



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

DETEKCE ŽIVOSTI LIDSKÉ RUKY Z MULTISPEKTRÁLNÍCH SNÍMKŮ

LIVENESS DETECTION OF HUMAN HAND FROM MULTISPECTRAL IMAGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

POLINA LEBEDEVA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SAKIN

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce



142139

Ústav: Ústav inteligentních systémů (UITS)
Studentka: **Lebedeva Polina**
Program: Informační technologie
Specializace: Informační technologie
Název: **Detekce živosti lidské ruky z multispektrálních snímků**
Kategorie: Umělá inteligence
Akademický rok: 2022/23

Zadání:

1. Prostudujte technologii multispektrální detekce živosti pro otisky prstů a celé ruky.
2. Analyzujte snímky z dodaných databází, popř. dohledejte další volně dostupné databáze.
3. Navrhněte algoritmus, který z multispektrálních snímků rozhodne, zda-li se jedná o živou či neživou ruku (falzifikát).
4. Navržený algoritmus implementujte.
5. Vyhodnoťte úspěšnost klasifikace živosti.
6. Experimentálně ověřte vytvořené řešení a dosažené výsledky shrňte. Diskutujte možná rozšíření.

Literatura:

- Liveness Detection in Biometrics:
<https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- Ying Hao, Zhenan Sun, Tieniu Tan and Chao Ren, "Multispectral palm image fusion for accurate contact-free palmprint recognition," *2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*, San Diego, CA, 2008, pp. 281-284, doi: 10.1109/ICIP.2008.4711746.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Splnění bodů 1 a 2.

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

Vedoucí práce: **Sakin Martin, Ing.**
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1.11.2022
Termín pro odevzdání: 10.5.2023
Datum schválení: 3.11.2022

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na detekci živosti lidské ruky z multispektálních snímků. Hlavním cílem je návrh a implementace algoritmu pro rozpoznávání živé ruky a falzifikátů na základě analýzy snímků ruky osvětlené specifickými vlnovými délkami. V práci se popisují různé techniky pro extrahování důležitých rysů ze snímků, jejich zpracování a způsoby, jak se může určit živost.

Abstract

This bachelor thesis focuses on the detection of the liveness of a human hand from multispectral images. The main objective is to design and implement an algorithm for recognizing live hands and spoofs based on the analysis of hand images illuminated by specific wavelengths. The work describes various techniques for extracting important features from images, their processing, and methods for determining liveness.

Klíčová slova

biometrie, multispektrální snímek, detekce živosti, ruka, zpracování obrazu, bezdotykové zařízení

Keywords

biometrics, multispectral image, liveness detection, palm, image processing, contactless device

Citace

LEBEDEVA, Polina. *Detekce živosti lidské ruky z multispektrálních snímků*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Martin Sakin

Detekce živosti lidské ruky z multispektrálních snímků

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením pana Martina Sakina. Uvedla jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpala.

.....

Polina Lebedeva

9. května 2023

Poděkování

V první řadě bych chtěla poděkovat svému vedoucímu za odborné rady, pomoc při vytvoření snímku a důkladnou kontrolu textu.

Pak bych chtěla poděkovat svému příteli, který mi poskytoval podporu v průběhu mého studia na FITu. A také svým spolužákům, se kterými to studium bylo pestřejší a ještě zábavnější.

Obsah

1	Úvod	3
2	Biometrie	4
2.1	Biometrické systémy	4
2.2	Identifikace a autentizace	6
2.3	Biometrické identifikátory	7
2.4	Detekce živosti	10
3	Světlo a jeho vliv na kůži	13
3.1	Druhy záření	13
3.2	Multispektrální snímkování	14
3.3	Kůže a její vlastnosti	15
3.4	Vliv vlnových délek na lidskou pokožku	16
4	Návrh	19
4.1	Zpracováváné snímky	19
4.2	Předzpracování snímků	21
4.2.1	Úprava jasu	22
4.2.2	Šedotónový obraz	23
4.2.3	Redukce šumu	24
4.2.4	Prahování obrazu	24
4.3	Návrh algoritmu	24
4.3.1	Detekce regionu zájmu	25
4.3.2	Detekce rýh	27
5	Implementace	31
5.1	Předzpracování snímku	31
5.1.1	Zlepšení jasu	31
5.1.2	Potlačení šumu	33
5.1.3	Odstranění pozadí	33
5.2	Detekce regionu zájmu	34
5.3	Vyhodnocení živosti	36
6	Vyhodnocení	42
6.1	Vyhodnocení nejvhodnějších vlnových délek	42
6.2	Vyhodnocení vstupního prahu	43
6.3	Vyhodnocení úspěšnosti metod	43
6.4	Vyhodnocení úspěšnosti množství použitých snímků	44

7 Závěr	45
Literatura	47
A Obsah odevzdávaného média	51
B Použití programu	53
C Snímky	54

Kapitola 1

Úvod

Spolu s vývojem různých způsobů zabezpečení se vyvíjí způsoby, jak toto zabezpečení obejít, a proto se v současné době na zabezpečení klade velký důraz.

Existují systémy, pro které stačí vytvořit dostatečně silné heslo, třeba fóra na různá témata, otevřené cloudové služby pro sdílení souborů (uloz.to, google disk), webové stránky pro sdílení receptů atd. Ale současně s tím je spousta jiných systémů, pro které je třeba větší zabezpečení: mailové služby, internetové bankovníctví, sociální sítě, zkrátka systémy, kde sdílíte svoje osobní údaje a ukradení účtu do kterých může vést k dost nepříjemným následkům. V dnešní době takové systémy vyžadují třeba dvoufázovou autentizaci: pomocí kódu, posílaného prostřednictvím SMS na vaše telefonní číslo nebo aplikace na mobilu, kde povolujete přihlášení/provedení transakce a podobně.

Je však možné, že se mobil ztratí nebo ho někdo ukradne, telefonní číslo se může změnit a zapomene se na obnovení v nějakém ze systémů. Co se ale ztratit nebo změnit za standardních podmínek nemůže jsou biometrické údaje. Pod tím chápeme charakteristiky živých osob, které jsou pro každého unikátní. Mezi takové charakteristiky patří otisky prstů, snímek obličeje, snímek oční duhovky nebo třeba i hlas. Díky své unikátnosti se dají použít pro ověření a identifikaci osoby. Avšak i pro tento způsob identifikace je třeba dávat důraz na zabezpečení.

V současné době jsou hodně rozšířené tzn. biometrické identifikační systémy. Jsou to systémy pro identifikaci, které pracují s biometrickými údaji. Často se používají pro přístup do chráněných objektů, například zaměstnanci banky, aby mohli vstoupit do budovy se identifikují pracovní kartou a otiskem prstu, dalšími příklady jsou výzkumné ústavy nebo vojenské objekty. Může se ale stát, že útočník ukradne identifikační kartu a nějakým způsobem vytvoří falzifikát otisku prstu. Avšak, vysoce kvalitní biometrický systém by měl být schopný odhalit pokus o neoprávněný přístup.

Cílem této bakalářské práce je analyzovat možné problémy a vytvořit algoritmus, který na základě multispektrálních snímků dlaně rozhodne, jestli je předložená ruka živá nebo jestli se jedná o falzifikát.

Kapitola 2

Biometrie

Biometrie (biometrika) je obor, zabývající se měřením a vyhodnocováním kvantitativních znaků živých organismů a biologických charakteristik chování lidí. Biometrie může být použita pro autentizaci a identifikaci osob pomocí zkoumání unikátních fyzických nebo behaviorálních rysů člověka [26]. Mezi hlavní výhody biometrie patří:

- větší bezpečnost: v okamžik identifikace/autorizace je nutná přítomnost člověka,
- větší pohodlnost: není třeba si pamatovat spoustu hesel,
- odolnost proti podvodům,
- malá pravděpodobnost krádeže identity.

Nevýhodou ale budou větší náklady na provozování podobných systémů, menší soukromí (biometrická data mohou částečně obsahovat i zdravotní stav osoby), tím pádem větší nároky na zabezpečení a riziko použití falzifikátů.

Je možné se ověřit na základě různých údajů: [11]

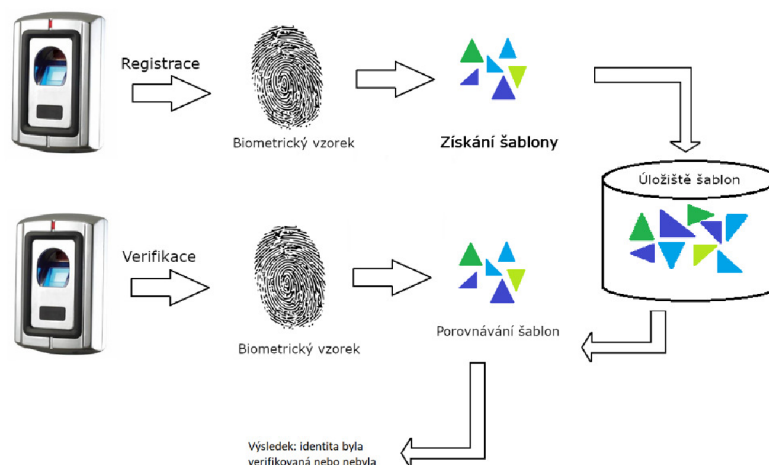
- znalosti, něco co si člověk pamatuje, ale může zapomenout, třeba: heslo, PIN,
- vlastnictví: něco, co máme, ale můžeme ztratit, například: občanský průkaz (ID), hardware klíč, pasport, mobil,
- bytí: něco, co člověk je.

2.1 Biometrické systémy

Biometrický systém je systém, který pro autentizaci a identifikaci používá biometrické údaje [19]. Zjednodušený biometrický systém je znázorněn na obrázku 2.1. Systém může pracovat v jednom z režimů:

1. registrační režim: v této fázi probíhá sběr biometrických informací osob, které se později budou identifikovat,
2. verifikační režim: proces ověření identity člověka na základě jím předložených údajů a těch, které se nachází v databázi systému.

V současné době biometrické systémy jsou hodně rozšířené, používají se pro identifikaci a verifikaci zaměstnanců ve firmách, jsou implementovány v mobilech a taky je využívají orgány státní správy (osobní doklady jako občanský průkaz nebo cestovní pas již obsahují biometrická data, která se následně můžou kontrolovat).



Obrázek 2.1: Biometrický systém

Hodnocení chybnosti

Biometrické systémy jsou schopny se dopouštět chyb z důvodu toho, že každý nasnímaný biometrický vzorek jedné osoby se mírně liší a rozhodování probíhá na základě skóre porovnání a nastaveného prahu. Chyby mohou vznikat například změnou okolního osvětlení nebo při přiložení prstu uživatele pod jiným úhlem.

Práh je hodnota, na které je založen výsledek porovnání. **Skóre** je číselná hodnota, která reprezentuje míru podobnosti mezi biometrickými daty, které byly získány od uživatele a biometrickým vzorkem, který je již uložen v databázi biometrického systému. Pokud skóre nasnímaného vzorku je menší, než práh, systém odmítne identitu, a pokud je skóre větší, systém identitu potvrdí.

Při porovnání výsledků biometrický systém udělá závěr, který může skončit následujícími scénáři:

- správné přijetí: osoba A je identifikovaná jako osoba A,
- správné odmítnutí: osoba A není identifikovaná jako osoba B,
- chybné přijetí: osoba A je identifikovaná jako osoba B,
- chybné odmítnutí: osoba A není identifikovaná jako osoba A.

Z těchto stavů jsou pak odvozené chybové míry, které jsou významné pro hodnocení biometrických systémů [13].

Míra chybného přijetí

Míra chybného přijetí (anglicky FAR – false accept rate) je podíl verifikačních transakcí s nesprávným tvrzením o identitě, která jsou chybně potvrzená. Jedná se o pravděpodobnost, kdy biometrický systém chybně klasifikuje dva různé biometrické vzorky jako ty, které patří stejné osobě.

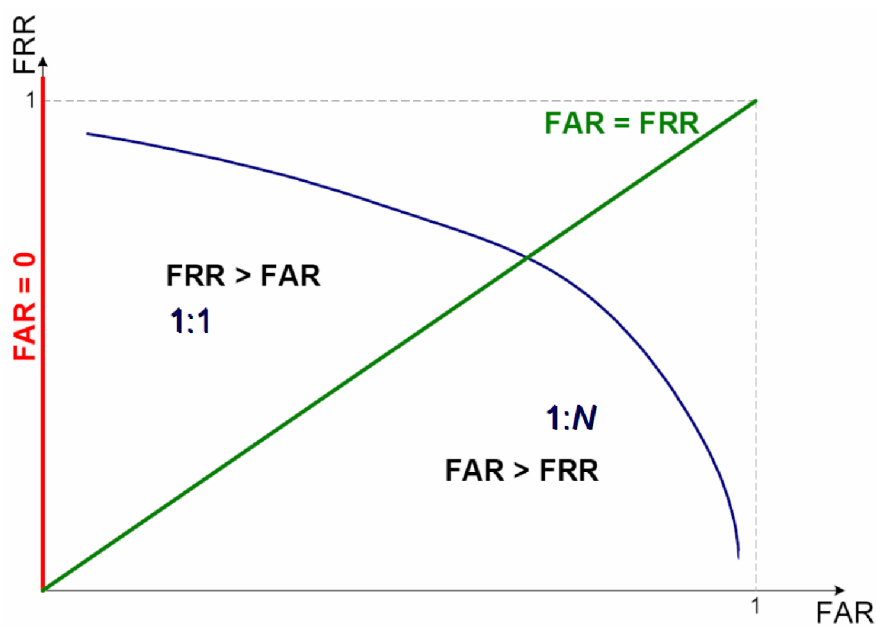
Míra chybného přijetí se vypočítá jako počet porovnání rozdílných vzorů s výsledkem shoda / celkový počet porovnání rozdílných vzorů [13].

Míra chybného odmítnutí

Míra chybného odmítnutí (anglicky FRR – false reject rate) je podíl verifikačních transakcí s pravdivým tvrzením o identitě, které jsou chybně odmítnuty. V tomto případě je to pravděpodobnost toho, že biometrický systém chybně klasifikuje dva vzory, které patří stejné osobě jako dva odlišné vzory a tím odmítne oprávněnou osobu.

Míru chybného odmítnutí je možné vypočítat jako počet porovnání stejných vzorů s výsledkem neshoda / celkový počet porovnání vzorů od této osoby.

Existují pak i další způsoby, jak hodnotit chybnost biometrického systému, třeba: míra chybné shody, míra chybné neshody, míra vyrovnání chyb a další chyby technického charakteru (neschopnost nasnímat, zaregistrovat . . .) [13] Poměr nezákladnějších měř je znázorněn v grafu 2.2. Díky těmto mírám je možné vyjádřit spolehlivost systému a najít optimální práh.



Obrázek 2.2: Vztah mezi FRR a FAR [12]

2.2 Identifikace a autentizace

Pod pojmem **identifikace** chápeme proces rozpoznávání a pojmenování osoby nebo předmětu [10]. V případě biometrického systému se jedná o nalezení testované osoby v databázi, tedy rozpoznávání 1:N.

Ve většině případů identifikaci provádí člověk, který rozpoznává nějaký objekt nebo člověka a to pomocí různých identifikačních prostředků.

Pokud se jedná o identifikaci člověka je možné použít nějaký průkaz totožnosti: porovnáme fotografii na průkazu s osobou nebo identifikujeme osobu na základě nějakých známých rysů (je to nějaký kamarád nebo slavná osobnost).

Autentizace je proces ověření identity osoby 1:1, tedy porovnání nasnímaného vzorku osoby s konkrétním vzorkem uloženým v databázi. Autentizace může být založená na rozpoznávání jedinečných biologických charakteristik subjektu. To vychází ze znalosti, že některé

charakteristiky jsou pro každého člověka jedinečné a neměnné za běžných okolností: otisky prstů, oční duhovka. Přesně proto tyto charakteristiky se dají využít pro autentizaci.

2.3 Biometrické identifikátory

Biometrické identifikátory jsou typické, zřetelné charakteristiky používané pro popsání osob. Lze je rozdělit na statické a dynamické. Statické charakteristiky (fyziologické) mají jeden pevný rys s určitou vlastností, která je přítomna vždy a těžce může být ovlivněna stavem člověka. Dynamické vlastnosti (behaviorální) jsou spojeny s chováním člověka, tím pádem jsou lehce ovlivnitelné a nemusí být časově ustálené. Mezi statické identifikátory spadají například: [45]

- otisky prstů,
- žíly na dlaních,
- obličej,
- DNA (Deoxyribonukleová kyselina, nositelka genetické informace),
- otisky dlaní,
- geometrie ruky,
- oční duhovka,
- sítnice oka.

K dynamickým identifikátorům patří:

- hlas/řeč,
- mimika obličeje,
- chůze,
- podpis.

Dále jsou rozebrány nejpopulárnější biometrické identifikátory, které se aktuálně využívají v biometrických systémech. Jsou důležité pro tuto práci z důvodu obecného pochopení biometrie a pochopení toho, jak by mohl být navržen výsledný algoritmus.

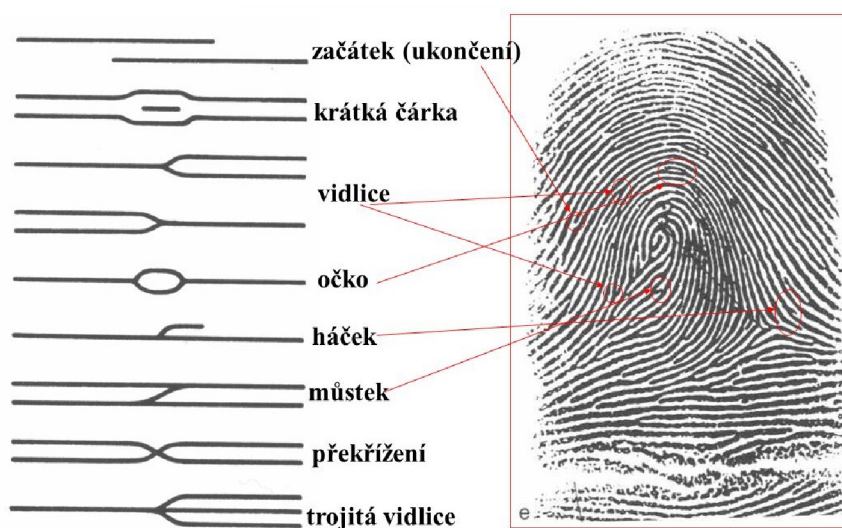
Otisky prstů

Každý člověk má na povrchu prstů papilární linie, struktura kterých jednoznačně určuje fyzickou identitu člověka. Tyto linie se formují během embryonálního vývoje a jsou relativně neměnné s časem (výjimkami jsou kožní onemocnění nebo kožní poruchy). Každý prst je unikátním vzorkem a neexistují žádní dva lidé papilární linie kterých by měli stejnou strukturu. To stejné platí i pro jednobuněčná dvojčata [21]. Pro ověření identity pomocí otisků prstů se používají různé snímače otisků prstů. Podle způsobů, kterým se získávají informace snímače mohou být kontaktní: prst bude položen na snímací plochu a senzor to zaznamená, nebo bezkontaktní: prst bude nasnímán kamerou.

Podle principu, na kterém pracuje snímač je můžeme dále klasifikovat na následující druhy:

- Kapacitní: vysílají slabé elektrické výboje do prstů, podle napětí pak vytvoří datový obraz prstů. Patří ke skupině kontaktních snímačů.
- Teplotní: snímá rozdíl teplot mezi jednotlivými papilárními liniemi a prostoru mezi nimi. Patří k kontaktním snímačům.
- Optické: při přiložení prosvítí a udělá snímek prstů. Patří ke skupině bezkontaktních snímačů.
- Ultrazvukové: ultrazvukový senzor s pomocí SW vytvoří 3D mapu prstu, mezi tím, jak standardní optické čtečky vytváří pouze 2D. Bezkontaktní snímač.

Při prvním skenování bude vytvořen obraz papilárních linií, který se následně zpracuje a do databáze se uloží tak zvaná množina markantů – anomálie v průběhu papilárních linií, viz obrázek 2.3. Pak při každém dalším přiložení prstu čtečka provádí stejnou operaci s přítomným prstem a porovnává množinu markantů s tou množinou, která je uložena v její databázi [13].



Obrázek 2.3: Množina markantů, které je možné v otisku prstu najít [22]

Žíly na dlaních

Stejně jako otisky prstů, obvykle žíly zůstávají po celý život člověka neměnné, a proto jsou vhodným biometrickým identifikátorem pro rozpoznání identity. Používají se žíly na hřbetu či dlani ruky nebo i v prstech. Jedná se o neinvazivní metodu, která je založena na principu získávání obrazu cévního stromu ruky a následného extrapolování informací z tohoto obrazu. A jelikož v cévách je obsažen hemoglobin je tato metoda méně náchylná na falšování identity.

Pro rozpoznávání žil v dlani se použije bezdotykový snímač, ke kterému se ruka přiblíží. Za využití infračerveného osvětlení se zobrazí cévní síť uvnitř tkáně. Kamera zařízení nasnímá obraz, který se zpracuje tak, aby co nejlépe vynikly žíly. Pak je možné porovnávat obraz s těmi, co se již nachází v databázi [13] [44]. Příklad takového snímku je na obrázku 2.4



Obrázek 2.4: Ruka se zvýrazněnými žilami [6]

Geometrie ruky

Rozpoznávání je založeno na tom tvrzení, že lidská ruka je jedinečná. Avšak neexistují nějaké dokumentární důkazy o tom, že tvar lidské ruky je jedinečný, a proto toto tvrzení je možné považovat za pravdivé pro malou populaci lidí [21]. Pro rozlišení lidí mezi sebou v současné době se používají následující charakteristiky ruky:

- délka prstů,
- šířka prstů,
- výška prstů,
- zakřivení a lokální anomálie.

Tento způsob rozpoznávání je vhodný v situaci, kdy z hlediska soukromých a citlivých informací nejde použít technologie rozpoznávání podle otisků prstů nebo obličeje. Další výhodou je, že ruce rozpoznávaného člověka mohou být i mírně znečištěné a nebude to mít kritický vliv na výsledek rozpoznávání.

Obraz ruky se může nasnímat běžnou kamerou ve stupních šedí. Ve většině systémů je snímán pouze siluet ruky shora nebo zespodu, jelikož pro identifikaci jsou potřebné jenom geometrické rysy.

Výhodou takového systému je jednoduchost zpracování vstupního obrazu. K nevýhodám naopak patří to, že tato technologie není vhodná pro rozpoznávání velkého množství lidí, jelikož geometrie ruky není příliš významným rysem pro popis osoby. Navíc, informace

z ruky nejsou neměnné během života člověka a třeba nošení šperků může snížit kvalitu rozpoznání. [13]

2.4 Detekce živosti

Kvůli riziku použití falzifikátu při identifikaci musíme u biometrických systému řešit také detekci živosti (anglicky PAD – Presentation Attack Detection) [9]. Pod tím pojmem chápeme možnost systému detekovat, jestli předložený biometrický vzorek je „živý“, tzn. že patří živému člověku nebo je to umělé vytvořený falzifikát, případně z neživé části těla. Během snímání ruky živost můžeme detekovat na základě následujících parametrů:

- pocení,
- tep,
- krevní tlak,
- teplota,
- spektrální charakteristiky,
- ultrazvuk,
- elektrické vlastnosti kůže,
- optické vlastnosti pokožky.

Existují různé faktory, které mohou mít zásadní vliv na tuto detekci, třeba záleží na tom, jestli je to statická (používá se jeden obraz) nebo dynamická analýza (použije se sada nebo video). Detekce, která je založena na sadě obrazu je přesnější, než statická analýza. Taktéž může být potřebná asistence pro použití některých metod. To může vnést výraznou časovou prodlevu v činnost systému [36].

Detekce živosti se může vyhodnocovat pomocí hardwaru (HW) anebo softwaru (SW). K hardwarovým způsobům patří:

- měření pulsu,
- měření teploty,
- měření elektrických vlastností pokožky,
- detekce kožní reakce na přítlak,
- reakce na teplý a studený podnět.

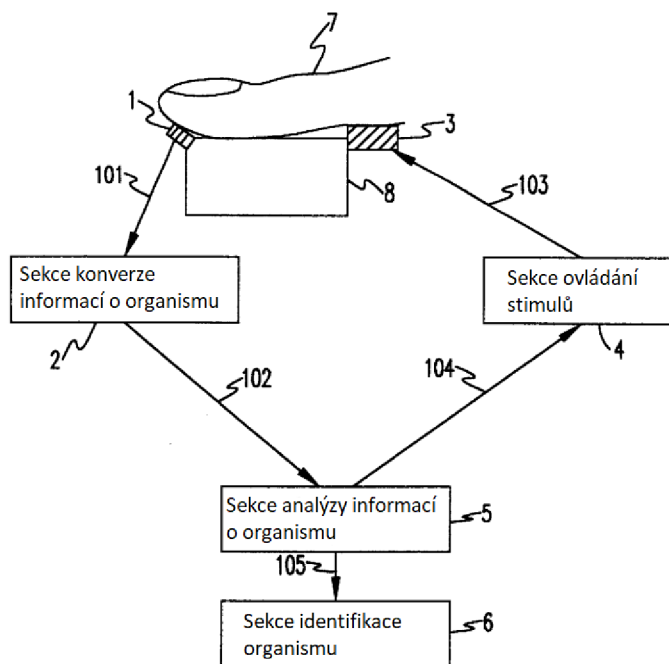
Kontrola může probíhat dvěma způsoby. V prvním případě se jedná o rozdělený systém, kde nejdříve probíhá detekce živosti a pak systém může načítat biometrická data nebo to může být integrovaný systém, kde detekce probíhá zároveň s odebráním vzorku. [21] V obou případech bude biometrický systém obsahovat doplňující modul, který bude odpovědný za detekci, například pulsometr nebo teploměr.

Softwarově se detekce provádí na již odebraném vzorku, třeba se kontrolují spektrální charakteristiky kůže nebo pocení.

Pro každou z výše uvedených metod se provádí specifické měření:

- **Měření pulsu:** senzor obvykle detekuje změny v úrovních odraženého světla ze snímaného objektu a přijímá to jako důkaz tepu a toku krve. Prvně světelný zdroj osvítlí objekt infračerveným světlem a poté fotodetektor změří úroveň světla, které se odráží od objektu [39].
- **Měření teploty:** termovizní snímkování – snímky, které jsou pořízeny speciální kamerou, která má schopnost detekovat infračervené záření (viz 3.1). Jelikož množství vyzařovaného infračerveného záření stoupá spolu s teplotou, termovizní snímek (termogram) poskytuje možnost detekovat rozdíly v teplotních proflech živého a falešného objektů [27]. Teplota lidské pokožky se pohybuje mezi 25 a 37 stupni Celsia.
- **Detekce kožní reakce na přitlak:** měří se změny v barvách pokožky díky tlaku, který byl aplikován na prst. Pokožka volně ležícího prstu je načervenalé barvy, když při tlaku zbledá [39].

Jedním z příkladů reálného zařízení, které využívá hardwarovou detekci je modul [17] viz 2.5, který pracuje následujícím způsobem. Prst ověřovaného člověka se nachází na kontaktní desce, na kterou se podává stimul zahrnující teplý a studený podnět. Následně se měří informace, které produkuje prst v reakci na stimul. Jako například, množství kolísání rychlosti průtoku krve proudící v periferních cévních cestách se liší podle podnětů. Protože periferní cévy na konečku prstu jsou se buď rozšíří nebo zúží se, hodnota amplitudy proudu krve se měří a zpracovává se modulem pro měření informací o organismu. Pod teplým podnětem amplituda krevního toku roste, pod studeným klesá [39].



Obrázek 2.5: Zařízení, které používá teplý a studený podnět [17]

Největším problémem detekce živosti, která vychází z řešení založeného na přidání hardwarového modulu navíc je to, že moduly nemusí pracovat stejným způsobem za různých podmínek jako jsou třeba teplota a vlhkost ovzduší. Navíc, to může způsobit zdražení samotného systému, a popsané výše metody mají i svoje nevýhody. Například, měření teploty

se dá docela jednoduše obejít tím, že se falzifikát přiloží k prstů člověka anebo se ohřeje předem [35].

Detekci živosti můžeme dále klasifikovat na pasivní a aktivní techniky [33].

- Pasivní techniky detekce živosti využívají vzorky, které již byly získány biometrickým senzorem. Tím pádem, další interakce s člověkem nejsou potřebné. Typickým příkladem pasivních metod je zpracování snímku, měření teploty nebo pulsu, které probíhá během odebírání vzorku.
- Aktivní techniky detekce živosti obvykle vyžadují dodatečnou interakci člověka s biometrickým systémem. Taková interakce by měla být žádána formou výzva – odpověď. K tomuto existují dva různé přístupy, kde první je výzva o vykonání konkrétní akce, která je pak vyhodnocena biometrickým systémem (jednotlivec může být požádán o konkrétní pohyb ruky, prstu nebo hlavy). Další způsob je pozorování a vyhodnocení nevědomých reakcí lidského těla na stimuly způsobené biometrickým systémem (teplý a studený podnět, změna osvětlení místnosti a reakce zornice na takovou změnu).

Kapitola 3

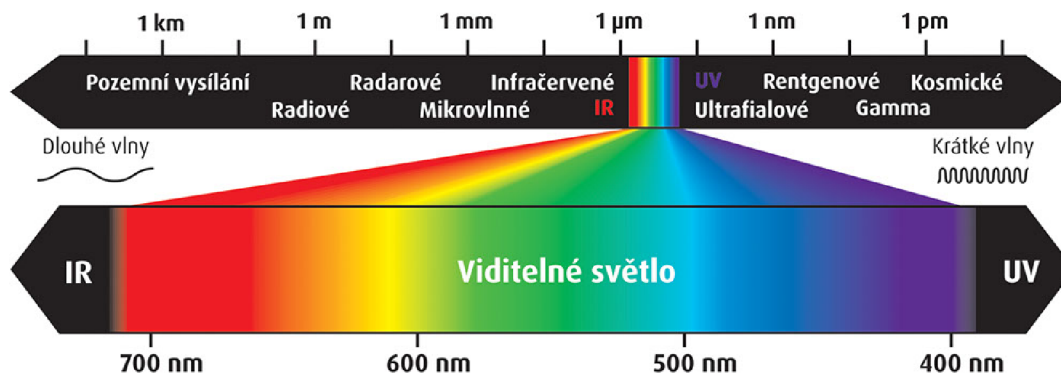
Světlo a jeho vliv na kůži

Elektromagnetické záření je šířící se v prostoru změna stavu elektromagnetického pole. Záření se skládá ze dvou složek: elektrické a magnetické, a může být vlnové anebo kvantové. Elektromagnetické spektrum zahrnuje záření všech vlnových délek. Může být nazváno Maxwellova duha [24].

Elektromagnetické záření se dá popsat pomocí různých parametrů, k nejdůležitějším patří amplituda (jas), vlnová délka, frekvence a perioda. Frekvence světla je úměrná jeho energii.

3.1 Druhy záření

Jsou různé druhy elektromagnetického záření, které se rozlišují podle vlnové délky a podle zdroje záření, třeba: rádiové záření, mikrovlny, infračervené záření, ultrafialové záření atd. Platí, že záření s nejvyšší délkou vlny má nižší frekvence a naopak. Každé záření má svoje specifické vlastnosti a využití.



Obrázek 3.1: Typy vln a jejich délky se zvýrazněným úsekem viditelného světla [14]

Ultrafialové záření

Ultrafialové záření (UV) má vlnové délky kratší, než 400 nm a je neviditelné pro lidské oko. Slunce je přírodním zdrojem plného spektra ultrafialového záření, které se rozděluje na několik kategorií podle vlnové délky [4].

- UV-A: nachází se na vlnových délkách 315 až 399 nm. Není pohlcováno ozonovou vrstvou a v plném množství dosahuje zemského povrchu [15].
- UV-B: patří do vlnových délek 280 až 314 nm. Ve většině se pohlcuje ozonovou vrstvou, ale malá část dostane se k zemskému povrchu [15]. Při působení na lidskou pokožku vyvolává tvorbu vitamínu D, podněcuje produkci melaninu, což způsobuje opálení, ale ve větším množství je hlavní příčinou zarudnutí a spálení pokožky sluncem. [31]
- UV-C: vlnová délka 100 až 279 nm. V plném množství se pohlcuje ozonovou vrstvou a atmosférou [15]. Pomocí umělých zdrojů se dá použít pro dezinfekci.

Infračervené záření

Vlnová délka infračerveného záření je větší, než 700 nm a rozděluje se na blízké, střední a vzdálené. Infračervené záření vydávají všechna tělesa. Lidské oko není citlivé na tento druh záření, ale člověk jeho registruje jako tepelný vjem [23].

Používá se třeba na dálkové ovládače nebo v brýlích pro noční vidění [3]. Kvůli dlouhé vlnové délce proniká hlouběji do pokožky, což napomáhá při pozorování žil. Infračervené záření se taky rozděluje na skupiny podle vlnové délky a to následně [40]:

- IR-A, blízko infračervené záření (anglicky NIR), nachází se na vlnových délkách 760 nm až 1600 nm
- IR-B, střední infračervené záření, 1400 nm až 3000 nm
- IR-C, daleké infračervené (angl. FIR) 3000 nm až 1mm.

Viditelné světlo

Nejdůležitější druh záření pro tuto práci. Je omezené vlnovými délkami 390 nm až 760 nm (frekvence 770 – 395 THz). V lidském oku světlo vyvolává světelný vjem. Pomocí světla člověk získává největší množství informace o okolí. U světla se rozeznává jeho intenzita a barva, která závisí na vlnových délkách obsažených ve světle [24].

Světelné spektrum je část elektromagnetického spektra, ve kterém je zobrazena závislost barev světla na vlnových délkách, viz obrázek 3.1.

3.2 Multispektrální snímkování

Multispektrální snímkování je metoda, pomocí které je možné zachytit obrazová data v rámcích specifické vlnové délky napříč celým elektromagnetickým spektrem. Vlnové délky mohou být rozděleny pomocí různých filtrů.

Multispektrální snímkování měří světlo v malém rozsahu spektrálních pásem, typicky od 3 do 15 pásem. Kombinuje tato pásma v jediný optický systém. Obvykle poskytuje kombinaci viditelného světla, blízko infračerveného světla, krátkých, středních a dlouhých vln infračerveného světla v jediném systému. Tato metoda dovoluje extrahování doplňujících informací, které není možné zachytit lidským okem, například žíly [7].

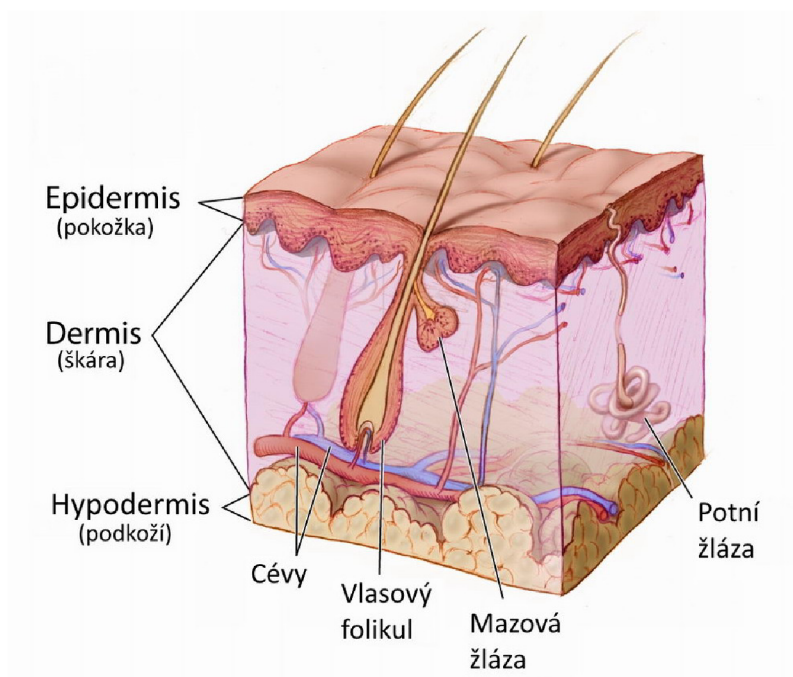
Avšak, multispektrální snímkování v kontextu dané práce je snímání jedné ruky v specifických vlnových délkách.

Snímky ve viditelném světle je možné pořídit běžnou kamerou. Kamera pro snímání ultrafialových a infračervených snímků musí být přizpůsobena přiděláním potřebných filtrů a musí mít vhodný snímač, který dokáže ty snímky zpracovat [8].

3.3 Kůže a její vlastnosti

Kůže je největší orgán lidského těla, který je složen ze tří hlavních částí: pokožka, škára a podkožní vazivo [48] viz obrázek 3.2. Pro lidský organismus kůže plní různé funkce:

- ochrana: brání před zásahem virů, bakterií, chemických látek do organismu,
- regulace tělesné teploty,
- regenerační: neustálá obměna a regenerace pokožky,
- pocitové vjemy: hmat, bolest, teplota atd.



Obrázek 3.2: Vrstvy lidské pokožky [2]

Pokožka

Pokožka neboli epidermis je vnější vrstvou lidské kůže a je tvořena několika vrstvami kožních buněk. Neobsahuje krevní cévy. Epidermis chrání lidský organismus před ztrátou vody, bakteriemi a toxiny.

Na spodní vrstvě se vytváří nové buňky kůže, které potom v rámci procesu keratinizace migrují až na horní vrstvu. Keratinizace je proces obnovení horní vrstvy epidermu, kdy povrchové buňky postupně umírají, rohovatí a odlupují se. Takže kůže na horní vrstvě epidermu se obnovuje přibližně jednou za 28 dní [16].

Škára (dermis)

Představuje sebou střední vrstvu, tvořenou vazivovou tkání s velkým množstvím krevních cév. Díky jejich množství je dobře prokrvená. Taktéž se vyskytují lymfatické cévy, smyslové

receptory, kterými vnímáme teplo, chlad a bolest, vlasové kořínky a tukové buňky. Hlavními složkami škůry jsou kolagen a elastin, a proto tato vrstva je zodpovědná za pružnost, mechanickou odolnost a pevnost kůže [38].

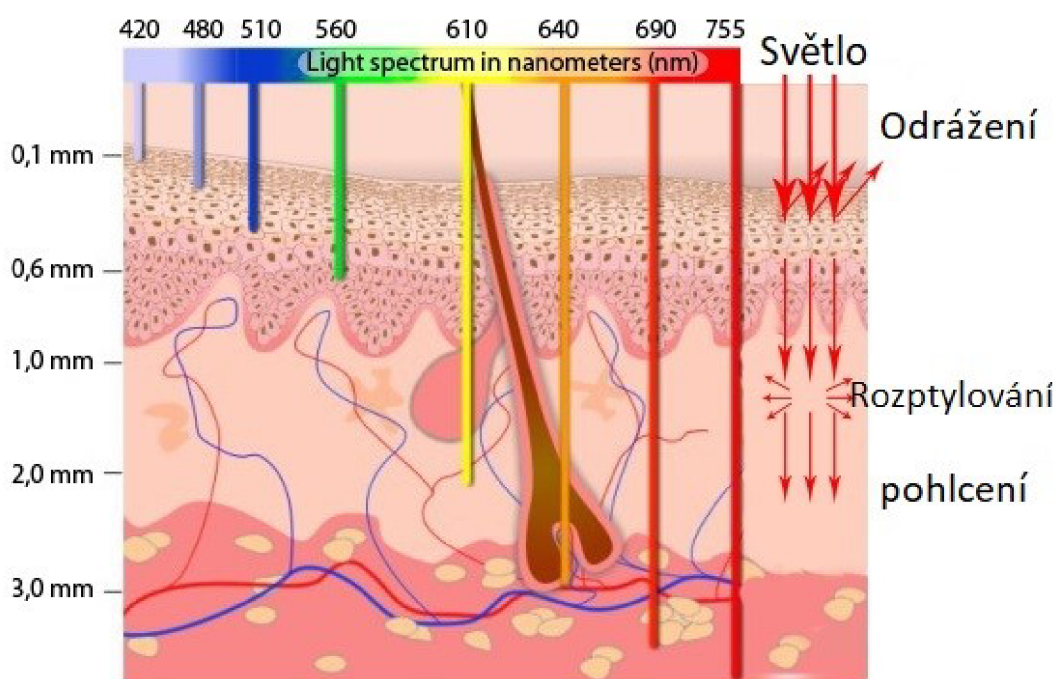
Podkoží (hypodermis)

Podkoží je nejhlubší vrstva kůže a je tvořena tukovými buňkami, řídkým vazivem a krevními cévami. V tukových buňkách se ukládá přebytek energie. Na různých částech těla a mezi pohlavími se množství tukových buněk liší. Díky tukovým buňkám hypodermis tvoří izolační vrstvu, která chrání lidský organismus proti poškození a teplotním vlivům [16].

Pro tuto práci nejdůležitější je prostřední vrstva neboli škůra z důvodů, které budou podrobněji rozepsány dále.

3.4 Vliv vlnových délek na lidskou pokožku

Na začátku elektromagnetické záření interaguje s kožním povrchem a pak proniká dovnitř, obvykle ale nemůže dosáhnout podkožní vrstvy. Podrobněji o podkoží v kapitole: 3.3. Optické vlastnosti pokožky jsou závislé na délce vlny a množství dopadajícího světla [47]. Typický proces integrace mezi pokožkou a zářením je vidět na obrázku 3.3.



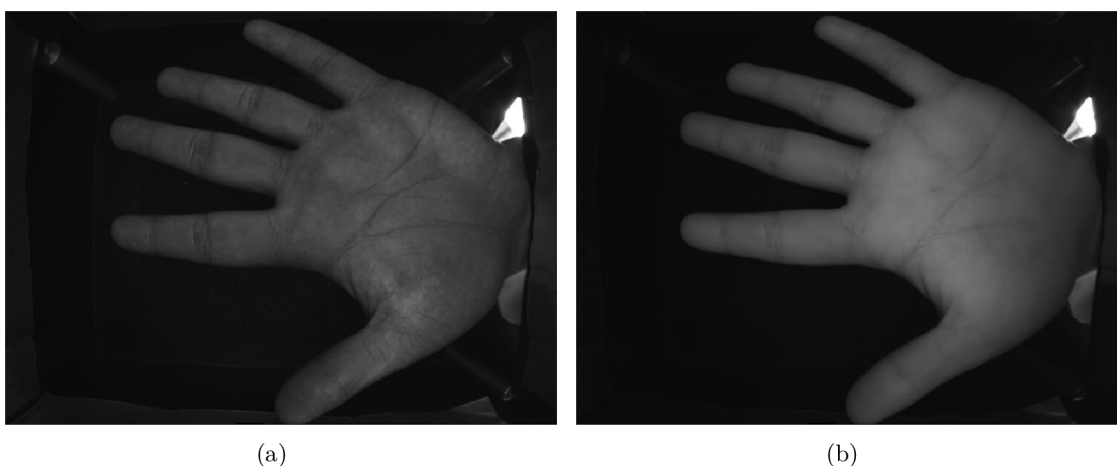
Obrázek 3.3: Šíření světla různých vlnových délek v tkáních [1]

Část záření se odráží, zbytek ale proniká do hloubky a pohlcuje se v prvních dvou kožních vrstvách (většina ve škůře).

Specifické vlnové délky pronikají do pokožky specificky hluboko a jsou pohlcovány jinak v odlišných vrstvách, protože každá vrstva obsahuje jiné chemické komponenty v různých koncentracích (krev, melanin, keratin) a má jinou strukturu, než ostatní vrstvy [34]. Na-

příklad krátké vlnové délky, ke kterým patří UV záření, v malém množství můžou prospět zdraví člověka a hrají nezbytnou roli v produkci vitamínu D. Naopak akutní účinky většího množství UV záření zahrnují poškození DNA buněk a spálení pokožky, fototoxické a fotoalergické reakce, což může působit předčasné stárnutí pokožky a dokonce patří k jednomu z rizikových faktorů vzniku rakoviny. Proto je důležité chránit pokožku: omezit dobu nacházení se na poledním slunci, používat opalovací krémy a oblečení s ochranným faktorem [31]. Na druhé straně, dlouhovlnné záření, jako je infračervené (IR-C), může mít příznivé účinky na lidský organismus. Podporuje regeneraci kožních buněk a poskytuje úlevu od bolesti. Při vysokých dávkách infračerveného záření může nastat popálení kůže a poškození očí, tak je důležité dodržovat bezpečné dávky a správné postupy [40].

Nejkratší vlny fialové a modré barvy jsou pohlcovány nejvíce epidermem, protože ten obsahuje největší množství melaninu, a delší vlny, jako třeba červená pronikají hlouběji, až do škáry. Rozdíl ukázán na obrázcích 3.4a) a 3.4b).



Obrázek 3.4: a) Délka vlny 460 nm, b) Délka vlny 700 nm [6]

Na obrázku 3.4 a) vidíme lepším způsobem povrch dlaně, je ostřejší, než by mohl být na obyčejné fotografii, na obrázku 3.4 b) jsou viditelné krevní cévy, které se nachází v hlubší vrstvě.

Cílem použití této vlastnosti kůže je ověření živosti předkládaného vzorku. Kvalitní falzifikát může napodobit vnější strukturu pokožky (vzor na dlani), ale je obtížnější vytvořit vnitřní složení lidské ruky. Na detekci živosti, která je založena na použití popisované vlastnosti kůže můžou mít vliv takové faktory jako:

- odstín kůže, protože pokud kůže má tmavší barvu, tak rýhy na ní jsou obtížněji pozorovatelné, tak by to mohlo zkomplikovat detekci,
- prokrvení, jelikož červené krevní buňky (erytrocyty) vykazují velkou absorpci zeleného světla a slabou absorpci červeného světla, výsledkem je to, že barevné složky se můžou měnit se zvýšením nebo snížením průtoku krve [41],
- výkon/kvalita zařízení, pro takovou metodu detekce živosti je důležité mít kvalitní kameru na snímání rukou, protože úspěšnost detekce v daném případě zaleží na kvalitě vstupních dat. Použití zařízení s nízkým výkonem může způsobit šумы a artefakty, které mohou snížit kvalitu rozpoznání a detekce živosti.

Třeba takové faktory jako teplota pokožky by neměly mít vliv na úspěšnost detekce, protože tento způsob se neopírá při rozhodnutí o živosti na měření teploty. Problém může vzniknout, když ruka bude jakkoliv znečištěna. Pokud pokožka bude mastná nebo zaprášená, změní se její odrazové vlastnosti, protože na horní vrstvě pokožky existuje další vrstva jiného materiálu.

Kapitola 4

Návrh

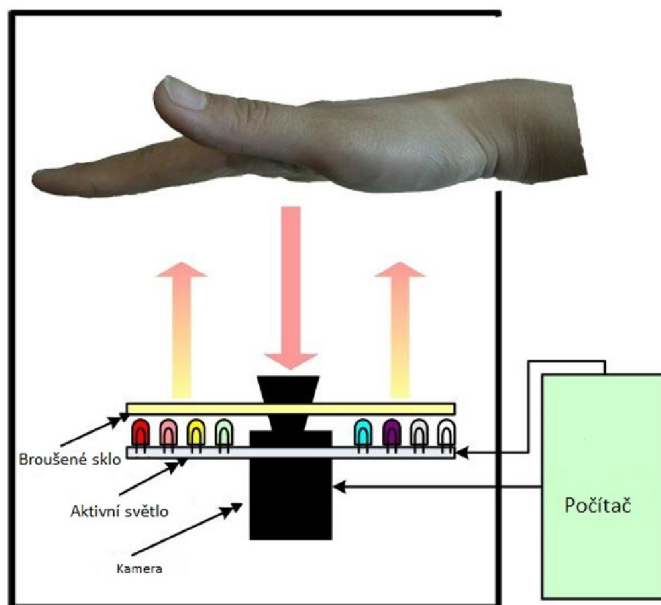
4.1 Zpracovávané snímky

Snímky zpracovávané v této práci částečně pochází z volně dostupné databáze CASIA [6]. Příklady snímků jsou vidět na obrázku 3.4.

Databáze představuje řadu snímků, která obsahuje fotografie dlaně jednoho člověka ve dvanácti variantách (šest pro levou a šest pro pravou ruku) pro každou použitou vlnovou délku: 460 nm, 630 nm, 700 nm, 850 nm, 940 nm a bílé světlo (400 nm až 700 nm). Vlnová délka v rozmezí 400 až 700 nm odpovídá viditelnému světlu, 850 nm a 940 nm už jsou délky z kategorií infračerveného světla. Snímky jsou monochromatické s rozlišením 768×576

Snímání probíhalo opakovaně s časovým odstupem více než jeden měsíc a vzorky rukou pochází od 100 různých lidí.

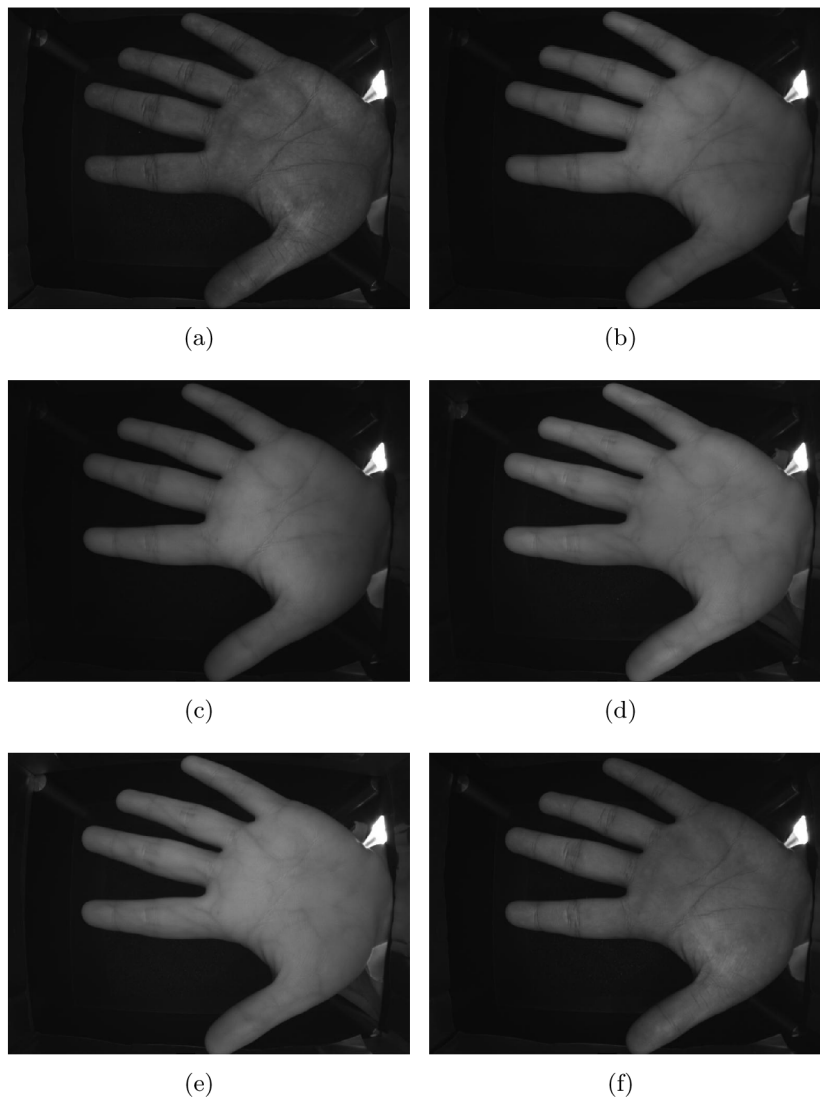
Snímání bylo prováděno na samostatně navržený snímač, pořizující multispektrální snímky. Schema zařízení je na obrázku 4.1



Obrázek 4.1: Snímač zařízení navržené skupinou CASIA [6]

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, čím větší je délka vlny, tím hlouběji proniká do kůže, takže nejlíp krevní cévy ve škáře uvidíme při použití snímků s vlnovou délkou 940 nm.

Příklady snímků z této knihovny jsou na obrázcích 4.2 a) až f).



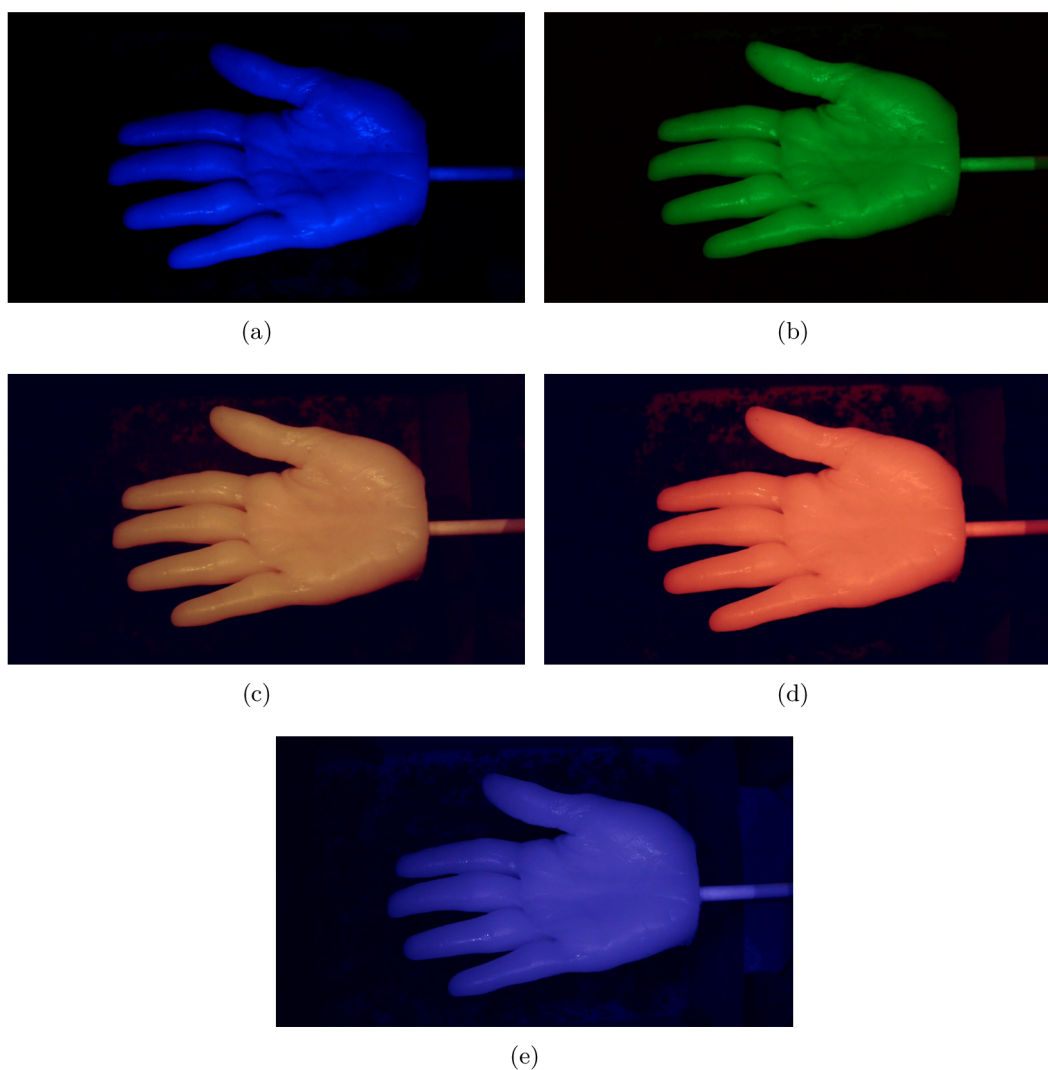
Obrázek 4.2: Délka vlny: a) 460 nm, b) 630 nm, c) 700 nm, d) 850 nm, e) 940 nm, f) Bílé světlo [6]

Výhodou této databáze je velké množství snímků od různých lidí s různou pokožkou, navíc jsou pořízeny pravé i levé ruce. Avšak mezi její nevýhody patří nízké rozlišení snímků a nedostatečně zakrytý vstupní otvor, kterým prosvítá nežádoucí světlo. Hlavní nevýhodou této databáze ovšem jsou chybějící snímky falzifikátů.

Z tohoto důvodu bylo potřebné nasnímat dostupné falzifikáty na podobném zařízení. Díky spolupráci s výzkumnou skupinou STRaDe¹ na FIT VUT bylo získáno více než 500

¹<https://strade.fit.vutbr.cz/cs/>

snímků 12 dostupných falzifikátů (viz obrázek 4.4) pod vlnovými délkami 465 nm až 855 nm. Příklady těchto snímků jsou na obrázcích 4.3 a) až e).

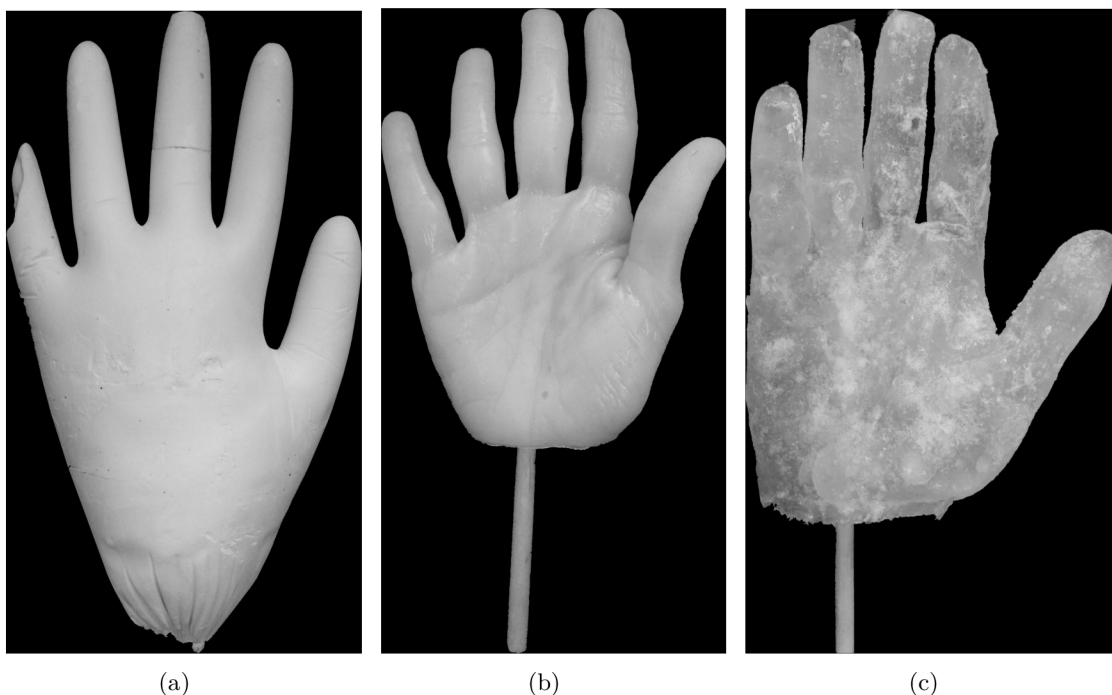


Obrázek 4.3: Délka vlny: a) 465 nm, b) 525 nm, c) 580 nm, d) 625 nm, e) 855 nm

Snímky falzifikátu byly vytvořeny v napodobeném snímacím zařízení jako databáze CASIA, avšak s mírnými odlišnostmi. Prvním rozdílem je, že pro snímání byla využita barevná kamera s větším rozlišením (1920×1080). Druhou je osvětlování podobnými vlnovými délkami o rozdílu do 5 nm. Z důvodů těchto malých odlišností bylo nezbytné nasnímat i několik snímků reálných rukou na tomto zařízení. Nasnímáno bylo 27 dobrovolníků. Úplný přehled příkladů snímků ze všech používaných databází je k nalezení v příloze C.4.

4.2 Předzpracování snímků

Prvním krokem je předzpracování obrázku: potlačení šumu, pokud je to potřeba, odebrání pozadí snímku a detekce oblasti zájmu (anglicky region of interest). Následně je potřeba zvýraznit čáry ruky na snímku a porovnat snímek menší vlnové délky (třeba 465 nm, 525 nm) se



Obrázek 4.4: Některé z falzifikátů používaných v práci

snímkem větší vlnové délky (580 nm, 625 nm). Inspirace pro navržení tohoto postupu byla čerpána z již existujících algoritmů pro jiné biometrické identifikátory, třeba pro otisky prstů a sítnici oka.

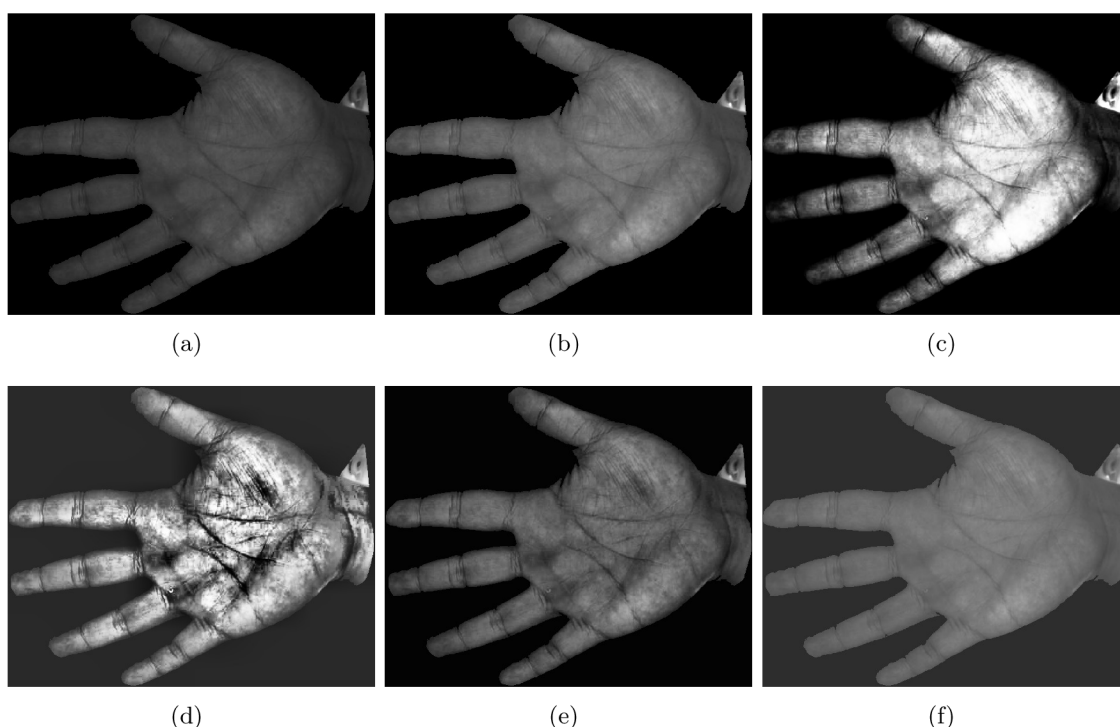
4.2.1 Úprava jasu

Po prohlédnutí všech dostupných snímků byl nalezen jeden problém: některé snímky byly moc tmavé. A proto bylo rozhodnuto přidat krok navíc, který by se zabýval vylepšením jasu. Pro vylepšení jasu knihovna OpenCV nabízí různé způsoby.

1. Lineární škálování (angl. linear scaling), každá hodnota pixelu se násobí škálovacím faktorem a to způsobuje zvětšení jasu. Lze provést pomocí funkce `multiply`.
2. Vyrovnání histogramu (angl. histogram equalization) je metoda, která se používá pro zlepšení kontrastu a jasu na snímcích pomocí přerozdělování hodnot pixelů. Provádí se výpočtem kumulativní distribuční funkce intenzivních hodnot obrázku a poté se každá pixelová hodnota mapuje na její transformovanou hodnotu. Tímto způsobem to vede k tomu, že hodnoty histogramu jsou rovnoměrněji rozděleny a díky tomu se vylepší kontrast snímku. Je implementována ve funkci `equalizeHist` [30] [32].
3. Adaptivní vyrovnání histogramu (angl. adaptive histogram equalization), tato metoda je variací vyrovnání histogramu, která přizpůsobuje a adaptuje proces vyrovnání specifickým charakteristikám obrazu. Obraz se při takové úpravě dělí na malé regiony a úprava histogramu se aplikuje na každý region nezávisle. Výsledek je pak získán konkatenací výsledků každého regionů. Algoritmus je implementován ve funkci `createCLAHE` [32].

4. Omezené adaptivní vyrovnání histogramu (angl. contrast limited adaptive histogram equalization – CLAHE), tento algoritmus pracuje na podobném principu jako adaptivní vyrovnání histogramu, jen přibývá krok navíc: kontrast každého regionu je omezen prahem: pokud je hodnota regionu nad definovaný práh je oříznuta a přerozdělena mezi ostatní regiony. Algoritmus je též definován ve funkci `createCLAHE`, ale navíc potřebuje mít zadán práh [29].
5. Korekce jasu přidáním konstantní hodnoty, tento způsob spočívá v tom, že k hodnotě každého pixelů se přidá nějaká konstanta a tímto se zvýší jas. Funkce, která implementuje tuto metodu `add` [28].

Příklady použití těchto metod jsou na obrázcích 4.5.



Obrázek 4.5: a) Originální snímek, vlnová délka 460 nm [6] b) Lineární škálování, c) Vyrovnání histogramu, d) Adaptivní vyrovnání histogramu, e) Omezené adaptivní vyrovnání histogramu, f) Korekce konstantní hodnotou

4.2.2 Šedotónový obraz

Šedotónový obraz je obraz, kde hodnota každého pixelů reprezentuje množství dopadajícího světla. Jak je patrné z toho názvu, šedotónový obraz je sestaven ze stupňů šedí. Aby bylo možné z barevného snímku získat šedotónový na každý pixel původního obrázku se použije vztah:

$$I = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \quad (4.1)$$

kde I je výsledná hodnota pixelu po úpravách, R , G , B jsou barevné složky, které odpovídají červené, zelené a modré barvám [37]. Je potřebné použít tuto metodu, protože snímky, které byly vytvořeny spolu s výzkumnou skupinou STRaDe jsou barevné (viz 4.3), a pro tuto práci jsou potřebné právě šedotónové snímky.

4.2.3 Redukce šumu

Šumem se nazývá nevyhnutelný vedlejší efekt, který vzniká v okamžiku vytvoření fotografie. Redukce šumu je proces odstraňování šumu ze signálu, v tomto případě ze snímků [20]. Existují různé způsoby, jak odstranit šum ze snímku, dále jsou popsány některé z nich.

Lineární filtry: jsou používány na odstranění určitých druhů šumu, třeba se hodí na Gaussův šum (každý pixel na obrázku je pozměněn od originální hodnoty obvykle o nějaké malé číslo). Tento filtr funguje tím způsobem, že hodnotě každého pixelu přiřadí průměrnou hodnotu nebo hodnotu váženého průměru z tohoto pixelu samotného a jeho sousedních pixelů. Příklad fungování podobného filtru je vidět na obrázcích 4.6 a) i b).

Nelineární filtry: jedním z příkladů této skupiny filtrů je mediánový filtr. Je často používán na redukci impulzního šumu (pixely na obrázku se hodně liší v barvě nebo intenzitě od okolních pixelů.). Funguje následujícím způsobem: vybírá se dvoudimenzionální okno (třeba 3x3), počítá se medián z hodnot pixelů v tomto okně, pak hodnota každého pixelu vymění za hodnotu mediánu a pokračuje se dál, pokud nebude zpracována celá plocha obrazu. Příklad odstranění šumu pomocí takového filtru je vidět na obrázcích 4.7 a), b).

Zprůměrování: Provádí konvoluci snímku s normalizovaným boxovým filtrem. Vezme se průměr všech pixelů v boxu a nahradí centrální prvek. Třeba, normalizovaný boxový filtr 3 × 3 by mohl vypadat následujícím způsobem:

$$K = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Tímto se ze snímků odstraní vysokofrekvenční obsah, třeba hrany. Příklady obrázků po zprůměrování jsou na 4.6 c), 4.7 c).

Jsou i další způsoby, jak potlačit vzniklé šумы na snímku. Používaná v této práci knihovna OpenCV nabízí funkci `fastNlMeansDenoising`². Funguje za předpokladu, že na snímku se budou nacházet podobné plochy (třeba o rozměru 5 × 5). Pokud takové plochy na snímku jsou, tak z nich je možné získat průměrnou hodnotu, která pak nahradí pixely v těch plochách. Příklad použití této funkce je na obrázcích 4.6 d), 4.7 d).

4.2.4 Prahování obrazu

Prahování je metoda, která rozděluje pixely obrazu podle vybrané prahové hodnoty T.

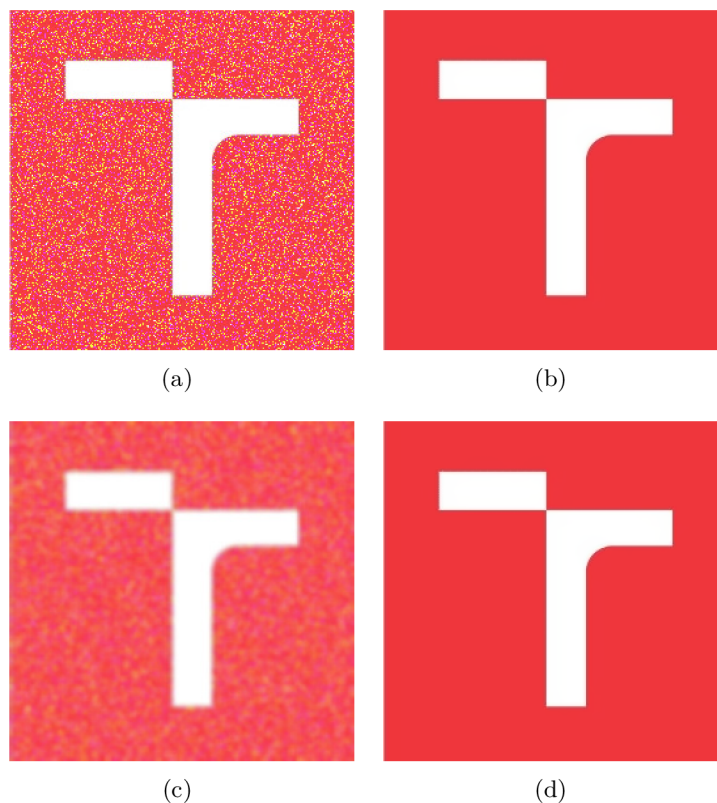
Postup pro vykonání tohoto algoritmu: pro každý pixel obrazu spočítáme hodnotu jeho intenzity, a pokud hodnota intenzity bude větší nebo rovná hodnotě prahu T, tak výstupní hodnota pixelu bude 1, jinak 0.

Tato metoda je uspokojující pro obrazy s velkým kontrastem, může ale vést na jeho značnou degradaci. Navíc, není vždy jasné, jak zvolit vhodný práh [37].

4.3 Návrh algoritmu

Návrh algoritmu vychází z myšlenky, která byla popsána v kapitole 3.4. Při porovnání snímků živé ruky, osvětlené pod různými vlnovými délkami, uvidíme na snímku ruky s menší vlnovou délkou více *rýh*, než na snímku s větší vlnovou délkou. U porovnání s falzifikátem, kde se množství *rýh* nebude měnit tak výrazně, protože nemá takové vlastnosti (vrstvy) jako lidská pokožka.

²https://docs.opencv.org/3.4/d5/d69/tutorial_py_non_local_means.html



Obrázek 4.6: a) Obrázek s šumem, b) Šum byl redukován pomocí Gaussovského filtru, c) Odstranění šumu pomocí zprůměrování, d) Odstranění šumu funkcí `fastNlMeansDenoising`

4.3.1 Detekce regionu zájmu

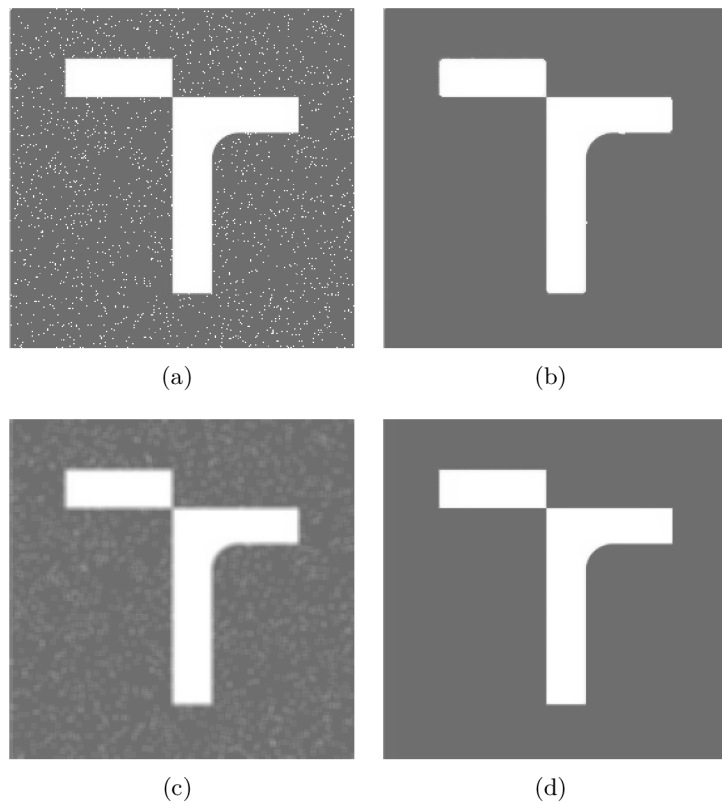
V této části algoritmu probíhá lokalizace oblasti zájmu na snímku. Jelikož na některých snímcích prsty nejsou dostatečně osvětleny nebo úplně chybí, to přináší nepřesnost v detekci rýh, naopak dlaň je pro tyto účely vždy optimální a proto pro tuto práci je dostačující použít jenom dlaň.

Aby bylo možné nechat jenom potřebnou pro detekci část ruky, je nutné zjistit, kde se nachází střed dlaně a následně kolem toho bodu vytvořit útvar a vynechat to, co do toho útvaru nezapadne.

Prvním krokem pro docílení potřebného výsledku by se mělo eliminovat pozadí, které by mohlo přinášet rušivé elementy (jak bylo zmíněno v kapitole 4.1, třeba CASIA knihovna má takové elementy na pozadí). Jsou různé způsoby jak odstranit pozadí, k nejjednodušším patří:

1. segmentace obrazu a na základě toho vytvoření masky, která se bude aplikovat na výchozí snímek,
2. použití strojového učení,
3. nabízená knihovnou OpenCV funkce `createBackgroundSubtractorMOG2`.

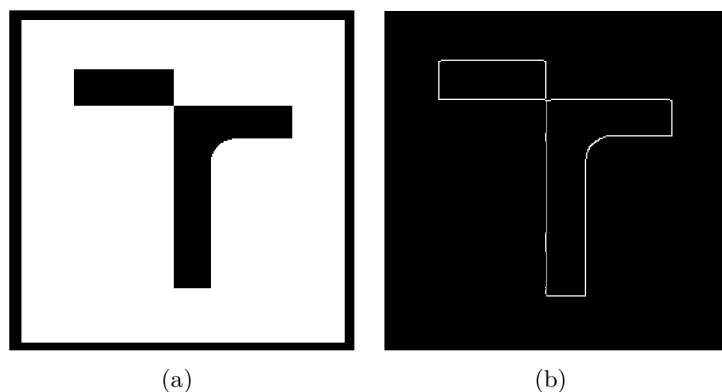
Dva poslední způsoby nejsou vhodné pro tuto práci. Strojové učení z důvodu nedostatečné sady dat pro trénování neuronových sítí (neexistují otevřené databáze snímků falzifikátů). Funkce z knihovny OpenCV skutečně může odstranit pozadí, pracuje ale s video



Obrázek 4.7: a) Obrázek s šumem, b) Šum byl redukován pomocí mediánového filtru, c) Odstranění šumu pomocí zprůměrování, d) Odstranění šumu funkcí `fastNlMeansDenoising`

soubory, kde je potřeba, aby se objekt hýbal, takže není možné ji použít na statický snímek ruky.

Tedy nejlepší volbou je segmentace obrazu a vytvoření masky. Existuje několik řešení, jak segmentovat objekt na snímku: aplikovat algoritmus detekce hran nebo prahování. Příklady toho, jak by to mohlo vypadat se nachází na obrázcích 4.8 a), b).



Obrázek 4.8: a) Výstup po prahování, b) Výstup po detekci hran

Po segmentaci samotné ruky na snímku přichází další část: detekce středu dlaně. Jedním

z nejpobulárnějších způsobu je detekce klíčových bodů – prstů a pak vybudování systému souřadnic, který je založen na detekovaných prstech.

V takovém algoritmu je několik důležitých kroků:

1. detekce dlaně,
2. detekce konturu ruky a nalezení orientačních bodů prstů,
3. výpočet souřadnic regionu zájmu,
4. detekce defektů.

Nejdůležitějším krokem v tomto případě je nalezení orientačních bodů prstů, hlavně prostředního, protože je to orientační bod středu dlaně.

Pokud by se snímky vytvářely pomoci kontaktního snímače, šlo by použít metody založené na řádkovém skenování, kde pixely jsou testovány shora dolů, jakmile se hodnota změni z bílé na černou, detekuje se orientační bod.

Avšak snímky používané v této práci jsou pořízené bezkontaktní kamerou, což by mohlo způsobit komplikace při detekci: ruce se snímají v různých polohách, s nějakou rotací a také mezery mezi prsty se můžou hodně lišit, takže je potřeba detekovat prsty jiným způsobem [25].

4.3.2 Detekce rýh

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, myšlenka detekce živosti vychází z principu množství detekovaných rýh, tím pádem je potřeba je detekovat a kontrolovat množství, které by se pak porovnávalo pro snímky jedné ruky v různých vlnových délkách. Na extrahování důležitých bodů se může použít jeden ze způsobů:

- detekce hran (příklad 4.8 b)),
- detekce klíčových bodů, jako třeba roh, výběžek atd,
- zvýraznění pomoci prahování.

Detekce hran se provádí pomoci různých operátorů, jako jsou třeba Sobel, Prewitt nebo Canny. Umožňují nalézt hrany v obrazu a vytvořit soubor důležitých bodů.

Sobelův operátor detekce hran

Sobelův operátor (anglicky Sobel operator) je diskretní diferenciacní operátor, vypočítává přibližnou hodnotu gradientu funkce intenzity obrazu. Kombinuje v sobě použití Gaussovského filtru a diferenciaci.

Tento algoritmus vychází z předpokladu, že hrana se nachází tam, kde je nesrovnalost ve funkci intenzity nebo dochází k prudkému intenzivnímu gradientu v obraze. Takže pokud se vezme derivace hodnoty intenzity přes obrázek a najdou se body, kde derivace je maximální, tam se bude nacházet hrana. Gradient v této situaci je vektor, jehož složky udávají, jak rychle se měni hodnota pixelu s vzdáleností v horizontálním a vertikálním směru [43].

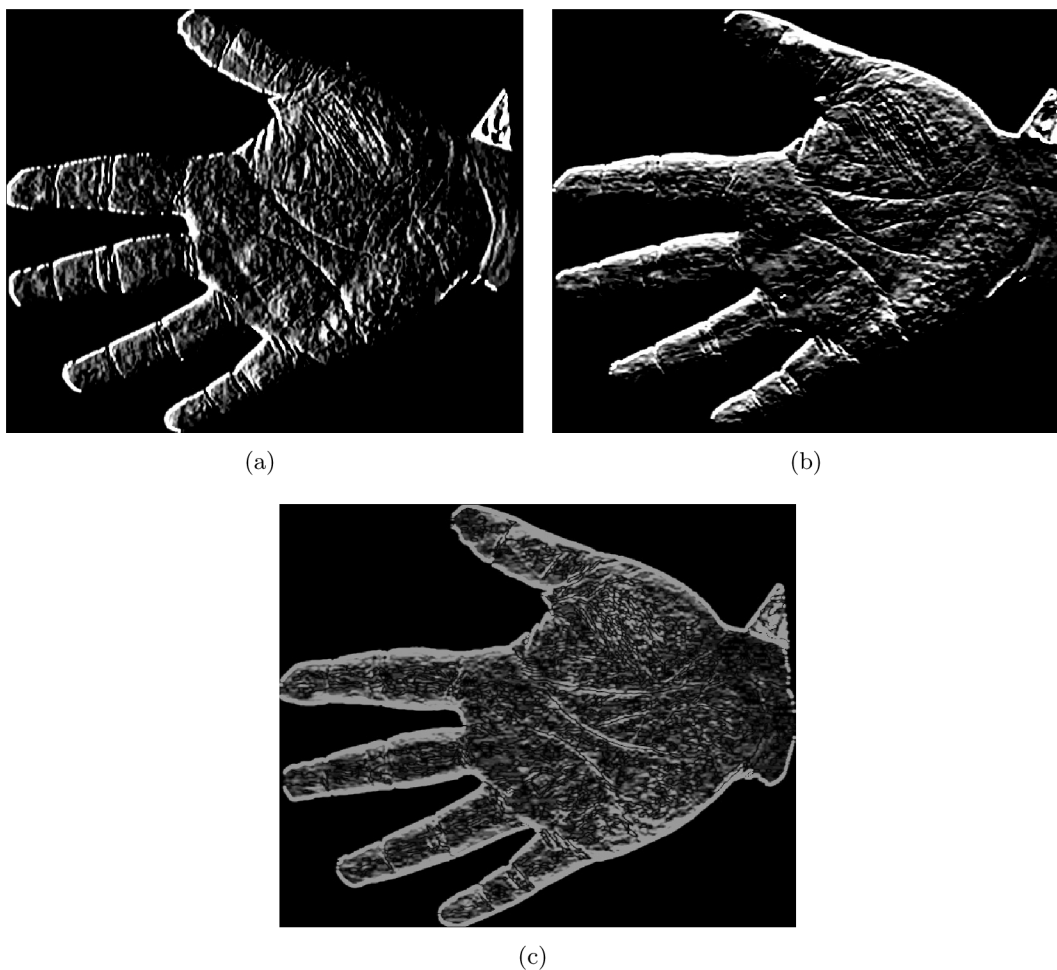
Pro odhad toho, kde se nachází gradient, Sobelův operátor používá dvě masky o rozměru 3×3 [42].

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Maska G_x se používá pro odhad gradientu v horizontálním směru, maska G_y ve vertikálním. Provádí se konvoluce mezi maskou a snímkem, algoritmus počítá gradient intenzity obrazu v každém bodě a poté určuje směr zvýšení intenzity obrazu v každém bodě. Potom se vertikální a horizontální gradient kombinují a určí se absolutní hodnoty gradientu v každém bodě a směr tohoto gradientu pomocí vzorce: [18]

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4.4)$$

Ukázka tohoto algoritmu aplikované na snímek ruky je na obrázcích 4.9.



Obrázek 4.9: a) Horizontální gradient, b) Vertikální gradient, c) Gradient

Cannyho hranový detektor

Cannyho hranový detektor (anglicky Canny Edge Detector) je populární algoritmus na detekci hran, který se skládá z několika fází [5].

1. prvním krokem je redukce šumu, v tomto algoritmu se používá Gaussovský filtr, který již byl zmíněn v kapitole 4.2,

2. dalším krokem je počítání amplitudy gradientu a jeho směru. Dělá se to pomocí Sobelova jádra (viz kapitolu 4.3.2) v horizontálním a vertikálním směru, aby se získaly derivace G_x, G_y v těchto směrech. Z těchto dvou derivací se pro každý pixel najde gradient (rovnice 4.5) a jeho směr (rovnice 4.6) následovně:

$$Edge_Gradient(G) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4.5)$$

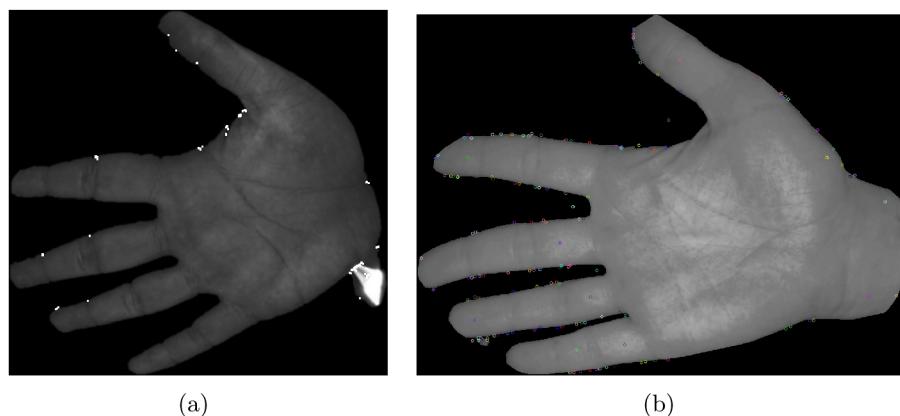
$$Angle(\theta) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (4.6)$$

Obvykle se směr gradientu určuje pomocí čtyř úhlů: 0, 45, 90 a 135 stupňů, směr gradientu je vždy kolmý na hrany [5],

3. non-maximum suppression (angl.) je algoritmus, který eliminuje nežádoucí pixely netvořící okraj. Aby se to provedlo, u každého pixelu se kontroluje, zda se jedná o lokální maximum v jeho okolí ve směru gradientu [46],
4. posledním krokem je hysterezní prahování, pro které jsou potřeba dvě prahovací hodnoty: minimální a maximální. Všechny hrany, které budou mít hodnotu intenzity gradientu menší, než minimální práh nebudou považovány jako hrany a naopak, hrany s hodnotou větší, než maximální práh - budou hrany. Pokud jsou nějaké hrany, které se nachází mezi dvěma prahovacími hodnotami, o nich se rozhoduje na základě toho, jestli jsou připojeny k hranám, o kterých se již rozhodlo [46].

Detekce klíčových bodů

Pro detekci klíčových bodů existuje několik různých algoritmů, například Harris Corner Detection, SIFT (anglicky Scale-Invariant Feature Transform), SURF (angl. Speeded Up Robust Feature) nebo ORB (Oriented Fast and Rotated BRIEF). Všechny jsou naimplementovány v knihovně OpenCV. Příklady použití některých z těchto algoritmů jsou na obrázcích 4.10 a), b).



Obrázek 4.10: a) Harris Corner Detection, b) SIFT

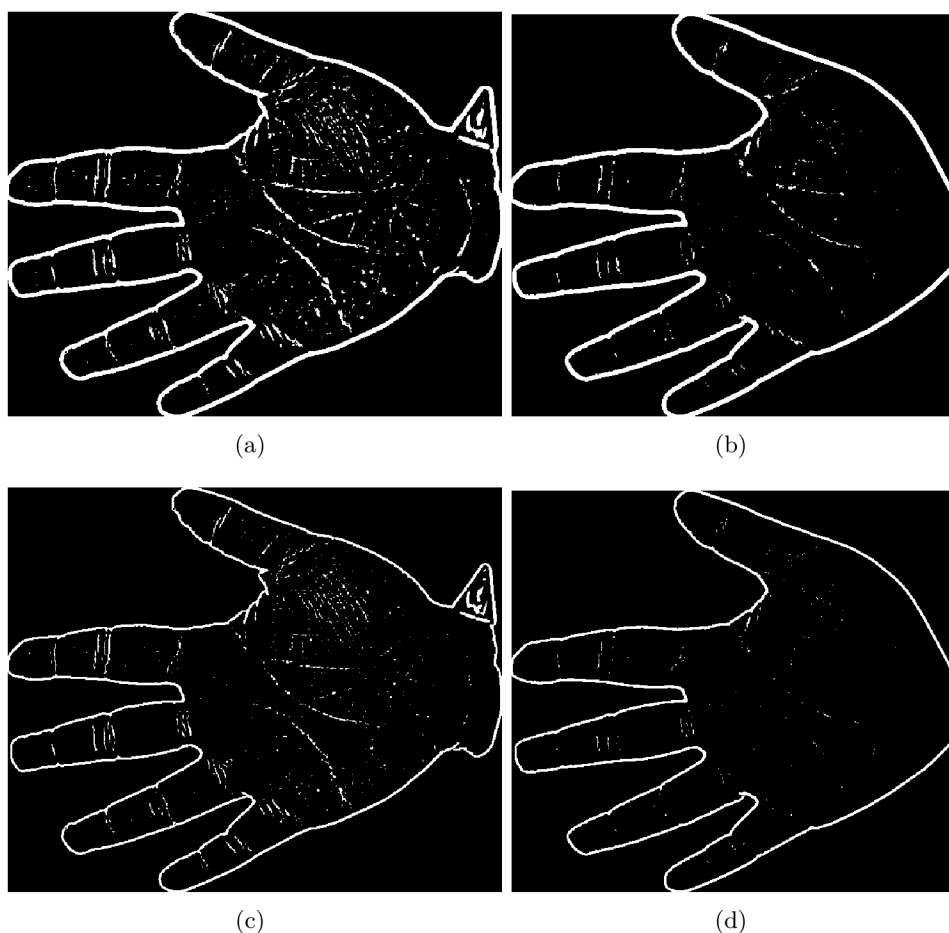
Prahování

Prahování již bylo zmíněno a otestováno v kapitole 4.2.4, ale knihovna openCV nabízí další možnost prahování pomocí funkce `adaptiveThreshold`. Parametry funkce jsou: snímek,

maximální hodnotu prahu, adaptivní metoda, typ prahování, rozměr bloku a konstantu C .
Adaptivní metody jsou dvě:

- `ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C` - hodnota pixelu se počítá jako střední hodnota bloku (rozměr byl předán funkci) sousedního pixelu minus hodnota konstanty C .
- `ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C` - hodnota pixelu se počítá jako vážený součet bloku sousedního pixelu minus konstanta C .

Příklady práce těchto metod znázorněny na obrázcích 4.11 a), b) byly zpracovány metodou `ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C`, c), d) pomocí metody `ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C`.



Obrázek 4.11: a), c) Ruka nasnímana v délce 460 nm, b), d) Ruka nasnímana v délce 630 nm

Mezi snímky je vidět rozdíl: na snímcích a), b) je zvýrazněno více rýh a jsou patrnější, než na snímcích c), d), kde jsou tenčí a je jich obecně méně. Tím pádem pro větší zvýraznění rýh je vhodnější použít metodu `ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C`.

Kapitola 5

Implementace

Táto kapitola je zaměřená na implementaci navrženého algoritmu a metod z kapitol 4.2 a 4.3.1. Popisují se zde použité algoritmy a metody, které se následně prokázaly za efektivní. Obecně pro implementaci byl použit programovací jazyk Python3 díky jednoduchosti práce s ním, velké rozšířenosti a dostupnosti knihoven. Pro práci s obrázkovými daty byla použita knihovna OpenCV. Logické schéma programu je znázorněno na obrázku 5.1.

5.1 Předzpracování snímku

5.1.1 Zlepšení jasu

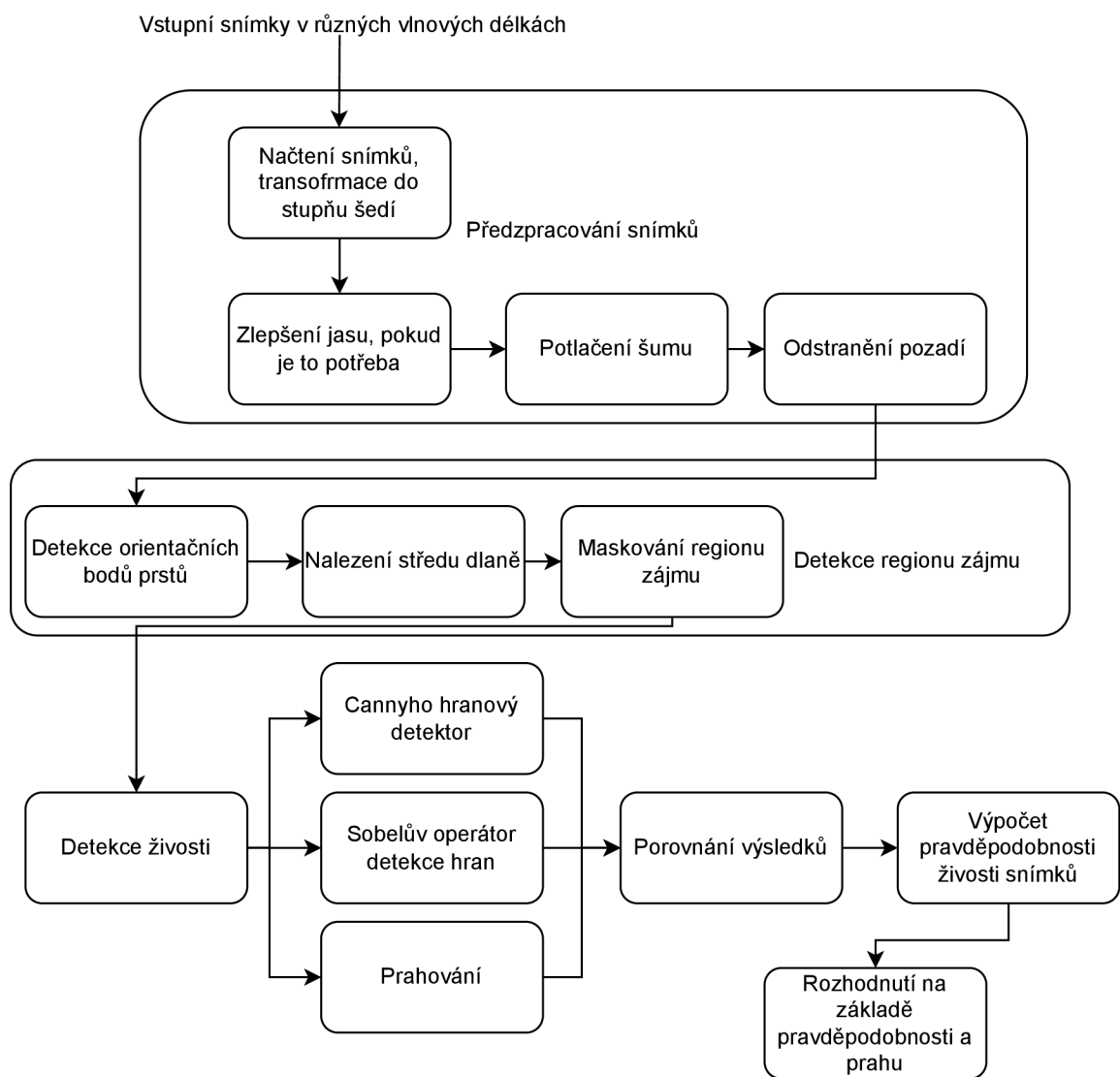
Po vyzkoušení všech metod, popsaných v návrhu v kapitole 4.2.1, bylo rozhodnuto zůstat u korekci přidáním konstantní hodnoty a to z následujících důvodů.

1. Většina funkcí vyžaduje nějaký proměnný parametr, jako třeba škálovací faktor u lineárního škálování nebo práh u omezeného adaptivního vyrovnání histogramu, a výběr těchto parametrů nebylo možné nějak zautomatizovat. Například, pro vybrání konstanty, která se bude přičítat je možné použít Otsuovu automatickou hodnotu.
2. Metody, které pracují s histogramem snímku moc osvětlují jeho střed a tím odstiňují prsty, což následně působilo nekonzistenci při prahování. Také na snímku 4.5 d) je vidět, že po zvýšení jasu jsou přítomné nežádoucí šumy.

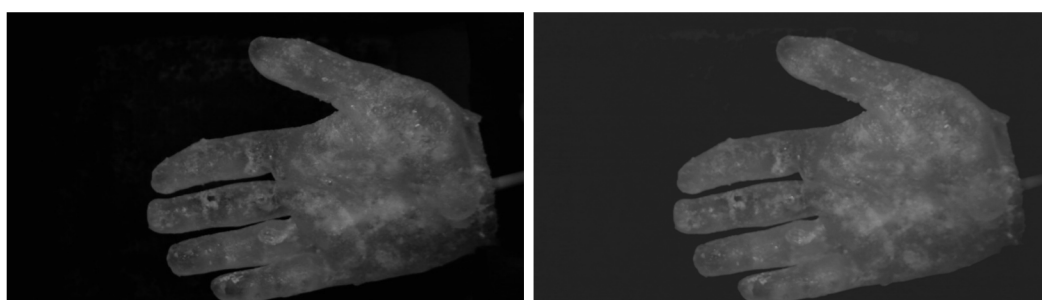
Zlepšení jasu v této práci je implementováno ve funkci `improve_bright`, která přijímá snímek a následně jeho vrací s zvýšeným jasem. Dělá to následujícím způsobem:

- prvně zjistí aktuální hodnotu jasu pomocí výpočtu střední hodnoty snímku,
- následně porovná aktuální hodnotu jasu s hodnotou 25, která byla empiricky zjištěna jako nejnižší možná hodnota jasu, kde snímky se ještě korektně zpracovávají,
- pokud je jas snímku menší, než nižší hodnota, provede se vylepšení. Zjistí se optimální hodnota jasu pomocí Otsuovy metody a ta hodnota se přičte funkcí `add`,
- pokud hodnota jasu snímku je větší jako nižší možná hodnota, funkce vrátí neupravený snímek.

Výsledný snímek pak vypadá následovně, viz obrázek 5.2.



Obrázek 5.1: Logické schéma programu



(a)

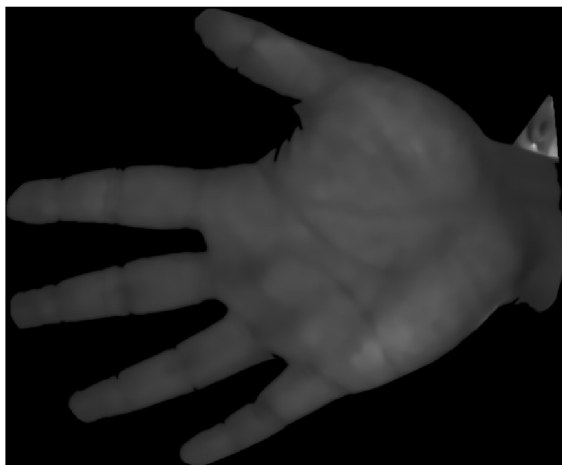
(b)

Obrázek 5.2: a) Původní snímek, b) Snímek se zvětšenou hodnotou jasu

5.1.2 Potlačení šumu

Potlačení šumu je v dané práci použito jako pomocný nástroj při detekci prstů ve funkci `find_fingers`. Funkce, která se používá je `blur` a princip jejího fungování byl popsán v kapitole 4.2. Tato funkce byla použita z důvodu vyhlazování ostřejších linií a úhlů, které by mohli narušit proces prahování a zhoršit jeho kvalitu. Nevýhodou její používání jsou proměnné parametry, které funkce vyžaduje. Tyto parametry se snímek od snímku liší a nejdou vybrat automaticky na základě hodnot obsažených v snímku, proto musely být zjištěny empirickým způsobem.

Z podobného důvodu nebyla použita funkce `fastNlMeansDenoising`: proměnné parametry, jako síla a rozměry oken, i když byly zvoleny stejně, na různých snímcích dávaly různé výsledky, což působilo pak nekorektní práci následujícího algoritmu a nepodařilo se zautomatizovat výběr těchto parametrů podle snímku. Jako další problém se ukázal, že konečné snímky rukou byly moc rozmazané a nešlo s nimi korektně pracovat, jako například na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Výsledek zpracování snímku funkcí `fastNlMeansDenoising`

5.1.3 Odstranění pozadí

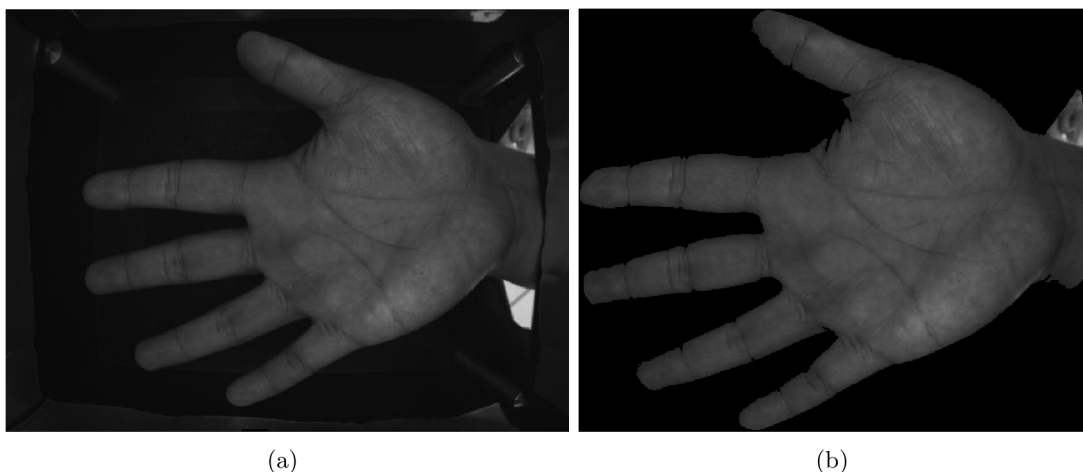
Odstranění pozadí v této práci je implementováno v několika krocích:

1. prvotní ořezání pozadí kolem ruky: je implementováno ve funkci `crop`, která jako parametry přijímá snímek a jeho název. Pracuje na následujícím principu: vytvoří se prahovaný snímek (parametr pro práh se vybere automaticky na základě hodnot, obsažených ve snímku - parametr `THRESH_OTSU`¹),
2. Následně se v prahovém snímku vyhledají kontury (funkce `findContours`) a nalezne se největší kontura, která patří obrysu ruky,
3. na konturu se aplikuje funkce `convexHull`, která vytvoří konvexní obálku kolem ruky,
4. na základě této obálky snímek se ořeže,

¹https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html

5. úplné odstranění pozadí: snímek se pošle do funkce `bg_remove`, ve kterém se pomocí prahování (podobně jako v předešlém kroku) vytvoří maska ruky,
6. maska se aplikuje na původní snímek.

Výsledek po aplikaci algoritmu je na obrázku 5.4



Obrázek 5.4: a) Snímek s pozadím, b) Pozadí bylo odstraněno

5.2 Detekce regionu zájmu

Tato část práce implementuje lokalizaci oblasti zájmu na snímku, návrh které byl popsán v kapitole 4.3.1.

Tímto se zabývá hned několik funkcí v programu. Proces začíná ve funkci `find_fingers`, která vrací snímek se zvýrazněnými prsty a pole s jejich souřadnicemi. Aby to bylo možné funkce využívá následujících algoritmů:

- prahování,
- hledání obrysu ruky pomocí funkce `findContours`,
- vytvoření konvexní obálky kolem ruky.

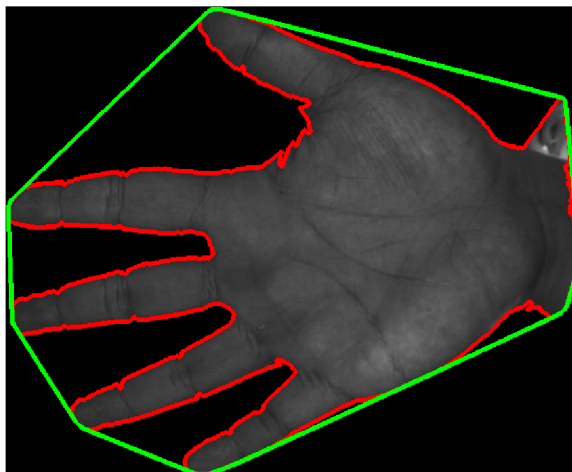
Výsledek po aplikaci těchto algoritmů je na obrázku 5.5.

Dalším krokem se použije funkce `convexityDefects`, která hledá tzv. odchylky od konvexní obálky. Příklad toho, jak tyto odchylky vypadají je na obrázku 5.6. Pro každou odchylku se vrací bod začátku, bod konce, nejbližší bod a přibližná vzdálenost k nejbližšímu bodu.

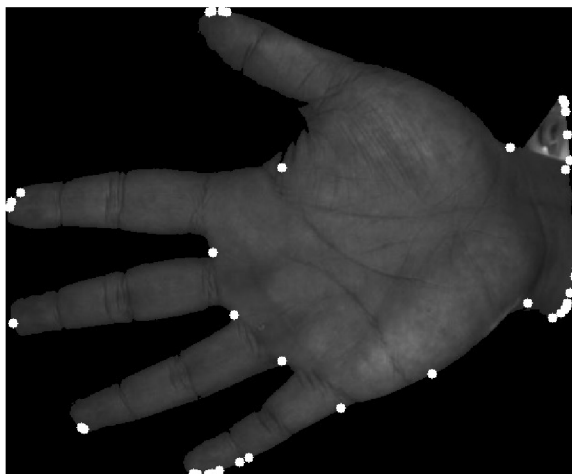
Pak byla použita kosinová věta: pro každý trojúhelník ABC, jehož strany mají délky a, b, c a jehož vnitřní úhel proti straně BC má velikost α , platí

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 * b * c * \cos \alpha \quad (5.1)$$

Předpokládá se, že za normálních podmínek úhel mezi prsty nemůže být větší, než 90 stupňů. A postupuje se následujícím způsobem:



Obrázek 5.5: Průběžný výsledek



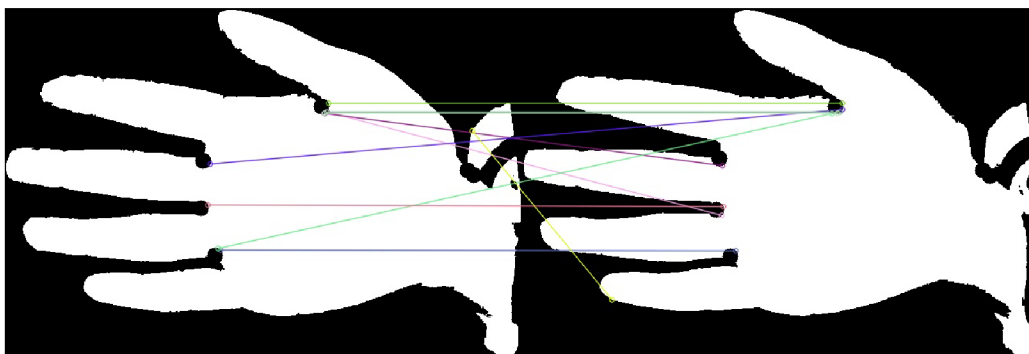
Obrázek 5.6: Odchylky od konvexní obálky

1. postupně se prochází pole odchylek,
2. pomoci souřadnic bodů se počítají úhly, které svírají mezi sebou,
3. z úhlů se spočte arkus kosinus,
4. jeho hodnota se porovná s 90 stupni (ekvivalentní $\frac{\pi}{2}$),
5. pokud je úhel menší, tak se bod zařadí do pole, obsahujícího souřadnice prstů.

Pro větší přesnost tohoto algoritmu byla přidána další funkce `match_fingers`, která již pracuje se dvěma snímky stejné ruky, ale v jiných vlnových délkách. Jako argumenty přijímá dva snímky, na kterých jsou zvýrazněny prsty, jejich jména a dvě pole, obsahující souřadnice prstů - tyto parametry jsou předávány z předešlé funkce. Ve funkci se pracuje s třídou ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) z knihovny OpenCV, která implementuje detektor klíčových bodů a extractor deskriptorů.

Najdou-li se podobné body mezi dvěma snímky a bude-li zjištěno, že na jednom ze snímků je nějaký bod navíc, který nepatří k prstům, tak postupně prochází nalezené po-

dobné body a body vracené funkcí `find_fingers`. Pokud najde 2 body vedle sebe v rozmezí maximálně 15 pixelů, přidá tento bod do pole "good_fingers", které následně vrátí. Porovnání rukou pomocí této funkce je znázorněno na obrázku 5.7.



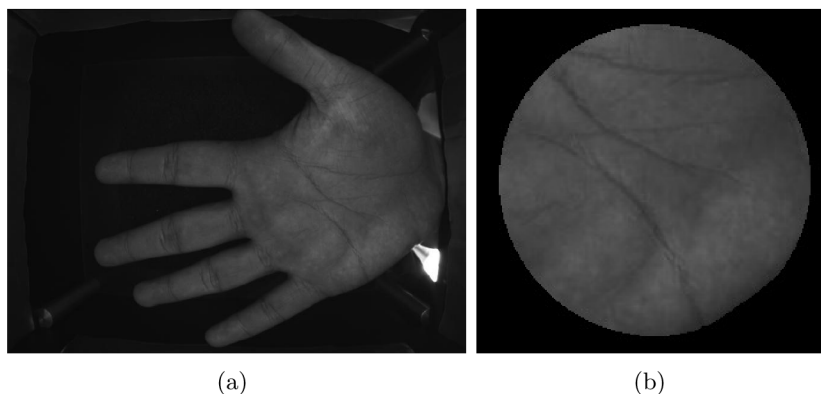
Obrázek 5.7: ORB detekce klíčových bodů

Poslední funkce, která se využívá pro detekci oblasti zájmu je `cut_fingers`. Jako parametry přijímá snímek, jeho jméno a pole souřadnic prstů. Funkce určí délku a šířku snímku, vezme souřadnice prostředního prstu a spočítá medián mezi prstem a šířkou obrázku. Jako hodnotu na ose Y vezme hodnotu prstu. Tímto způsobem je určován střed ruky. Potom funkce určí rádius kruhu podle vzorce:

$$radius = (median - x)/1.5, \quad (5.2)$$

kde `median` je horizontální souřadnice středu ruky, a `x` je souřadnice prostředního prstu. Hodnota 1.5 byla zjištěna empiricky.

Kruh o takovém rádiu naloží jako masku na snímek, vyjme jej a bude dále s ním nakládat jako s oblastí zájmu. Výsledek po aplikování tohoto postupu je na obrázku 5.8



Obrázek 5.8: a) Ruka [6], b) Oblast zájmu ruky (dlaně)

5.3 Vyhodnocení živosti

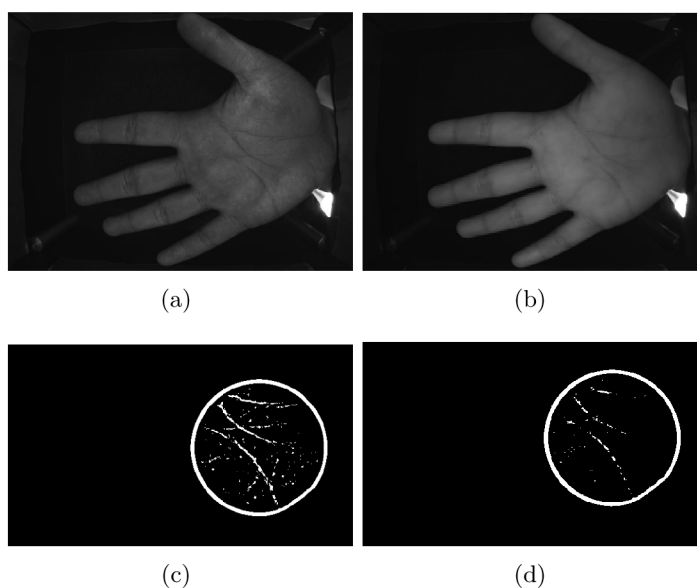
Detekce živosti v této práci je implementována pomocí několika různých způsobů.

Z těch způsobů, které byly zmíněny v návrhu nebyl použit pouze jeden: detekce klíčových bodů. Příčinou bylo to, že většina detekovaných bodů patřila spíše vnější kontuře ruky, ale

v tomto kroku to již nebylo potřeba. Navíc, některé z těchto bodů ani nepatřili ruce, což vyloučilo možnost použití této metody pro ořezání pozadí.

První způsob se nachází ve funkci `counters_count`, která potřebuje předat samotný snímek a jeho název. Funkce používá primárně prahování, funkce kterého je převzata z knihovny OpenCV: `adaptiveThreshold`. Adaptivní metoda, která byla použita je `ADAPTIVE_THRESH_MEAN_C`, protože se prokázala za výkonnější. Nevýhodou použití této funkce jsou proměnné parametry, viz 4.3.2, které v této práci musely se empiricky zjistit. Výsledky dosahují očekávané přesnosti a proto bylo rozhodnuto funkci použít.

Po tom, co se na snímek aplikuje prahovací funkce, spočítá se množství nalezených čar pomocí nalezení kontur a výsledek se předá hlavní funkci, která provádí vyhodnocení výsledků. To, jak budou vypadat snímky po aplikaci tohoto postupu je znázorněno na snímcích 5.9 a 5.10. Je patrné, že se množství viditelných rýh na snímku živé ruky zmenšuje s tím, jak roste vlnová délka, a opačná situace se projeví na snímcích falzifikátu.



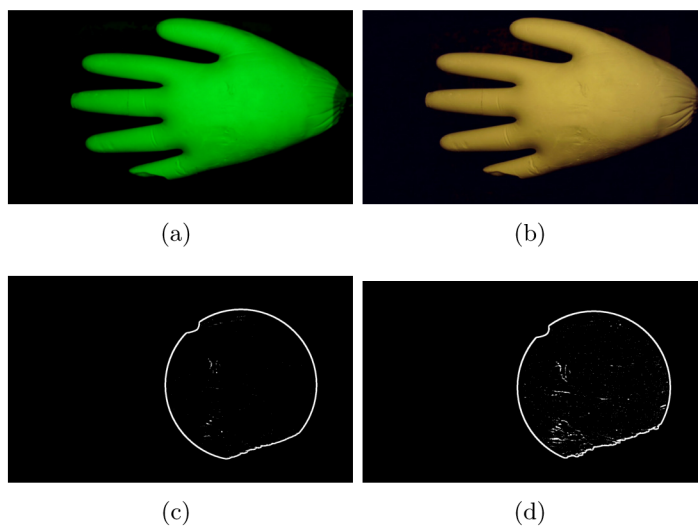
Obrázek 5.9: a) Ruka nasnímána ve vlnové délce 460 nm, b) Ruka nasnímána ve vlnové délce 630 nm, c) Výstup po prahovací funkci snímku v délce 460 nm, d) Výstup po prahovací funkci snímku v délce 630 nm

Druhá metoda používá Cannyho hranový detektor popsáný v kapitole 4.3.2, který je implementován knihovnou OpenCV ve funkci `Canny`. Funkce potřebuje jenom snímek a rozsah prahu. V této práci daná metoda se nachází v `Canny_detect`. Pro nalezení rozmezí prahovacích hodnot se používá Otsuova metoda, která určuje optimální hodnotu prahu z histogramu snímku. Avšak Otsuova metoda vrací jenom jednu hodnotu, když Canny funkce potřebuje pro práci dvě. Proto se hodnota modifikuje pomocí vztahu:

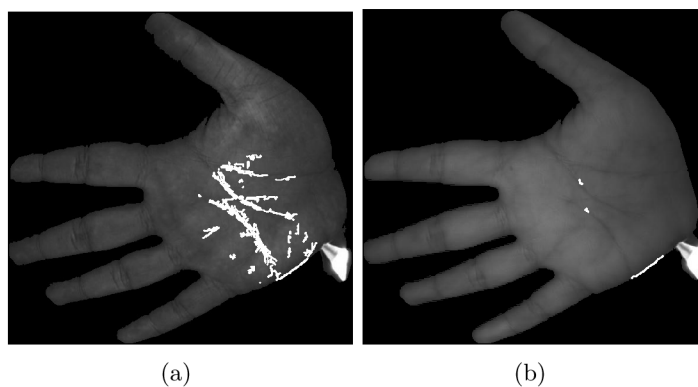
$$(1 \pm 0.33) * otsu \tag{5.3}$$

kde *otsu* je optimální prahovací hodnota z Otsuove funkce.

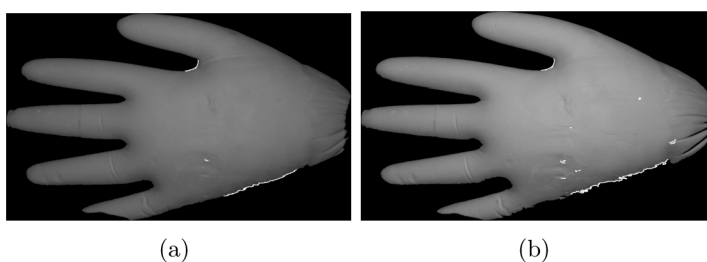
Funkce vrací jako výsledek snímek, který byl zpracován Canny funkcí a pak se zase počítá množství nalezených čar. Příklady využití této metody jsou na obrázcích 5.11, 5.12.



Obrázek 5.10: a) Falzifikát nasnímán ve vlnové délce 525 nm, b) Falzifikát nasnímán ve vlnové délce 580 nm, c) Výstup po prahovací funkci snímku v délce 525 nm, d) Výstup po prahovací funkci snímku v délce 580 nm



Obrázek 5.11: a) Ruka nasnímána ve vlnové délce 460 nm se zvýrazněnými rýhami pomocí Cannyho hranového detektoru, b) Ruka nasnímána ve vlnové délce 630 nm se zvýrazněnými rýhami pomocí Cannyho hranového detektoru



Obrázek 5.12: a) Falzifikát nasnímán ve vlnové délce 525 nm zpracován pomocí Cannyho hranového detektoru, b) Falzifikát nasnímán ve vlnové délce 580 nm zpracován pomocí Cannyho hranového detektoru

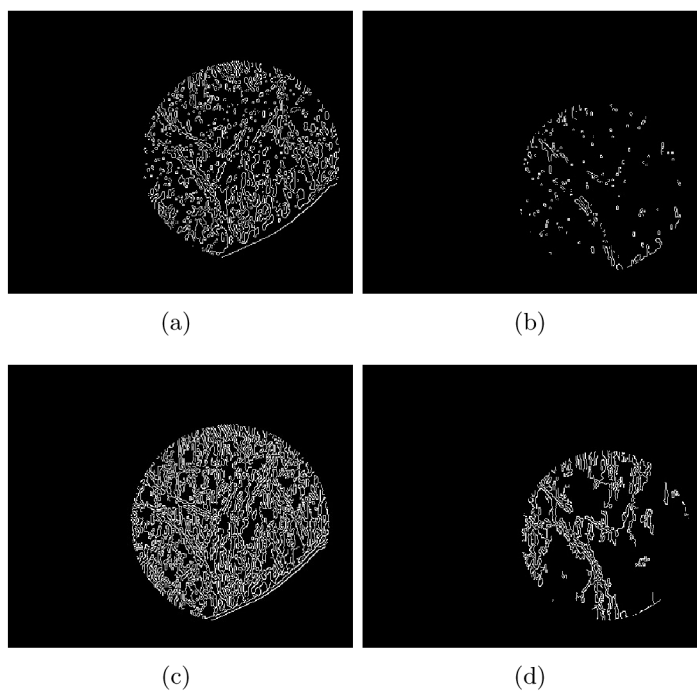
Třetí přístup k detekci živosti využívá Sobelův operátor pro detekci hran. Ve funkci `sobel_edge` se provede zpracování snímku na základě postupu, který byl zmíněn v kapitole 4.3.2. Výsledkem je gradient snímku (jako například obrázek 4.9 c)). Po jeho nalezení je potřeba vyextrahovat rýhy, aby bylo možné porovnat jejich množství. Na toto jsou použity dva způsoby, první se vykonává následně:

1. na snímek s gradientem se aplikuje prahování s automatickou hodnotou z Otsuovy metody,
2. na prahovaný snímek se následně použije Cannyho hranový detektor
3. na tomto snímku se spočítají kontury.

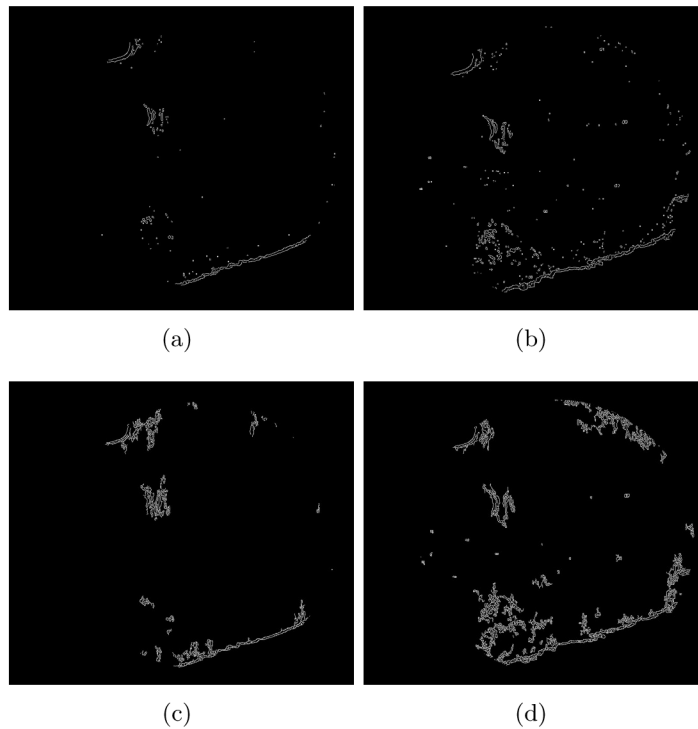
Druhý způsob:

1. na snímek se aplikuje Cannyho hranový detektor,
2. z tohoto snímku se spočítají kontury.

Ukázka výsledných snímků po aplikaci prvního postupu je na obrázcích 5.13 a), b), 5.14 a), b). Příklad práce druhého postupu je na stejných obrázcích pod c), d).



Obrázek 5.13: a), c) Ruka nasnímána ve vlnové délce 460 nm, b), d) Ruka nasnímána ve vlnové délce 630 nm



Obrázek 5.14: a), c) Falzifikát nasnímán ve vlnové délce 525 nm , b), d) Falzifikát nasnímán ve vlnové délce 580 nm

Po tom, co každá z popsaných metod předá hlavní funkci počet kontur, které patří snímkům, proběhne vyhodnocení, zda jsou to snímky živé ruky. Vykonává se to následujícím způsobem:

- hlavní funkce porovná množství kontur od každé metody pro dva snímky,
- pokud snímek s menší vlnovou délkou bude mít větší množství kontur, do příslušné proměnné se zapíše 1, což bude znamenat, že kontrola prošla úspěšně,
- pokud situace bude opačná, do proměnné se zapíše 0 a to znamená, že kontrola selhala,
- podle následujícího vzorce se spočítá pravděpodobnost toho, že předložený snímek je snímkem živé ruky:

$$\text{probability} = \frac{\text{first_check} + \text{second_check} + \text{third_check} + \text{fourth_check}}{4} \times 100 \quad (5.4)$$

- tato pravděpodobnost se porovná s prahem, který byl zadán uživatelem při spuštění skriptu, a pokud pravděpodobnost je větší nebo se rovná hodnotě prahu — vrátí se informace, že se jedná o živou ruku a s jakou pravděpodobností,
- v opačném případě se vypíše informace, že se jedná falzifikát a jaká je pravděpodobnost toho, že na snímku je falzifikát.

Příklady výstupní hlášky:

- v případě, že do programu byl předán snímek falzifikátu: [FALSE] probability of being a fake is 100.0%
- v případě, že do programu byl předán snímek živé ruky: [OK] probability of being a real hand is 100.0%

Kapitola 6

Vyhodnocení

Tato kapitola práce se zabývá vyhodnocením dosažených výsledků pomocí testování na dostupných databázích snímků a za různých parametrů aplikovaných na výsledný algoritmus.

6.1 Vyhodnocení nejvhodnějších vlnových délek

Vlnová délka 2. snímku Vlnová délka 1. snímku	465 nm	525 nm	580 nm	625 nm	855 nm
465 nm	0%	10%	26.9%	69.5%	81.5%
525 nm	–	0%	89.4%	95.4%	95.8%
580 nm	–	–	0%	85.1%	79.1%
625 nm	–	–	–	0%	66.6%
855 nm	–	–	–	–	0%

Tabulka 6.1: Vyhodnocení úspěšnosti použití snímků různých vlnových délek pro STRaDe reálné ruče

V tabulce 6.1 je vyhodnoceno použití snímků všech dostupných vlnových délek pro snímky reálných rukou z databáze STRaDe. Jak je patrné z tabulky, nejlepší výsledky vyhodnocení jsou pro ty snímky, které se liší ve vlnových délkách více než 100 nm. Například, 525 nm a 625 nm nebo 465 nm a 855 nm. Z důvodu toho, že obecně nejlepší výsledky napříč celou tabulkou jsou dosaženy při kombinaci snímků 525 nm a 625 nm a 525 nm a 855 nm, pro další práci a testování bylo rozhodnuto použít snímky 525 nm a 625 nm, protože vlnová délka 855 nm už nepatří do rozsahu viditelného světla. Při porovnání úspěšnosti použití snímků

Vlnová délka 2. snímku Vlnová délka 1. snímku	465 nm	525 nm	580 nm	625 nm	855 nm
465 nm	0%	77.3%	86%	94.7%	84.3%
525 nm	–	0%	81.7%	92.1%	77.3%
580 nm	–	–	0%	85.2%	66.9%
625 nm	–	–	–	0%	41.7%
855 nm	–	–	–	–	0%

Tabulka 6.2: Vyhodnocení úspěšnosti použití snímků různých vlnových délek pro STRaDe falzifikáty

různých vlnových délek pro falzifikáty, vytvořené ve skupině STRaDe (výsledky porovnání v tabulce 6.2), je možné dospět k podobnému závěru, jako z tabulky 6.1, nejlepší volbou při porovnání jsou snímky, které byly vytvořeny ve vlnových délkách 525 nm a 625 nm. Podle daného výběru byly zvoleny i snímky v databázi CASIA s vlnovými délkami 460 nm a 630 nm, jako nejbližší možná alternativa snímkům ze skupiny STRaDe.

Tím pádem v dalších testováních byly použity snímky vytvořené ve vlnových délkách 525 nm a 625 nm z databáze STRaDe a 460 nm a 630 nm z CASIA databáze.

6.2 Vyhodnocení vstupního prahu

Tabulka 6.3 ukazuje, jaké úspěšnosti dosáhne algoritmus při různých hodnotách prahu. Úspěšnost testů se počítá jako

$$\text{Úspěšnost} = \frac{\text{počet zvládnutých testů}}{\text{celkový počet testů}} \quad (6.1)$$

kde se test pro falzifikáty bere jako zvládnutý v situaci, když program nahlásí snímek jako falzifikát, a pro živé ruce, když program nahlásí snímek jako živou ruku. Z tabulky 6.3 je vidět, že nejvhodnějším prahem je 75, protože je to optimální pro počet falešně pozitivních falzifikátů a pozitivních reálných rukou pro všechny 3 používané databáze snímků. Je možné použít i práh 50, protože poskytované výsledky jsou uspokojivé, ale práh 75 nabízí lepší bezpečnost díky lepšímu odhalení falzifikátů.

DB snímků \ Práh	50	75	100	Chyba
CASIA Real	93.9%	92.9%	38.3%	2%
STRaDe Real	95.4%	86.3%	50.0%	43.5%
STRaDe Fake	92.1%	95.6%	97.3%	16.5%

Tabulka 6.3: Vyhodnocení úspěšnosti nastavení prahu pro různé databáze snímku

6.3 Vyhodnocení úspěšnosti metod

Tato část testování se zabývá testováním každé metody detekce živosti zvlášť. Podrobný popis metod je v kapitole 5.3. Každá z implementovaných metod byla testována pro tři dostupné databáze snímků. Souhrnné hodnocení se nachází v tabulce 6.4. Pro vyhodnocení úspěšnosti každé z metod byl použit následující vztah:

$$\text{Úspěšnost} = \frac{\text{počet správných vyhodnocení metodou}}{\text{celkový počet vyhodnocovaných snímků}} \quad (6.2)$$

V tomto případě, vyhodnocení metodou není závislé na celkovém vyhodnocení algoritmem, a tím pádem i na hodnotě prahu. Tedy, pokud metoda vyhodnotí snímek živé ruky správně, ale algoritmus nahlásí, že je to falzifikát – test pro danou metodu se spočítá jako úspěšný.

Z tabulky 6.4 je patrné, že celkově nejlepší úspěšnost při vyhodnocení mají metody, které jsou označeny jako *Sobel + Kontury* a *Sobel + Canny*, které jsou popsány jako dva způsoby ve třetí metodě v kapitole 5.3. Nejhorší úspěšnost v testech má metoda označená v tabulce jako *Canny*, která je popsána ve stejné kapitole jako druhá metoda.

DB snímků \ Metoda	Kontury	Canny	Sobel + Kontury	Sobel + Canny
CASIA Real	93.9%	38.3%	92.9%	93.9%
STRaDe Real	68.1%	72.7%	95.4%	95.4%
STRaDe Fake	95.8%	43.7%	92.7%	89.5%

Tabulka 6.4: Hodnocení úspěšnosti každé metody v poměru ke všem testům

6.4 Vyhodnocení úspěšnosti množství použitých snímků

Standardně se program spouští se dvěma snímky, pro snímky pořízené spolu se skupinou STRaDe se používají vlnové délky 525 nm a 625 nm, pro snímky z databáze CASIA [6] 460 nm a 630 nm.

Avšak, ruce a falzifikáty jsou nasnímány ve větším množství vlnových délek, a proto bylo rozhodnuto otestovat také možnosti algoritmu za podmínek, kdy se použije více, než dva snímky. Výsledky takových testů jsou v tabulce 6.5, kde jsou znázorněny různé hodnoty použitých prahu a množství snímku. Data pro dva snímky jsou v tabulce 6.3.

Pro vyhodnocení úspěšnosti algoritmu pracujícího se třemi snímky byly využity snímky ve vlnových délkách, pro snímky ze skupiny STRaDe: 525 nm, 580 nm a 625 nm a pro CASIA databázi 460 nm, 630 nm a 700 nm.

Pro vyhodnocení úspěšnosti algoritmu pracujícího se čtyřmi snímky byly využity různé vlnové délky, pro snímky ze skupiny STRaDe: 525 nm, 580 nm, 625 nm a 855 nm a pro CASIA databázi: 460 nm, 630 nm, 700 nm a 850 nm.

DB snímků \ Množství	3 snímky				4 snímky			
	50	75	100	Chyba	50	75	100	Chyba
CASIA Real	83.1%	65.2%	3%	3%	29.2%	10.1%	0%	7.2%
STRaDe Real	87.5%	43.7%	25%	58.9%	56.2%	31.2%	6.2%	58.9%
STRaDe Fake	100%	100%	100%	19.1%	100%	100%	100%	24.3%

Tabulka 6.5: Hodnocení úspěšnosti množství použitých snímků

Při porovnání úspěšnosti algoritmu pro dva, tři a čtyři snímky je možné dospět k závěru, že pro systémy, kde čas zpracování je prioritou je vhodnější použít algoritmus, pracující se dvěma snímky a prahem 75, a pro systémy, kde prodleva o dvě až tři vteřiny nebude rozhodující, optimálnějším řešením bude daný algoritmus pracující se třemi snímky a hodnotou prahu 50.

Kapitola 7

Závěr

Cílem této práce byla analýza snímků z existujících databázi, návrh a implementace algoritmu, jehož účelem je detekce živosti podle předložených snímků. Byly prozkoumány existující databáze s multispektrálními snímky a z důvodu chybějících snímků falzifikátů byly vytvořeny dvě malé databáze, které obsahovaly jak snímky falzifikátů, tak i živých rukou.

Následně byl vytvořen návrh algoritmu, který využívá principu interakce lidské pokožky a viditelného světla, kde u snímků rukou v menší vlnové délce je viditelné větší množství rýh, protože paprsky světla se odráží od horní vrstvy pokožky, než u snímků rukou vytvořených ve větší vlnové délce, kde paprsky pronikají hlouběji do pokožky.

Navržený algoritmus byl implementován a pracuje následujícím způsobem. Na začátku probíhá fáze předzpracování snímku, která zahrnuje: vylepšení jasu, potlačení šumu, odstranění pozadí. Dále se detekuje region zájmu, v této práci se používá střed dlaně, který byl zvolen z důvodu toho, že má lepší světelné a stabilní podmínky, naopak prsty nejsou tak dobře osvětlené. V tomto regionu probíhá samotná detekce živosti, kde každá ze čtyř metod specificky zvýrazní rýhy a spočítá jejich množství.

Poté, co se pro každou metodu zvlášť porovná množství rýh, algoritmus vyhodnotí pravděpodobnost, zda-li předložený vzorek patří živému člověku. Pokud pravděpodobnost bude větší nebo se bude rovnat zadanému prahu, snímek se vyhodnotí pozitivně, tedy jako živá ruka, v opačném případě jako falzifikát.

Algoritmus byl otestován pomocí čtyř parametrů: vyhodnocení vlnových délek snímků, vyhodnocení vstupního prahu, úspěšnosti jednotlivých metod a množství použitých snímků. Na základě výsledků testování vychází úspěšnost odhalení falzifikátu větší než 90%, úspěšnost detekce reálných rukou větší než 85%. Je tedy možné dospět k závěru, že vypracovaný postup plní zadaný cíl a detekuje živost.

Experimentální testování bylo provedeno tím způsobem, že implementovaný algoritmus byl přidán do kódu zařízení, které sloužilo k nasnímání snímku reálných rukou a falzifikátu ve skupině STRaDe. Vyzkoušeny byly ruce lidí, kteří nebyli v původní databázi a také nový falzifikát. Vše bylo úspěšně rozpoznáno. V několika případech algoritmus nezvládl vyhodnotit živost, tzn. nahlásil chybu při zpracování, ale po opětovném nasnímání vyhodnocení proběhlo správně.

Jedním možným návrhem pro rozšíření naimplementovaného algoritmu je zrychlení vyhodnocení živosti, protože aktuální vyhodnocení algoritmem trvá průměrně tři až pět vteřin. Aby bylo možné dosáhnout lepšího výsledku vyhodnocení, rychleji než tři vteřiny, bylo by vhodné přepsat algoritmus do programovacího jazyka, kterého zpracování je rychlejší, než Python, například C++.

Dalším návrhem pro rozšíření by mohlo být důkladnější zpracování rýh na ruce, které by zohledňovalo jejich tvar a délky a mohlo následně vést i k identifikaci osoby. Například, použití jiného způsobu na zvýraznění rýh anebo kombinací již použitých.

Literatura

- [1] BL. *Photonic energy, narrow band frequency led light therapy, image* [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.beautyandlongevity.com/photonic-light/>.
- [2] BLISS, D. *Skin and its layers, image* [online]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anatomy_The_Skin_-_NCI_Visuals_Online.jpg.
- [3] BOLLES, D. *Infrared Waves* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: https://science.nasa.gov/ems/07_infraredwaves.
- [4] BOLLES, D. *Ultraviolet Waves* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: https://science.nasa.gov/ems/10_ultravioletwaves.
- [5] CANNY, J. F. *Canny Edge Detector* [online]. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.x/da/d22/tutorial_py_canny.html.
- [6] CASIA. *CASIA Multi-Spectral Palmprint Database* [online]. [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: http://www.cbsr.ia.ac.cn/english/MS_PalmprintDatabases.asp.
- [7] COFFEY, V. C. *Multispectral Imaging Moves into the Mainstream* [online]. [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: https://www.optica-opn.org/home/articles/volume_23/issue_4/features/multispectral_imaging_moves_into_the_mainstream/.
- [8] COSENTINO, A. *Identification of pigments by multispectral imaging* [online]. [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: <https://heritagesciencejournal.springeropen.com/articles/10.1186/2050-7445-2-8>.
- [9] DENNING, D. E. It's "liveness," not secrecy, that counts. [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://faculty.nps.edu/dedennin/publications/biometrics.pdf>.
- [10] DICTIONARY, C. *Identification* [online]. [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/identification>.
- [11] DOLEŽEL, M. *Falsifikace biometrické charakteristiky a detekce živosti* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/securitysession/falsifikace-biometricke-charakteristiky-a-detekce-zivosti>.
- [12] DRAHANSKÝ, M. *Přehled biometrických systémů a testování jejich spolehlivosti* [online]. [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14955421-Biometrickych-systemu-a-testovani-jejich-spolehlivosti-prehled-drahan-fit-vutbr-cz-martin-drahansky-drahan.html>.
- [13] DRAHANSKÝ, M. *Biometrie*. 1. vyd. M. Dražanský, 2011. ISBN 978-80-254-8979-6.

- [14] DUŠEK, J. *Spectrum.jpg* [online]. [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/files/2012/03/spectrum.jpg>.
- [15] ENVIRONMENTAL HEALTH, N. C. for. *UV Radiation* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.cdc.gov/ncch/ncch/features/uv-radiation-safety/index.html>.
- [16] FIALA, R., NÁHLOVSKÝ, J. a ŠEBEK, T. *Anatomie lidské kůže* [online]. [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: <https://www.hojeni-ran.cz/anatomie-lidske-kuze>.
- [17] FUKUZUMI, S. *Organism identifying method and device*. U.S. Patent 6314195, Nov 6, 2001 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/6314195>.
- [18] GARY BRADSKI, A. K. *Sobel Derivatives* [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/3.4/d2/d2c/tutorial_sobel_derivatives.html.
- [19] GUENNOUNI, S., MANSOURI, A. a AHAITOUF, A. *Visual Impairment and Blindness - What We Know and What We Have to Know*. 1. vyd. 2019. ISBN 978-1-83962-953-2.
- [20] HAMBAL, A. M., PEI, Z. a ISHABAILU, F. L. *Image Noise Reduction and Filtering Techniques* [online]. [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://www.ijsr.net/archive/v6i3/25031706.pdf>.
- [21] JAIN, A., FLYNN, P. a ROSS, A. *Handbook of Biometrics*. Springer US, 2007 [cit. 2023-05-02]. 402–423 s. ISBN 9780387710419.
- [22] KOVÁŘOVÁ, M. *Kriminalistická Daktyloskopie, obrázek* [online]. [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3342891/11/images/7/MARKANTY.jpg>.
- [23] KRÁLOVÁ, M. *INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ* [online]. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticke-vlny/infracervene-zareni>.
- [24] LEPIL, O. *Fyzika pro gymnázia Optika*. 5. vyd. 2015. ISBN 9788071964445.
- [25] LIANG, X., FAN, D., LI, Z. a ZHANG, D. Region of Interest Localization Methods for Publicly Available Palmprint Databases. In: SARFRAZ, M., ed. *Biometric Systems*. Rijeka: IntechOpen, 2020, kap. 4. DOI: 10.5772/intechopen.93131. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.93131>.
- [26] MICHIGAN STATE UNIVERSITY, B. R. g. *What is Biometrics?* [online]. [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: <https://biometrics.cse.msu.edu/info/index.html>.
- [27] NEGIED, N. K. Human biometrics: Moving towards thermal imaging. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2014, sv. 2, č. 6, [cit. 2023-05-02].
- [28] OPENCV. *Arithmetic Operations on Images* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/3.4/d0/d86/tutorial_py_image_arithmetics.html.
- [29] OPENCV. *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/master/d6/dc7/group__imgproc__histograms.html#gad47a446f142e6e0db3d1204b2a4afd30.

- [30] OPENCV. *Histogram Equalization* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.x/d5/daf/tutorial_py_histogram_equalization.html.
- [31] ORGANIZATION, W. H. *Ultraviolet radiation* [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ultraviolet-radiation>.
- [32] PIZER, S. M., AMBURN, E. P., AUSTIN, J. D., CROMARTIE, R., GESELOWITZ, A. et al. Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer vision, graphics, and image processing*. Elsevier. 1987, sv. 39, č. 3, s. 355–368. ISSN 0734-189X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734189X8780186X>.
- [33] ROGMANN, N. a KRIEG, M. Liveness Detection in Biometrics. In: *2015 International Conference of the Biometrics Special Interest Group (BIOSIG)*. 2015, s. 1–14. DOI: 10.1109/BIOSIG.2015.7314611.
- [34] ROWE, R. K. Biometrics Based on Multispectral Skin Texture. In: *Advances in Biometrics*. Springer US, 2007, s. 1146–1152. ISBN 978-3-540-74548-8.
- [35] SANDSTRÖM, M. Liveness Detection in Fingerprint Recognition Systems. In: 2004 [cit. 2023-05-02].
- [36] SCHUCKERS, S. a ADLER, A. *Evaluation of Liveness or Anti-spoofing in Biometric Systems* [online]. [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: https://www.nist.gov/system/files/documents/2021/12/06/schuckers_stephanie_nist_presentation_3_2010vr6.pdf.
- [37] SPANĚL, M. a MILET, T. *Základy počítačové grafiky: Redukce barevného prostoru* [online]. [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IZG/private/lecture/izg_slide_omezeni_barev_rev2022_169.pdf.
- [38] STRÁŽNICKÁ, J. a HAVLOVÁ, H. *Kosmetologie e-book*. 1. vyd. 2016. ISBN 978-80-88058-83-0.
- [39] TISTARELLI, M. a CHAMPOD, C. *Handbook of Biometrics for Forensic Science*. Springer International Publishing, 2018 [cit. 2023-05-02]. 65–72 s. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition. ISBN 9783319844589.
- [40] TSAI, S.-R. a HAMBLIN, M. R. Biological effects and medical applications of infrared radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2017, sv. 170, s. 197–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.04.014>. ISSN 1011-1344. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1011134416311691>.
- [41] UKAI, K., RAHMAN, R. a KOBASHI, S. Facial skin blood perfusion change based liveness detection using video images. *Electronics and Communications in Japan*. 2019, sv. 102, č. 6, s. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecj.12171>. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ecj.12171>.
- [42] VIJAYARANI, S. a VINUPRIYA, M. Performance analysis of canny and sobel edge detection algorithms in image mining. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2013, sv. 1, č. 8, s. 1760–1767.

- [43] VINCENT, O. R., FOLORUNSO, O. et al. A descriptive algorithm for sobel image edge detection. In: *Proceedings of informing science & IT education conference (InSITE)*. 2009, sv. 40, s. 97–107 [cit. 2023-04-26].
- [44] WATANABE, M., ENDOH, T., SHIOHARA, M. a SASAKI, S. *Palm vein authentication technology and its applications* [online]. [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: <https://www.fujitsu.com/downloads/GLOBAL/labs/papers/palmvein.pdf>.
- [45] WILES, J., CLAYPOOLE, T., DRAKE, P., HENRY, P., JOHNSON, L. et al. *Techno Security's Guide to Securing SCADA*. 1. vyd. Syngress, 2008. ISBN 9780080569994.
- [46] XU, Z., BAOJIE, X. a GUOXIN, W. Canny edge detection based on Open CV. In: *2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*. 2017, s. 53–56 [cit. 2023-04-26]. DOI: 10.1109/ICEMI.2017.8265710. ISBN 978-1-5090-5035-2.
- [47] YI, D., YANG, W. a LI, S. Z. Skin Spectroscopy. In: LI, S. Z. a JAIN, A., ed. *Encyclopedia of Biometrics*. Springer US, 2009, s. 1224–1229. ISBN 978-0-387-73003-5. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-0-387-73003-5_1027.
- [48] ŠTORK, J. *Dermatovenerologie*. 2013. ISBN 978-80-7262-898-8.

Příloha A

Obsah odevzdávaného média

```
|_ casia_real_tests
|_ |_ casia_palmprint_database.txt
|_ doc
|_ install
|_ |_ install_linux.sh
|_ |_ install_windows.bat
|_ |_ requirements.txt
|_ fake_tests
|_ |_ photos
|_ |_ ...
|_ |_ photos
|_ obsah_media.txt
|_ real_tests
|_ |_ STRaDe reálné ruce.txt
|_ src
|_ |_ Doxyfile
|_ |_ Readme.md
|_ |_ image_processing.py
|_ |_ liveness_detection.py
|_ tests
|_ |_ Test.py
|_ |_ Readme.md
|_ Text bakalarske prace
```

Složky `casia_real_tests`, `fake_tests` a `real_tests` jsou určeny pro uložení snímků, na kterých se vyzkouší funkčnost vyvinutého algoritmu. Snímky z databáze CASIA a snímky reálných rukou, vytvořených spolu s výzkumnou skupinou STRaDe nejsou poskytnuty z důvodů ochrany osobních údajů a soukromí nasnímaných osob. V každé složce jsou k nalezení informace, jak tyto snímky získat.

Do složky `doc` byla vygenerována programová dokumentace. Zdrojové soubory se nachází ve složce `src`, spolu s `Readme` souborem, obsahujícím pokyny na instalaci a spouštění. Také je tam obsažen `Doxyfile` pomocí kterého se dá vygenerovat programová dokumentace.

Složka `install` obsahuje soubor s požadavky, který obsahuje soupis použitých knihoven a jejich verze, a také dva skripty, pomocí kterých se dají nainstalovat všechny potřebné nástroje a balíčky jako: `python` verze 3, `doxygen` a knihovny, používané v práci.

Ve složce `tests` je dodatečně přiložen testovací skript a soubor `Readme`, který obsahuje pokyny, jak testy použít.

Příloha B

Použití programu

Pro spuštění programu je potřeba mít nainstalovaný Python verzi 3.10.5. Pak je potřeba doinstalovat chybějící knihovny pomocí příkazu `pip3 install -r requirements.txt`. Pokud `pip3` není nainstalován spolu s `python3`, je možné doinstalovat pomocí `sudo apt install python3-venv python3-pip`.

Jsou také nabídnuty instalační skripty pro Linux distribuce a operační systém Windows, které se nachází ve složce `install`, které nainstalují `python` verze 3, `doxygen` a knihovny ze souboru `requirements.txt`

S programem se pracuje následujícím způsobem

použití:

```
liveness_detection.py [-h] [-d DIR] photo1 photo2 [-ph3 PH3] [-ph4 PH4]
[-bug {True,False}] [-t 1...100]
```

poziční argumenty:

<code>photo1</code>	Název prvního snímku
<code>photo2</code>	Název druhého snímku

možnosti:

<code>-h, --help</code>	Nápověda
<code>-d DIR, --dir DIR</code>	Složka se snímky
<code>-ph3 PH3</code>	Název třetího snímku
<code>-ph4 PH4</code>	Název čtvrtého snímku
<code>-bug {True,False}, --debug {True,False}</code>	Debugovací režim, ukazuje obrázky
<code>-t 1...100, --threshold 1...100</code>	Hodnota prahu, na základě které algoritmus rozhoduje jestli je předložená živá ruka

Příloha C

Snímky

Ukázku problematického snímku falzifikátu je vidět na obrázku C.1. Jeho problémem je nedostatečný jas snímku i po vylepšení, nabídnutém v implementaci (viz 4.2.1), protože samotná ruka je dodatečně obarvená červenou barvou, která pohlcuje vlny ostatních barev. Když jediná barevná složka obsažena ve viditelném světle je modrá nebo zelená, tak snímek takové ruky je úplně tmavý.

Existují i problematické snímky reálných rukou, jejich příklady jsou na C.2 a C.3. Problémem snímku C.2 a) je to, že v moment focení člověk sevřel ruku, a tím pádem, prsty jsou zakřivené. Pak s takovým snímek algoritmus nemůže pracovat korektně a je to znázorněné na snímku C.2 b).

Dalším potenciálně problematickým snímek je C.3. Na něm je vidět, že člověk má šperky na ruce, které by mohli narušit rozpoznávání. Navržený algoritmus byl vyzkoušen na dvou sadách takových snímků a zpracování prošlo v pořádku, tedy ruka se rozeznala jako živá, ale ne pro kombinaci všech vlnových délek.



(a)



(b)

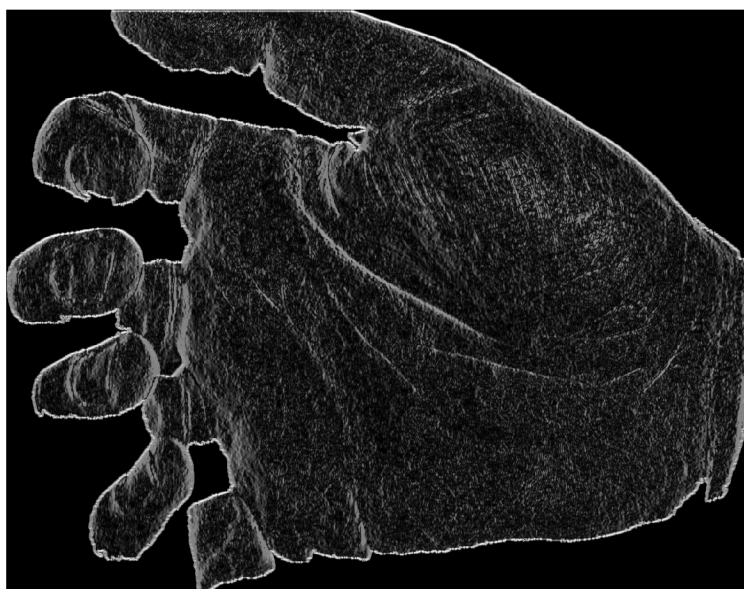


(c)

Obrázek C.1: Problematický falzifikát ruky (Halloween dekorace) a) denní světlo, b) vlnová délka 465 nm ve stupních šedí, c) vlnová délka 525 nm ve stupních šedí



(a)



(b)

Obrázek C.2: Problematický snímek reálné ruky se sevřenými prsty



(a)



(b)

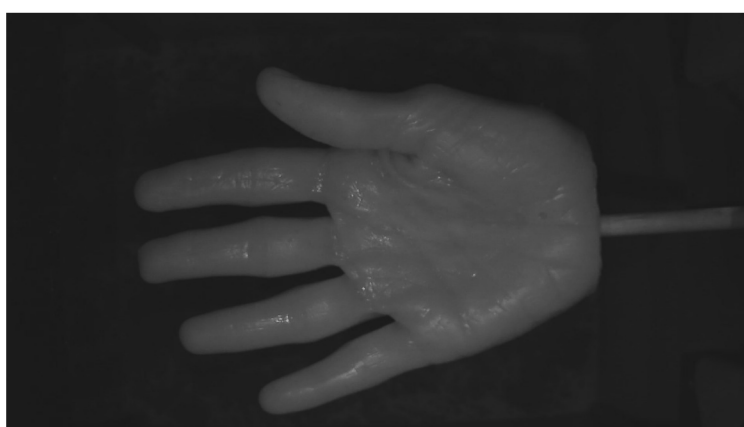
Obrázek C.3: Problematický snímek živé ruky se šperky



(a)



(b)



(c)

Obrázek C.4: Porovnání snímků vytvořených o stejné vlnové délce z databáze: a) CASIA databáze [6], b) STRaDe živá ruka, c) STRaDe falzifikát