovité hmoty - daktyloskopické prášky - nanesením prášku dojde k vykreslení papilárních linií otisku.
- (b) Chemické – založeny na chemické reakci mezi potem a chemikálií, dochází k barevnému obtáhnutí rysů otisku. Používají se různé chemické látky:
 - Dusičnan stříbrný – reaguje s chloridy v potu a vytváří černé kovové stříbro.
 - Ninhydrin – reaguje s bílkovinami v potu a vytváří růžové vykreslení.
- (c) Fyzikálně-chemické – s použitím par kyanoakrylátu či jódu – jod-stříbro: leštěná stříbrná destička se přiloží na otisk zviditelněný jódovými parami a vystaví se intenzivnímu světlu, na destičce vzniká stálý otisk tmavohnědé až hnědočerné barvy.

Mezi nejčastější a nejrozšířenější metody zajišťování viditelných stop patří fotografování, využívá se především u stop daktyloskopických, trasologických a mechanoskopických. K zajištění krvavých, mastných či barevných stop se pro dosažení většího barevného kontrastu při fotografování často využívá aditivních filtrů. Při správném provádění této metody nehrozí znehodnocení stop, jelikož není vyžadován přímý kontakt s objektem. Dalším benefitem je možnost zvýšit šanci ideálního zachycení stopy umělou změnou podmínek, například změnou osvětlení stopy, expozice či různým nastavením citlivosti fotoaparátu. Stopy se běžně zajišťují s přiloženým měřítkem. [4]

Další metodou zajišťování daktyloskopických stop je snímání daktyloskopickou fólií, a to poté, co byly zvýrazněny daktyloskopickým práškem viz [35]. Tato metoda může následovat metodu fotografování. Plastické daktyloskopické stopy lze zajistit odléváním, odlitek se poté otiskne na papír za pomoci daktyloskopické černě. Někdy je také možné stopy zvýraznit šikmým světlem a následně vyfotografovat.

Latentní daktyloskopické stopy lze též zviditelnit pomocí osvětlovací lampy se šterbinou k plošné orientaci osvětlení. Tak lze za pomoci šikmého osvětlení umožnit zviditelnění téměř všech druhů daktyloskopických stop. To je pak následováno fotografickou metodou dokumentace. Zajištění stopy na místě trestného činu je možné i po zviditelnění s použitím par sublimovaného jódu (nebo kyanoakrylátu), který zbarví stopy hnědočerveně. Zde je potřeba stopy včas vyfotografovat, než dojde k jejich znehodnocení přirozeným odsublimováním jódu. [33]

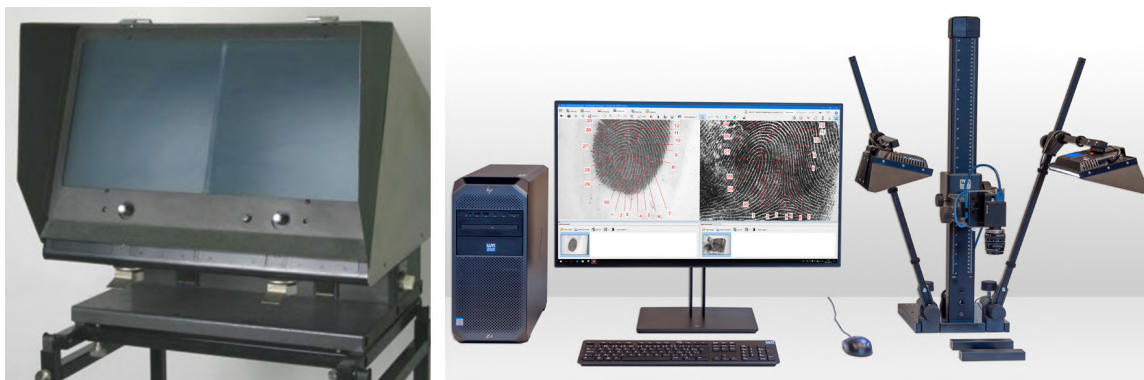
Z hlediska materiálu objektů, na nichž jsou daktyloskopické stopy zajišťovány, se nejčastěji jedná o lesklé neporézní povrchy jako je sklo, lakované dřevo, různé plasty, hladký kov apod. Častým případem zajišťování otisků prstů je též jejich jímání z různých papírových dokumentů. Daktyloskopické stopy se obvykle zajišťují přímo na místě činu, až na případy, kdy z předmětů nelze stopy zajistit. Za těchto okolností se stopy přepraví do kriminalistické laboratoře.

2.3.3 Zpracování zajištěných otisků prstů

Proces daktyloskopické identifikace lze rozčlenit do tří fází [30]:

1. Zkoumání stop z hlediska jejich vhodnosti pro identifikaci – zkoumání identifikačních znaků, jejich počet a kvalita.
2. Srovnávací zkoumání – hodnocení jednotlivých markantů z hlediska jejich kvality (druh – háček, očko atd. určuje identifikační hodnotu), i kvantity (určena jejich polohou ve vztahu k okolním znakům), dochází ke srovnávání těchto hodnot mezi oběma identifikujícími objekty a vyvozují se první závěry o shodě.
3. Souhrnné zhodnocení všech dílčích závěrů.

Dříve se ke zkoumání a srovnávání daktyloskopických stop odborníky PČR využíval komparátor manuální, ten je dnes pomalu nahrazován komparátorem digitálním. Obě zařízení jsou k vidění na obrázku 2.4. Princip fungování manuálního i digitálního komparátoru je však stejný: na každou stranu zařízení je zvětšen otisk a znalec otisky mezi sebou porovnává a sází markantní body. Digitální komparátor má samozřejmě výhodu částečné automatizace, což je především automatické číslování sázených markantních bodů a volba měřítka, a možnosti uložení.



Obrázek 2.4: Manuální (vlevo) a digitální (vpravo) komparátor využívající PČR.

Po zajištění daktyloskopických stop tedy následuje jejich ohodnocení z hlediska obsahu informací. Tato vlastnost je nazývána upotřebitelnost, a stopy je možné dle tohoto kritéria rozdělit na [39]:

- (a) upotřebitelné k identifikaci – stopy obsahující často více než 10 identifikačních znaků (markantů), které mohou být použity jako důkazní prostředek při identifikaci,
- (b) částečně upotřebitelné – stopy, které nemají dostatek znaků, aby mohly být použity jako přímý důkaz, avšak lze na jejich základě vyloučit podezřelé osoby, a
- (c) neupotřebitelné – neobsahují dostatek informací k identifikaci člověka, často se jedná o neúplné otisky s méně než 7 markantními body.

Z důvodů časové náročnosti při zpracování daktyloskopických expertiz (též vlivem stoupající kriminality) byl celosvětově zaveden automatizovaný identifikační systém označovaný jako AFIS, jehož součástí je i algoritmus, který je schopen automaticky detekovat markanty. Lokalizace identifikačních znaků se i přes zjednodušení díky moderním technologiím stále neobejde bez znalců, kteří provádí výsledné kriminalistické zkoumání [33].

Aktuálně jsou u nás též využívány sbírky otisků prstů systému AFIS, který v ČR, stejně jako v ostatních členských státech Evropské unie, obsahuje kartu vždy s otisky všech deseti prstů, jménem a příjmením, pohlavím, barvou očí, obličejem a vlasů, a výškou postavy. Do tohoto systému má přístup OKTE (Odbor kriminalistické techniky a expertiz), Kriminalistický ústav Praha a útvary Cizinecké a pohraniční policie. [27]

2.4 Vlivy na kvalitu a degradaci daktyloskopických stop

Časová stálost daktyloskopických stop je i dnes nesporným problémem daktyloskopie. V minulosti již proběhlo několik pokusů o vyvinutí metody odhadu stáří otisků prstů pro určení jejich relevance na místě činu, ale zatím jen s omezeným úspěchem. Pro použití spolehlivého modelu stárnutí otisků prstů je zásadní důkladné pochopení jejich změn v čase od počáteční fáze po zdegradování. Jakmile by byl model úspěšně vyvinut, umožnil by vyšetřovatelům prověřit okruh podezřelých osob ze spáchání trestného činu a zaměřit se pouze na osoby, které měly přístup na místo činu, a také hypoteticky vytvořit časovou osu trestného činu. [19]

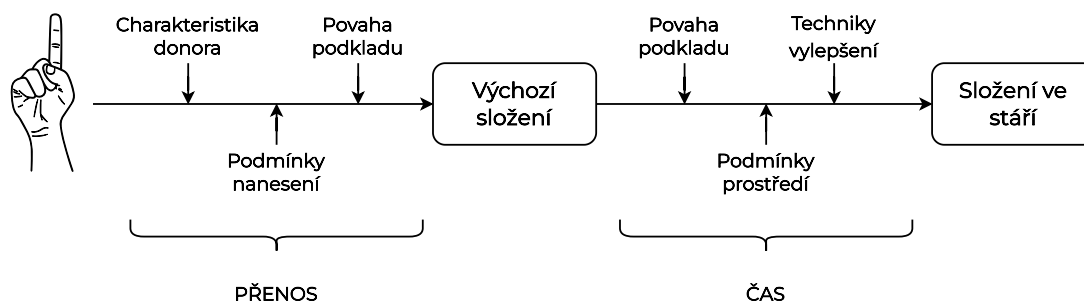
Stáří otisků prstů lze definovat jako časový úsek od okamžiku, kdy stopy vznikly, do okamžiku, kdy byly odhaleny a zajištěny. Během této doby jsou stopy vystaveny různým

fyzickým a chemickým jevům, které jsou považovány za skutečný proces stárnutí. Tím se rozumí změny, které probíhají jak uvnitř potní a mastné látky, tak na obrazu stopy, což vede ke zmatnění, vysychání a ztrátě adhezních schopností. Jedná se o změnu nenasycených adapoidních sloučenin na nasycené, jakož i vliv kyslíku a vodní páry vyvolávající žluknutí tuků, což vede k matnění a tvrdnutí přirozeně vylučovaných látek potních žláz. [15]

Zmínky o vlivu času na daktyloskopické stopy se v české kriminalistické literatuře vyskytují jen sporadicky. Jsou známy případy, ve kterých se podařilo využít pro identifikační účely stopy staré i několik let. Z toho plyne, že nelze uvést jednoznačné podmínky stárnutí otisků prstů a předem tak rozhodnout, zda může daktyloskopická stopa ještě existovat, avšak je jisté, že čím delší je doba od zanechání stopy, tím jsou stopy po vyvolání méně čitelné. [30]

Významným vlivem na stálost a rychlost degradace daktyloskopických stop jsou už faktory jejich vzniku. Otisky vzniklé při větší koncentraci potně-tukové substance na papilárních liniích prstu budou mít pochopitelně větší šanci na delší stálost [34]. Dalším předmětem vlivu na stálost jsou i vlastnosti nosného materiálu otisku. Lepší schopnost pro uchování stopy mají neporézní a hladké materiály, a naopak drsné a savé materiály mají tuto schopnost menší [30]. Z toho plyne, že ideálními objekty pro snímání daktyloskopických stop jsou hladké sklo, hladký kov, keramické materiály, některé plastické hmoty, lakované předměty apod. Naopak nevhodnými materiály jsou různé textilie a kůže, hrubé dřevo a papír, stavební materiály atd.

Samotnou trvanlivost stopy určuje řada faktorů, především okolní prostředí – teplota, vlhkost, nebo sluneční záření, jak také ukazuje následující schematické znázornění chemického složení otisků prstů a jeho ovlivňujících faktorů na obrázku 2.5. Vysoká vlhkost způsobuje rozpíjení a při vyšších teplotách zase dochází k vysychání potních stop. Mastné stopy se zase za vyšších teplot rozpíjejí. Rozdíly ve stálosti jsou tedy dány i druhem stopy, potní, potně-tukové, mastné i krvavé stopy atd. mají každá jiné vlastnosti, a tudíž i jejich stálost je odlišná. [10]



Obrázek 2.5: Znázornění faktorů ovlivňujících složení otisků prstů podle Aline Giroda.

Stálost stop na různých podkladech a při rozdílných podmínkách okolí je tedy tak variabilní, že pouhým pozorováním nemůže být vyvozen jistý závěr, kdy stopa vznikla. Speciální metriky pro degradaci stop dle jednotlivých substancí jsou popsány v následujících sekcích. Mastným stopám zde není věnována pozornost, jelikož se nejedná o tak obvyklý (přirozený) typ stopy.

2.4.1 Vlivy na degradaci potně-tukových stop

Původní složení sekretu z prstů je směsí mnoha látek pocházejících ze tří zdrojů: pokožky, sekrečních žláz v škáře¹ a vnějších nečistot (kromě sloučenin pocházejících z epidermis a sekrečních žláz obsahují zbytky otisků prstů také mnoho nečistot, jako jsou zbytky potravin, prach, či spóry bakterií).

Obecnou příčinou degradace potně-tukových stop je úbytek vody, přičemž voda je hlavní složkou dlaňové ekrinní suspenze. V minulosti byla dokonce zaznamenána ztráta 85 % obsahu otisku v průběhu dvou týdnů způsobena především ztrátou vody. Pokud jde o vliv stárnutí na aminokyseliny, ty jsou v čase poměrně stabilní. To znamená, že staré daktyloskopické stopy lze na papíře uchovávaném v ideálním prostředí stále vyvolat pomocí činidel pro vizualizaci aminokyselin – jako je ninhydrin. Aminokyseliny jsou totiž afinní k celulóze, a tak smohou zůstat stabilní po dlouhou dobu, hlavně na papírových substrátech.

Stárnutí mazových látek, zejména skvalenu, cholesterolu a mastných kyselin, se projevuje především jejich kvalitativním a kvantitativním úbytkem v čase. Tyto sloučeniny podléhají v závislosti na čase značné degradaci, což vede k tvorbě nových složek, většinou malých oxidovaných molekul. Se snižující se hladinou látek v otisku je pak možné přiblížit jeho stáří, kdy jsou určité látky stále detekovatelné, a jiné už ne. S tím, že však není jisté, jaké množství, kterých chemických látek, bylo přeneseno v době vzniku otisku, nelze ani pomocí chemického rozboru určit přesné stáří stopy.

Za zmínku stojí také komplexní výzkum v Rumunsku, který zahrnoval 800 otisků prstů zkoumaných po dobu dvou let s cílem prozkoumat proces stárnutí otisků prstů a zabýval se aspekty jako je tloušťka hřebene, vzdálenost mezi hřebeny a údolími, počet makroskopických prvků ve stopě, počet pórů, počet epitelových buněk nebo kvantifikace celkové DNA. Získané výsledky vedou k zajímavé domněnce o možném vlivu krevní skupiny na proces stárnutí otisku prstu. Ačkoli samozřejmě není ani v tomto ohledu žádný definitivní závěr, tato skutečnost by mohla poskytnout zajímavé a užitečné informace, které lze využít při vyšetřování.

Fakta v této sekci byla převzata ze zdroje [10] a [15].

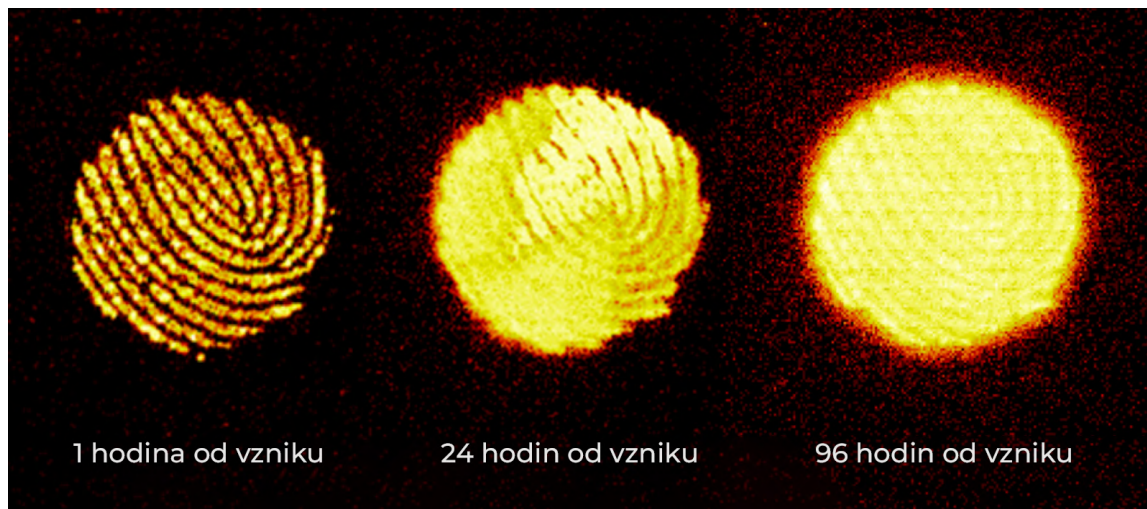
Využití hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů za pomoci technologie Time-of-Flight

Tímto tématem se do široka zabývají Shin Muramoto a Edward Sisco z Národního institutu pro standardy a technologie (NIST) Spojených států amerických a fakta v této sekci vycházejí z jejich článku *Strategies for Potential Age Dating of Fingerprints through the Diffusion of Sebum Molecules on a Nonporous Surface Analyzed Using Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry* viz [19].

Velmi variabilní chemické složení otisku prstu od dárce k dárci vylučuje použití konkrétních interních biologických ukazatelů pro určení stáří otisku, toto komplexní složení ovlivňuje i proces stárnutí. Proces výše zmíněné oxidace látek je citlivý na faktory prostředí, jako jsou např. teplota a světlo, což způsobuje, že tato metoda je sotva použitelná v situacích, kdy tyto faktory nelze kontrolovat.

¹Škára je spodní vrstva kůže a obsahuje mimo jiné pět milionů sekrečních žláz, mezi něž patří i apokrinní, ekrinní a mazové, jejichž sekrety se dostávají do kůže na povrch epidermálními póry [10]

Metoda určení stáří otisku pomocí míry povrchové difúze biomolekul v čase používá hmotnostní spektrometrii sekundárních iontů s časovým průletem (TOF-SIMS)² ke sledování difúze molekul nasycených mastných kyselin s molární hmotností na povrchu od 143 g/mol do 395 g/mol. Příklad má schopnost detekovat a identifikovat více chemických látek současně, a jeho prokázané submikrometrové prostorové rozlišení otisků v kombinaci s pikogramovou³ až femtogramovou⁴ citlivostí organických molekul na povrchu jej činí dokonale vhodným pro studium difúze molekul mazových látek na složitých površích.



Obrázek 2.6: Snímky otisků prstů pod spektrometrem v čase. Převzato z [19].

Z výzkumů vychází, že difúzi molekul z relativně čerstvých otisků (do 96 hodin od vzniku) lze modelovat pomocí chybové funkce, jelikož vyšší molární hmotnost vykazuje nižší difúzní rychlosti řízené mocninnou funkcí. Obrázek 2.6 demonstruje difúzní rozdíly v rámci 1, 24 až 96 hodin. Difuzivita zřejmě nezávisí pouze na molární hmotnosti. Aby byl model co nejpřesnější, je nutné do něj zavést i povrchové interakce, které hrají důležitou roli při difúzi endogenních sloučenin. Dále je vhodné se zabývat účinky teploty na povrch, jelikož každý povrch reaguje na teplotu odlišně, což je další komplikací pro difúzní model. Datování stáří otisků pomocí TOF-SIMS je stále ve vývoji, už teď je ale jisté, že za aktuálně dostupných technologií je tato metoda použitelná pro určování stáří otisků prstů v rámci maximálně stovek hodin, přičemž debaty o prokazatelnosti vzhledem k neznámým počátečním stavům jsou více než na místě.

2.4.2 Vlivy na degradaci krevních stop

Stejně jako u potně-tukových otisků, i u krevních stop dochází s postupem času ke změnám optickým (barva krevní skvrny se s časem mění z červené na hnědou, ostrost rysů chřadne) i chemickým. V minulosti byly zkoumány různé metody pro určení stáří krevních stop, včetně analýzy degradace RNA, spektroskopické metody, počítaje mikroskopii atomárních sil (AFM – atomic force microscopy). Jedním z mála průkazných závěrů je zatím

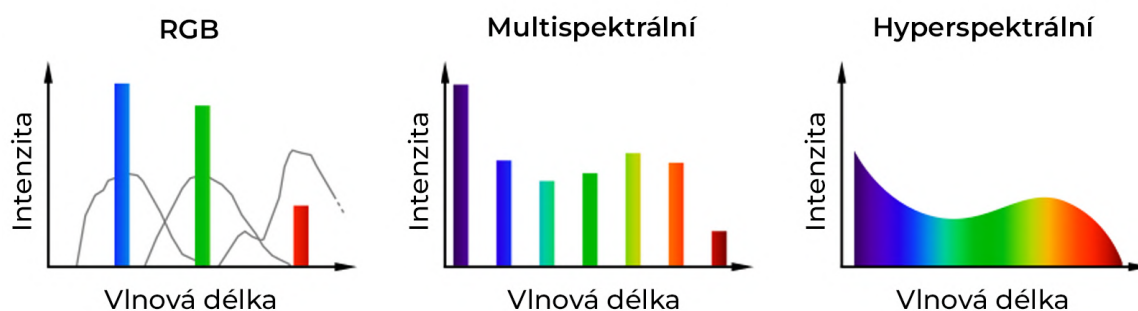
²TOF(Time-Of-Flight) – Měření doby letu odraženého světla od snímaného objektu, SIMS (Secondary-ion mass spectrometry) – Technika používaná k analýze složení povrchů látek naprašováním povrchu vzorku soustředěným svazkem primárních iontů a sběrem a analýzou vyvržených sekundárních iontů.

³Jednotka hmotnosti rovnající se 0,000 000 000 01 (10^{-12}) gramů

⁴Jednotka hmotnosti rovnající se 0,000 000 000 001 (10^{-15}) gramů

zřetelný nárůst tuhosti krevních vzorků v průběhu času. Výzkum zkoumající elektronovou rotační rezonanční spektroskopii prokázal vztah mezi elektronovou paramagnetickou rezonancí (EPR) železitých látek a počtem dnů od krvácení. I zde však platí že faktory prostředí, jako je vystavení světlu a teplota, negativně ovlivňují analýzu a je potřeba s těmito odchylkami pracovat. [3]

Dalším přístupem je hyperspektrální zobrazování, které narozdíl od ostatních přístupů ke spektrálnímu zobrazování, jak je zobrazeno na obrázku 2.7 shromažďuje a zpracovává informace z celého elektromagnetického spektra a poskytuje možnost kombinovat konvenční zobrazovací techniky se spektroskopií generováním trojrozměrné (x, y, A) hyperspektrální datové kostky pro zpracování a analýzu, kde x a y představují dva prostorové rozměry a A představuje spektrum získané pro každý jednotlivý bod na povrchu vzorku. [40]



Obrázek 2.7: Porovnání druhů spektrálního zobrazování

Analýza hyperspektrálním zobrazováním má dle výsledků z výzkumu viz [3] významné výhody jak pro detekci, tak pro určení stáří otisků prstů a krevních skvrn. I zde však bohužel platí, že se jedná o nedostatečně potvrzenou metodu a výsledky je nutné brát s rezervou vůči nekontrolovatelnosti prostředí, ve kterém se stopy vyskytují.

Kapitola 3

Počítačové zpracování otisků prstů

I přesto, že je analýza otisků prstů stále nejpřesnější pod rukou a znalým okem daktyloskopa, počítačovému zpracování se dostává čím dál většího rozpuku. Důvodem je jednak časová náročnost těchto analýz, tak i čím dál větší popularita automatizace díky moderním technologiím.

Tato kapitola se věnuje fungování biometrických systémů a počítačovému zpracování otisků prstů. Informuje o existujících algoritmech pro určení kvality otisků prstů a podrobně rozebírá funkcionalitu algoritmu NFIQ 2.1.

3.1 Biometrické systémy

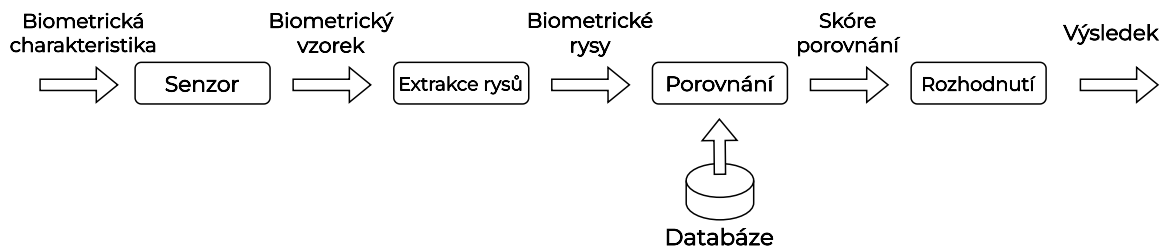
Tato sekce popisuje různé druhy biometrických systémů dle jejich základního rozdělení, jejich fungování a druhy chyb, které rozlišujeme. Informace prezentované v této sekci jsou převzaty ze zdrojů [8], [7] a [6].

Biometrické systémy se rychle stávají součástí každodenního života lidí na celém světě. Díky integraci s mobilními zařízeními přichází mnoho z nás denně do styku s nějakou formou biometrického ověřování. Budoucnost biometrických trendů je v medicíně, bankovních službách nebo třeba i marketingovém výzkumu a mnoha dalších odvětvích, v nichž je vyžadována osobní identifikace. Biometrické systémy jsou dnes běžně využívány v docházkových systémech. Přichází i propojení s cloudovým řešením, zde je nutné se zabývat také bezpečností dat. Biometrické systémy se sice rozrůstají a zdokonalují, nevyhnutelně se s technologickým pokrokem ale zdokonalují také možnosti, jak biometrické systémy obelstít.

V závislosti na kontextu aplikace se biometrické systémy rozlišují na ověřovací (verification) a identifikační (identification). **Ověřovací** biometrický systém ověřuje totožnost osoby porovnáním zachycené biometrické charakteristiky s její dříve zachycenou (zapsanou) biometrickou referenční šablonou předem uloženou v systému. Provádí porovnání jedna ku jedné, aby potvrdil, zda je tvrzení o totožnosti osoby pravdivé. Ověřovací systém předložené tvrzení o totožnosti buď odmítne, nebo přijme. **Identifikační** biometrický systém rozpozná jednotlivce tak, že vyhledá shodu v celé databázi, provádí porovnání jedna ku více záznamům, aby zjistil, zda se jedinec v databázi vyskytuje. Pokud ano, vrátí identifikátor odkazu na zápis, který se shoduje. V identifikačním systému je zjišťována identita subjektu, aniž by musel žádat o identifikaci.

Fungování biometrického systému pro oba případy je znázorněno ve schématu na obrázku 3.1, činnost ověřovacího a biometrického systému je velmi podobná. Subjekt prezentuje systému své fyzické a behaviorální vlastnosti, které lze souhrnně označit jako biometric-

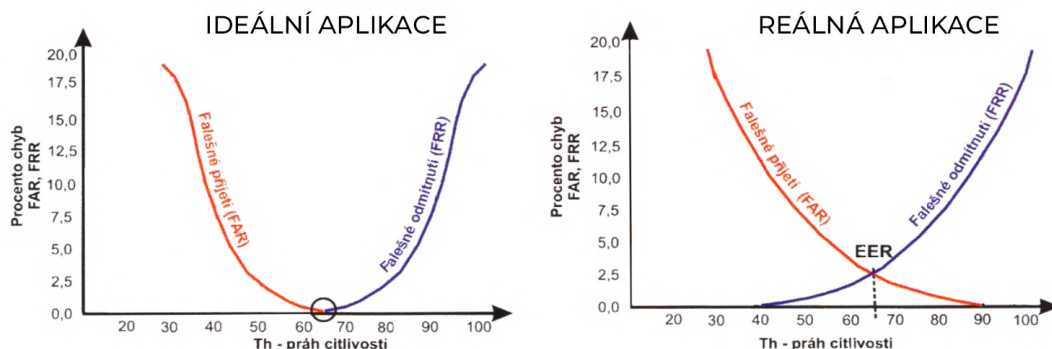
kou charakteristiku. Tato charakteristika je nasnímána senzorem a stává se biometrickým vzorkem, obrazem, ze kterého jsou extrahovány rysy. Biometrické rysy lze interpretovat jako množinu význačných znaků daného vzorku reprezentující biometrickou charakteristiku unikátním způsobem. Biometrické rysy subjektu jsou poté porovnávány se záznamy v databázi nebo mohou být uloženy do biometrické šablony. Porovnáním s databází vzniká skóre porovnání, na základě kterého dochází k rozhodnutí a získání výsledku. Pro skóre porovnání platí: $s \in \langle 0, 1 \rangle$ – hodnoty od totální neshody ($= 0$) po totální shodu ($= 1$). Práh akceptace je obvykle definován správcem systému a platí pro něj $T \in \langle 0, 1 \rangle$, pro $T \geq s$ je subjekt odmítnut, pokud $T < s$ je subjekt přijat.



Obrázek 3.1: Schéma biometrického systému.

Jako v každých systémech, i v těch biometrických dochází k chybám. Jsou rozlišovány následující chyby:

- Selhání snímání: FTA – Failure to Acquire.
- Selhání extrakce: FTE – Failure to Enroll / FTX – Failure to Extract.
- Selhání porovnávání: FTM – Failure to Match.
- Chybné odmítnutí správného subjektu (systém): FRR – False Reject Rate.
- Chybné odmítnutí správného subjektu (algoritmus): FNMR – False Non-Match Rate.
- Chybné odmítnutí neoprávněného subjektu (systém): FAR – False Accept Rate.
- Chybné odmítnutí neoprávněného subjektu (algoritmus): FMR – False Match Rate.



Obrázek 3.2: Porovnání ideálního a reálného systému podle [30].

Pro vyhodnocení přesnosti biometrického ověřovacího systému je třeba shromáždit výsledky získané z velkého počtu porovnání mezi sadami znaků a šablonami stejného prstu. Ideální zařízení je absolutně spolehlivé, bez jakékoliv chybovosti, tedy $FAR = FRR = 0$. Toho však v praxi nelze dosáhnout. Jak je možné vidět na obrázku 3.2, tak ve výsledku ale vždy záleží na kontextu zařízení, výsledné nastavení vstupní citlivosti závisí na požadovaných vlastnostech na biometrický systém.

3.2 Počítačové rozpoznávání otisků prstů

Rozpoznávání otisků prstů počítačem umožňuje ověřit nebo identifikovat osobu na základě počítačové analýzy a porovnání informací získaných z identifikovaných rysů otisku prstu. Skládá se ze tří technologických kroků, kterými jsou předzpracování obrazu, extrakce identifikačních znaků a porovnání otisků a vyhodnocení. Tyto kroky budou podrobně popsány v následujících sekcích.

3.2.1 Předzpracování obrazu

Obraz otisku prstu je charakterizován jak vlastnostmi jeho vzniku (např. snímání biometrickým zařízením či skenování inkoustového otisku na papíře), tak okolními podmínkami vzniku obrazu i samotným rozpoložením otisku. Kvalita výsledného obrazu otisku záleží i na snímacích vlastnostech nosiče otisku. Předzpracování obrazu se provádí zejména s cílem zvýraznění kresby papilárních linií a odstranění nežádoucích objektů ve snímku. Při předzpracování se běžně používá Gaborův filtr, filtrování ve frekvenční oblasti, metody segmentace a hranové detektory s filtrem median.

Papilární linie mají často v obraze různé odstíny, z tohoto důvodu se provádí převod obrazu do odstínů šedi a následně převod papilárních linií do jediného barevného odstínu, toho lze docílit pomocí prahování (binarizace). Při tomto procesu se z obrazu obsahující body z celé škály 256 odstínů šedi vytvoří obraz, který obsahuje jen dvě barvy, první reprezentující papilární linie a druhá pozadí – díky detekování kontur vyšetřovaných objektů dochází k úplné separaci pixelů zájmu od pixelů pozadí do dvou samostatných skupin. Těmto oddílům se pak přidělí nová jasová hodnota, často hodnota 0 nebo 1 – černá nebo bílá barva pixelu.

Jedním z významných problémů při zpracování obrazu otisku prstu je šum – nadbytečné obrazové prvky rušící kresbu otisku. Se šumem se lze nejčastěji setkat pokud došlo k ušpinění, namočení či pomačkání nosiče, a to i v případě, že k deformaci došlo před vznikem otisku. Odstraněním šumu je vyřešen problém falešných markantů a jizev, nečitelných oblastí a nekvalitního pozadí snímku. Při odstraňování šumu je často cílem zvětšení kontrastu. V praxi se uplatňují různé konvoluční adaptivní filtry využívající detekci směru papilární linie, kde se provádí zvýraznění obrazových bodů. Body orientovány jiným směrem jsou naopak potlačeny.

Protože jsou čáry papilárních linií někdy v základním obraze pro počítačová zpracování příliš silné, provádí se též transformace linií na tenké čáry tloušťky právě jednoho obrazového pixelu. Zároveň tak dojde k odstranění problému duplicity bodů i eliminaci falešného prahování.

Informace využití v této podsekcí byly získány ze zdrojů [7] [6] a [18].

3.2.2 Extrakce identifikačních znaků

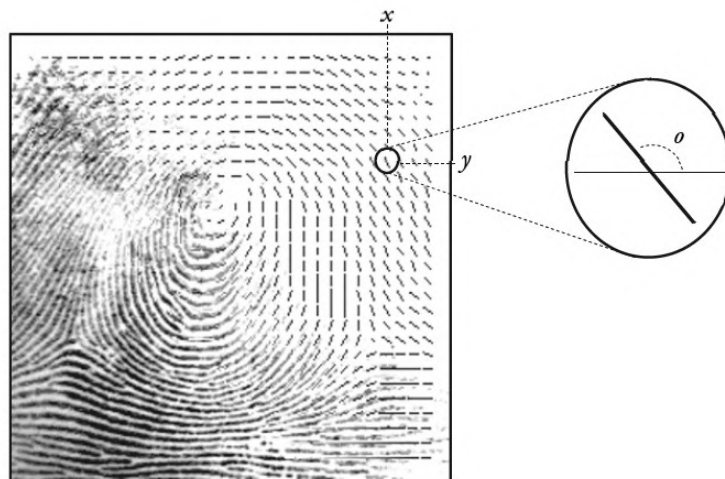
Identifikační znaky otisku prstu jsou obecně popsány na třech různých úrovních [18]:

1. Globální – celkový vzor tvořený papilárními liniemi.
2. Lokální – markantní body.
3. Detailní – detaily papilárních linií.

Na **globální** úrovni se zkoumá vzor linií, ty často probíhají plynule paralelně, avšak vykazují jednu nebo více oblastí, kde nabývají různých tvarů. Jak již bylo výše zmíněno, tyto body se nazývají body singularity, rozlišují se smyčky a delty. Singulární body jsou užitečné pro klasifikaci a indexaci otisků prstů, ale jejich rozlišovací schopnost není dostatečná pro přesné porovnávání. [18]

Algoritmy pro porovnávání otisků prstů mohou předem vyrovnat obrazy otisků prstů podle orientačního nebo středového bodu, který se nazývá jádro – nejvyšší bod nejvnitřnější linie, odpovídá středu nejsevernější singularity typu smyčky. U otisků prstů, které neobsahují singularity typu smyčka je definice jádra obtížná. V těchto případech je jádro obvykle spojeno s bodem maximální křivosti linie. Vzhledem k vysoké variabilitě vzorů otisků prstů je tedy obtížné spolehlivě lokalizovat registrační bod (jádro) na všech snímcích otisků prstů. Singulární oblasti se používají pro klasifikaci otisků prstů (přiřazení k jednomu z pěti základních typů: levá smyčka, pravá smyčka, závit, oblouk, klenutý oblouk), s cílem zjednodušit jejich vyhledávání a získávání. Otisk prstu, který má být identifikován, je pak třeba porovnat pouze s odpovídajícími skupinami otisků prstů v jedné sekci databáze na základě jeho třídy. [17]

Klasifikace otisků prstů je mnohdy nejednoduchý problém kvůli malé mezitřídní hodnotě a velké variabilitě uvnitř třídy ve vzorech otisků prstů. Existuje mnoho přístupů ke klasifikaci otisků prstů, většina z nich využívá detekci orientace papilárních linií znázorněnou na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Demonstrace orientačních vektorů papilárních linií. Převzato z [18].

Vyšší přesnosti v následných fázích klasifikace lze dosáhnout posílením orientačních prvků umístěných v nejvýraznějších oblastech obrazu otisku prstu. Hlavním problémem klasifikačních schémat je, že počet tříd je malý a otisky prstů jsou mezi ně nerovnoměrně

rozděleny: více než 90 % otisků prstů patří pouze do tří tříd – pravá smyčka, levá smyčka a závit, proto se zavádí i dílčí klasifikace, průběžná klasifikace a další techniky indexování. [18]

Na **lokální** úrovni dochází k lokalizaci markantních bodů. Ačkoli reprezentace založená na markantech je charakterizována vysokou význačností, spolehlivá automatická extrakce markantů může být problematická, a to zejména u otisků prstů s extrémně nízkou kvalitou, které postrádají jakoukoli strukturu linií. V dnešní době se používá vyhledávání na základě začátků/konců linií a dvojitých vidlic, zároveň musí být vyloučeny všechny falešné markanty. U každého nalezeného markantu je vždy uložena čtveřice x, y, t, o , kde x je souřadnice markantu v obrazu na ose x , y je souřadnice markantu v obrazu na ose y , t je typ markantu a o je orientace, tedy gradient, který svírá markantní bod s osou x . Takovéto čtveřice všech markantů dohromady vytvářejí biometrickou šablonu. [7]

Na **detailní** úrovni se detekují velmi jemné detaily papilárních linií, jako je jejich šířka, tvar, zakřivení, obrysy okrajů apod. Jedním z nejdůležitějších detailů na této úrovni jsou potní póry prstů, jejichž poloha a tvar jsou považovány za vlastnosti s vysokou informační hodnotou. Každá linie vnější kůže je po celé délce poseta póry a je ukotvena k vnitřní kůži dvojitou řadou kolíčkových výčnělků. Velikost pórů se může pohybovat od 60 do 250 μm , počet pórů podél centimetrové linie se pohybuje od 9 do 18. Bylo zjištěno že 20-40 pórů může stačit k určení identity člověka. [1]

Extrakce velmi jemných detailů, včetně pórů, je však proveditelná pouze u kvalitních snímků otisků prstů s vysokým rozlišením (např. 1 000 dpi), a proto tento druh zobrazení není pro neforensní aplikace praktický.

3.2.3 Porovnání otisků a vyhodnocení

Proces porovnání probíhá tak, že se, s využitím tolerančního boxu, který umožňuje tolerovat drobné chyby v pozici či gradientu, právě sejmutá šablona otisku prstu a šablony, které byly sejmuty dříve a uloženy v databázi normalizují, a zarovnají (např. pomocí transformačních matic) a dochází ke srovnávání korelujících markantů – odpovídajících čtveřic x, y, t, o . Při porovnávání sousedících markantů lze vztahy mezi sousedícími markanty vyjádřit souřadnicemi a směrovými vektory. Sousední markanty však nemusí být absolutně identické ani u jednoho a téhož otisku prstu z důvodu možného zkreslení způsobeného šumem v obraze nebo drobnými změnami způsobenými elasticitou lidské kůže. [6]

Porovnávání končí v případě, že algoritmus nalezne shodu v dostatečném počtu markantů, nebo vyčerpá všechny kombinační možnosti jednotlivých markantů. Výsledkem je celkové skóre shody.

3.3 Existující algoritmy pro vyhodnocení kvality daktyloskopických stop

Algoritmů pro zpracování daktyloskopických stop existuje nespočetně mnoho, ať už se zaměřením na samotnou extrakci dat z otisků nebo na určení celkové kvality stopy. V této sekci jsou popsány způsoby určování skóre kvality třech vybraných software: NFIQ, Innovatrics IDKit a Neurotechnology VeriFinger.

3.3.1 NIST Fingerprint Image Quality

NFIQ (NIST Fingerprint Image Quality) je projekt Národního institutu standardů a technologie (National Institute of Standards and Technology, NIST), který pomocí zlepšování

vědeckých měření a tvorby standardů podporuje inovace a výzkum v širokém spektru oborů. [22]

3.3.2 NFIQ 1

Původní verze NFIQ je předchůdcem dnešní verze tohoto algoritmu z roku 2004. Jedná se o algoritmus kvality obrazu otisků prstů založený na neuronové síti, který přijímá vstupní obraz ve formátu ANSI/NIST či NIST IHEAD, komprimovaný WSQ, JPEG a bezztrátový JPEG [14]. Vypočítává vektor rysů pomocí mapy kvality obrazu a statistiky kvality markantů vytvořené algoritmem detekce markantů MINDTCT.

MINDTCT změří kvalitu segmentovaných oblastí v obraze, což sestává z určení směru toku hřebenů v obraze a detekce oblastí s nízkým kontrastem, nízkým tokem hřebenů a vysokým zakřivením. Tyto podmínky představují nestabilní oblasti v obraze, kde je detekce markantů nespolehlivá, a společně je lze použít k vyjádření úrovně kvality obrazu. Vektor rysů se poté použije jako vstup do klasifikátoru neuronové sítě MLP (Multi-Layer Perceptron) a výstupní aktivační úroveň neuronové sítě se použije k určení hodnoty kvality obrazu otisku prstu. Zde je rozlišováno pět úrovní kvality, přičemž 1 je nejvyšší kvalita a 5 je nejnižší kvalita. Tato verze NFIQ vypisuje tuto hodnotu kvality a výstupní aktivační úroveň z neuronové sítě MLP. [37]

3.3.3 NFIQ 2

Informace v této podsekcí jsou převzaty z projektové dokumentace NFIQ 2 viz [36] a normy ISO/IEC 29794-4. Mezi původní verzí a NFIQ 2 je nespočetně mnoho rozdílů. Například, NFIQ 2 je již schopen detekovat částečné rozmazání a zjistí mnoho případů překrývání otisků prstů, které získaly dobré hodnocení v algoritmu NFIQ 1 [32]. Nová verze přináší i přesnější rozsah výsledného hodnocení kvality – od 0 do 100, nižší výpočetní složitost a podporu pro mobilní platformy. Lze říci, že NFIQ 2 poskytuje stabilnější výsledky než algoritmus NFIQ 1.

NFIQ 2 využívá open source extraktor markantů FingerJet FX OSE, propojuje kvalitu obrazu optických a inkoustových otisků prstů s operačním výkonem rozpoznávání, což umožňuje přesnou definici hodnot kvality a jejich následnou numerickou kalibraci. To následně umožňuje standardizaci potřebnou pro podporu celosvětového nasazení snímačů otisků prstů s univerzálně interpretovatelnou kvalitou obrazu.

Aktuální verze NFIQ, NFIQ 2.1, pracuje s šedotónovými (8-bit) obrazy, kde je každému pixelu přiřazena hodnota v rozmezí 0 (černá) až 255 (bílá) reprezentující intenzitu šedi, s rozlišením 500 PPI. Algoritmus podporuje digitální obrazy pořízené optickými snímači a skenované inkoustové otisky. V textu této práce je pod označením NFIQ2 vždy myšlena aktuální verze, tedy verze 2.1. Funkce kvality NFIQ 2.1 jsou formálně normalizovány jako součást normy ISO/IEC 29794-4 a podle autorů je kvalita otisku prstu definována jako „*míra, do jaké biometrický vzorek splňuje stanovené požadavky na cílenou aplikaci*“. Algoritmus zpracovává při výpočtu kvality 14 vlastností, které mají nejvýznamnější vliv na kvalitu otisku, jako je celkový počet markantů, analýza histogramu apod. Tyto vlastnosti jsou popsány níže. Výsledné skóre kvality tedy i u tohoto algoritmu vychází z vektoru rysů, který se skládá z hodnocení jednotlivých vlastností otisku, jak popisuje rovnice 3.1.

$$\begin{aligned}
\mathbf{Q}_{\text{NFIQ2}} = & (Q_{\text{FDA}}^\mu, Q_{\text{LCS}}^\mu, Q_{\text{OCL}}^\mu, Q_{\text{OFL}}^\mu, Q_{\text{RVU}}^\mu, \\
& Q_{\text{FDA}}^\sigma, Q_{\text{LCS}}^\sigma, Q_{\text{OCL}}^\sigma, Q_{\text{OFL}}^\sigma, Q_{\text{RVU}}^\sigma, \\
& \mathbf{Q}_{\text{FDA}}, \mathbf{Q}_{\text{LCS}}, \mathbf{Q}_{\text{OCL}}, \mathbf{Q}_{\text{OFL}}, \mathbf{Q}_{\text{RVU}}, \\
& Q_{\text{MU}}, Q_{\text{MMB}}, Q_{\text{COH}}^{\text{rel}}, Q_{\text{COH}}^{\text{sum}}, Q_{\text{AREA}}^\mu, \\
& Q_{\text{MIN}}^{\text{cnt}}, Q_{\text{MIN}}^{\text{com}}, Q_{\text{MIN}}^{\text{mu}}, Q_{\text{MIN}}^{\text{ocl}}).
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Segmentace

Prvním krokem je segmentace obrazu, kde dochází k separaci otisku od pozadí v obraze, následující zpracování pak budou procházet pouze v té části obrazu, kde se nachází otisk prstu. Ořezou se prázdné okraje a následně se vypočítá průměr hodnot odstínů šedi pro každý řádek nebo sloupec, celý proces popisuje algoritmus 1: z okrajů se vypočte průměr šedotónových hodnot, pokud je tato průměrná hodnota ≥ 250 , tedy bílá, je daný řádek či sloupec vyřazen. Následuje vymaskování popředí algoritmem pro výřez otisku, viz algoritmus 2. Otisk a vzhled jeho masky demonstruje obrázek 3.4.

Algoritmus 1: ODSTRANĚNÍ KONSTANTNÍCH BÍLÝCH ČAR V OBRAZE.

Input: Šedotónový obraz s otiskem \mathbf{I} , Práh $T_\mu = 250$
Output: Obraz otisku prstu bez konstantních bílých čar \hat{I}

- 1 **for** každý řádek R_i z \mathbf{I} , od začátku **do**
- 2 Vypočti aritmetický průměr řádku μ_{row}
- 3 Při prvním výskytu kde $\mu_{\text{row}} \leq T_\mu$ nastav $\text{idx}_t = i$
- 4 Při posledním výskytu kde $\mu_{\text{row}} \leq T_\mu$ nastav $\text{idx}_b = i$
- 5 **end**
- 6 **for** každý řádek C_i z \mathbf{I} , zleva **do**
- 7 Vypočti aritmetický průměr sloupce μ_{col}
- 8 Při prvním výskytu kde $\mu_{\text{col}} \leq T_\mu$ nastav $\text{idx}_l = i$
- 9 Při posledním výskytu kde $\mu_{\text{col}} \leq T_\mu$ nastav $\text{idx}_r = i$
- 10 **end**
- 11 Extrahuj oblast zájmu jako $\hat{I} = \mathbf{I}.\text{roi}(\text{idx}_l, \text{idx}_t, \text{idx}_r, \text{idx}_b)$

Algoritmus 2: SEGMENTACE POPŘEDÍ NA ZÁKLADĚ SMĚRODATNÉ ODCHYLKY.

Input: Obraz s otiskem \mathbf{I} , Práh T
Output: Maska popředí otisku \mathbf{I}_{mask}

- 1 K vypočítání \hat{I} normalizuj \mathbf{I} na nulovou střední hodnotu a jednotkovou směrodatnou odchylku
- 2 **for** každý blok \mathbf{V} v \hat{I} **do**
- 3 Vypočítej směrodatnou odchylku \mathbf{V} jako $\sigma_{\mathbf{v}}$
- 4 Označ odpovídající blok v \mathbf{I}_{mask} jako popředí pokud $\sigma_{\mathbf{v}} > T$
- 5 **end**



Obrázek 3.4: Maska otisku a otisk. Převzato z [2]

Frekvenční bloková analýza

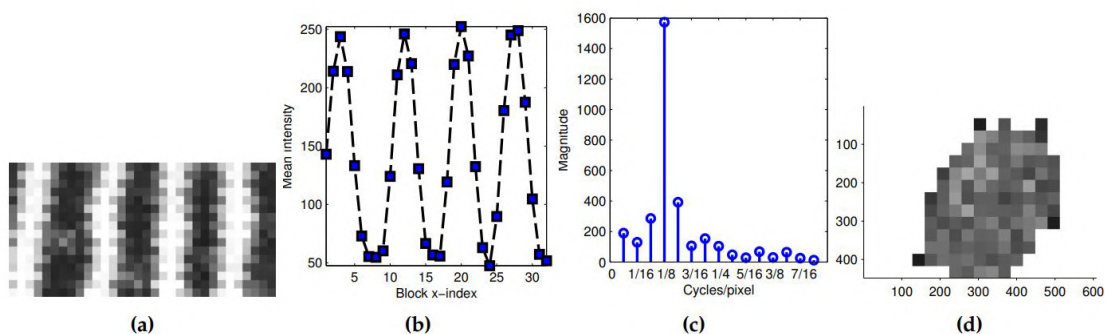
FDA (Frequency Domain Analysis, v překladu Frekvenční bloková analýza), jak již název napovídá, operuje s jednotlivými bloky obrazu a kontroluje papilární linie. Podrobný popis poskytuje algoritmus 3, ukázka procesu je k vidění na obrázku 3.5. Dochází k extrakci jednorozměrné charakteristiky struktury papilárních linií otisku, která je projekcí středních hodnot lokální oblasti podél osy y na jednorozměrný vektor a je vypočítána jako:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{V_h} \sum_{k=1}^{V_h} \mathbf{V}(x, k), \quad (3.2)$$

kde V_h je výška \mathbf{V} . Tím se efektivně získá aproximovaná reprezentace základní periodicity v rámci lokální oblasti. Na základě této charakteristiky se vypočítá dft (diskrétní fourierova transformace), aby se určila frekvence sinusoidy, která následuje tuto strukturu rysů otisku prstu. Výstupem je vektor obsahující informace o základní periodicitě každého bloku – lokální skóre kvality FDA $Q_{\text{FDA}}^{\text{local}}$, pro které platí:

$$Q_{\text{FDA}}^{\text{local}} = \begin{cases} \frac{\mathbf{A}_{F_{\text{max}}} + C(\mathbf{A}_{F_{\text{max}}-1} + \mathbf{A}_{F_{\text{max}}+1})}{\sum_{F=1}^{|A|/2} A_F} & , \text{ if } F_{\text{max}} = \mathbf{A}_1 \text{ or } F_{\text{max}} = \mathbf{A}_{|A|} \\ 1 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (3.3)$$

kde C je dle ISO/IEC TR 29794-4:2010 konstanta nabývající hodnotu 0,3, díky které dochází zachování zeslabení amplitudy frekvenčních pásem, která bezprostředně obklopují pásmo s maximální amplitudou.



Obrázek 3.5: Proces FDA: (a) centrální oblast vstupního bloku, (b) profil papilárních linií, (c) DFT profilu papilárních linií, (d) mapa kvality $Q_{\text{FDA}}^{\text{local}}$. Převzato z [36].

Algoritmus 3: FDA

Input: Obraz s otiskem **I****Output:** FDA vektor lokálního skóre kvality $Q_{\text{FDA}}^{\text{local}}$

```
1 for každý blok V v I do
2   Dopln blok V o sousední 2 pixely z každé strany
3   Otoč blok V tak, aby směr papilárních linií byl kolmý k ose x
4   Ořež V tak, aby neobsahoval žádné neplatné oblasti
5   S použitím V vypočítej charakteristiku profilu papilárních linií S dle rovnice 3.2
6   Vypočítej dft popisu profilu S pro získání velikosti reprezentace A
7   Zahod první prvek S
8   Urči  $F_{\text{max}}$  jako index největšího prvku A
9   Vypočítej  $Q_{\text{FDA}}^{\text{local}}$  z V s použitím A a  $F_{\text{max}}$  dle rovnice 3.3
10 end
```

Lokální zřetelnost linií

LCS (Local Clarity Score, v překladu lokální zřetelnost linií) je algoritmus 4, jenž po blocích počítá rozlišitelnost papilárních linií pomocí lineární regrese pro určení prahu úrovně šedi a klasifikuje pixely jako hřebeny nebo údolí. Během výpočtu se také kontroluje šířka a odstín linií. V oblastech se složitější strukturou papilárních linií, jako jsou např. markanty nebo velká zakřivenost v oblasti singularit, takto navržený a implementovaný algoritmus nedosahuje příliš dobrých výsledků.

Algoritmus 4: LCS

Input: Obraz s otiskem **I****Output:** LCS vektor lokálního skóre kvality $Q_{\text{LCS}}^{\text{local}}$

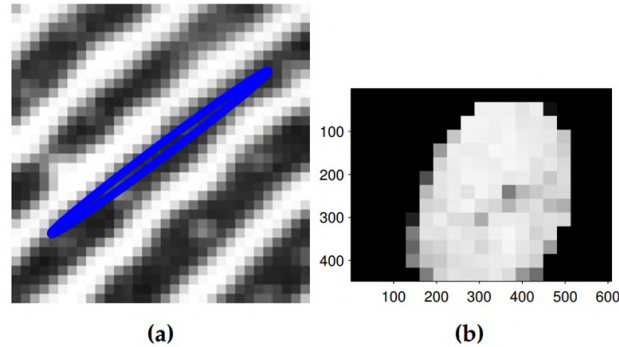
```
1 for každý blok V v I do
2   Otoč blok V tak, aby směr dominantních papilárních linií byl kolmý k ose x
3   Ořež V tak, aby neobsahoval žádné neplatné oblasti
4   S použitím V vypočítej charakteristiku profilu papilárních linií S dle rovnice 3.2
5   Urči  $dt$  pomocí lineární regrese na S
6   Pro každý element  $\mathbf{S}(x)$  nastav práh  $\mathbf{T}(x)$  podle  $dt$  pro stanovení druhu
   papilární linie  $x$  (hřeben nebo údolí)
7   Klasifikuj sloupce bloku V podle  $\mathbf{P}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } \mathbf{S}(x) < \mathbf{T}(x) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$  a
8   Z P urči vektor přechodu papilárních linií C
9   Z C vypočítej vektor W obsahující šířky papilárních linií
10  Urči normalizovanou šířku hřebene a šířku údolí  $\bar{W}_h$  a  $\bar{W}_u$ 
11  Urči podíl chybně klasifikovaných pixelů  $\bar{W}_h$  a  $\bar{W}_u$  v oblastech papilárních linií
12  Vypočítej lokální skóre kvality  $Q_{\text{LCS}}^{\text{local}}$ 
13 end
```

^aHodnota 0 dopovídá klasifikaci údolí, 1 hřebene.

Úroveň jistoty orientace

OCL (Orientation Certainty Level, v překladu úroveň jistoty orientace) definuje čitelnost směru papilárních linií v rámci bloku. Pro každý blok v obrazu dochází k výpočtu gra-

dientu intenzity pomocí metody centrovaných rozdílů a následnému výpočtu kovarianční matice, z jejichž vlastních hodnot se pak získá Q_{OCL}^{local} . Kroky postupu jsou demonstrovány na obrázku 3.6.



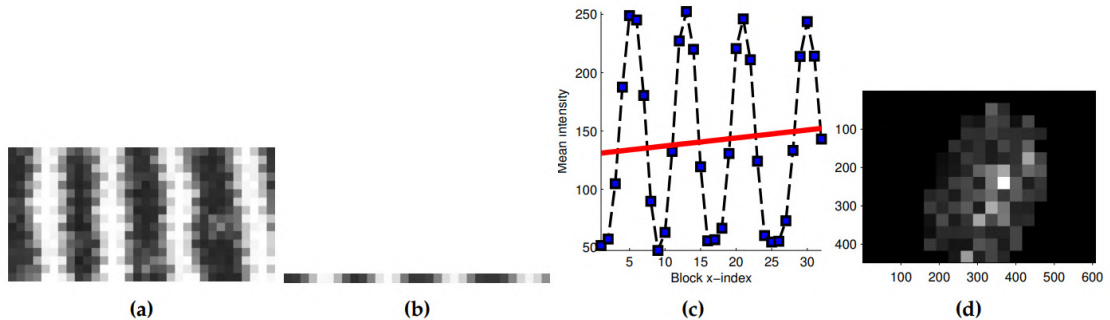
Obrázek 3.6: OCL: (a) aktuální blok s poměrem mezi vlastními hodnotami označeným jako elipsa, (b) lokální skóre kvality Q_{OCL}^{local} . Převzato z [36].

Tok orientace

Algoritmus OFL (Orientation Flow, v překladu tok orientace) je míra spojitosti toku hřebene, která je založena na absolutním rozdílu orientace mezi blokem a jeho osmi-okolím. V případě, že je velký rozdíl mezi orientací bloku a jeho sousedů, jedná se o potenciálně chybný blok.

Jednotvárnost papilárních linií

Algoritmus RVU (Ridge Valley Uniformity, v překladu jednotvárnost papilárních linií) ověřuje, zda je šířka papilárních linií konstantní. U obrazu prstu s jasným oddělením papilárních linií se očekává, že poměr šířek hřebenů a údolí zůstane poměrně konstantní, a proto se jako ukazatel kvality vzorku používá směrodatná odchylka poměrů. Kroky algoritmu jsou popsány na obrázku 3.7. Vlastnost kvality rovnoměrnosti papilárních linií Q_{RVU}^{local} je závislá na rozlišení.



Obrázek 3.7: RVU: (a) výřez bloku, (b) průměrný profil bloku, (c) průměrný profil s regresní přímkou, (d) místní skóre kvality jako směrodatná odchylka místních poměrů papilárních linií. Převzato z [36].

MU

Kvalita Q_{MU} je aritmetický průměr z vstupního obrazu v odstínech šedi.

MMB

Kvalita Q_{MMB} je aritmetický průměr z vypočteného aritmetického průměru na každý blok vstupního obrazu v odstínech šedi.

Kvalita markantů

NFIQ 2.1 používá upravený¹ FingerJet FX OSE (fjfx) extraktor markantů k získání dvou metrik:

- FingerJetFX_MinutiaeCount $Q_{\text{MIN}}^{\text{cnt}}$ – počet markantů detekovaných v celém obrazu.
- FingerJetFX_MinCount_COMMinRect200x200 $Q_{\text{MIN}}^{\text{com}}$ – počet markantů ležících v obdélníku o rozměrech 200×200 pixelů se středem v těžišti (COM – center of mass) umístění všech detekovaných minutí.

Pro detekované markanty jsou pak vypočítána skóre kvality. Zde jsou použity dvě různé metody, jejichž výsledkem jsou dva odlišné prvky, $Q_{\text{MIN}}^{\text{mu}}$ a $Q_{\text{MIN}}^{\text{ocl}}$. Pro $Q_{\text{MIN}}^{\text{mu}}$ platí:

$$Q_{\text{MIN}}^{\text{mu}} = (\mu_{\text{Obraz}}(I) - \mu_{\text{Blok}}(I)) / \sigma_{\text{Obraz}}(I), \quad (3.4)$$

kde I je intenzita pixelu, μ aritmetický průměr a σ standardní odchylka. Blok má střed v bodě výskytu markantu a je velikosti 32×32 px. Vracená hodnota funkce je procentuální podíl těchto hodnot kvality markantů mezi 0 a 0,5. $Q_{\text{MIN}}^{\text{ocl}}$ je úroveň jistoty orientace bloku o velikosti 32×32 px se středem v místě markantního bodu. Vracená hodnota funkce je procento těchto hodnot kvality markantu větší než 80.

Funkce založené na oblasti zájmu

Za oblast zájmu (ROI, Region of interest) je považována oblast popředí obrazu otisku prstu, tj. oblast obrazu, kde je otisk prstu viditelný. Prvním krokem je určení této oblasti zájmu, následně se vypočítá průměrná hodnota této oblasti Q_{AREA}^{μ} , součet koherenčních hodnot $Q_{\text{COH}}^{\text{sum}}$ bloků o velikosti 16×16 z koherenční mapy odhadu orientačního pole oblasti a průměrnou hodnoty koherence z těchto bloků obrazu $Q_{\text{COH}}^{\text{rel}}$: $Q_{\text{COH}}^{\text{rel}} = Q_{\text{COH}}^{\text{sum}}/n$ kde n je počet bloků, které obsahují alespoň jeden pixel oblasti zájmu. Podrobný popis výpočtů s oblastí zájmu je poměrně komplexní, details jsou popsány v projektové dokumentaci [36].

Vektory kvality lokálních kvalit

Posledními chybějícími hodnotami pro vektor skóre kvality Q_{NFIQ2} je průměr místních hodnot kvality Q_{QNAME}^{μ} a jejich průměrná odchylka $Q_{\text{QNAME}}^{\sigma}$. Pro výpočet platí následující rovnice:

$$Q_{\text{QNAME}}^{\mu} = \frac{1}{N * M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Q_{\text{QNAME}}^{\text{local}} \quad (3.5)$$

¹V extraktoru bylo odstraněno omezení počtu výstupních markantů.

$$Q_{\text{QNAME}}^{\sigma} = \left(\frac{1}{N * M - 1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(Q_{\text{QNAME}}^{\text{local}}(i, j) - Q_{\text{QNAME}}^{\mu} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

kde QNAME je FDA, LCS, OCL, OFL, či RVU. Pro algoritmy kvality FDA, LCS, OCL, OFL a RVU jsou lokální hodnoty kvality vedle průměru a směrodatných odchylek znázorněny jako histogram. Histogram poskytuje úplnější reprezentaci rozložení lokálních kvalit při zachování vektoru vlastností s pevnou délkou.

3.3.4 Innovatrics

Slovenská firma Innovatrics zase přišla s algoritmem pro rozpoznávání otisků prstů složeným ze dvou hlavních částí: extrakce znaků a porovnávání otisků prstů. NIST se aktivně podílí i na vývoji obou těchto architektur a nástrojů pro testování shod v daktyloskopických stopách. Informace v této sekci vycházejí z projektové dokumentace [11] a [12].

Extraktor rysů zakóduje původní surový obraz do určité šablony otisku prstu, podporuje různé formáty obrazu z různých typů snímačů. Je také optimalizován pro inkoustové a rolované obrazy otisku (běžně používané v kriminalistických aplikacích). Program byl navržen tak, aby dobře pracoval s nekvalitními a částečnými snímky otisků prstů a je schopen výrazně zlepšit celkovou kvalitu obrazu a opravit případné vady tak, aby neovlivnily proces rozpoznávání.

Porovnávací program srovnává šablony otisků prstů, nepoužívá původní obraz otisku prstu, ale šablony, které jsou výsledkem jejich analýzy. Na základě skóre podobnosti pak provádí proces ověřování (porovnání 1:1) a/nebo identifikaci (vyhledávání 1:N). V závislosti na aplikaci může být v databázi uloženo od několika stovek až po desítky milionů šablon.

Skóre kvality otisku prstu

Kvalita otisků prstů je Innovatrics definovaná jako hodnota mezi 0 (nejnižší kvalita) a 100 (nejvyšší kvalita). Hodnota je vypočítána během extrakce šablony otisku, následně je do šablony zaznamenána. Sada IDKit SDK poskytuje pro získání skóre kvality otisku prstu funkci `IEngine_GetFingerprintQuality`. Jelikož se jedná o komerční program, detaily implementace nejsou zveřejněny. Skóre souvisí s celkovým počtem charakteristických rysů nalezených na snímku otisku prstu. Kvalita otisku prstu má určitou vypovídací schopnost o chybách identifikace (FAR a FRR). Kvalitnější otisky prstů mají pravděpodobně za následek vyšší míru rozpoznání. Obecně platí, že kvalita nad 40 je dostatečně dobrá pro porovnávání. Aplikace by měla při registraci odmítnout naskenované otisky prstů s kvalitou nižší než 40.

Aplikace může k identifikaci odeslat vzorek s nízkou kvalitou, sada IDKit SDK se pokusí provést identifikaci pomocí dostupných biometrických informací. Otisky prstů s nízkou kvalitou vzorku mohou zvýšit FAR a kvůli chybějícím informacím zvýšit FRR. Za účelem kontroly FAR a FRR se doporučuje kontrolovat kvalitu otisků prstů. Kvalita nad 30 by měla být dostatečná pro spolehlivou identifikaci.

3.3.5 VeriFinger

VeriFinger, část balíčku MegaMatcher od firmy Neurotechnology, je komerční program založený na hlubokých neuronových sítích využívající technologie založené na detekci markantů spolu s řadou vlastních algoritmických řešení, která zvyšují výkon a spolehlivost systému. Podporuje formáty JPG, PNG, BMP v rozlišení 250 až 1000 dpi. Zdrojem informací pro tuto sekci je oficiální webová stránka produktu viz [21], a projektová dokumentace [20].

Nástroj je určen pro vývojáře biometrických systémů, k dispozici je jako sada pro vývoj softwaru, která umožňuje tvorbu samostatných a webových řešení na platformách Microsoft Windows, Linux, Mac OS X, iOS a Android. Samotná implementace v několika programovacích jazycích jako je C, C++, C#, Java nebo Visual Basic. Technologie zajišťuje rychlou a spolehlivou verifikaci i identifikaci. Program VeriFinger ve výchozím stavu ale nepodporuje dávkové určování kvality.

Aktuálně si algoritmus rozpoznávání otisků prstů společnosti Neurotechnology drží první místo v hodnocení NIST PFT III a první místo v žebříčku FVC-onGoing ověřování otisků prstů a dlaní. Dnes se tyto produkty používají ve více než 3 000 bezpečnostních systémech ve více než 100 zemích světa.

Skóre kvality otisku prstu

VeriFinger, podobně jako Innovatrics, kontroluje při vkládání šablon otisků do databáze jejich kvalitu a povolí uložení pouze pokud kvalita šablony přesahuje stanovený práh. Získání skóre kvality zajišťuje funkce `NFRecord.GetQuality`. Popis celého aplikačního rozhraní je poskytnut v rozsáhlé projektové dokumentaci, detaily implementace však nejsou zveřejněny.

Kapitola 4

Experimenty s degradací kvality daktyloskopických stop

Součástí práce je tvorba vzorků otisků prstů na různých materiálech v různých prostředích. Původní rozsah datasetů měl dle zadání obsahovat pouze potní stopy, rozhodlo se však, že nad rámec zadání, pro možnost porovnání nejen povrchů a prostředí, ale i substancí, vznikne více druhů stop. Tyto sady jsou sestaveny tak, aby zastupovaly všechny typy nejběžnějších porézních a neporézních materiálů vyskytujících se na místě trestného činu. Dle způsobu zpracování vznikly dvě kategorie datasetů: sady k postupné fotodokumentaci a sady k odebrání a zpracování v ateliéru a laboratoři OKTE PČR Brno.

Všechny fotografie vzorků byly pořizovány objektivem Canon EF 100/2.8 L macro IS USM s tělem Canon 5D MkIV, Canon 90D nebo Canon 850D za převážně umělého světla. Zpracování na OKTE PČR Brno sestávalo vždy z následujících úkonů:

1. Fotografování vzorků (v případě, že na nich byly stopy viditelné).
2. Prášení / Ponořování do zviditelňovací směsi.
3. Fotografování vzorků po procesu zviditelňování.



Obrázek 4.1: Magnetický prášek 1-0175 bichromatický a magnetický štětec.

K zaprašování byl používán magnetický prášek 1-0175 bichromatický a magnetický štětec viz obrázek 4.1. Pro ponořování byla využita kapalina vzniklá jako směs ninhydrinu (6 g), methanolu (30 ml), isopropylalkoholu (40 ml) a petroletheru (930 ml). Obě tyto činnosti probíhaly v daktyloskopické laboratoři OKTE PČR Brno, přičemž k ponořování do ninhydrinové směsi byla využita speciální komora zobrazená na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Dýmová komora pro vyvolávání otisků jodovými parami

4.1 Tvorba vzorků

Při přípravách výzkumu proběhlo několik konzultací se zástupci Policie České republiky ohledně volby materiálů pro tvorbu stop, druhů substancí a vhodných prostředích pro jejich pozorování. Abychom simulovali více i méně kontrolovatelné podmínky umístění vzorků, rozhodli jsme se pro tvorbu vzorků v těchto prostředích:

- Interiér (značeno I).
- Prašný exteriér s lehkým krytím proti dešti (značeno Ek).
- Exteriér bez krytí (značeno Ev).

Z důvodu vhodného zastoupení porézních i neporézních povrchů často se vyskytujících na místě trestného činu byly pro tvorbu vzorků vybrány tyto materiály:

- Papír (značeno P).
- Lesklý papír (značeno LP).
- Sklo (značeno S).
- Fotocuprexit (značeno FC).
- Měkká folie (značeno F).
- Displej monitoru (značeno M).

Displej monitoru je z důvodu dostupnosti a nesnadné manipulaci součástí pouze sad pro fotodokumentaci, všechny ostatní materiály jsou prvky sad vzorků jak k postupnému fotografování, tak k odběru a zviditelnění.

Posledním předmětem diskuse byla volba substancí pro tvorbu vzorků. Potně-tukové vzorky byly jasnou volbou, k tomu jsme se domluvili na vzorcích krevních. Pro pozorování zvláštních úkazů byla i přes svou neobvyklost přidána mastnota. Nakonec výsledný seznam substancí vypadá následovně:

- Potně-tukové (značeno PT).
- Mastné (značeno M).
- Krevní (značeno K).

Pro krevní stopy byla zajištěna potkaní krev z Lékařské fakulty Masarykovy univerzity, jelikož bylo však její množství omezené, jsou krevní stopy pouze v sadách k fotodokumentaci. Vzniká tím zároveň prostor na rozšíření tohoto výzkumu. K vytvoření mastných stop bylo využito vepřové sádlo.

Tvorba vzorků probíhala 20.-26. 10. 2021. Celkově bylo vytvořeno 845 vzorků, z toho 780 k odejmutí a zviditelnění a 65 vzorků k postupnému fotografování. Konkrétně:

	Papír	Lesklý papír	Sklo	Fotocuprexit	Folie
Potně-tukové	30	25	25	25	25
Mastné	30	25	25	25	25

Tabulka 4.1: Sada vzorků k odběru, vytvořeno 3x (pro interiér, exteriér a krytý exteriér)

	Papír	Lesklý papír	Sklo	Fotocuprexit	Folie	Displej monitoru
Potně-tukové	-	-	2	1	-	1
Mastné	-	-	2	1	1	2
Krevní	2	2	2	1	2	2

Tabulka 4.2: Sada vzorků k focení, vytvořeno 3x (pro interiér, exteriér a krytý exteriér)

Přičemž exteriérové sady pro fotodokumentaci mají pro pozorování zajímavých jevů o krevní vzorek na papíru navíc, interiérová sada pro fotodokumentaci má zase o dva krevní vzorky na folii více. Sady potně-tukových stop k fotodokumentaci nebyly z důvodu nemožnosti jejich fotografické dokumentace vytvořeny na papíru, lesklém papíru a folii. Z toho samého důvodu nevznikly mastné stopy k focení na papíru a lesklém papíru.

Vytvořené vzorky byly popsány a následně umístěny dle jejich kategorií do bedýnek nebo upevněny na dřevěnou konstrukci, jak lze vidět na obrázku 4.3. Pro pozorování okolních podmínek byly k sadám vzorků umístěny měřiče teploty a vlhkosti s rozlišením 0.1 °C/0.1% RH¹ a přesností popsané v tabulce 4.3.

¹RH — (Relative Humidity, v překladu relativní vlhkost) je poměr hmotnosti vodní páry v daném objemu k hmotnosti páry, která se nasycuje tímto objemem při dané teplotě

Teplota	Odchylka	Vlhkost	Odchylka
40-70 °C	±2 °C	0-20 a 80-100 %	±5 %
0-40 °C	±1 °C	20-80 %	±3,5 %
-40-0 °C	±2 °C		

Tabulka 4.3: Odchylky měření teploty a vlhkosti



Obrázek 4.3: Venkovní konstrukce se vzorky

4.2 Fotografování

Fotografie stop byly jak v ateliéru OKTE, tak fotoaparátem FIT, pořizovány vždy zároveň v JPEG i RAW formátu ve velikosti 4000 × 6000 px, přičemž v RAW formátu mají snímky hloubku 24 bit. Pořizování snímků s větší bitovou hloubkou dle [31] nejen optimalizuje kvalitu obrazu, ale také optimalizuje schopnost eliminovat pozadí při zpracování snímků. Když má obrázek vyšší bitovou hloubku, je často jednodušší identifikovat jednotlivé barevné hodnoty, které jsou si velmi podobné, jako např. ninhydrinový otisk na šeku, který používá podobnou barevnou hodnotu pro pozadí šeku, nebo identifikovat překrývající se otisky prstů či zaznamenat velmi světlé detaily obsažené v nekvalitním latentním otisku prstu.

Při fotografování byly vzorky nasvětčovány umělým světlem, jak je možné vidět na obrázku 4.4 tak, aby na nich otisky co nejlépe vynikly. Stejně světelné podmínky pro fotografování každého snímku nebylo možné zajistit. To je další komplikací při vyhodnocování datasetů, kdy je potřeba brát v potaz, že kontrast mezi otisky a jejich pozadími se liší a existují případy, kdy na vzorku určitá část otisku je, ale na fotografii není tolik výrazná, jako ve skutečnosti. To se jeví jako další z mnoha nevýhod algoritmického zpracování oproti ručnímu zpracování daktyloskopem či odborníkem z praxe.

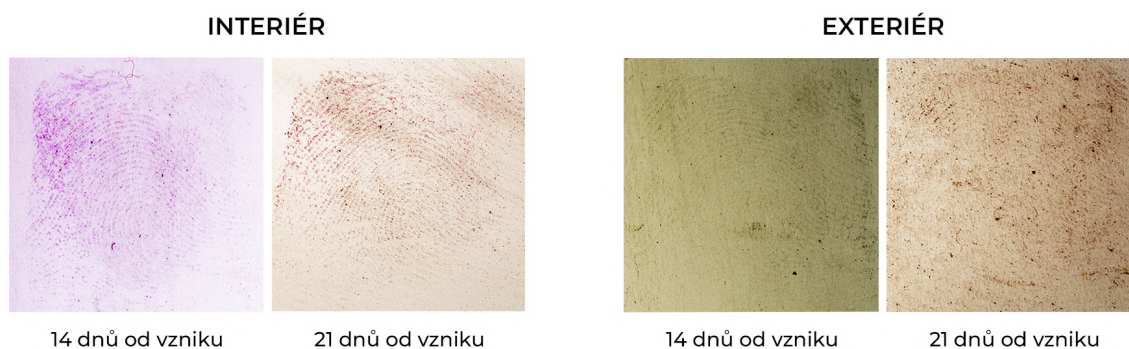
Pokud by bylo možné zajistit absolutně stejné světelné podmínky pro fotodokumentaci každého vzorku, je jisté, že by výsledky byly mnohem konzistentnější s mnohem větší výpovědní hodnotou, jak bude popsáno později.



Obrázek 4.4: Fotoateliér OKTE Brno PČR

4.3 Pozorování

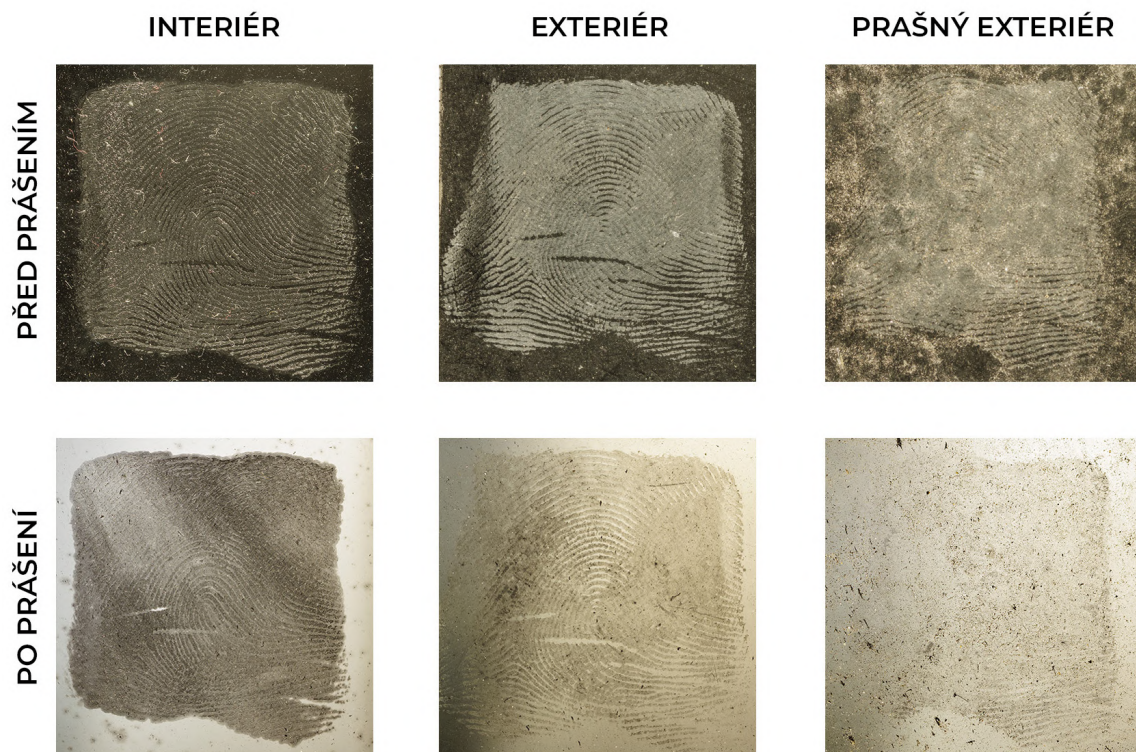
Již první výsledky ukázaly, že jakmile došlo v exteriéru k navlhnutí papíru, dojde k rozpítí potně-tukových stop. Jak lze vidět na obrázku 4.5, už po 14 dnech od vzniku je exteriérová stopa na hranici upotřebitelnosti. Pro potvrzení jsme však pokračovali s dokumentací těchto vzorků i po druhém týdnu výzkumu. U interiérových potně-tukových stop se zase setkáváme s problémem vysychání stopy, kdy stopa již není schopna dobře pojmout zviditelňovací magnetický prášek, což je problém u stop, na které nelze uplatnit chemické zviditelňovací metody. Také protože není možné prokázat počáteční nasycení stopy, a tím je doba do rozpítí prakticky neprokazatelná, byly po šesti týdnech papírové vzorky ze sady k odebrání a zviditelnění vyřazeny z výzkumu.



Obrázek 4.5: Porovnání interiérových a exteriérových potně-tukových vzorků na lesklém papíru vyhodnocených ponořením do ninhydrinové kapaliny.

Mastné stopy mají dle pozorování stálost mnohem lepší. V interiéru na rozdíl od potně-tukových tak rychle nevysychají. V exteriéru se zdá, že má na mastné stopy chlad konzervační účinky, hrany otisknutých třecích rýh v obraze zůstávají ostré i po více než 120 dnech od vzniku. Problémem pro rozpoznání otisku se však stává vedlejší šum vzniklý usazováním prachu a ostatních částic. To ukazuje obrázek 4.6, kde jsou porovnány vzorky na skle ze

všech prostředí po 5 měsících od vytvoření. Zde je dobře vidět také to, že prach napomáhá vysychání stopy, a ta pak ztrácí schopnost pojmát magnetický prášek pro zviditelnění třech rýh otisku. Mastné stopy tak kvůli prachu v exteriéru vysychají dříve jak v interiéru, což ukazuje srovnání v příloze A.



Obrázek 4.6: Porovnání mastných vzorků před a po prášení na skle 5 měsíců od vzniku.

Zde však hraje roli i to, že se jedná o neporézní povrch, na kterém mají stopy mnohem menší tendence k rozpítí. Rozpítí lze na porézních površích, jako je papír, pozorovat u stop všech typů substancí, například mastné stopy sice zůstávají dlouho rozpoznatelné, po jejich okraji se však s časem objevuje mastné ohraničení viz obrázek 4.7. Je jasné, že ze všech typů zkoumaných substancí zůstávají nejdéle upotřebitelné stopy mastné, k jejichž značnému rozpítí a rozmazání dochází až za vyšších teplot.



Obrázek 4.7: Mastné vzorky na papíru v průběhu času po prášení.

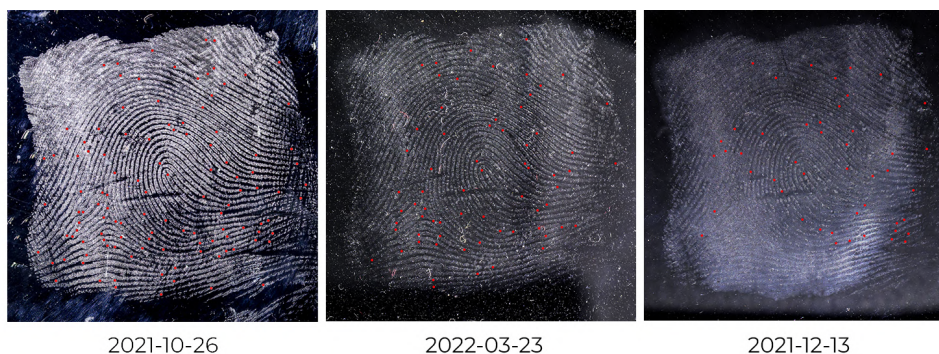
Ve výzkumu bylo výhodou, že na jeho začátku byly všechny stopy kontrolovány, zda jsou upotřebitelné, ale ve všech případech naneštěstí platí, že nejsme schopni určit přesné

původní složení a množství nanesené substance na povrch, což znemožňuje prokazatelné určení míry degradace. V praxi nelze běžným pozorováním určit míru stárnutí daktyloskopických stop. Z toho stejného důvodu nelze porovnat míru degradace mezi jednotlivými typy povrchů.

Co se fotografovacích setů týče, zde je situace mnohem lepší, jelikož se jedná o pozorování jednoho a toho samého vzorku. Zde má proto smysl pozorovat úbytky markantů a změny v papilárních liniích. Oproti algoritmickému zpracování má reálné pozorování tu výhodu, že jsme schopni vzorek podrobně zkoumat pod lupou z různých úhlů, a tak je mnohem menší pravděpodobnost, že nám unikne nějaký detail, který se třeba nemusí podařit při fotografování zachytit.

Jelikož ale k fotodokumentaci fotografovacích sad docházelo v laboratořích FIT VUT a nedošlo k jejich přímé analýze daktyloskopem, tak i zde dojde pouze k rozboru fotografií vzorků. Protože je kapacita souboru omezená, byly pro demonstraci vybrány pouze vzorky na skle. Ty též budou podrobně popsány při algoritmickém rozboru. U ostatních neporézních povrchů vypadají výsledky pro dané substance a daná prostředí velice podobně. V příloze B jsou k vidění jak jednotlivé sety vzorků na skle, tak výsledky jejich algoritmické analýzy.

U vzorků všech druhů substancí lze spatřit nestálosti v kvalitě způsobené různým nasvícením i napadaným prachem. Na několika snímcích je za vzorkem také jakýsi opar, který vzniká kvůli fotografickým vlastnostem skla, to lze nejlépe spatřit na vzorcích potnětukových, například vzorek 2021-12-13 z obrázku B.1. Tento vzorek, spolu s prvním a posledním vzorkem sady byly předmětem zkoumání odborníka, který na každém z nich označil markanty, jak ukazuje obrázek 4.8.



Obrázek 4.8: Mastné vzorky na papíru v průběhu času po prášení.

Každý z těchto otisků byl označen za upotřebitelný, přičemž na prvním vzorku ze sady (2021-10-26) bylo identifikováno 114 markantů, na posledním vzorku sady (2022-03-23) 66 markantů a na vzorku s oparem (2021-12-13) 47 markantů. Nutno podotknout, že mezi prvním a posledním vzorkem sady je 148 dnů. Stálosti zde jistě napomáhá i poměrně stabilní interiérová teplota. Když mezi sebou porovnáme všechny typy vzorků na skle z konce výzkumu, dojdeme ke zjištění, že vzorky z prašného exteriéru již nejsou upotřebitelné, nehledě na typ substance.

Když se vezme v úvahu vývoj exteriérového počasí viz obrázek 5.5, lze vidět, že jakmile po prvním týdnu výzkumu výrazně zapršelo, tak u potních i krevních vzorků v exteriéru došlo k okem postřehnutelnému zeslábnutí papilárních linií. Mastné vzorky nebyly deštěm nijak zvlášť poznamenány. Lze však předpokládat, že jakmile dojde k teplým deštům, jejichž teplota se v našem podnebí může pohybovat až okolo 35 °C, budou výsledky odlišné.



Obrázek 4.9: Porovnání krevních vzorků na neporézním a porézním materiálu.

Porovnání porézních a neporézních povrchů ukazuje obrázek 4.9. Zde je k vidění vždy první a poslední krevní vzorek ze sady na skle a na papíře. Na obou typech materiálu dochází ke změně barvy krve. Exteriérové vzorky podléhají ovlivnění šumem podobným způsobem. Stopy na porézním povrchu (papír) mají o něco málo více rozpité papilární linie, k čemuž na porézním povrchu dochází mnohem rychleji než na neporézním.

Vzhledem k tomu, že se u jednotlivých vzorků fotografovacích setů mění osvětlení a též dochází ke zkreslení napadáváním prachových částic, nelze z pouhého pohledu na fotografii určit stáří stopy, kterou vyobrazuje. Opět docházíme k závěru, že míra degradace podle fotografie nemůže být za těchto podmínek jednoznačně a prokazatelně stanovena.

Kapitola 5

Programové řešení

Výsledkem programového řešení práce je nástroj FiQSA (Fingerprint Qualities Sample Assessment) který má za úkol analyzovat každý z datasetů a porovnat výsledky určení kvality pro každý z obrázků. Hlavní porovnání probíhá mezi algoritmy **NFIQ 2.1** a **Innovatrics IDKit SDK**, oba jsou to algoritmy uznávané odbornou veřejností, s Innovatrics má dokonce Fakulta navázanou spolupráci. Pro zajímavost je v nástroji zahrnuto i porovnání algoritmů **MINDTCT** a **FingerJetFX OSE** pro extrakci markantních bodů. Oba tyto algoritmy, mimo jiné, vrací počet markantů a skóre kvality pro každý markant.

Program byl vyvinut v jazyce Python verze 3.10 na platformě Windows. Pro správné fungování je nutné mít zajištěnou licenci pro Innovatrics IDKit SDK v8.0.1.0. Možnosti spuštění jsou popsány v manuálu v příloze C.

5.1 Implementace

Implementace se nachází ve složce `src` a větví se dle způsobu použití (jak je popsáno v manuálu v příloze C) na analýzu datasetů a zobrazení dat z tabulkových souborů. V obou případech je pak spuštěna Dash webová aplikace s interaktivními grafy zobrazující výsledky. Pokud jsou při spuštění dodány i informace o počasí, jsou vykresleny i ty. Zpracování argumentů i větvení, ke kterému na jejich základě dochází, je obsaženo v souboru `main.py`, který je zároveň startovním bodem programu. Celá funkcionality je ale zabalena ve třídě `DataManager`, která se pak předává k vykreslení Dash aplikaci.

5.1.1 Parsování podmínek prostředí

Mezi vstupními argumenty je programu možné předat složku s excelovými soubory buď měřiče `WeatherLogger` nebo formátu souboru `ČHMI`¹, podle toho, o jaký druh se jedná, je složka zpracována buď třídou `WeatherDataSet` nebo `CHMISet`. V obou případech jsou data každého setu souborů s daty o počasí přeparována, a s použitím knihovny `pandas` spojena do datového rámce.

Prvním problémem je hned formát některých polí souborů měřiče `WeatherLogger`, pokud se jedná o desetinné číslo, část za desetinnou čárkou je v těchto souborech často z neznámého důvodu reprezentována románským číslem. Například číslo 24,6 je reprezentováno jako 24,VI. Z toho důvodu bylo nutné implementovat parsovací funkci využívající regex, která je volána v lambda funkci konvertoru při načítání datového rámce.

¹Český Hydrometeorologický Ústav

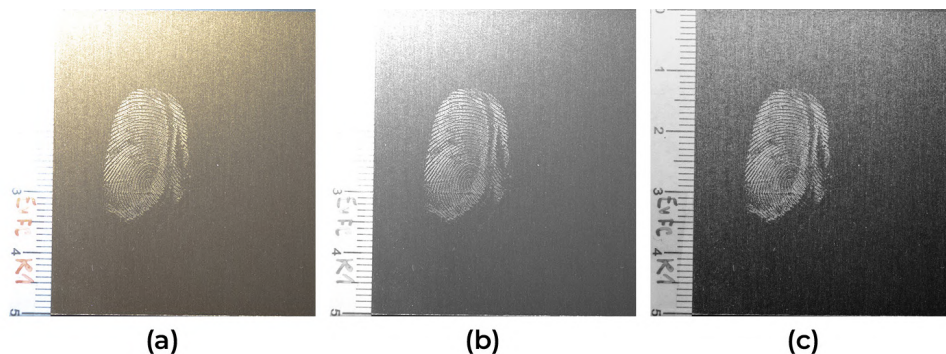
Problémem zde bylo také pasrování data obou druhů zápisu na stejný formát. Weather-Logger soubory obsahují datum i s časem v nestandardním formátu dd-MM-yy/HH:mm:ss. Soubory s údaji o srážkách z ČHMI zase obsahují data pouze den po dni. Pro zjednodušení jsou WeatherLogger zápisy seskupeny do záznamů podle dnů tak, že záznam již neobsahuje zápisy po čtvrt hodině (či jiném časovém úseku), ale každý řádek odpovídá jednomu dni a obsahuje průměrnou, maximální a minimální teplotu a relativní vlhkost daného dne. Tak lze umístit data o podmínkách prostředí do jedné tabulky s osou x odpovídající hodnotám data každého ze zápisů.

5.1.2 Třída DataManager

`DataManager` je třída typu `dataclass`, která zabaluje práci s daty. Obsahuje seznamy substancí, povrchů i prostředí a všechny druhy datových rámců. Mimo funkce pro získání či uložení těchto prvků obsahuje dvě hlavní metody: `extract_data`, která řídí analýzu datasetů, a `get_from_files`, která zajišťuje získání dat ze souborů. V obou případech dochází k extrahování důležitých dat a jejich uložení do atributů třídy.

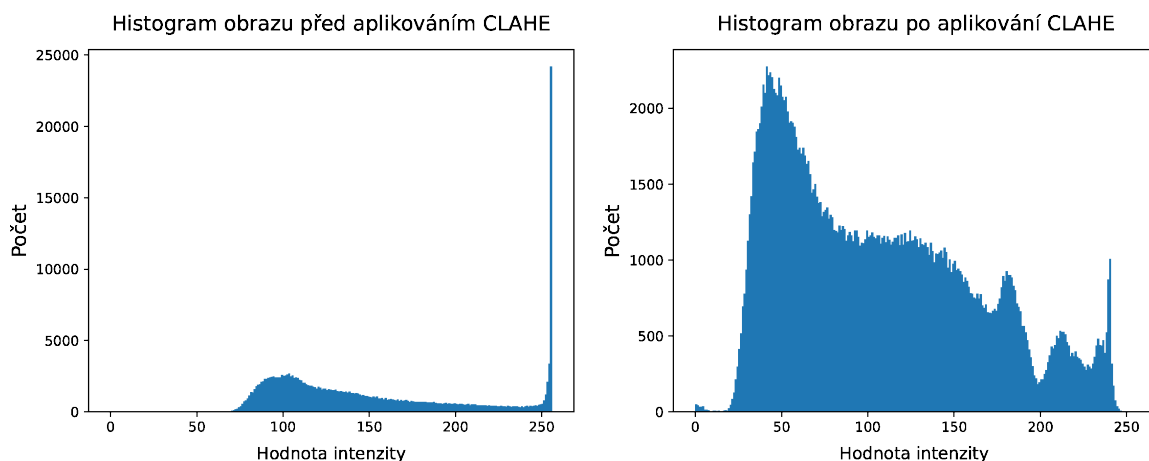
5.1.3 Analýza datasetů

Každý dataset ze složky `s/datasets` je nejprve uložen do třídy `Dataset`. Vzorky jsou zde uloženy jako list prvků typu `Image`, což je třída s daty pro každý obrázek. Při procházení souborů je detekován jejich typ a pokud se nejedná o `.jpg`, program se pokusí o konverzi. Zde také, je-li to žádoucí dochází ke změně názvu souboru na datum pořízení. Zároveň dochází k **předzpracování** obrazu. To sestává z převodu do odstínů šedi, převzorkování obrazu na 500 ppi, adaptivního vyrovnávání histogramu s omezením kontrastu (CLAHE) a, v případě, že má obraz velikost větší než 1000 px, změny jeho velikosti.



Obrázek 5.1: Kroky předzpracování: (a) původní obrázek, (b) obrázek převedený do tónů šedi, (c) obrázek po aplikování CLAHE.

Adaptivní vyrovnávání histogramu s omezením kontrastu (CLAHE, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) nezohledňuje celkový kontrast obrazu, ale rozděljuje obraz do bloků, kde se následně provádí vyrovnání histogramu [23]. To má za důsledek odstranění oparu a vyrovnání příliš jasných a tmavých oblastí bez ztráty optické hloubky obrazu. Obrázek 5.2 ukazuje histogram obrázků otisku prstu (b) a (c) z obrázku 5.1.



Obrázek 5.2: Histogram obrazu před a po aplikování CLAHE.

Po předzpracování následuje **aplikování algoritmů pro extrakci skóre kvality**, to zastřešuje třída `SoftwareDataExtractor`. Obrázky jsou zde postupně analyzovány pomocí MINDTCT, FingerJetFX OSE, NFIQ 2.1 a programu vyvinutého za pomoci Innovatrics IDKit SDK. Tento program byl implementován v jazyce C++ a nachází se v souboru `Innovatrics/src/idkit_image_scores`. Dochází zde k inicializaci modulu pomocí funkce `IEngine_InitModule`, vytvoření databáze uživatelů, zapsání obrazu do databáze a extrakci počtu markantů s použitím funkce `IEngine_GetMinutiaePoints` a skóre kvality užitím funkce `IEngine_GetFingerprintQuality` z obrazu. Následně byl z programu vytvořen spustitelný soubor, který je volán při extrakci dat třídou `SoftwareDataExtractor`.

Při extrakci dat ostatními algoritmy se, podle toho, o jaký algoritmus se jedná, získají různé druhy výstupu. Z těch je nutné vyparsovat potřebná data. Například algoritmus FingerJetFX OSE vrací binární strukturu normy ISO/IEC 19794-2:2005/Cor.1:2009 a data z ní jsou extrahována s využitím znalostí z neoficiální dokumentace této normy viz [38]. Výstup z MINDTCT je zase parsován podle informací z [14], zde jsou k dispozici různé typy souborů popisující počty, pozice i kvality a typy markantů. Pro účely programu pracujeme pouze s počty a kvalitami markantních bodů. NFIQ2 vrací různé typy kvalit, jak bylo popsáno v sekci 3.3.3, program pracuje pouze s výslednou kvalitou určenou tímto algoritmem.

Z hodnot kvality každého markantu definovaných algoritmem MINDTCT i FingerJetFX OSE je vypočítán průměr označený jako celkové skóre kvality daného algoritmu. Následně je ze všech skóre, není-li skóre 0², vypočítán průměr. Ke všem extrahovaným datům jsou ještě z důvodu normalizace³ kvůli vykreslování v grafu vypočteny jejich procentuální hodnoty. Všechny hodnoty jsou následně uloženy do dané instance třídy `Image`. Výsledný seznam hodnot je následující:

- Průměrná kvalita: `average_quality`
- MINDTCT počet detekovaných markantů: `mindtct_minutiae_count`
- MINDTCT průměrná kvalita: `mindtct_average_quality`

²Skóre 0 je navraceno i v případě, že se nepodaří data z obrázku extrahovat, proto se tato hodnota do průměrování nezahrne. V obou případech bohužel dochází ke zkrácení výsledků.

³Každý obraz má jiný počet markantů i jinou počáteční kvalitu, a tak je nutné pro validní monitorování pohybů v těchto počtech data normalizovat na jejich procentuální hodnotu v rámci setu tak, že se zastoupení bude pohybovat vždy mezi 0 až 100 % hodnoty hodnot.

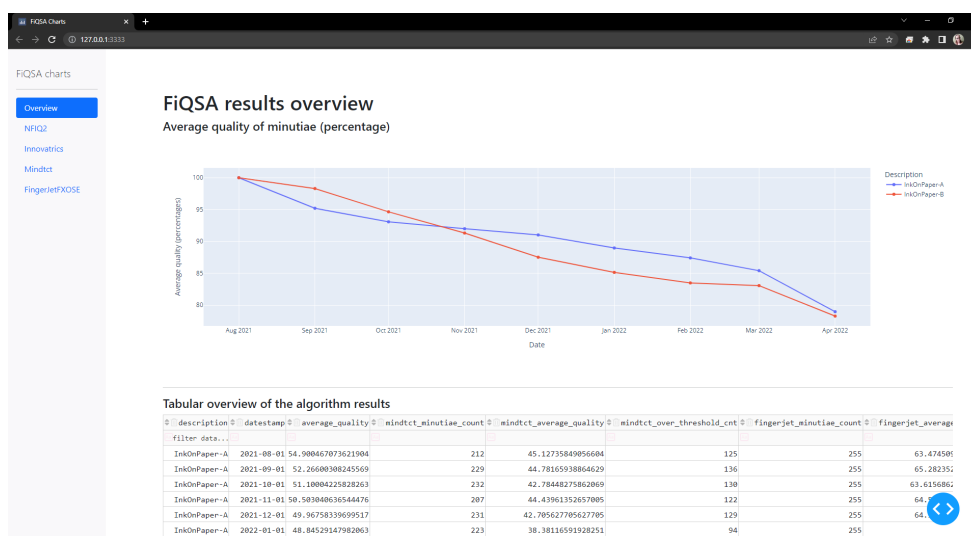
- MINDTCT počet detekovaných markantů nad stanoveným prahem kvality: `mindtct_over_threshold_cnt`
- FingerJetFX počet detekovaných markantů: `fingerjet_minutiae_count`
- FingerJetFX průměrná kvalita: `fingerjet_average_quality`
- FingerJetFX počet detekovaných markantů nad stanoveným prahem kvality: `fingerjet_over_threshold_cnt`
- NFIQ2 skóre kvality: `nfiq2_quality_score`
- NFIQ2 počet detekovaných markantů: `nfiq2_minutiae_count`
- NFIQ2 počet detekovaných markantů v centrální oblasti velikosti 200 × 200 px: `nfiq2_minutiae_count_rect200`
- Innovatrics počet detekovaných markantů: `innovatrics_minutiae_count`
- Innovatrics skóre kvality: `innovatrics_quality_score`

Do grafových hodnot jsou však vykreslovány jen vybrané hodnoty, zbylé jsou vypočítávány čistě pro rozšíření oblasti pozorování.

Po extrahování skóre kvality všech obrázků setu se daná instance třídy `Dataset` pokusí o dekodování názvu setu z názvu jeho složky a ten spolu s popisy a všemi daty obrázků setu uloží do datového rámce. `DataManager` následně spojí všechny tyto rámce do jednoho. Zároveň vznikají datové rámce dle druhu algoritmu a substance.

5.1.4 Interaktivní aplikace s grafy

K vykreslování grafů je v aplikaci používána knihovna Plotly, jedná se o open source projekt, díky kterému lze vytvářet jednoduché i složité grafy s možností interaktivity. Mimo vykreslování grafů do dokumentace je knihovna Plotly, spolu s frameworkem Dash, použita i pro vývoj webové aplikace s grafy. Dash je framework vytvořený k produkci interaktivních webových aplikací napsán na základech jazyků Flask, Plotly.js a React.js. [25]



Obrázek 5.3: FiQSA Dash aplikace ve webovém okně.

Aplikace Dash se skládá z popisu rozložení aplikace a jejího vzhledu a popisu interaktivity. Celá implementace vykreslovací aplikace je v řešení zabalena do třídy `ChartApp`. Rozložení obsahuje stromové prvky podobně jako v jazyce HTML, hlavními prvky jsou `html.Div` a `html.Graph`. Oproti jednoduchým Dash aplikacím, FiQSA aplikace je rozdělena do sekcí, mezi kterými se přepíná pomocí navigačního menu (jak je možné vidět na obrázku 5.3), které definuje komponenta `dbc.Nav`.

Rozdělení do sekcí umožňuje alespoň částečnou recyklaci šablon grafů pro jednotlivé typy grafů, což Dash běžně neumožňuje. Používání stejné šablony grafů pro vykreslování různých dat umožňuje switch, který na základě vstupních parametrů grafu vrací obsah a jeho parametry k vykreslení, jako jsou třeba informace, které budou zobrazeny po najetí kurzorem na zlom v grafu, což demonstruje obrázek 5.4.

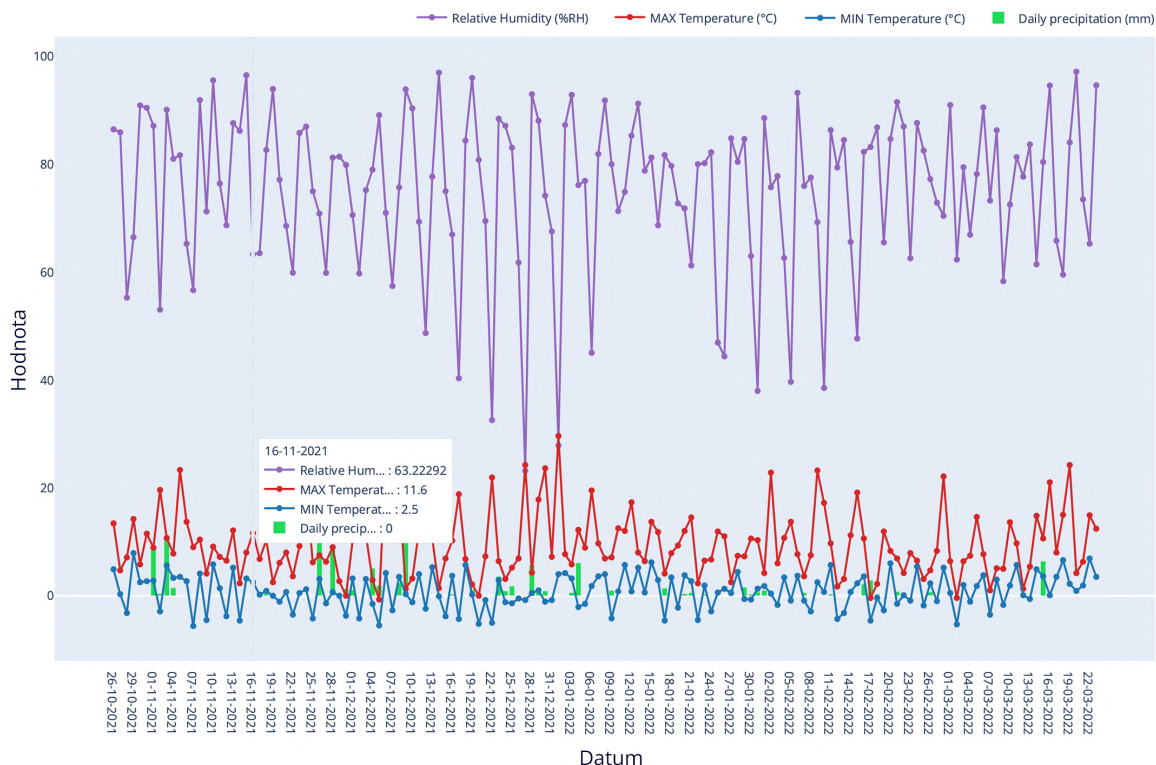


Obrázek 5.4: Část grafu ve FiQSA Dash aplikaci.

Interaktivitu zajišťují definované *callback* funkce, které jsou automaticky volány nástrojem Dash, kdykoli se změní vlastnost vstupní komponenty, aby se aktualizovala nějaká vlastnost jiné komponenty (výstupu) [24]. To je v aplikaci nejvíce využíváno pro změny na základě označených checkboxů, které též lze vidět na obrázku 5.4. Tyto změny zapříčiňují odpovídající maskování dat v datových rámcích. Z důvodu optimalizace se čtou data podle typu vždy jen z odpovídajících datových rámců. I přesto se bohužel lze setkat s trochu delším načítáním, vždy se však jedná o délku v rámci maximálně několika sekund.

Na základě vstupních dat je aplikace připravena vykreslit i data o počasí, jsou-li poskytnuta. Tato data jsou rozdělena podle prostředí, v jednom grafu je vykreslena jak teplota a relativní vlhkost daného prostředí, tak i průměrné denní srážky, pokud jsou dostupné. Graf exteriérového počasí z průběhu výzkumu je k vidění na obrázku 5.5. Pro zjednodušení

orientace mají tyto grafy nastaveny sdílený vertikální kurzor, který ukazuje všechna data daného sloupce.



Obrázek 5.5: Graf exteriérového počasí ve webové aplikaci při najetí kurzoru.

Výchozí port pro spuštění na localhostu je 3333. Demo verze aplikace je nasazena na web do cloudové platformy Heroku a je dostupná na url <https://fiqsa.herokuapp.com/>. Zde jsou k vidění výsledky analýzy datasetů vzniklých v rámci výzkumu. Demo aplikace je plně funkční i na tabletech či dotykových telefonech, i když se na menším displeji s aplikací pracuje poměrně hůře. Pro zjednodušení otevření webové aplikace z tištěné verze je zde přiložen QR kód viz obrázek 5.6.

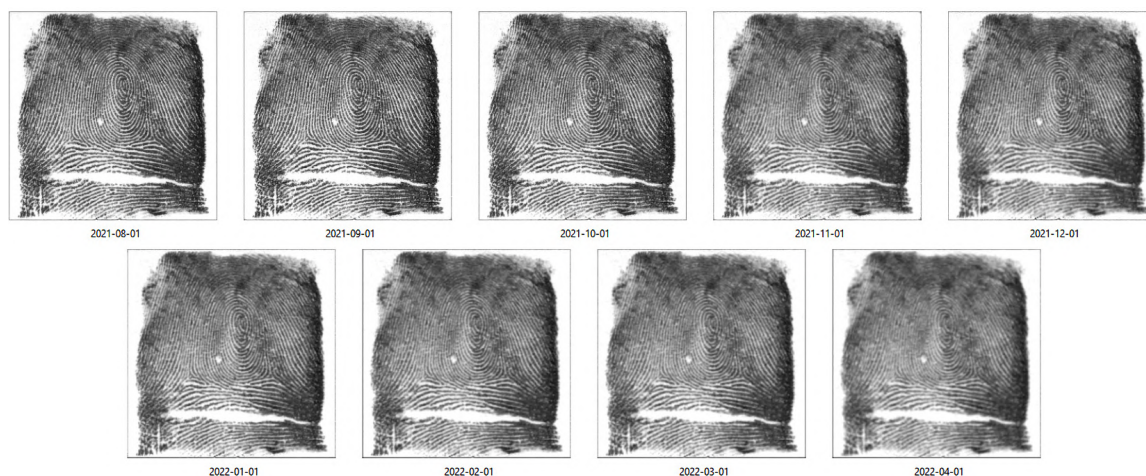


Obrázek 5.6: QR kód pro spuštění demo aplikace na tabletu či chytrém telefonu.

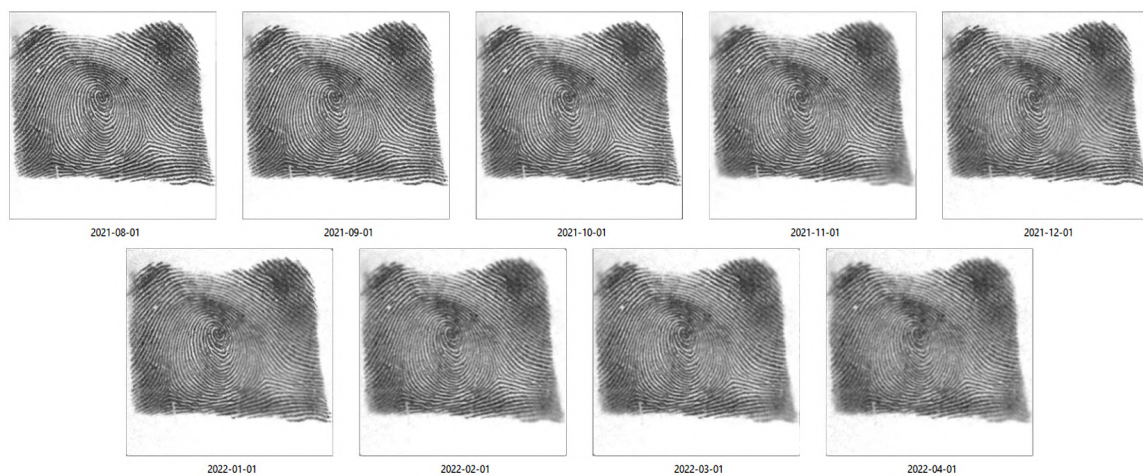
5.2 Testování na umělé sadě

Pro pokus na inkoustových vzorcích byla vytvořena simulovaná sada obsahující dva sety vzorků, vzorky pocházejí z vyžádané databáze společnosti NIST. V obou případech se jedná o inkoustový otisk pravého palce bez větších defektů. Sety se nacházejí ve složce datasets/NIST-samples.

Prvním vzorkem obou simulovaných setů je původní obrázek, kterému je postupně přidáván šum a Gaussovské rozostření o poloměru 0,3 obrázkové body. Pro demonstraci jsou obrázkům přiřazena data od 1. 8. 2021 do 1. 4. 2022, vždy s intervalem jednoho měsíce, každá sada tedy obsahuje 9 vzorků. Vzorky simulovaných setů i s jejich přiřazenými daty jsou vyobrazeny na obrázcích 5.7 a 5.8.

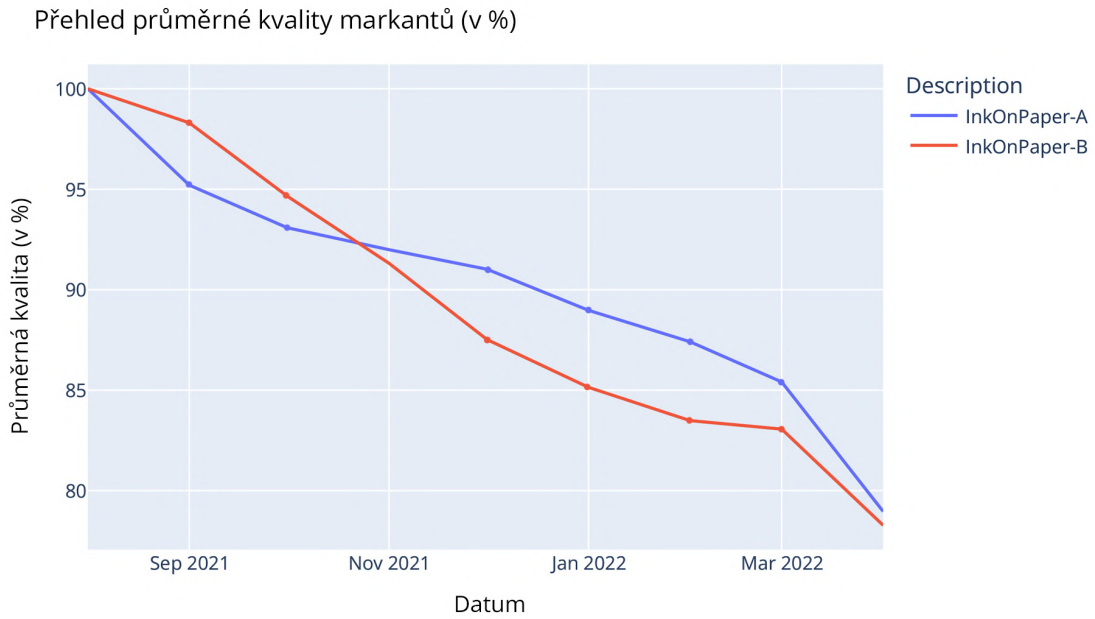


Obrázek 5.7: NIST dataset InkOnPaper-A.



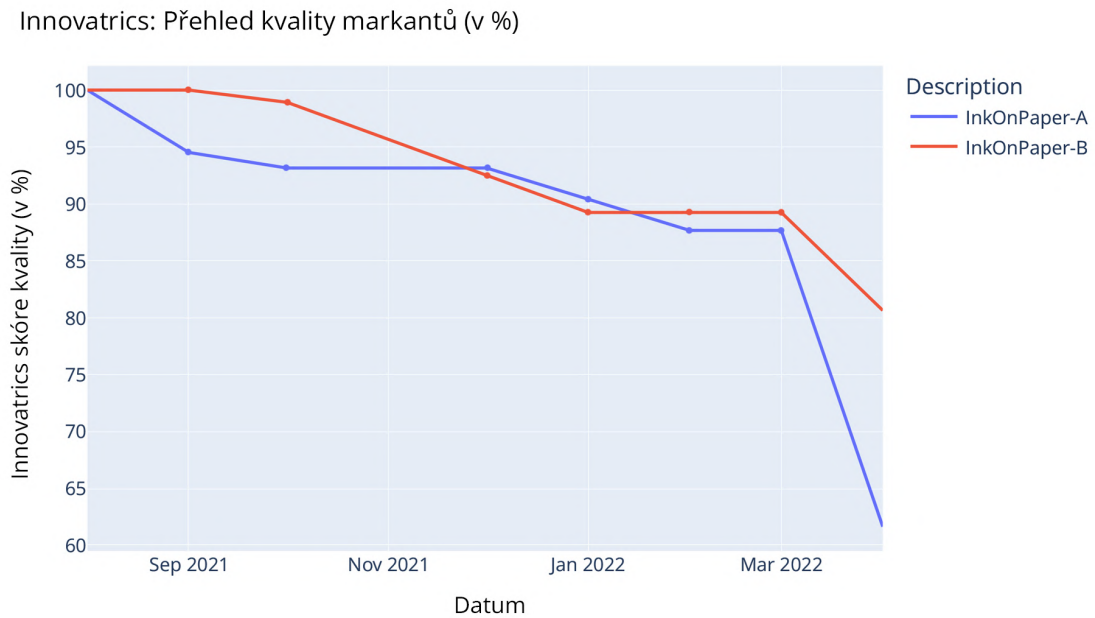
Obrázek 5.8: NIST dataset InkOnPaper-B.

Procentuální reprezentace vypočítané průměrné kvality setů je k vidění na obrázku 5.9. Souhrnné výsledky obou simulovaných sad jsou mnohem stabilnější než výsledky analýzy vzniklých datasetů, která bude popsána v následující sekci. To není velkým překvapením, jelikož již bylo nastíněno, že z důvodu rozdílů v nasvětlení vzorků a pohybech v mírách šumu dochází k dezinterpretaci některých částí dat obsažených ve vzorcích.



Obrázek 5.9: Souhrnný graf výsledků analýzy NIST datasetu.

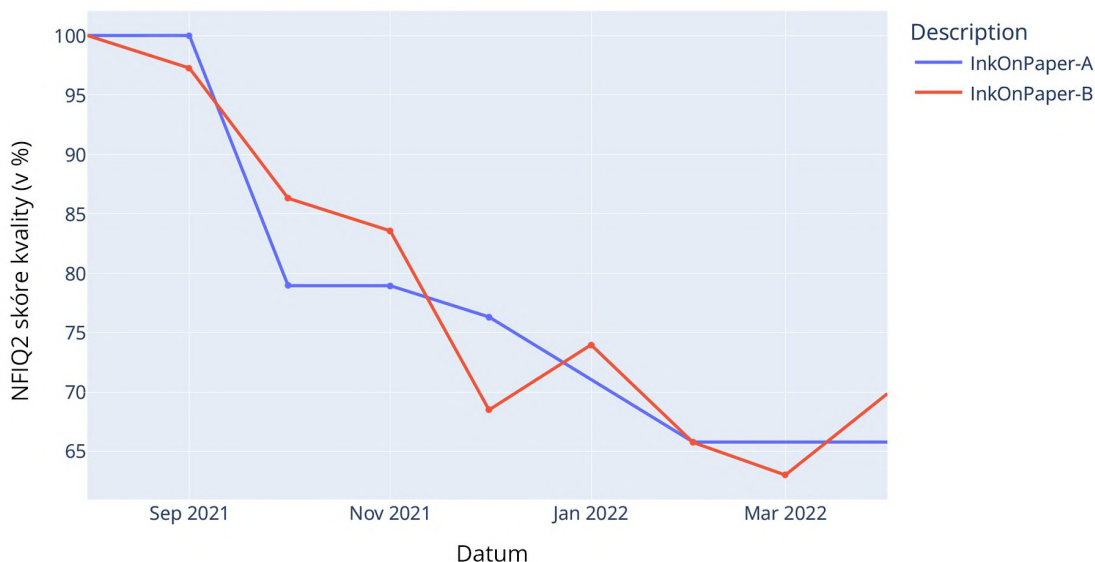
Tento souhrnný výsledek berme pouze jako orientační, jelikož se jedná o průměr hodnot čtyř různých algoritmů, kde každý z nich vyhodnocuje vzorky trochu odlišným způsobem. Vzhledem k tomu, že je však výpočet u všech vzorků prováděn stejným způsobem, jsou výsledky stále validní. Algoritmus využívající Innovatrics IDKit SDK má obecně stabilnější výsledky, jak lze vidět na obrázku 5.10.



Obrázek 5.10: Graf výsledků analýzy NIST datasetu algoritmem využívajícím knihovnu Innovatrics.

To připisují schopnostem algoritmu extrahovat rysy i z poměrně zašuměných obrazů. NFIQ 2.1, a tím i FingerjetFX OSE, pracují se zašuměnými obrazy jiným způsobem, jak bude demonstrováno i později.

NFIQ2: Přehled kvality markantů (v %)



Obrázek 5.11: Graf výsledků analýzy NIST datasetu algoritmem NFIQ 2.1.

Obrázek 5.11 vyobrazuje graf skóre kvality určeného algoritmem NFIQ 2.1. Zde lze spatřit neočekávané vzrůstající skoky mezi procentuálními reprezentacemi skóre kvality. Skoky v grafech jsou často způsobeny falešným zostřením obrázku přidaným šumem, zašuměný rozmazaný obrázek může totiž mít lepší skóre kvality než pouze rozmazaný obrázek. Tuto domněnku také potvrzují nezávislé experimenty.

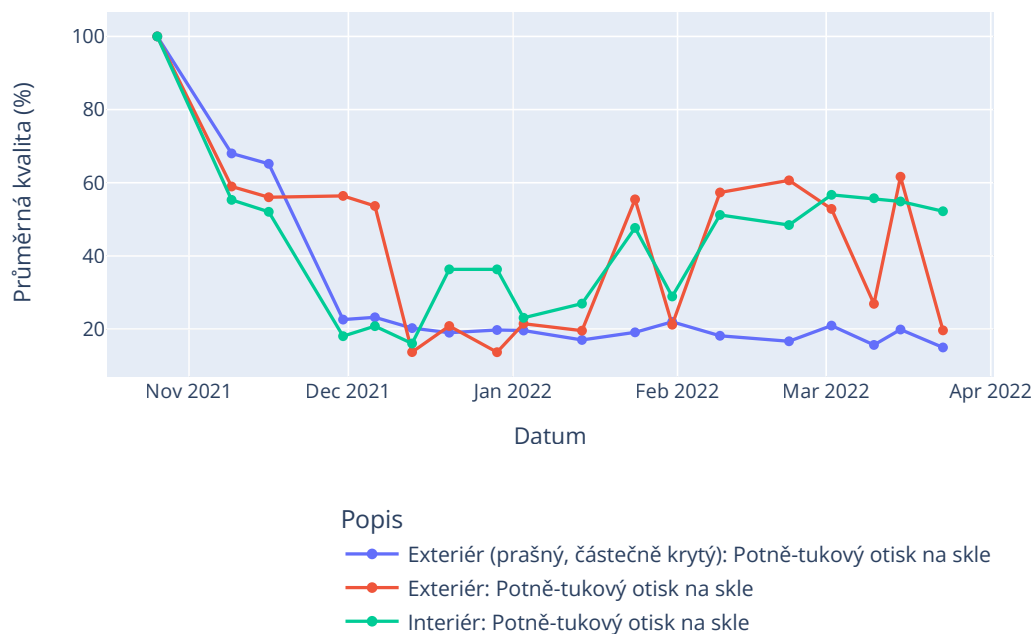
5.3 Výsledky analýzy vzniklých datasetů

Jak bylo předpokládáno, algoritmická syntéza datasetů vzniklých v rámci výzkumu nepřináší nijak konzistentní výsledky. Stejně tak, jako již bylo popsáno v sekci 4.3, se zde setkáváme s problémem, že nejsou stopy na snímcích zachyceny identicky jako jejich předchozí verze. Pro popis výsledků byly vybrány vzorky na skle, sety lze vidět v příloze B. U ostatních neporézních povrchů vypadají výsledky pro dané substance a daná prostředí velice podobně.

U velmi zašuměných obrázků je problémem samotná data z fotografie vůbec extrahovat, natož určit kvalitu. Pokud se nepodaří tyto data extrahovat, vrátí daný algoritmus skóre 0. Extrakce dat je mnohdy obtížná i z důvodu, že různé úhly světla někdy zvýrazňují šum na fotografii. Proto jsou pak ve výsledných grafech vidět pády k 0.

Graf na obrázku 5.13 zobrazuje průměrná skóre kvality potně-tukových vzorků na skle. Paradoxně nejstabilnější výsledky zde mají vzorky z prašného, částečně krytého exteriéru. Zde totiž došlo k rapidní degradaci po prvním měsíci výzkumu po kombinaci prachu a deště. Vzorky poté zůstávají konstantně špatné kvality, a tak nedochází ke skokům v grafu.

Potně-tukové vzorky na skle – Průměrné skóre kvality



Obrázek 5.12: Graf výsledků analýzy potně-tukových vzorků na skle.

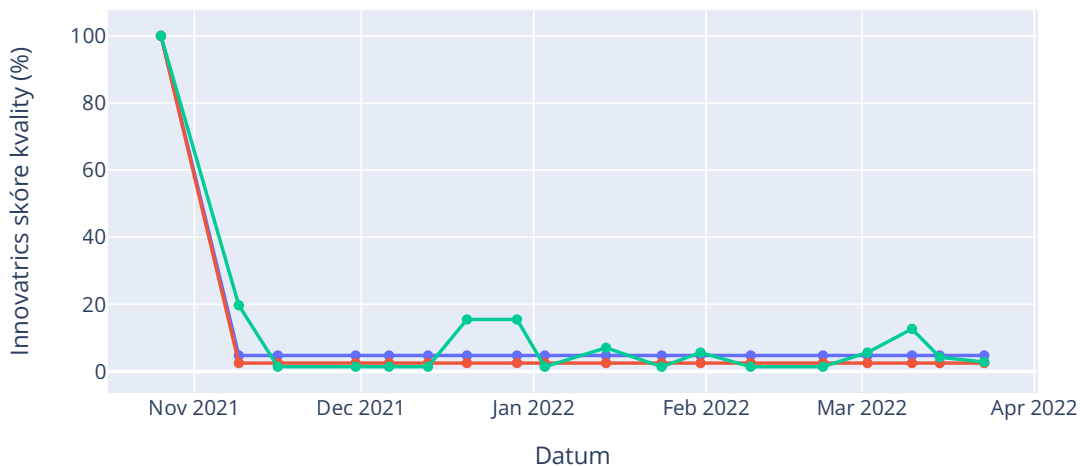
Když porovnáme obrázky vzorků a jejich analýzu algoritmy NFIQ2 a Innovatrics, což ukazují grafy na obrázku 5.13, můžeme vidět, že algoritmus Innovatrics má mnohem přísnější kritéria na kvalitu než algoritmus NFIQ2. Jak již bylo zmíněno, NFIQ2 se pouští do analýzy i velmi zašuměných obrazů, mnohdy ale identifikuje šum jako falešné markanty. To jen potvrzuje fakt, že tento algoritmus není připraven na analýzu vzorků z nekontrolovaných prostředí, a zaměřuje se spíše na inkoustové otisky.

Pro detailní pohled na grafy je nejvhodnější využít Dash webovou aplikaci, která díky své interaktivitě poskytuje podrobné informace o vyhodnocení každého vzorku ze všech typů sad. Pro ilustraci jsou však přiloženy grafy vybraných analýz v příloze B, kde lze pozorovat podobné výsledky, jako je vidět zde. V příloze B jsou k vidění také tabulkové výsledky analýzy vybraných sad. V tabulkách jde vidět, že i přesto, že NFIQ2 využívá při extrakci algoritmus FingerJetFX OSE, tak mají tyto algoritmy velmi odlišné výsledky. To není tak velkým překvapením vzhledem k tomu, že je NFIQ2 skóre kvality složeno z mnohem více faktorů.

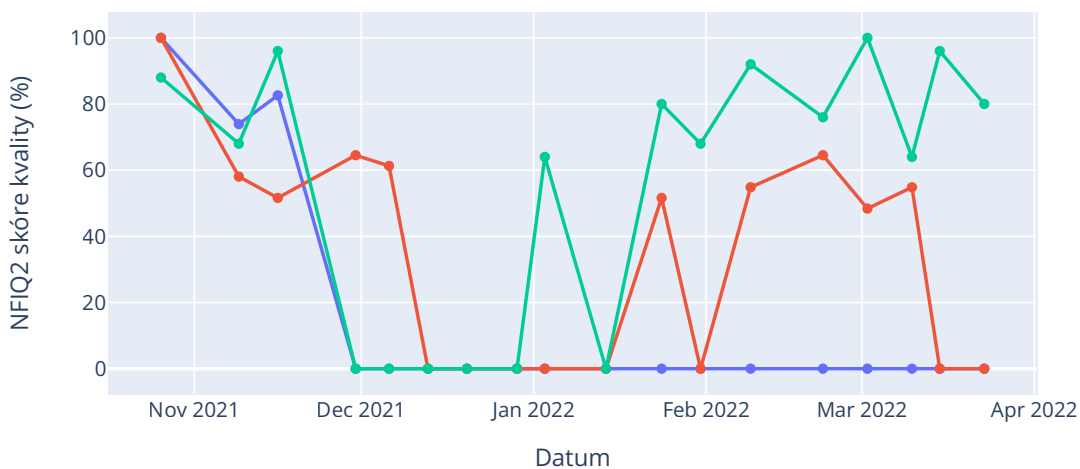
Z tabulek v příloze B plyne, že každý algoritmus stanovuje kvalitu zcela odlišným způsobem. Obecně vyšší průměrné skóre kvality vrací FingerJetFX OSE oproti MINDTCT, kde pro ty samé vzorky získáváme průměrné skóre kvality až o desítky nižší. Předpokládala jsem, že to může být způsobeno výchozím nastavením extraktoru, kdy MINDTCT extrahuje více markantů, i s hraniční kvalitou, a proto je prak průměrná kvalita nižší. Celkové počty extrahovaných markantů tuto domněnku však vyvrací. Je tedy pravděpodobné, že jsou rozdíly způsobeny odlišnými standardy určování kvality. Protože je každý vzorek vyhodnocen odlišně, není možné podle skóre kvality jakkoliv určit míru degradace stop.

Když se porovnají výsledky mezi jednotlivými substancemi, lze dojít k závěru, že vždy záleží na konkrétní stopě, jejím osvětlení a zašumění. Nelze jednoznačně určit, který typ substance dosahuje nejlepších výsledků. Průměrně dosahují o něco lepších skóre kvality stopy mastné.

Potně-tukové vzorky na skle – Innovatrics skóre kvality



Potně-tukové vzorky na skle – NFIQ2 skóre kvality



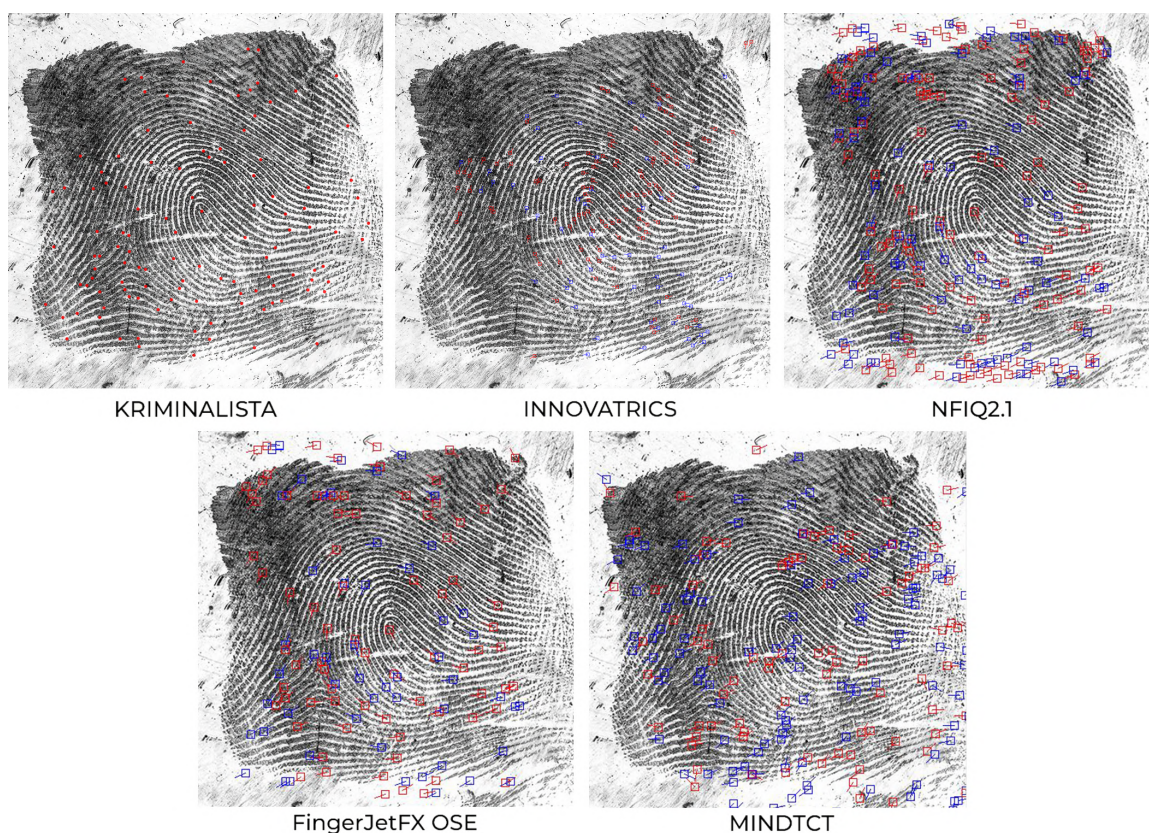
Popis

- Exteriér (prašný, částečně krytý): Potně-tukový otisk na skle
- Exteriér: Potně-tukový otisk na skle
- Interiér: Potně-tukový otisk na skle

Obrázek 5.13: Grafy s výsledky analýz potně-tukových vzorků na skle algoritmy Innovatrics a NFIQ2.

Porovnání identifikovaných markantů jednotlivými algoritmy a kriminalistou v digitálním daktyloskopickém komparátoru DactyScope ukazuje obrázek 5.14. Počty identifikovaných markantů jsou následující:

- Kriminalista: 114 identifikovaných markantů
- Innovatrics: 106 identifikovaných markantů
- NFIQ 2.1: 232 identifikovaných markantů
- FingerJetFX OSE: 227 identifikovaných markantů
- MINDTCT: 193 identifikovaných markantů

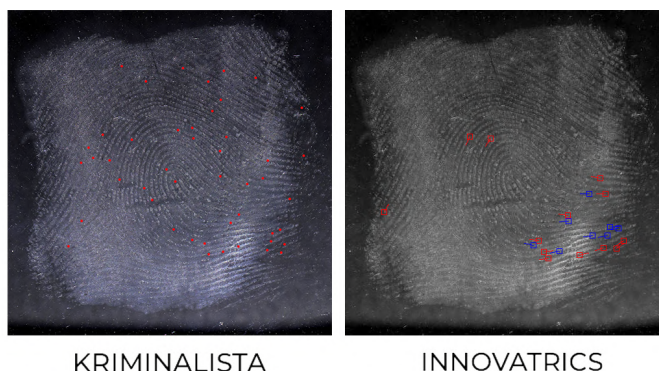


Obrázek 5.14: Porovnání detekovaných markantů algoritmy a odborníkem.

Jak z dat vyplývá, v tomto případě je nejbližší počtu identifikovaných markantů kriminalistou algoritmus Innovatrics. Otázkou zůstává, zda kriminalistovi a algoritmu Innovatrics neunikly některé z markantů identifikované ostatními metodami. Na obrázku 5.14 však lze vidět, že algoritmy NFIQ 2.1, FingerJetFX OSE i MINDTCT identifikovaly falešné markanty v oblastech nad a pod otiskem prstu. Nutno podotknout, že zde se jedná o ideální případ analýzy, jelikož je vzorek téměř bez šumu.

Porovnání identifikace markantů v obrazu opticky horší kvality odborníkem a algoritmem Innovatrics ukazuje obrázek 5.15. Jedná se o vzorek potně-tukové substance na skle uchovávaný v interiéru zachycený 13. 12. 2021. Odborník zde identifikoval 47 markantních

bodů, zatímco algoritmus Innovatrics pouze 21. Z toho lze vyvodit závěry, že algoritmus Innovatrics sice oproti ostatním nevrací takové množství falešně identifikovaných markantů, avšak je u něj problémem identifikovat méně zřetelné markanty u snímků horších kvalit.



Obrázek 5.15: Porovnání detekovaných markantů algoritmy a odborníkem.

Algoritmická analýza fotografií s otisky prstů potvrzuje hypotézu stanovenou již při pozorování, a to že za aktuálních podmínek výzkumu není z fotografií možné jednoznačně určit míru degradace daktyloskopických stop, nehledě na materiál, typ substance a prostředí. Zároveň nelze jednoznačně stanovit, který z algoritmů analyzuje vzorky lépe, jelikož každý pracuje jinak a výsledky záleží na jednotlivých mírách šumu, oparu a celkových nedostatků v obrazu.

Kapitola 6

Závěr

Tato bakalářská práce měla za úkol přiblížit problematiku určení míry degradace daktyloskopických stop a porovnat algoritmy zabývající se určováním jejich kvality. K tomu účelu byl vybrán algoritmus NFIQ 2.1 a program implementovaný s využitím knihovny Innovatrics IDKit SDK. Tyto produkty byly vybrány, jelikož jsou považovány za software uznávaný odbornou veřejností. Mimo to, Innovatrics je partnerská firma VUT FIT.

Součástí práce je také tvorba vzorků otisků prstů na různých materiálech v různých prostředích a jejich zajišťování a pozorování v průběhu času. Před samotným výzkumem bylo nejprve nutné si nastudovat způsoby využití a zpracování otisků prstů, jak z hlediska využití v kriminalistické daktyloskopii, tak ze strany počítačové analýzy otisků prstů. Tomu se věnují kapitoly druhá a třetí. Zde jsou také probrány vlivy na kvalitu a degradaci daktyloskopických stop a detailně popsány vybrané existující algoritmy pro vyhodnocení kvality daktyloskopických stop.

Pro experimenty s degradací kvality daktyloskopických stop v různých prostředích a na různých materiálech byly vytvořeny sady otisků prstů na papíru, lesklém papíru, skle, fotocuprextitu, měkké folii a displeji monitoru, čímž byly zastoupeny porézní i neporézní materiály. Do výzkumu byly dokonce zahrnuty i různé typy substancí, konkrétně potnětuková, krevní a mastná. Tyto sady vznikly v třech téměř identických verzích a každá byla pozorována v jiném prostředí, kterým je buď interiér, exteriér nebo prašný, částečně krytý exteriér. U každého prostředí byl sledován vývoj teploty a vlhkosti, při pozorování exteriérových výsledků byla zohledněna i data o denních srážkách poskytnutá ČHMI. Celkově bylo vytvořeno 845 vzorků, z toho 780 k odejmutí a zviditelnění v laboratořích a ateliéru OKTE PČR a 65 vzorků k postupnému fotografování.

Pozorování ukázalo, že stopy mají mnohem menší tendence k rozpítí na neporézních površích, což potvrzuje fakta stanovená při studování problematiky degradace daktyloskopických stop. Jako nejvíce stabilní se ukázalo interiérové prostředí, což nebylo žádným překvapením. Ze všech typů zkoumaných substancí zůstávají nejdéle upotřebitelné stopy mastné, k jejichž značnému rozpítí a rozmazání dochází až za vyšších teplot. Mastné stopy také nejpomaleji vysychají a pokud nedojde k jejich přehlcení prachem, jsou schopny pojmout zviditelňovací magnetický prášek i po více jak 100 dnech od vzniku.

Zkoumáním odebíraných vzorků bylo potvrzeno, že v praxi nelze prokazatelně určit míru degradace daktyloskopických stop, jelikož běžně není známo původní složení a množství nanesené substance na povrch. Problémem u postupně fotografovaných vzorků je nestálost zajišťovacích podmínek. Jelikož nebylo možné zařídit od začátku výzkumu stabilní nasvětlení pro každý vzorek, tak se u jednotlivých vzorků fotografovacích setů mění osvětlení.

To způsobuje inkonzistence ve výsledcích, protože se vždy nemusí podařit při fotografování zachytit stejný počet informací z otisku.

K algoritickému porovnání byly do výsledného programu mimo již zmíněné algoritmy NFIQ 2.1 a Innovatrics zahrnuty i extraktory markantů MINDTCT a FingerJetFX OSE, které, mimo jiné, vrací počet markantů a skóre kvality pro každý markant, ze kterého je pak vypočítána průměrná kvalita identifikovaných markantů. Součástí programového řešení je také interaktivní webová aplikace s grafy a její demo verze ukazující výsledky analýzy setů vzorků vzniklých v rámci výzkumu je dostupná online na <https://fiqsa.herokuapp.com/>. Aplikace porovnává jak jednotlivé algoritmy, tak i substance, povrchy a prostředí, ukazuje vývoj počasí a filtrovatelný celkový souhrn získaných informací.

Algoritmická analýza byla nejprve testována na uměle vytvořených setech vzorků se simulovanou degradací. Už z výsledků tohoto rozboru bylo jasné, že každý algoritmus přistupuje ke stanovení kvality otisku prstu zcela odlišně. Nikde není jednoznačně stanoveno, jak k tomu přistupovat – problém evropského standardu kvality otisku prstu zůstává stále otázkou. Výsledky algoritmické analýzy vzniklých setů otisků prstů potvrzují hypotézu stanovenou již při pozorování, a to že za aktuálních podmínek výzkumu není z fotografií možné jednoznačně určit míru degradace daktyloskopických stop, nehledě na materiál, typ substance a prostředí. Zároveň nelze jednoznačně stanovit, který z algoritmů analyzuje vzorky lépe, jelikož každý pracuje jinak a výsledky záleží na jednotlivých mírách šumu, oparu v obrazu a jeho celkových nedostatecích.

Práce svým rozsahem nad rámec splňuje všechny body zadání. Jako vhodné rozšíření se nabízí výzkum se zajištěnými standardizovanými světelnými podmínkami pro fotodokumentaci. Vhodným navázáním může též být implementace algoritmu, který by z fotografií s různými úhly nasvícení obsahující ideálně zobrazené pouze části otisků složil snímek obsahující všechny zachycené informace.

Literatura

- [1] ASHBAUGH, D. R. *Quantitative-qualitative friction ridge analysis: An introduction to basic and advanced ridgeology*. 1. vyd. CRC PRESS, 1999. 248 s. ISBN 9780367778736.
- [2] BARTUNEK, J. Minutiae Extraction from Fingerprint with Neural Network and Minutiae based Fingerprint Verification. *Research Gate* [online]. 1. vyd. Květen 2022, č. 1, s. 64, [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/269801825_Minutiae_Extraction_Based_on_Propriety_of_Curvature.
- [3] CADD, S., LI, B., BEVERIDGE, P., O'HARE, W. a ISLAM, M. Age Determination of Blood-Stained Fingerprints Using Visible Wavelength Reflectance Hyperspectral Imaging. *Journal of Imaging*. 1. vyd. Listopad 2018, sv. 4, č. 1. DOI: 10.3390/jimaging4120141.
- [4] CHMELÍK, J. *Rukověť kriminalistiky*. 1. vyd. Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2005. 536 s. ISBN 80-86898-36-9.
- [5] COWLITZCOUNTRY. *Fingerprints*. Government Websites, 2022 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.co.cowlitz.wa.us/994/Fingerprints>.
- [6] DRAHANSKÝ, M., ORSÁG, F., DOLEŽEL, M. a AL. et. *Biometrie*. 1. vydání. Computer Press, s.r.o, 2011. 294 s. ISBN 978-80-254-8979-6. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/research/publication/9468>.
- [7] DRAHANSKÝ, M. *Moderní biometrické systémy založené na více charakteristikách a jejich vlastnosti*. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIMUM, 2016. 44 s. ISBN 978-80-214-5451-4.
- [8] DRAHANSKÝ, M. *Hand-based biometrics: methods and technology*. 1. vyd. The Institution of Engineering and Technology, 2018. 448 s. IET book series in advanced biometrics. ISBN 978-1-78561-224-4.
- [9] GERMAN, E. *The History of Fingerprints*. OnIn Internet Services, 2022 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://onin.com/fp/fphistory.html>.
- [10] GIROD, A., RAMOTOWSKI, R. a WEYERMANN, C. Composition of fingermark residue: A qualitative and quantitative review. *Forensic Science International*. 1. vyd. 2012, sv. 223, č. 1, s. 10–24, [cit. 2022-02-26]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.05.018>. ISSN 0379-0738. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379073812002666>.
- [11] INNOVATRICS. *IDKit SDK v8.0.1.0*. 1. vyd. 2020. 191 s.

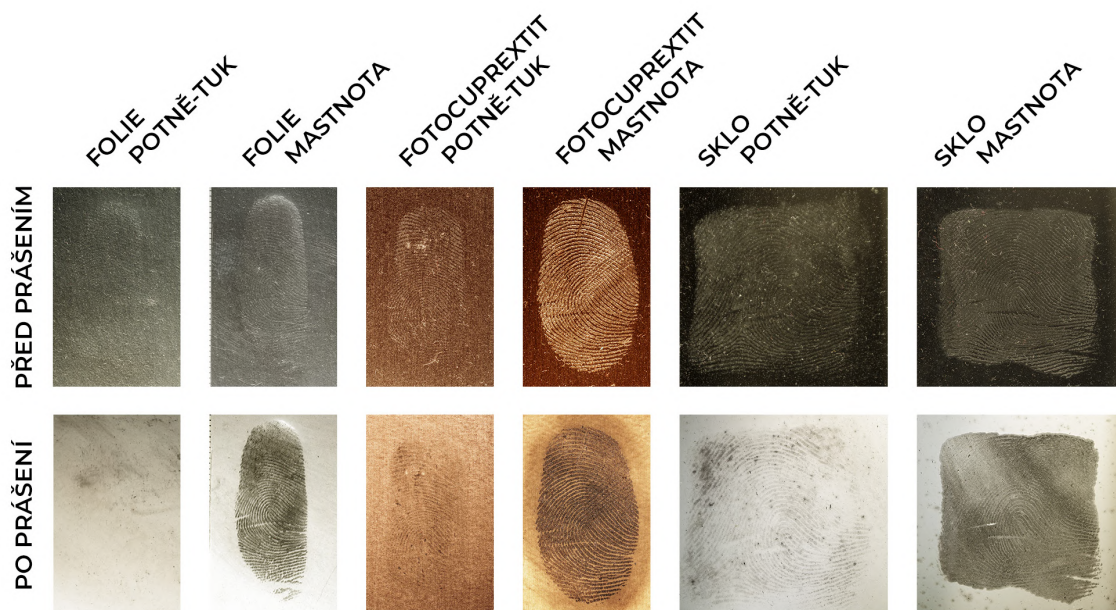
- [12] INNOVATRICS. *Fingerprint technology - innovatrics - how it works* [online]. Innovatrics, 2021 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.innovatrics.com/fingerprint-technology/>.
- [13] JŠ. *Daktyloskopické stopy* [online]. 2008 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: http://krimi-spk.web.cz/02_exper/expertiz/02a_dakt/02a_stopy.htm.
- [14] KO, K. *User's Guide to NIST Biometric Image Software (NBIS)*. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2007 [cit. 2022-02-12]. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7392>.
- [15] KRASSOWSKI, K. Challenges of dating of fingerprints and bloodstains. *Journal of Modern Science*. 1. vyd. 2018, sv. 38, č. 3, s. 209–219, [cit. 2022-03s-20]. DOI: 10.13166/jms/99212. ISSN 1734-2031. Dostupné z: <https://doi.org/10.13166/jms/99212>.
- [16] KÜCKEN, M. a NEWELL, A. C. Fingerprint formation. *Journal of theoretical biology* [online]. 1. vyd. 2005, č. 1, [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15833314/>.
- [17] LI, S. Z. a JAIN, A., ed. *Encyclopedia of biometrics*. 1. vyd. Springer, 2009 [cit. 2022-01-20]. 1466 s. ISBN 978-0-387-73002-8.
- [18] MALTONI, D., MAIO, D., JAIN, A. K. a PRABHAKAR, S. *Handbook of Fingerprint Recognition*. 2. vyd. Springer, 2009. 506 s. ISBN 978-1-84882-253-5.
- [19] MURAMOTO, S. a SISCO, E. Strategies for Potential Age Dating of Fingerprints through the Diffusion of Sebum Molecules on a Nonporous Surface Analyzed Using Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*. 1. vyd. 2015, sv. 87, č. 16, s. 8035–8038, [cit. 2022-02-21]. DOI: 10.1021/acs.analchem.5b02018. PMID: 26185934. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b02018>.
- [20] NEUROTECHNOLOGY. *MegaMatcher 12.3, VeriFinger 12.3, VeriLook 12.3, VeriEye 12.3 and VeriSpeak 12.3 SDK: Developer's Guide*. 1. vyd. 2022. 2865 s. Dostupné z: https://download.neurotechnology.com/Neurotec_Biometric_SDK_Documentation.pdf.
- [21] NEUROTECHNOLOGY. *VeriFinger fingerprint recognition technology*. 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://neurotechnology.com/>.
- [22] NIST. *About NIST* [online]. 2022 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/about-nist>.
- [23] OPENCV. *OpenCV: Histograms*. 2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.x/d5/daf/tutorial_py_histogram_equalization.html.
- [24] PLOTLY. *Dash Documentation & User Guide*. 2021 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://dash.plotly.com/>.
- [25] PLOTLY. *Plotly Python Open Source Graphing Library*. 2022 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://plotly.com/python/>.

- [26] PČR. *Kriminalistický ústav Policie České republiky* [online]. 2021 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.policie.cz/kriminalisticky-ustav-praha-expertizni-obory.aspx>.
- [27] PČR. *Ohledání místa činu*. Policie České republiky, 2021 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.policie.cz/clanek/ohledani-mista-cinu.aspx>.
- [28] R., K., HUTCHINS, L. A., GRAY, M. L. a BARNES, J. G. *The fingerprint sourcebook*. 1. vyd. U.S. Department of Justice, 2012. 422 s. ISBN 1477664769.
- [29] RADOVÁ, V. *Rozpoznávání lidí podle otisků prstů a geometrie ruky* [online]. Západočeská univerzita v Plzni katedra kybernetiky, 2021 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://www.kky.zcu.cz/uploads/courses/bbs/BBS_4_ruka.pdf.
- [30] RAK, R., MATYÁŠ, V. a ŘÍHA, Z. *Biometrie a identita člověka ve forezních a komerčních aplikacích*. 1. vyd. Grada, 2008. 664 s. ISBN 978-80-247-2365-5.
- [31] ROBINSON, E. M. *Crime scene photography*. 2. vyd. Academic Press, 2010. 713 s. ISBN 978-0-12-375728-9.
- [32] SHANIT. *NFIQ-1/2 Observations, Initial results* [online]. Shanit Ltd., 2021 [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: https://eab.org/files/events/06_Mickey_Cohen_SHANIT_210615_v210607.pdf.
- [33] STRAUS, J. *Kriminalistická technika*. 3., rozš. vyd. Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2012. 448 s. ISBN 978-80-7380-409-1.
- [34] STRAUS, J. a PORADA, V. *Kriminalistická daktyloskopie*. 1. vyd. Vydavatelství PA ČR, 2005. 285 s. ISBN 80-7251-192-0.
- [35] SVOBODA, I. *Kriminalistika*. 1. vyd. Key Publishing s.r.o., 2016. 378 s. ISBN 978-80-7418-259-4.
- [36] TABASSI, E., OLSEN, M., BAUSINGER, O., BUSCH, C., FIGLARZ, A. et al. *NFIQ 2: NIST Fingerprint Image Quality* [online]. NIST U. S. Department of Commerce, 2021 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8382>.
- [37] TABASSI, E., WILSON, C. L. a WATSON, C. I. *Fingerprint Image Quality*. NIST Fingerprint Image Quality, 2004 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=905710.
- [38] VAŽAN, R. *ISO/IEC 19794-2:2011/Cor.1:2012 Summary - Fingerprint template formats*. 2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://templates.machinezoo.com/iso-19794-2-2011#minutia>.
- [39] VICHLENDÁ, M. *KRIMINALISTIKA* [online]. 1. vyd. Střední odborná škola ochrany osob a majetku s.r.o., 2011 [cit. 2022-01-20]. 425 s. Dostupné z: <https://www.sosoom-zlin.cz/media/skripta/kriminalistika.pdf>.
- [40] WEBER, A. R. a LEDNEV, I. K. Age Estimation of Bloodstained Fingermarks. In: DE ALCARAZ FOSSOUL, J., ed. *Technologies for Fingerprint Age Estimations: A Step Forward*. Cham: Springer International Publishing, 2021, s. 323–357 [cit. 2022-01-20]. DOI: 10.1007/978-3-030-69337-4_12. ISBN 978-3-030-69337-4. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69337-4_12.

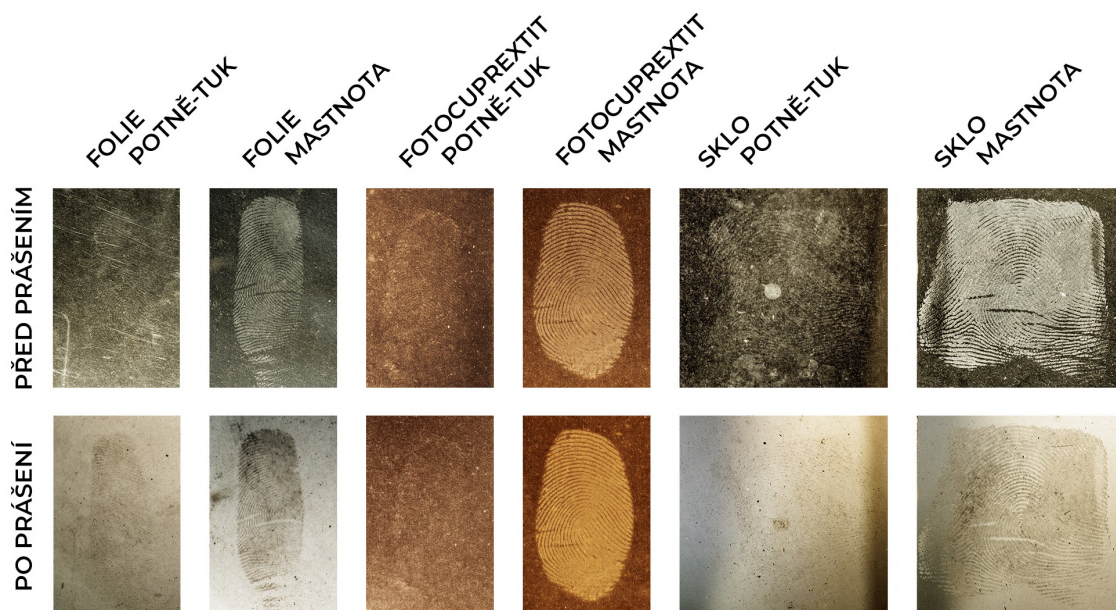
Příloha A

Srovnání vzorků před a po prášení odebraných pět měsíců od vzniku

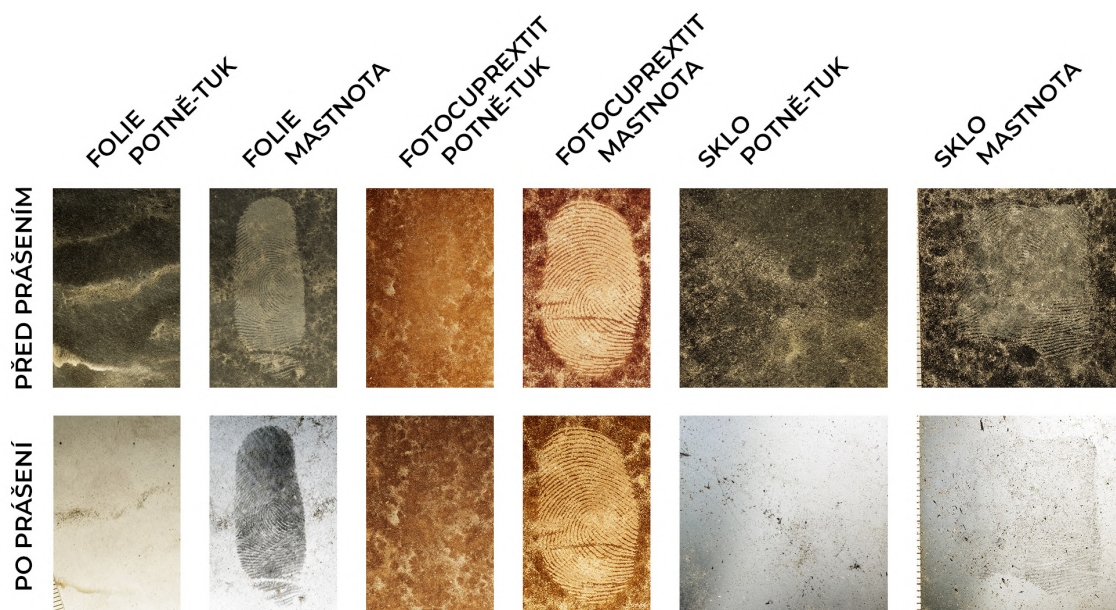
Na obrázcích v této příloze lze vidět rozdíly mezi vzorky ze všech zkoumaných prostředí. Obsah tohoto dokumentu je bohužel limitován, proto jsou porovnání sad z celého průběhu k dispozici pouze na datovém serveru STRaDe@FIT.



Obrázek A.1: Porovnání vzorků na neporézních materiálech z interiéru.



Obrázek A.2: Porovnání vzorků na neporézních materiálech z exteriéru.



Obrázek A.3: Porovnání vzorků na neporézních materiálech z prašného částečně krytého exteriéru.

Příloha B

Výsledky analýzy fotografovaných sad na skle ze všech prostředí

Pro ukázkou byly vybrány sady potně-tukových (obrázky [B.1](#), [B.2](#), [B.3](#)), mastných (obrázky [B.4](#), [B.5](#), [B.6](#)) a krevních (obrázky [B.8](#), [B.9](#), [B.10](#)) stop na skle, jelikož právě mezi nimi lze nejlépe pozorovat všechny rozdíly. Ostatní sady (včetně těchto samozřejmě) jsou přidány k programovému řešení a lze je podrobně zkoumat zde. Celé datasety jsou též dostupné v databázi výzkumné skupiny STRaDe. Ke každému z vybraných datasetů náleží tabulka shrnující výsledné NFIQ2 skóre kvality, Innovatrics skóre kvality, MINDTCT průměrnou kvalitu a FingerJetFX OSE průměrnou kvalitu vzorku. Dále je ke každému setu porovnání výstupů v grafu.

Datum	NFIQ2	Innovatrics	MINDTCT	FingerJetFX OSE
2021-10-26	22	71	47,0	64,8
2021-11-09	17	14	24,3	58,0
2021-11-16	24	1	22,0	59,6
2021-11-30	0	1	17,5	0,0
2021-12-06	0	1	20,3	0,0
2021-12-13	0	1	15,4	0,0
2021-12-20	0	11	26,2	0,0
2021-12-29	0	11	26,2	0,0
2022-01-03	16	1	18,4	0,0
2022-01-14	0	5	22,6	0,0
2022-01-24	20	1	19,4	57,2
2022-01-31	17	4	23,4	0,0
2022-02-09	23	1	23,8	57,0
2022-02-22	19	1	23,0	56,2
2022-03-02	25	4	28,7	58,4
2022-03-10	16	9	26,3	62,9
2022-03-15	24	3	26,6	58,8
2022-03-23	20	2	26,4	58,5

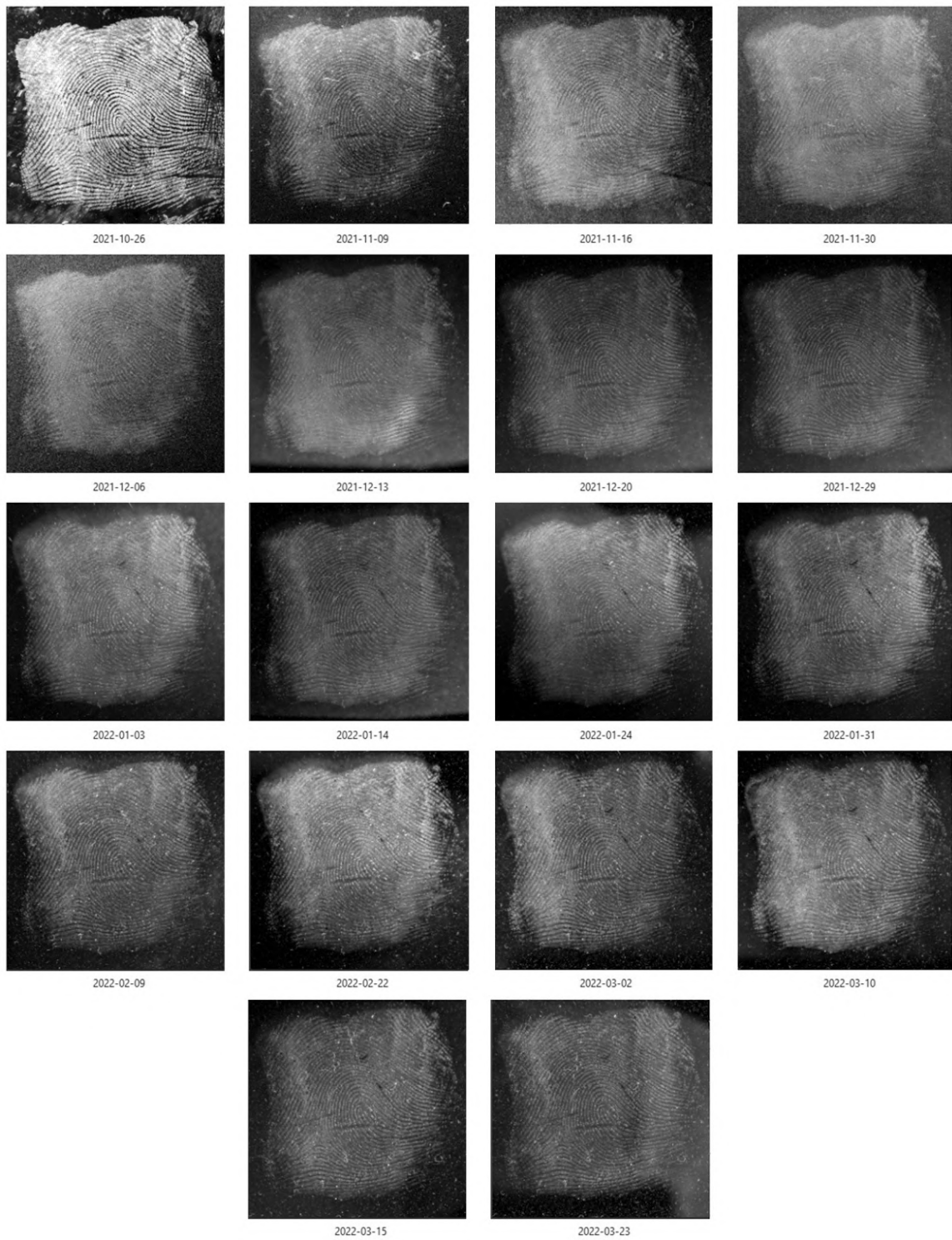
Tabulka B.1: Výsledky analýzy fotografované potně-tukové stopy na skle uchovávané v interiéru z obrázkem [B.1](#).

Datum	NFIQ2	Innovatrics	MINDTCT	FingerJetFX OSE
2021-10-26	31	40	28,6	64,5
2021-11-09	18	1	21,4	56,4
2021-11-16	16	1	20,3	54,7
2021-11-30	20	1	19,2	52,4
2021-12-06	19	1	17,1	51,0
2021-12-13	0	1	10,2	0,0
2021-12-20	0	1	16,1	0,0
2021-12-29	0	1	10,2	0,0
2022-01-03	0	1	16,6	0,0
2022-01-14	0	1	15,1	0,0
2022-01-24	16	1	18,7	55,3
2022-01-31	0	1	16,4	0,0
2022-02-09	17	1	16,0	60,2
2022-02-22	20	1	18,1	60,4
2022-03-02	15	1	17,0	53,7
2022-03-10	17	1	15,1	0,0
2022-03-15	0	1	17,1	57,8
2022-03-23	0	1	15,1	0,0

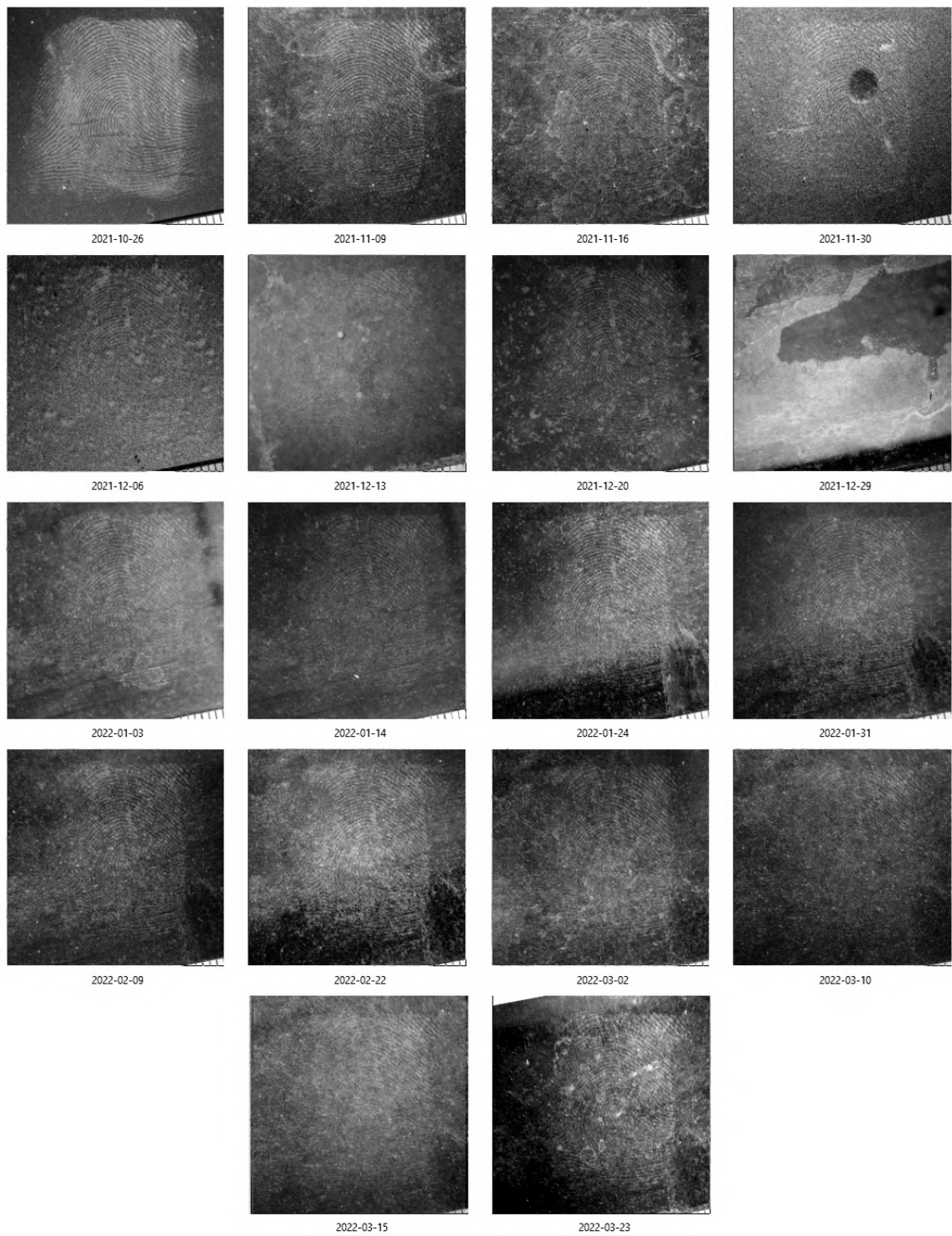
Tabulka B.2: Výsledky analýzy fotografované potně-tukové stopy na skle uchovávané v exteriéru B.2.

Datum	NFIQ2	Innovatrics	MINDTCT	FingerJetFX OSE
2021-10-26	23	21	32,3	60,5
2021-11-09	17	1	15,8	59,2
2021-11-16	19	1	18,0	51,2
2021-11-30	0	1	14,5	0,0
2021-12-06	0	1	14,9	0,0
2021-12-13	0	1	12,9	0,0
2021-12-20	0	1	12,0	0,0
2021-12-29	0	1	12,5	0,0
2022-01-03	0	1	12,4	0,0
2022-01-14	0	1	10,6	0,0
2022-01-24	0	1	12,1	0,0
2022-01-31	0	1	14,0	0,0
2022-02-09	0	1	11,4	0,0
2022-02-22	0	1	10,4	0,0
2022-03-02	0	1	13,3	0,0
2022-03-10	0	1	9,7	0,0
2022-03-15	0	1	12,6	0,0
2022-03-23	0	1	9,2	0,0

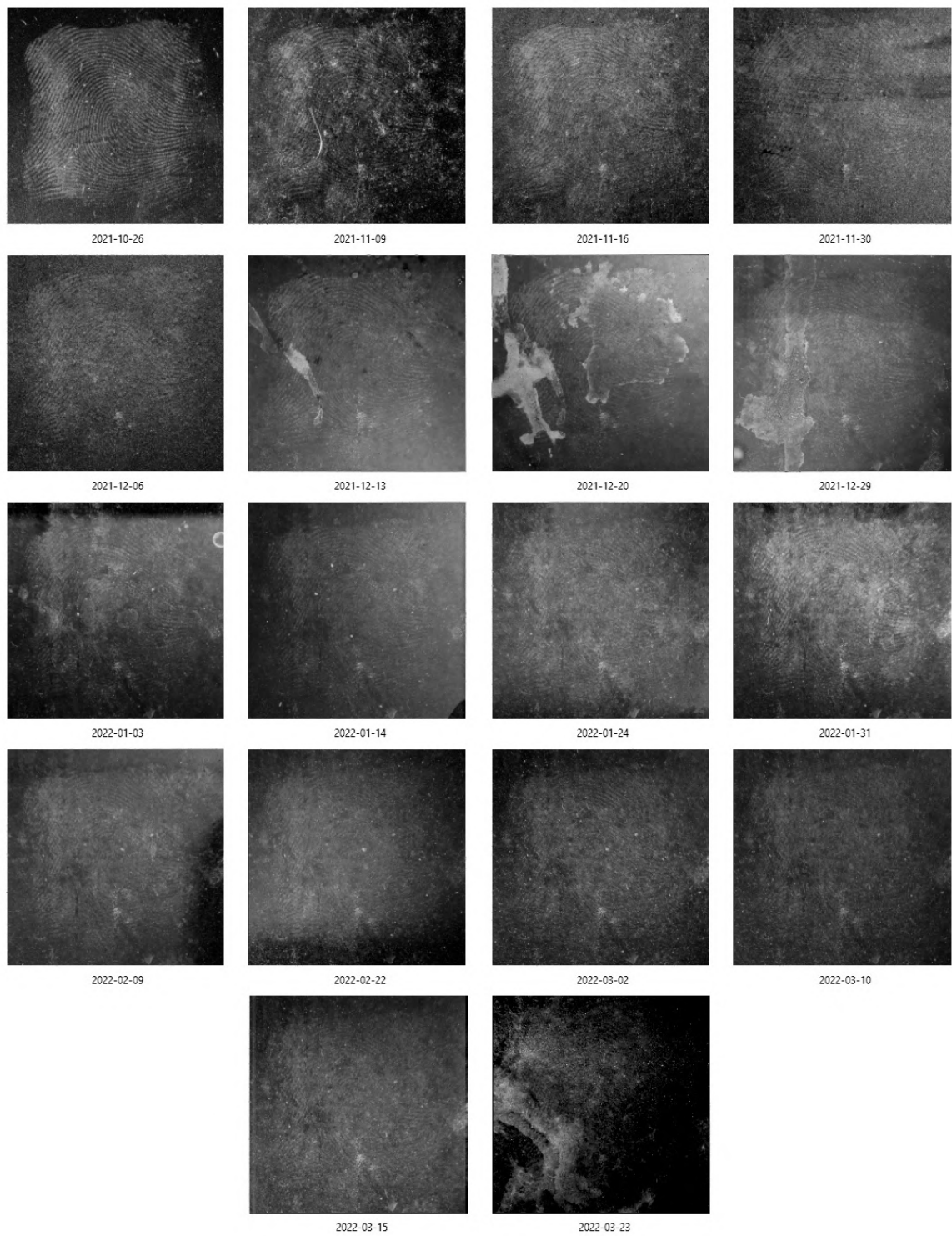
Tabulka B.3: Výsledky analýzy fotografované potně-tukové stopy na skle uchovávané v prašném, částečně krytém exteriéru z obrázku B.3.



Obrázek B.1: Fotografovaná potně-tuková stopa na skle uchovávaná v interiéru.



Obrázek B.2: Fotografovaná potně-tuková stopa na skle uchovávaná v exteriéru.



Obrázek B.3: Fotografovaná potně-tuková stopa na skle uchovávaná v prašném, částečně krytém exteriéru.

Datum	NFIQ2	Innovatrics	MINDTCT	FingerJetFX OSE
2021-10-26	23	1	18,7	54,7
2021-11-09	26	1	17,5	55,4
2021-11-16	28	18	30,7	62,7
2021-11-30	32	22	30,6	64,3
2021-12-06	47	46	31,1	69,4
2021-12-13	36	59	48,0	71,0
2021-12-20	33	59	50,3	75,6
2021-12-29	42	56	52,9	72,1
2022-01-03	24	48	46,0	69,8
2022-01-14	32	54	46,6	69,6
2022-01-24	23	49	42,5	72,2
2022-01-31	36	58	45,5	71,0
2022-02-09	38	52	46,0	71,6
2022-02-22	34	58	46,6	69,7
2022-03-02	20	44	43,1	66,2
2022-03-10	33	39	40,1	66,1
2022-03-15	28	36	39,6	65,5
2022-03-23	22	38	38,1	65,0

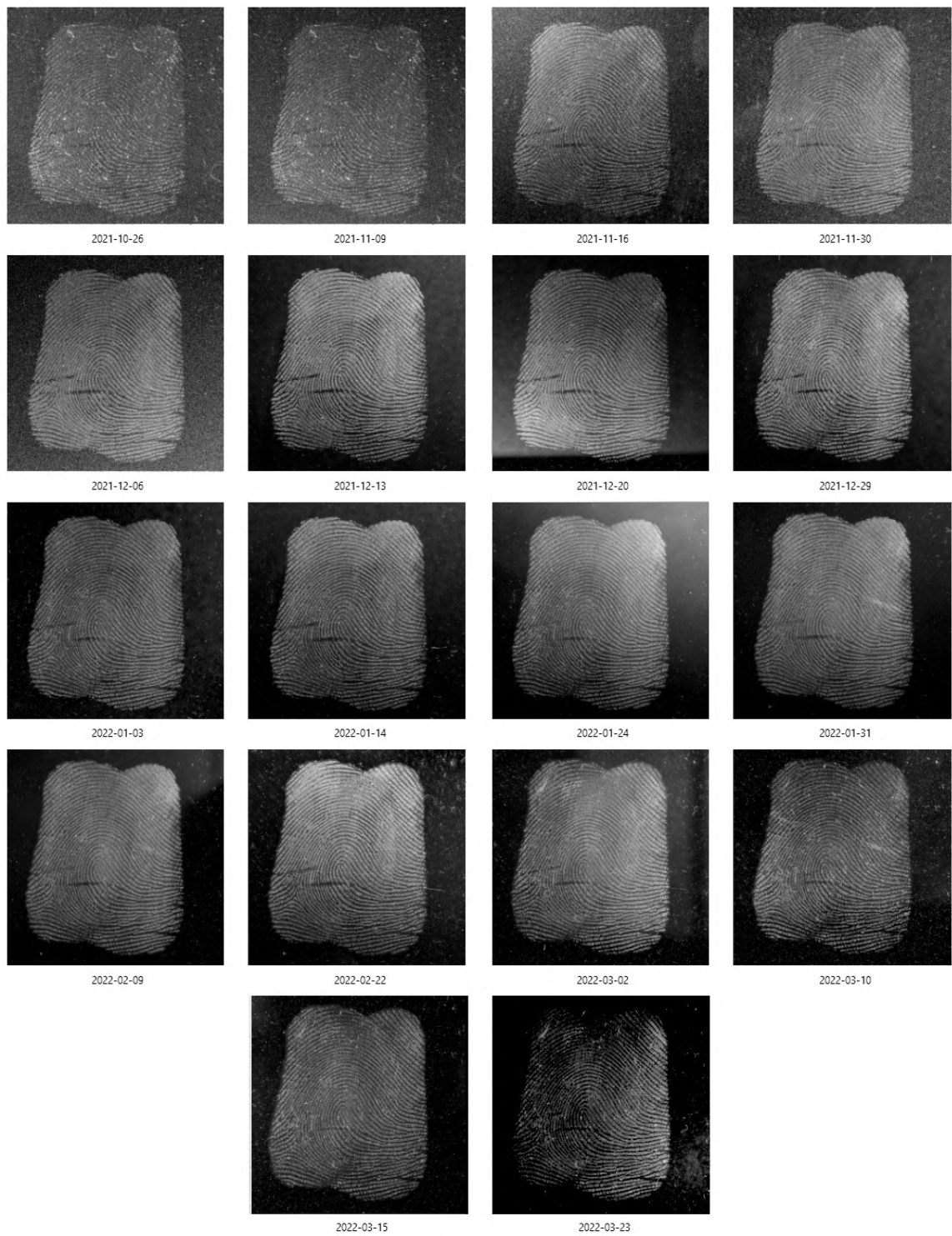
Tabulka B.4: Výsledky analýzy fotografované mastné stopy na skle uchovávané v interiéru z obrázku B.4.

Datum	NFIQ2	Innovatrics	MINDTCT	FingerJetFX OSE
2021-10-26	31	30	23,4	60,8
2021-11-09	42	49	39,5	67,3
2021-11-16	22	43	33,4	65,5
2021-11-30	29	45	27,8	64,0
2021-12-06	22	40	33,4	60,9
2021-12-13	17	40	34,1	64,9
2021-12-20	28	44	37,6	67,6
2021-12-29	13	15	22,6	58,8
2022-01-03	29	43	38,1	64,8
2022-01-14	30	43	35,2	64,1
2022-01-24	23	40	31,8	61,2
2022-01-31	27	43	39,4	65,8
2022-02-09	26	42	35,7	68,3
2022-02-22	27	45	37,2	67,0
2022-03-02	31	46	44,0	65,8
2022-03-10	29	40	28,2	62,9
2022-03-15	23	39	27,4	62,3
2022-03-23	22	41	30,9	62,6

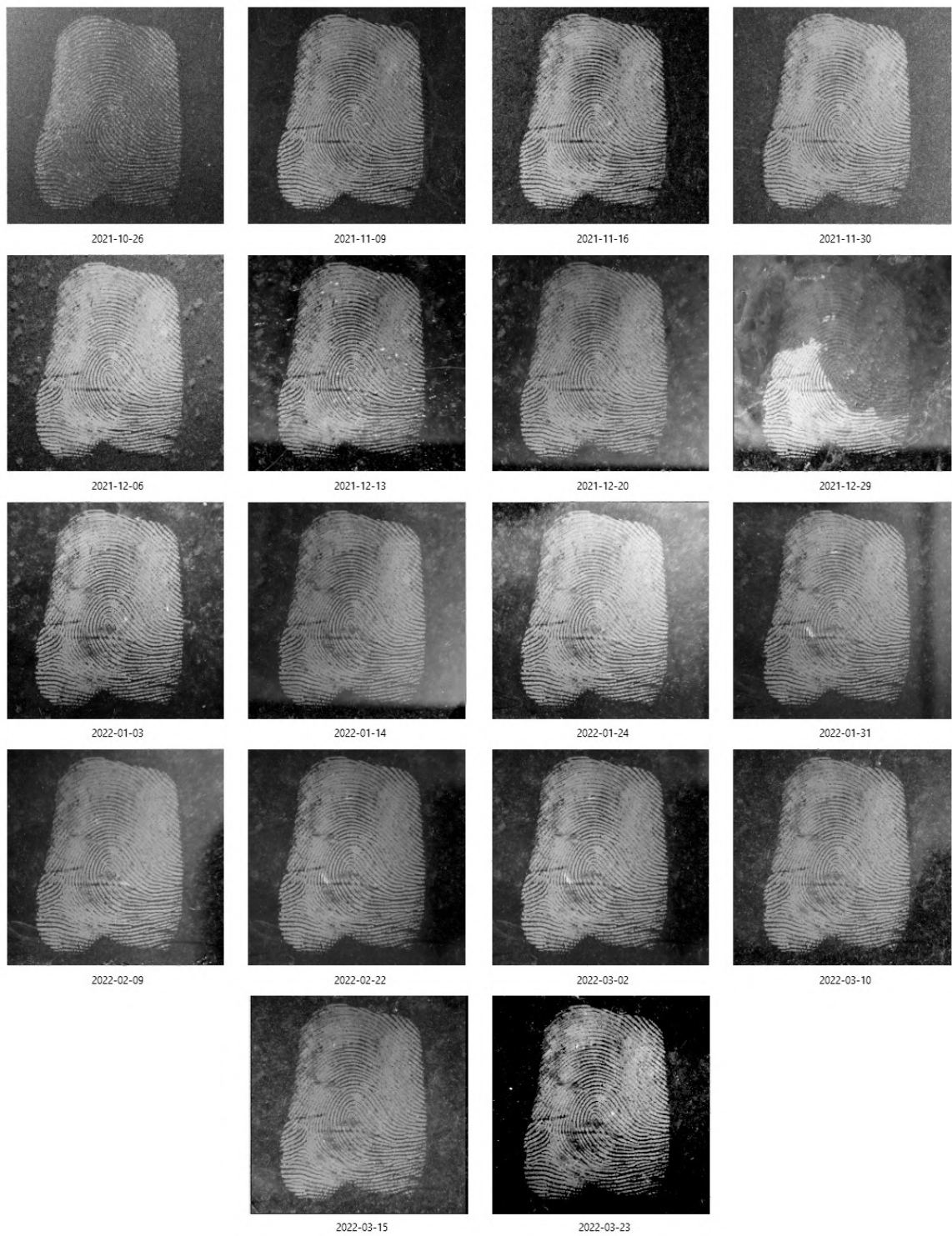
Tabulka B.5: Výsledky analýzy fotografované mastné stopy na skle uchovávané v exteriéru z obrázku B.5.

Datum	NFIQ2	Innovatrics	MINDTCT	FingerJetFX OSE
2021-10-26	18	32	44,6	62,9
2021-11-09	19	31	30,7	59,9
2021-11-16	12	6	26,3	62,8
2021-11-30	12	22	25,6	62,9
2021-12-06	18	5	19,9	0,0
2021-12-13	12	16	19,0	55,4
2021-12-20	11	13	23,3	61,1
2021-12-29	14	17	27,2	58,8
2022-01-03	7	19	25,5	60,2
2022-01-14	16	24	25,6	60,6
2022-01-24	7	21	21,6	59,6
2022-01-31	16	18	22,4	58,9
2022-02-09	9	17	23,8	59,5
2022-02-22	21	7	19,1	61,0
2022-03-02	18	6	21,7	59,1
2022-03-10	0	6	20,1	54,9
2022-03-15	16	3	21,9	59,0
2022-03-23	16	3	21,9	59,0

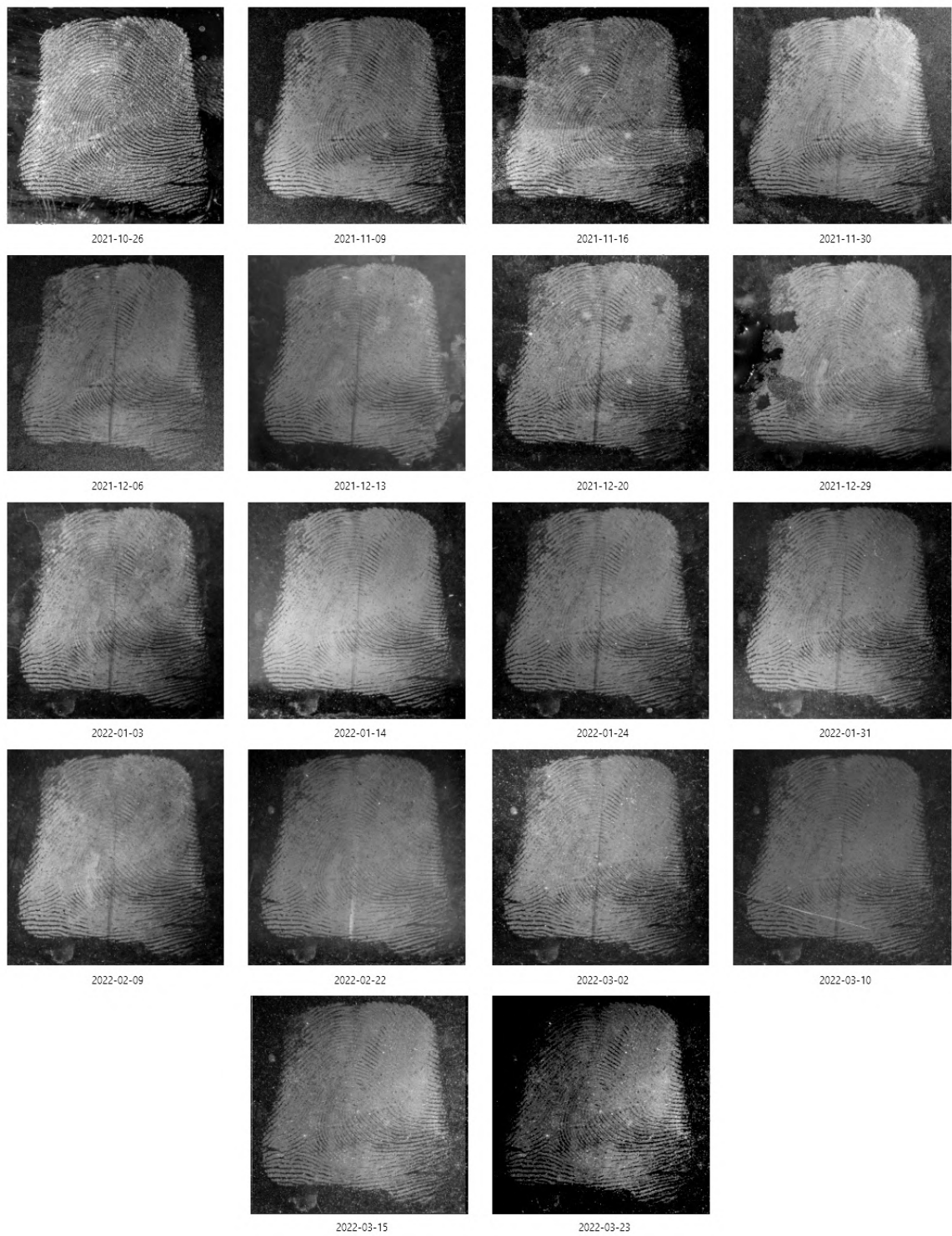
Tabulka B.6: Výsledky analýzy fotografované mastné stopy na skle uchovávané v prašném, částečně krytém exteriéru z obrázku B.5.



Obrázek B.4: Fotografovaná mastná stopa na skle uchovávaná v interiéru.

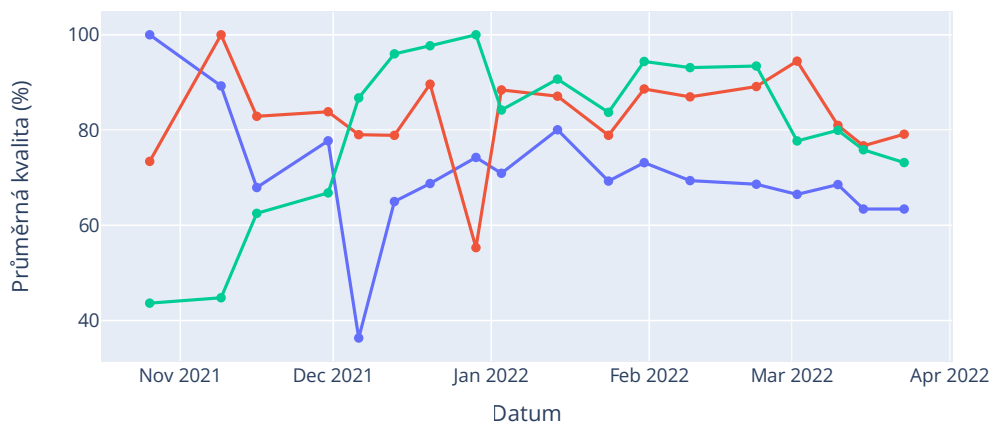


Obrázek B.5: Mastné stopy na skle uchovávané v exteriéru.

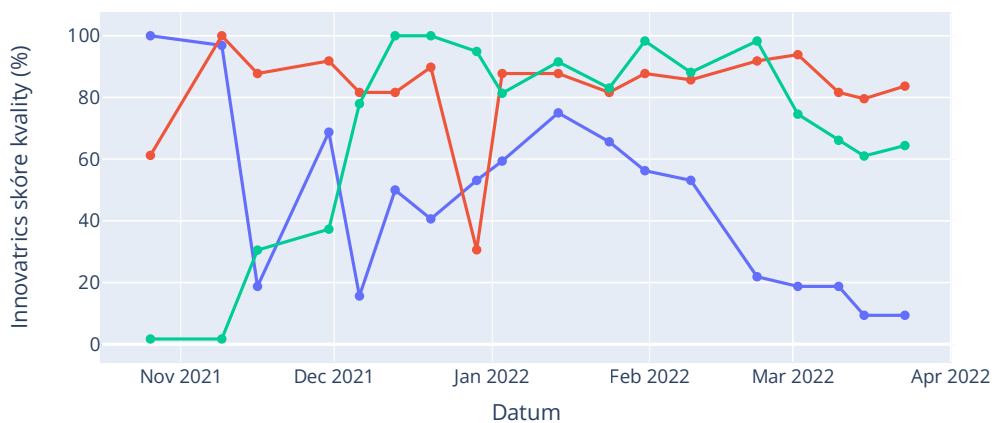


Obrázek B.6: Fotografovaná mastná stopa na skle uchovávaná v prašném, částečně krytém exteriéru.

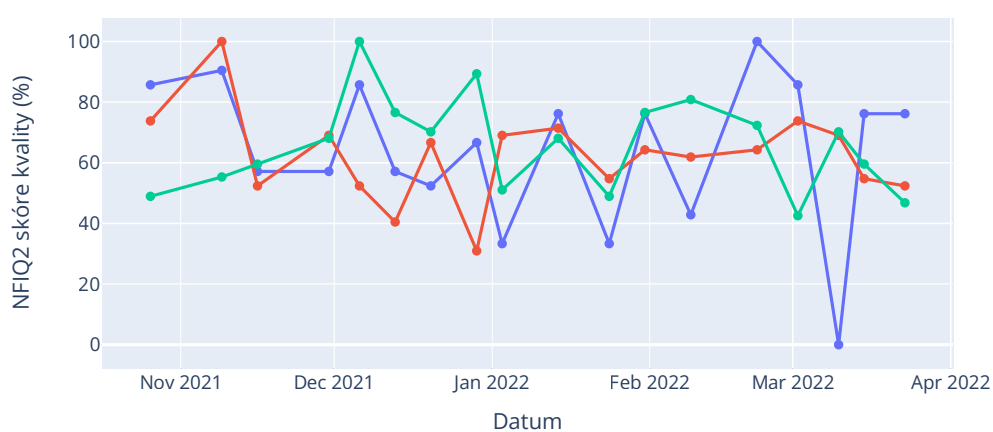
Mastné vzorky na skle – Průměrné skóre kvality



Mastné vzorky na skle – Innovatrics skóre kvality



Mastné vzorky na skle – NFIQ2 skóre kvality



Popis

- Exteriér (prašný, částečně krytý): Mastný otisk na skle
- Exteriér: Mastný otisk na skle
- Interiér: Mastný otisk na skle

Obrázek B.7: Porovnání analýz mastných otisků na skle.

Datum	NFIQ2	Innovatrics	MINDTCT	FingerJetFX OSE
2021-10-26	43	7	18,7	58,2
2021-11-09	25	1	15,0	58,2
2021-11-16	36	1	15,9	59,2
2021-11-30	30	1	16,6	60,3
2021-12-06	27	1	18,0	60,2
2021-12-13	26	1	15,3	46,6
2021-12-20	27	1	17,5	50,8
2021-12-29	0	1	14,7	0,0
2022-01-03	0	1	15,2	0,0
2022-01-14	28	1	14,8	45,7
2022-01-24	24	1	18,8	54,7
2022-01-31	26	1	15,4	48,1
2022-02-09	0	1	14,8	0,0
2022-02-22	0	1	15,0	0,0
2022-03-02	0	1	14,9	0,0
2022-03-10	0	1	13,1	0,0
2022-03-15	26	1	13,7	53,9
2022-03-23	32	1	14,3	50,2

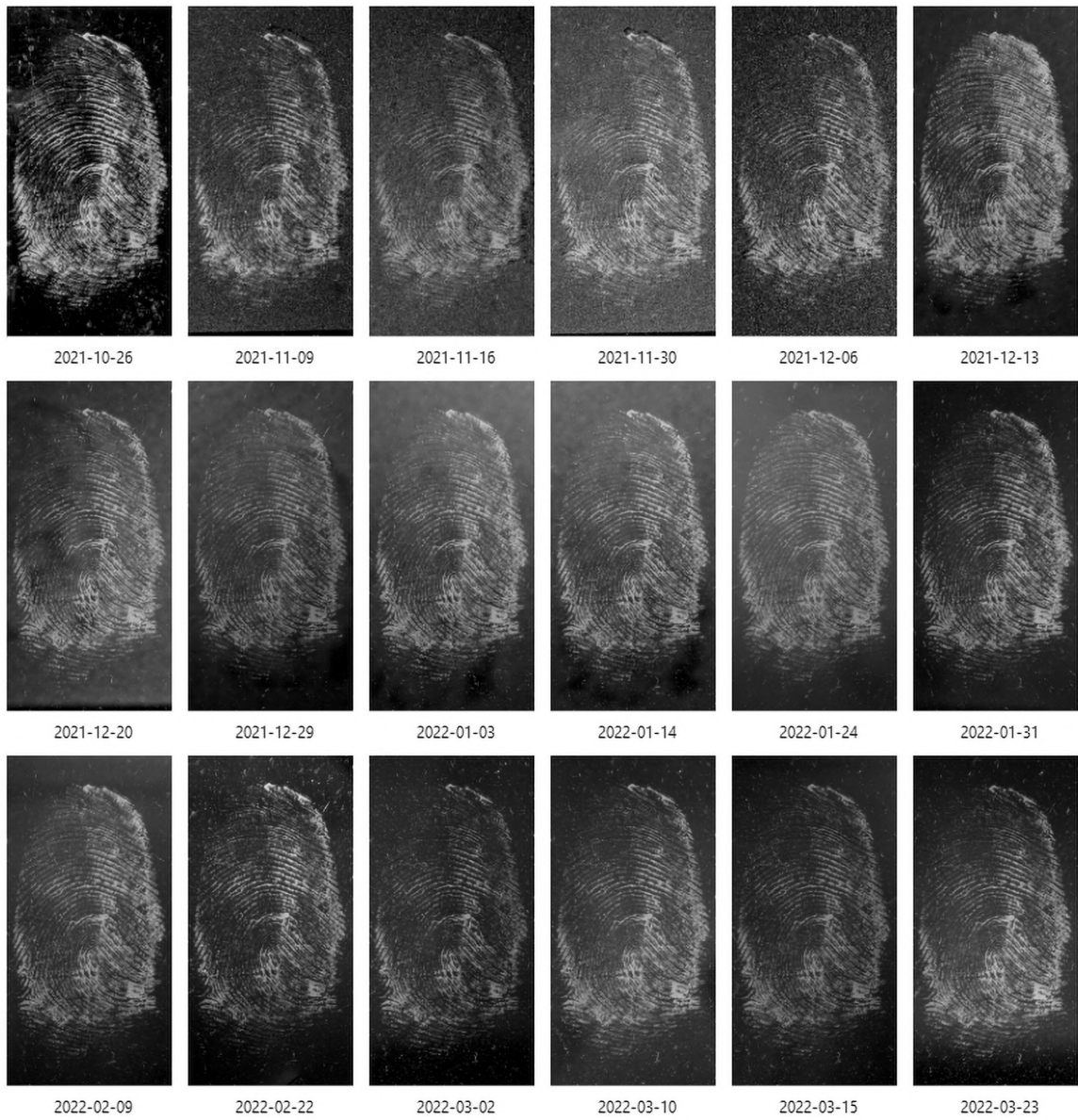
Tabulka B.7: Výsledky analýzy fotografované krevní stopy na skle uchovávané v interiéru z obrázku B.8.

Datum	NFIQ2	Innovatrics	MINDTCT	FingerJetFX OSE
2021-10-26	37	8	33,9	51,6
2021-11-09	32	1	16,3	56,9
2021-11-16	35	1	15,1	57,6
2021-11-30	36	1	18,3	57,4
2021-12-06	26	1	19,8	57,7
2021-12-13	29	1	14,7	56,9
2021-12-20	16	1	15,5	57,6
2021-12-29	0	1	11,5	0,0
2022-01-03	27	1	14,0	48,1
2022-01-14	0	1	12,3	0,0
2022-01-24	0	1	12,7	0,0
2022-01-31	0	1	12,2	0,0
2022-02-09	21	1	14,8	55,7
2022-02-22	25	1	14,6	49,9
2022-03-02	31	1	15,0	49,4
2022-03-10	23	1	14,1	49,7
2022-03-15	26	1	14,6	55,4
2022-03-23	27	1	12,5	49,4

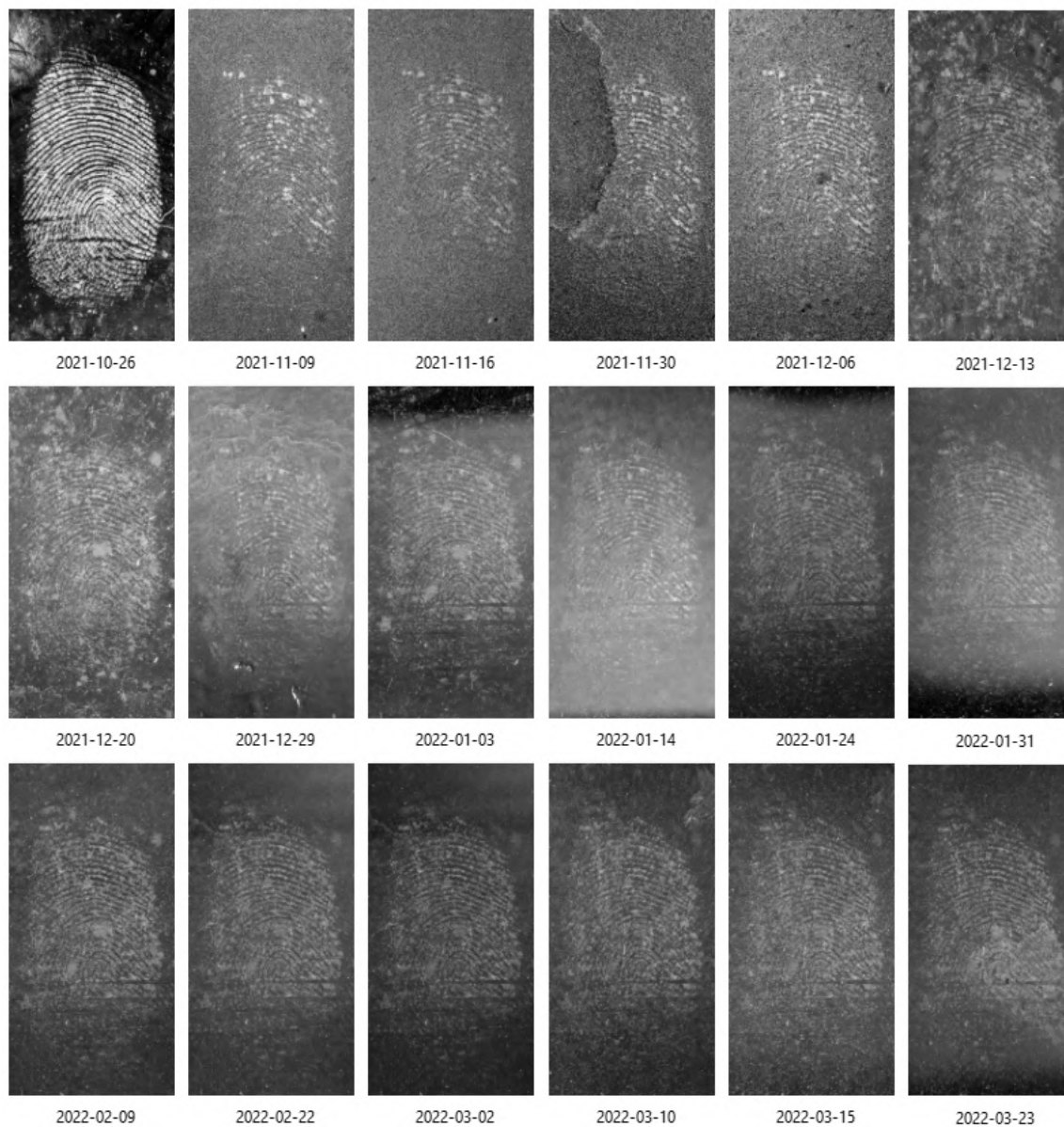
Tabulka B.8: Výsledky analýzy fotografované krevní stopy na skle uchovávané v exteriéru z obrázku B.9.

Datum	NFIQ2	Innovatrics	MINDTCT	FingerJetFX OSE
2021-10-26	43	7	18,7	58,2
2021-11-09	25	1	15,0	58,2
2021-11-16	36	1	15,9	59,2
2021-11-30	30	1	16,6	60,3
2021-12-06	27	1	18,0	60,2
2021-12-13	26	1	15,3	46,6
2021-12-20	27	1	17,5	50,8
2021-12-29	0	1	14,7	0,0
2022-01-03	0	1	15,2	0,0
2022-01-14	28	1	14,8	45,7
2022-01-24	24	1	18,8	54,7
2022-01-31	26	1	15,4	48,1
2022-02-09	0	1	14,8	0,0
2022-02-22	0	1	15,0	0,0
2022-03-02	0	1	14,9	0,0
2022-03-10	0	1	13,1	0,0
2022-03-15	26	1	13,7	53,9
2022-03-23	32	1	14,3	50,2

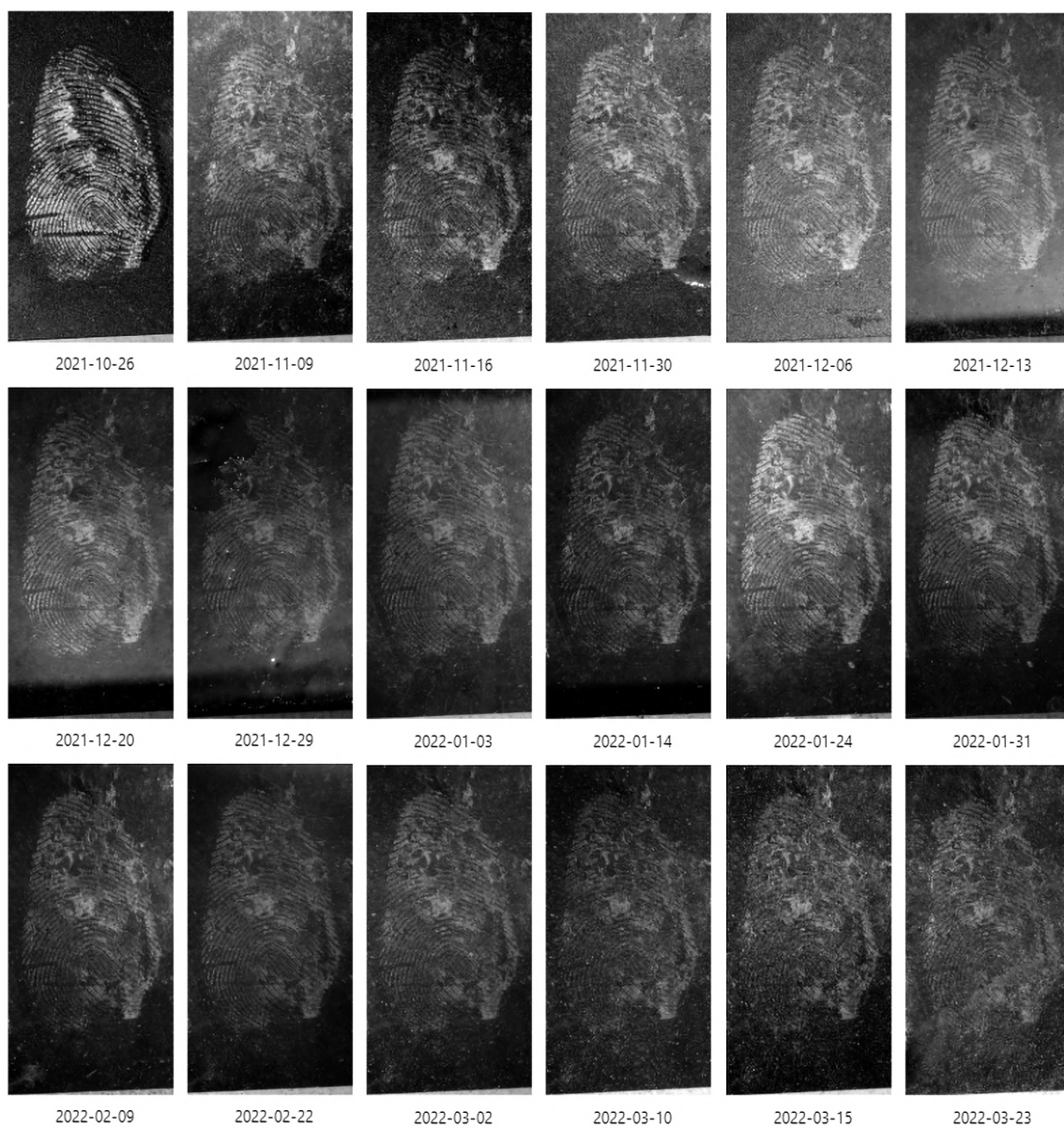
Tabulka B.9: Výsledky analýzy fotografované krevní stopy na skle uchovávané v prašném, částečně krytém exteriéru z obrázku B.9.



Obrázek B.8: Fotografovaná krevní stopa na skle uchovávaná v interiéru.

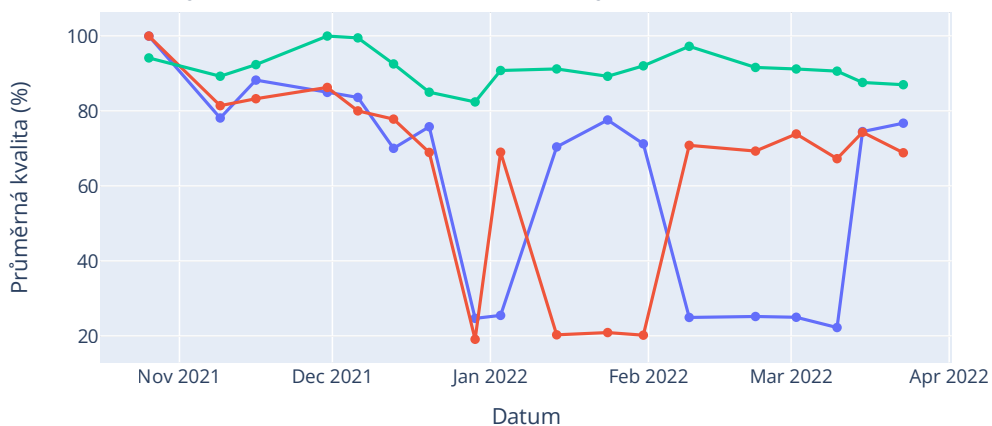


Obrázek B.9: Fotografovaná krevní stopa na skle uchovávaná v exteriéru.

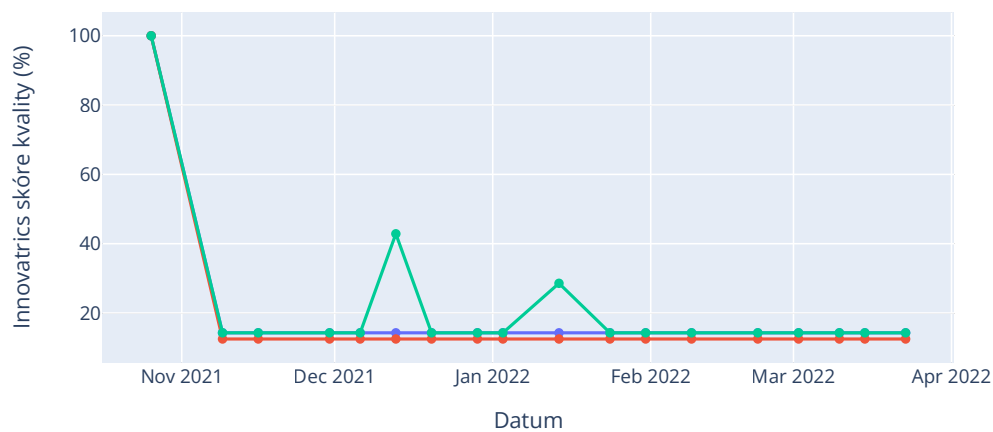


Obrázek B.10: Fotografovaná krevní stopa na skle uchovávaná v prašném, částečně krytém exteriéru.

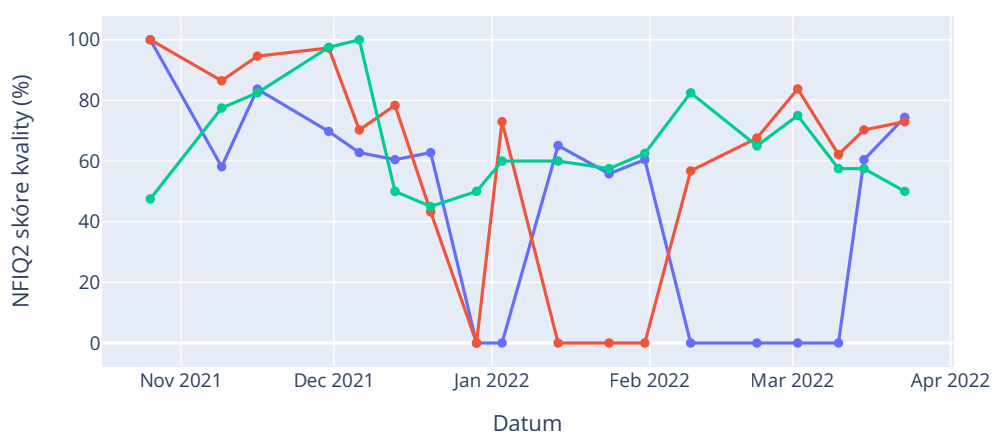
Krvavé vzorky na skle – Průměrné skóre kvality



Krvavé vzorky na skle – Innovatrics skóre kvality



Krvavé vzorky na skle – NFIQ2 skóre kvality



Popis

- Exteriér (prašný, částečně krytý): Krvavý otisk na skle
- Exteriér: Krvavý otisk na skle
- Interiér: Krvavý otisk na skle

Obrázek B.11: Porovnání analýz krvavých otisků na skle.

Příloha C

FiQSA Manuál

Pro správné fungování je nutné mít na počítači Python verze 3.10, program je určen pro platformu Windows. Pro správné fungování je nutné mít zajištěnou licenci pro Innovatrics SDKit v8.0.1.0. Všechny potřebné knihovny a jejich verze jsou vypsány v souboru `requirements.txt`. Řešení se nachází ve složce `src`, odtud je nutné jej spouštět.

Řešení již obsahuje spustitelné soubory NFIQ2, Innovatrics, MINDTCT i fjfx, ale je možné specifikovat vlastní cestu pomocí argumentů programu. V argumentech je nutné předat cestu k datasetům nebo excelovým souborům. Program předpokládá, že každý set obsahuje obrázky otisků s názvem dle data porřízení, pokud tomu tak není, lze nastavit pomocí parametru `-t`, `--transfer_names` získání tohoto data z metadat obrázku a převod na požadovaný formát. To je možné pouze v případě že obrázek tato metadata obsahuje. Jeli-žádoucí vykreslit markantní body detekované algoritmem Innovatrics, lze k tomu použít argument programu `-r`, `--render_minutiae`. Obrázky budou následně uloženy ve složce `output/images`. Výsledkem analýzy vzorků je sada excelových souborů, která bude uložena ve složce `output/tables`. Následně dojde ke spuštění Dash aplikace s interaktivními grafy porovnávající výsledky. Jsou-li k dispozici WeatherLogger data či data z ČHMI, lze jejich vyobrazení do grafů nastavit pomocí odpovídajících parametrů viz seznam parametrů. Pro správné fungování musí soubory obsahovat data v očekávaném formátu, který lze vidět na souborech ve složce `WeatherData`.

Pokud není analýza fotografií vzorků žádoucí, lze spustit analýzu z excelových souborů. Zde program předpokládá na vstupu složku se soubory pojmenovanými dle jejich obsahu jako dává program na výstupu:

Obsah	Název
Všechna data	df.xlsx
Potně-tukové vzorky	sweat_df.xlsx
Krevní vzorky	blood_df.xlsx
Mastné vzorky	grease_df.xlsx
Výstup NFIQ2	nfiq2_df.xlsx
Výstup Innovatrics	innovatrics_df.xlsx
Výstup fjfx	fingerjet_df.xlsx
Výstup mindtct	mindtct_df.xlsx

Tabulka C.1: Očekávané soubory pro analýzu ze souborů xlsx

Samozřejmě musí souhlasit také názvy sloupců všech souborů, formát je k nahlédnutí ve složce output/tables.

Přehled vstupních argumentů

```
Použití: python main.py [-h] [-d DATASETS_PATH] [-e EXTRACT_FROM_CSV]
[-m MINDTCT_PATH] [-f FINGERJET_PATH] [-n NFIQ2_PATH]
[-i INNOVATRICES_SCORES_PATH] [-r] [-t] [-wi WHEATHER_INTERIOR]
[-we WHEATHER_EXTERIOR] [-c CHMI_SET_PATH]
```

Fingerprint Qualities Statistics Assesment

Možnosti:

```
-h, --help          Zobrazit tuto nápovědu a ukončit
-d, --datasets_path Cesta ke složce obsahující sady vzorků
-e, --extract_from_excel
                    Extrakce a zobrazení dat z souborů formátu
                    excel v poskytnuté složce
-m, --mindtct_path  Cesta ke spustitelnému souboru MINDTCT
-f, --fingerjet_path Cesta ke spustitelnému souboru fjfx
-n, --nfiq2_path    Cesta ke spustitelnému souboru NFIQ2
-i, --innovatrices_scores_path
                    Cesta ke spustitelnému souboru Innovatrices
                    vracejícímu počet a kvalitu markantů v otisku
-r, --render_minutiae Uložit vyobrazení markantů z programu
                    Innovatrices na obrázcích otisků
-t, --transfer_names Přenést názvy obrázků na název dle data vzniku
-wi, --wheather_interior
                    Cesta ke složce se sadami WheatherLogger souborů
                    xls z interiéru
-we, --wheather_exterior
                    Cesta ke složce se sadami WheatherLogger souborů
                    xls z exteriéru
-c, --chmi_set_path Cesta ke složce se sadami souborů xlsx srážek
                    Českého Hydrometeorologického ústavu
```

Příklady použití

Analýza NIST-samples datasetů, uložení obrázků s vykreslenými markanty, spuštění Dash aplikace bez přehledu počasí:

```
python main.py -r -d '../datasets/NIST-samples'
```

Vykreslení dat z existujících .xlsx souborů ve složce output/tables v Dash aplikaci bez přehledu počasí:

```
python main.py -e '../output/tables'
```

Analýza vzniklých datasetů, spuštění Dash aplikace s přehledem počasí z přiložených složek se soubory:

```
python main.py -wi '../WeatherData/WheatherLogger/Interior' -we
'../WeatherData/WheatherLogger/Exterior' -c '../WeatherData/CHMI'
-d '../datasets/super-crop'
```

Vykreslení dat z existujících .xlsx souborů ve složce output/tables v Dash aplikaci s přehledem počasí:

```
python main.py -wi '../WeatherData/WheatherLogger/Interior' -we
'../WeatherData/WheatherLogger/Exterior' -c '../WeatherData/CHMI'
-e '../output/tables'
```

Výpis nápovědy:

```
python main.py -h
```

Příloha D

Obsah přiloženého DVD

- Elektronická verze tohoto textu ve formátu PDF.
- Spustitelný soubor a zdrojové kódy aplikace.
- Spustitelný soubor programu pro extrakci markantů a skóre kvality s využitím knihovny Innovatrics IDKit SDK.
- Spustitelné soubory MINDTCT, FingerjetFX OSE a NFIQ 2.1 potřebné pro správný běh programu.
- Sety simulovaných vzorků i sety fotografovaných vzorků vzniklých v rámci výzkumu.
- Tabulkové soubory obsahující výsledky algoritmické analýzy souborů vzorků vzniklých v rámci výzkumu.
- Grafy popisující výsledky algoritmické analýzy souborů vzorků vzniklých v rámci výzkumu ve formátu SVG.