



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

EXTRAKCE RUKY Z FOTOGRAFIE S RŮZNÝM POZADÍM

HAND EXTRACTION FROM A PHOTO WITH DIFFERENT BACKGROUNDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TIMOTEJ KOVÁČIK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SAKIN

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce



Student: **Kováčik Timotej**
Program: Informační technologie
Název: **Extrakce ruky z fotografie s různým pozadím**
Hand Extraction from a Photo with Different Backgrounds
Kategorie: Zpracování obrazu

Zadání:

1. Prostudujete literaturu věnující se extrakci objektů ze snímku. Zaměřte se na detekci rukou, či prstů.
2. Analyzujte dodanou databázi nasnímaných rukou osvětlených různými vlnovými délkami, případně dohledejte další.
3. Navrhněte algoritmus, který ve snímku identifikuje ruku a provede její výřez.
4. Navrhněte algoritmus, který na extrahovaném výřezu ruky identifikuje prsty a dlaň.
5. Implementujte navržené algoritmy.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky a diskutujte další možné pokračování této práce.

Literatura:

- Zhiquan Feng, Bo Yang, Yuehui Chen, Yanwei Zheng, Tao Xu, Yi Li, Ting Xu, Deliang Zhu, "Features extraction from hand images based on new detection operators", Pattern Recognition, Volume 44, Issue 5, 2011, Pages 1089-1105, ISSN 0031-3203, <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.08.007>.
- Mohammed, Fatma & Mohammad, Walid & Kayes, A. S. M. & Póya, Attila & Hasan, Jamal. (2013). Geometrical Feature Extraction of Human Hand. International Journal of Computer and Information Technology. 02. 780-784.
- JongShill Lee, YoungJoo Lee, EungHyuk Lee and SeungHong Hong, "Hand region extraction and gesture recognition from video stream with complex background through entropy analysis," *The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, San Francisco, CA, 2004, pp. 1513-1516, doi: 10.1109/IEMBS.2004.1403464.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Splnění bodů 1 až 4.

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. listopadu 2020
Datum odevzdání: 12. května 2021
Datum schválení: 11. listopadu 2020

Abstrakt

Táto práca je zameraná na extrakciu ľudskej ruky z fotografií s rôznym pozadím. Cieľom je navrhnúť a implementovať algoritmus schopný lokalizovať ľudskú ruku v obraze a identifikovať jej časti. V práci sú analyzované spôsoby biometrickej identifikácie a verifikácie, metódy používané pre extrakciu objektov z obrazu. Výsledkom práce je návrh a implementácia algoritmu ktorý je schopný extrahovať ruku z fotografie a následne identifikovať jej časti.

Abstract

This thesis focuses on extraction of human hand from photographs with different backgrounds. The goal is to design and implement an algorithm capable of locating human hand in the image and identifying its parts. It analyses the methods of biometric identification and verification, methods used for extracting objects from an image. The outcome of this thesis is a design and implementation of an algorithm that is able to extract human hand from a photo and identify its parts.

Kľúčové slová

extrakcia ruky, spracovanie obrazu, geometria ruky, detekcia kože, biometria, rozpoznávanie objektov

Keywords

hand extraction, image processing, hand geometry, skin detection, biometry, object recognition

Citácia

KOVÁČIK, Timotej. *Extrakce ruky z fotografie s různým pozadím*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Martin Sakin

Extrakce ruky z fotografie s různým pozadím

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením Ing. Martina Sakina. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....
Timotej Kováčik
10. mája 2021

Podakovanie

Chcel by som poďakovať svojmu vedúcemu práce Ing. Martinovi Sakinovi za vedenie, užitočné rady a ochotu. Taktiež by som chcel poďakovať rodine a priateľom za podporu a trpezlivosť.

Obsah

1	Úvod	3
2	Biometria	4
2.1	Identifikácia a verifikácia	5
2.2	Odtlačok prsta	5
2.3	Geometria ruky	6
2.4	Žily ruky	8
2.5	Dynamika písania na klávesnici	9
2.6	Rozpoznávanie podľa podpisu	9
3	Metódy spracovania obrazu pre extrakciu objektov	11
3.1	Metódy segmentácie	11
3.1.1	Histogram	11
3.1.2	Prahovanie	12
3.1.3	Zhlukovanie	13
3.1.4	Rozširovanie a erózia	14
3.1.5	Detekcia hrán	15
3.2	Metódy detekcie objektu	16
3.2.1	Detekcia na základe príznakov	16
3.2.2	Detekcia na základe porovnávaní šablón (Template matching)	18
3.2.3	Znalostné metódy	18
3.2.4	Konvolučné neurálne siete	19
4	Návrh algoritmu	20
4.1	Predspracovanie obrazu	20
4.2	Lokalizácia ruky - Prirovnávanie šablón	22
4.3	Lokalizácia ruky - Geometria kontúr	23
4.4	Detekcia častí ruky	24
5	Implementácia	27
5.1	Knižnica OpenCV	27
5.2	Segmentácia	27
5.3	Lokalizácia ruky	28
5.4	Identifikácia prstov a dlane	29
6	Zhodnotenie práce a experimenty	33
6.1	Dataset	33
6.2	Segmentácia	34

6.3	Lokalizácia ruky	36
6.4	Identifikácia prstov a dlane	36
6.5	Ukážky výstupu	39
7	Záver	43
	Literatúra	44
A	Obsah priloženého pamäťového média	47

Kapitola 1

Úvod

Extrakcia prvkov z obrazu je jednou z najdôležitejších častí spracovania obrazu, ktorá je najčastejšie používaná na oddelenie časti obrazu na základe špecifickej charakteristiky objektu. V oblasti spracovania obrazu môže byť použitá na detekciu a extrakciu rôznych častí ľudského tela. Na základe existujúcej literatúry môžeme tvrdiť, že ruka je najdôležitejšou časťou ľudského tela, potrebná pre každodenné činnosti. Detekcia ruky a jej častí v obraze je považovaná za dôležitý krok pri rôznych aplikáciách, ktoré využívajú rozpoznávanie gest ruky, porozumenie znakovkej reči, a ďalšie aplikácie založené na interakcií človeka s počítačom.

Väčšina používaných algoritmov na detekciu ruky a jej častí sú založené na detekcii kože. Existuje viac dôvodov prečo je detekcia ruky náročným problémom v oblasti počítačového videnia. Prvým je fakt, že ľudská ruka je deformovateľný objekt, čo znamená že je zložitá presne definovať jej tvar. Po druhé, v mnohých aplikáciách je nemožné ovplyvniť prostredie v ktorom je ruka snímaná, čo spôsobuje rôzne svetelné podmienky a kvalitu snímok.

Mnohé z techník popísané v tejto práci sú využívané pre čoraz častejšie používaný biometrický spôsob identifikácie. So stúpajúcimi požiadavkami na bezpečnosť sú neustále hľadané nové, spoľahlivejšie spôsoby identifikácie a verifikácie osôb. Niektoré futuristické výhľady do budúcnosti naznačujú že biometria človeka môže takmer úplne nahradiť fyzické predmety a heslá pre overenie identity jedinca. Biometrické údaje o osobe nepodliehajú rizikám spojeným s overovaním pomocou identifikačných kariet, čipov alebo hesiel. Ide o nezameniteľné, špecifické a jednoducho merateľné črty ktoré je možné len veľmi ťažko sfaľšovať. Príkladom experimentálne využívaným vo svete je rozpoznávanie ľudí podľa tváre. Ďalšou možnosťou časti tela s jedinečnými znakmi potrebnými na zistenie identity, je ľudská ruka.

Cieľom práce je navrhnúť a vytvoriť systém pre detekciu a extrakciu ruky z fotografie s komplexným pozadím a farebným osvetlením ruky. Extrakcia ruky z obrazu môže byť využitá pri detekcii živosti ruky, ktorá sa snaží zistiť, či sa jedná o reálnu vzorku ruky, alebo o podvrhnutý falzifikát. Ďalej sa práca zameriava na detekciu dlane a prstov ruky. Tieto údaje môžu byť využité pre získanie informácií o polohe ruky vzhľadom ku snímaciemu zariadeniu.

Kapitola 2

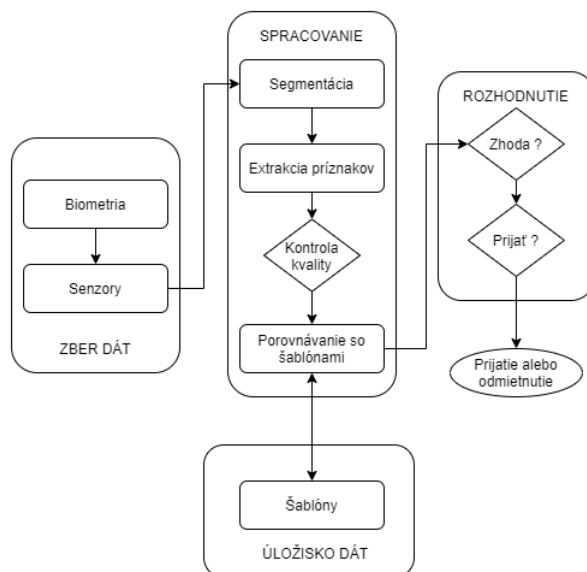
Biometria

Detekcia ruky a prstov v obraze spadá do oblasti biometrie. Názov biometria reprezentuje súbor metód určených na identifikáciu alebo verifikáciu osôb podľa jedinečných fyzických znakov, alebo behaviorálnych (zvykových) črt jedinca. Biometria sa v posledných rokoch stala rozrastajúcim trendom, v moderných organizáciách a podnikoch sa stala nevyhnutnosťou, pretože bezpečnostné systémy založené na heslách a tokenoch často zlyhávajú proti zvyšujúcemu sa počtu kybernetických útokov. V každodennom živote sú tieto spôsoby overovania identity náchylné kvôli možnému zlyhaniu ľudského faktoru. Nie je možné zabezpečiť to, že fyzické predmety potrebné na identifikáciu sú neustále v bezpečí.

Súbor metód označených ako biometrická identifikácia sa dá rozdeliť do dvoch kategórií: fyziologická a zvyková verifikácia. Medzi fyziologické črty patrí odtlačok prsta, geometria ruky, obraz tváre, vlastnosti sietnice oka. K zvykovým črtám patria napríklad podpis, spôsob chôdze, rytmus stláčania klávesov na klávesnici, pohyb kurzoru a ďalšie. Táto kapitola bude zameraná najmä na biometrické systémy, ktoré skúmajú vlastnosti ruky.

Klasický biometrický systém zahŕňa nasledujúce kroky [29], ako ukazuje obrázok 2.1:

- Zber dát - určený na získavanie dát z biometrického senzoru
- Spracovanie - modul zahŕňa predspracovanie obrazu, segmentáciu a vytvorenie šablóny
- Úložisko dát - ukladá dáta, ktoré sú porovnávané so šablónami vytvorenými modulom pre spracovanie
- Rozhodovací modul - poskytuje rozhodnutie o prípadnej zhode šablóny a zozbieranými dátami



Obr. 2.1: Diagram bežného biometrického systému [29].

2.1 Identifikácia a verifikácia

Biometria sa používa na rôzne účely, ale zvyčajne je súčasťou identifikačného alebo verifikačného systému. Rozdiely medzi týmito dvoma systémami majú vplyv na to, ako rýchlo a s akou spoľahlivosťou systém funguje.

Verifikačné systémy zisťujú či je osoba tým za koho sa vydáva. Jedinec sa prezentuje ako konkrétna osoba a systém kontroluje jeho biometriu podľa biometrického profilu ktorý už existuje v databáze a je prepojený s danou osobou. Verifikačné systémy sa všeobecne označujú ako 1:1 porovnávacie systémy, pretože systém sa snaží porovnávať údaje predložené jedincom, s konkrétnymi údajmi ktoré už sú v databáze. Vďaka tomu že verifikačné systémy porovnávajú len jeden biometrický vzor, poskytujú presnejšie a rýchlejšie výsledky ako identifikačné systémy, bez ohľadu na počet vzorov v databáze.

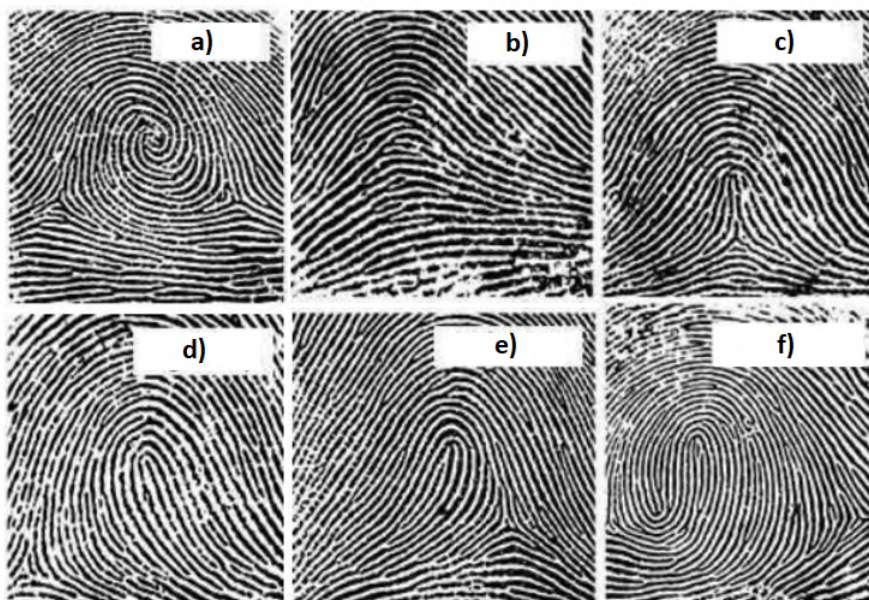
Identifikačné systémy sa líšia od verifikačných tým, že sa snažia identifikovať neznámu osobu alebo neznáme biometrické dáta. Systém sa označuje ako 1:N porovnávací systém, pretože musí porovnať dáta poskytnuté jedincom so všetkými vzorkami v databáze. Získanie výsledkov identifikácie je časovo náročnejšie v porovnaní s verifikačnými systémami, a so zväčšujúcim sa počtom vzorov v databáze sa čas potrebný na identifikáciu zvyšuje. Príkladom identifikačného systému je získavanie identity osoby na základe odtlačku prsta.

2.2 Odtlačok prsta

Identifikácia osôb na základe odtlačku prsta je najstarší, bežne používaný a jediný medzinárodne legálne akceptovaný spôsob biometrickej identifikácie osôb [33]. Črty odtlačku prsta sú unikátne a nezameniteľné pre každého jedinca, preto sa využívajú v mnohých odvetviach, ako napríklad v civilných a komerčných aplikáciách, prístupe k mobilnému telefónu, armáde, medicíne, štátnej službe alebo v súdnom lekárstve [27]. Dnešné senzory odtlačkov prstov sú založené na optickom, tepelnom, ultrazvukovom prístupe, na rozdiel od starej metódy atramentu na zachytenie odtlačku. Odtlačky sú rozdelené do viacerých podtypov,

vďaka čomu, pri hľadaní identického odtlačku, nie je potrebné prehľadávať celú databázu. Rozdeľujeme ich na šesť typov [34], ktorými sú oblúk, špirála, klenutý oblúk, pravá slučka, ľavá slučka a dvojitá slučka, ako je znázornené na obrázku 2.2.

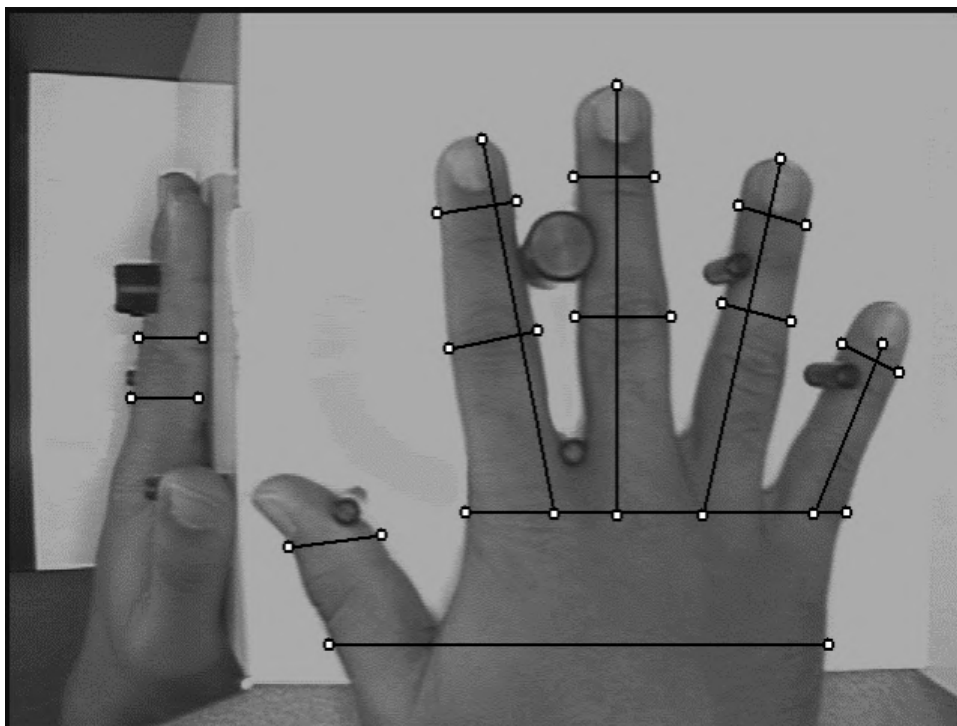
Experimenty ukazujú, že biometrické metódy založené na odtlačkoch prstoch majú veľmi nízky počet falošných negatív siahajúcich od 3% do 7%, a počet falošných pozitív od 0.001% do 0.01% [33].



Obr. 2.2: Typy odtlačkov prsta: a) špirála, b) oblúk, c) klenutý oblúk d) pravá špirála e) ľavá špirála f) dvojitá špirála [34].

2.3 Geometria ruky

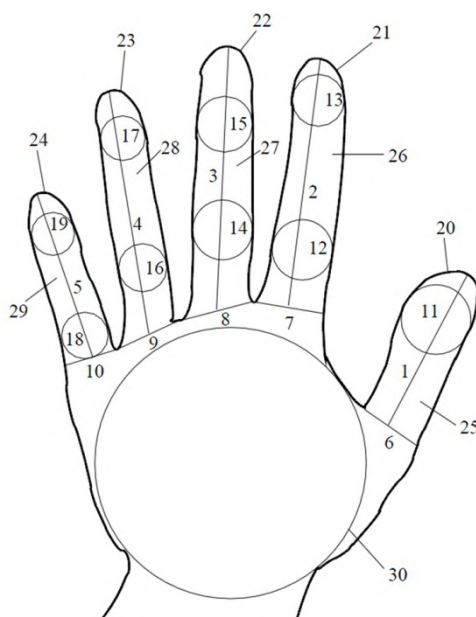
K jednoduchším metódam patrí identifikácia pomocou geometrie ruky. Dĺžka, šírka a tvar všetkých piatich prstov jednej ruky sú jedinečné rozmery, dá sa na ich základe uskutočniť pomerne presná verifikácia, avšak nedosahuje presnosti iných biometrických metód. Z tohto dôvodu sa používa identifikácia na základe geometrie ruky najčastejšie v kombinácii s inými identifikačnými metódami. Medzi základné metódy rozpoznávania osôb podľa geometrie ruky patria metódy založené na priamych meraniach, zarovnávaní rúk 2.3, analýza šírky prstov alebo metóda analýzy 3D geometrie ruky [17].



Obr. 2.3: Snímanie geometrie ruky [30].

Biometria na základe ruky je založená na štruktúre dlane a prstov, zameriava sa na šírku prstov v rôznych miestach, dĺžku prstov, veľkosť časti dlane a podobne. Aj keď sa tieto vlastnosti medzi ľuďmi nie sú také unikátne ako napríklad odtlačok prsta, geometria ruky môže byť veľmi užitočná pre verifikáciu osôb.

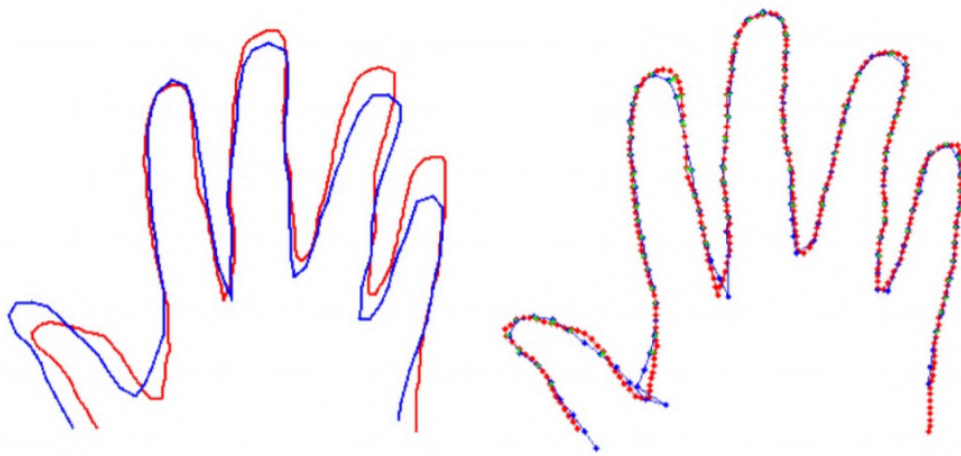
V roku 2002 bolo definovaných tridsať základných geometrických vlastností ruky 2.4 [8]. Tieto vlastnosti sú veľmi presné, a sú využívané pre 2D analýzu geometrie ruky.



Obr. 2.4: Geometrické vlastnosti ruky [8]

Mnohé zo systémov na snímanie geometrie ruky využívajú kolíky medzi ktoré používateľ umiestni ruku. Počas procesu vzorkovania osoba položí ruku na podložku viac krát, kolíky udržia ruku v stabilnej polohe. Systémy ktoré používajú upevnenie ruky pomocou kolíkov umožňujú presnejšie meranie geometrických črt, pretože ruka je počas vzorkovania pevne umiestnená a nemôže nastať pohyb ktorý by narušil snímanie. Nevýhodou tohto systému je to že dopredu definovaná poloha môže po umiestnení ruky na podložky spôsobiť deformáciu ruky. Pri snímaní sa používajú iba geometrické rysy, ostatné charakteristiky, ako napríklad farba pleti alebo detail povrchu sa ignorujú [23].

Alternatívou pre systémy využívajúce podporné kolíky je systém založený na extrakcii, zarovnaní a následnom porovnávaní tvaru ruky so vzormi v databáze. Vo výskume [22] bolo extrahovaných 353 tvarov ruky od 53 osôb. Počet fotografií ruky jedného človeka sa líšil od 2 po 15. Tvary ruky rovnakých ľudí boli upravené a prekryté, ako ukazuje obrázok 2.5.

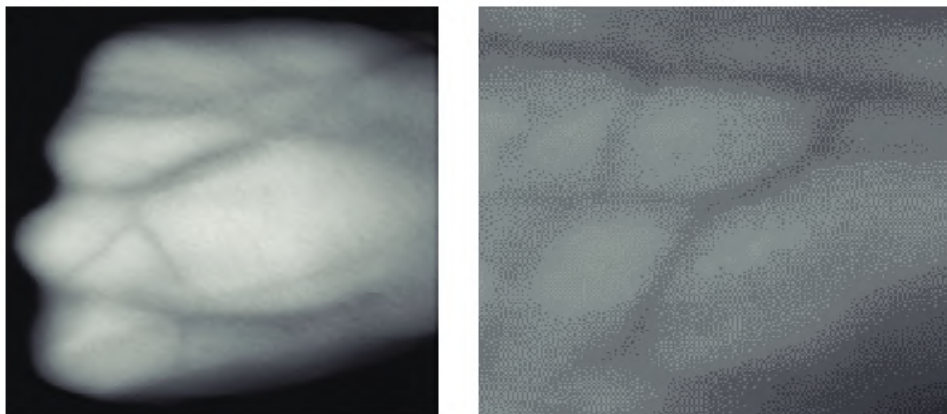


Obr. 2.5: Extrahované a zarovnané tvary ruky jednej osoby [22].

Výsledny biometrickej identifikácie tohto systému dosahovali 2% falošných pozitív a 1.5% falošných negatív. Tieto hodnoty sú porovnateľné s profesionálnymi systémami za použitia podporných kolíkov.

2.4 Žily ruky

Tvar podkožného cievneho stromu obsahuje informácie, na základe ktorých je možné spoľahlivo identifikovať jedinca. Metóda je založená na získaní obrazu po osvietení ruky infračerveným svetlom. Princíp spočíva v tom, že infračervené svetlo dokáže prejsť cez väčšinu ľudského tkaniva v ruke, avšak hemoglobín v žilách toto svetlo plne absorbuje [9], viz. obrázok 2.6. Pre získanie vzoru pre identifikáciu jedinca je použitá LED dióda a fotoaparát. Pri osvietení a zosnímaní ruky sú žily na fotografii tmavé. Fotoaparát zaznamená ruku, obraz je digitalizovaný, overený a porovnaný s registrovanými vzormi v databáze. Celý proces autentizácie zaberie menej ako dve sekundy.



Obr. 2.6: Žily ruky po osvetení infračerveným svetlom [26].

Vzory tvorené žilami sú považované za unikátne u každého jedinca, čo spôsobuje, že táto metóda biometrickej identifikácie je veľmi ťažká na oklamanie, čo patrí medzi jej najväčšie výhody [36]. Metóda je taktiež odolná voči zmene v čase, rozloženie žíl sa mení časom len minimálne.

2.5 Dynamika písania na klávesnici

Tento spôsob biometrickej identifikácie, patriaci medzi inovatívne metódy, sleduje dobu stlačenia klávesy, celkový spôsob písania, rovnako ako doby medzi stlačeniami jednotlivých klávesov. Spôsob písania je zachytávaný, a na základe jeho vlastností je vytvorený unikátny biometrický vzor pre daného užívateľa, určený pre neskoršiu identifikáciu [10]. Čas vyžadovaný na nájdenie a stlačenie jednotlivých kláves, a čas, ktorý je klávesa stlačená, patrí medzi znaky, ktoré sú veľmi charakteristické pre danú osobu, bez ohľadu na to akou rýchlosťou osoba píše. Väčšina ľudí má špecifické klávesy, na ktoré stlačenie vyžadujú dlhší čas ako na stlačenie iných. Praváci stláčajú klávesy, ktoré sú na pravej strane klávesnice štatisticky rýchlejšie ako klávesy na ľavej strane. Chyby pri písaní, ako dvojité kliknutie, vymenené písmená alebo vynechanie znaku sú charakteristickým znakom osoby, bez potreby toho aby bol známy jazyk v akom je text písaný.

Vytvorenie spoľahlivého vzoru pre identifikáciu osoby trvá dlhšie ako metódou odtlačkov prstov, keďže je potrebné spôsob písania jedinca zaznamenávať dlhšiu dobu. Hlavnou nevýhodou tejto metódy identifikácie je pomerne veľká šanca podobnosti spôsobu písania u viacerých ľudí. Spôsob písania u jedinca sa môže navyše časom meniť, čo spôsobuje ďalšie problémy pri spoľahlivej identifikácii. Medzi výhody patrí to, že metóda nevyžaduje žiaden špecifický hardware, na vytvorenie vzoru pre užívateľa stačí klávesnica. Táto metóda sa využíva najmä na detekciu neoprávneného prístupu k osobnému počítaču.

2.6 Rozpoznávanie podľa podpisu

Metóda spadá do behaviorálnych typov identifikácie a patrí medzi široko používané metódy osobnej identifikácie a verifikácie. Mnoho oficiálnych dokumentov vyžaduje verifikáciu osoby na základe podpisu. Prebieha pomocou biometrického zariadenia skladajúceho sa z pera a podložky, ktoré zachytávajú vlastnosti podpisu, ako sú tlak vyvíjaný na podložku, smer písania, rýchlosť písania jednotlivých častí a celkový čas [21]. Existujú dva prístupy

ako analyzovať podobnosti podpisu, parametrický a funkcionálny prístup [6]. Parametrické vlastnosti popisujú vlastnosti podpisu, ktoré sú nezávislé od času, napríklad rozmery podpisu, počet priložení pera na podložku alebo pomer dĺžky a výšky podpisu. Parametrické vlastnosti sú kompaktné, takže veľkosť dát po ich uložení je pomerne malá. Funkcionálne vlastnosti odkazujú na črty, ktoré sa vzťahujú k času, patrí sem sklon pera, tlak, sklon pera v čase. Vďaka tomu, že sú tieto črty ukladané ako signály v čase, poskytujú presnejšiu identifikáciu ako parametrické vlastnosti. Medzi výhody tohto spôsobu biometrickej verifikácie patrí schopnosť verifikovať jedinca bez jeho prítomnosti na diaľku. Hlavnou nevýhodou je možnosť falšovania podpisu, ak je používaný podpis jedinca príliš jednoduchý.

Kapitola 3

Metódy spracovania obrazu pre extrakciu objektov

Táto kapitola popisuje teoretické poznatky z oblasti extrakcie objektov z obrazu, známe metódy a ich výhody a nevýhody pri použití, prístupy k riešeniu problematiky. Termín *extrakcia objektov* v oblasti spracovania obrazu odkazuje na detekciu objektov s podobnými charakteristikami a ich oddelenie od zvyšku obrazu často potrebné pre ďalšie spracovanie.

3.1 Metódy segmentácie

Pri extrakcii objektu z obrazu je segmentácia obrazu dôležitým krokom. V štádiu segmentácie je obraz rozdelený na oblasti na základe podobnosti pixelov [19]. Typicky je používaná na lokalizáciu hraníc objektov ako sú čiary alebo krivky. Segmentácia zjednodušuje obraz na časti a zlepšuje možnosti jeho analýzy [7]. Táto sekcia popisuje najznámejšie a najčastejšie používané metódy segmentácie obrazu pre účely extrakcie prvkov.

3.1.1 Histogram

Proces generovania histogramu zo vstupného obrazu je bežnou praktikou v oblasti spracovania obrazu. Štatistické informácie získané z histogramu napomáhajú vykonávať predspracovanie obrazu mnohým algoritmom. Informácie o obraze ako priemer hodnoty pixelov, medián, odchýlka a štandardná odchýlka sa dajú získať veľmi jednoducho, ak je poskytnutý histogram obrazu. Techniky segmentácie založené na použití histogramu sú veľmi efektívne v porovnaní s ostatnými technikami, obyčajne vyžadujú len jeden prechod pixelmi obrazu. Z obrazu je vytvorený histogram založený na zvolených vlastnostiach pixelov (farba, intenzita). Z hodnôt histogramu, jeho vrcholov, je možné vyčítať informácie o hodnotách pixelov. Táto metóda sa využíva napríklad pri nastavovaní expozície fotografie [20]. Histogram vypovedá o svetelných podmienkach prostredia. Algoritmy používané v kamerách smartfónov ho využívajú pre automatické nastavenie najlepšej expozície.

Často využívanou metódou v oblasti spracovania obrazu je equalizácia histogramu. Je to proces prispôbenia kontrastu obrazu na základe modifikácie rozloženia histogramu, čo spôsobuje že oblasti s nižším kontrastom budú ľahšie spracovateľné. Metóda sa využíva najmä pri obrazoch v ktorých je pozadie aj popredie buď príliš tmavé alebo svetlé. Výsledkom equalizácie histogramu je celkové zlepšenie viditeľnosti objektov na obraze (obrázky 3.1 a 3.2).



Obr. 3.1: Obráz pred equalizáciou histogramu.



Obr. 3.2: Obráz po equalizácii histogramu.

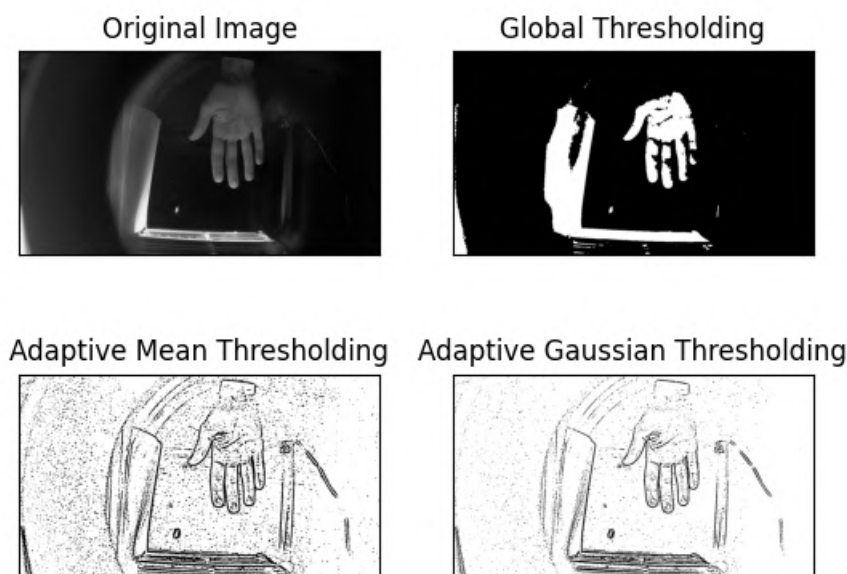
3.1.2 Prahovanie

Prahovanie je najjednoduchšou metódou segmentácie obrazu [28]. Je používaná na oddelenie objektov v obraze od pozadia. Príkladom využitia prahovania je analýza dokumentov, kde cieľom je extrahovať vytlačený text, logá, obrázky. Metóda je založená na transformácii obrazu v odtieňoch šedej na binárny obraz na základe hodnoty intenzity jednotlivých pixelov na základe matematickej funkcie 3.1.

$$[ht]f(c) = \begin{cases} A & \text{if } c < T \\ B & \text{if } c > T \end{cases} \quad (3.1)$$

- c vstupná hodnota farby pixelu
- T prahovacia hodnota
- A nová hodnota pre vstupnú hodnotu pod prahom
- B nová hodnota pre vstupnú hodnotu nad prahom

Prahovacie metódy prechádzajú obraz postupne po pixeloch. Na základe hodnôt pixelov určia pixelu hodnotu 0 alebo 1. Využívajú sa rôzne typy prahovania [13][38] pre získanie čo najpresnejších výsledkov s čím menšou časovou náročnosťou. Kľúčovým krokom je určenie prahovej hodnoty. Pre presnejšie výsledky segmentácie sa používa napríklad prahovanie na základe histogramu, kde je hľadaná optimálna hodnota prahu na základe histogramu obrazu.



Obr. 3.3: Prahovanie obrazu

3.1.3 Zhlukovanie

Zhlukovanie je metóda, pri ktorej sa obraz za použitia algoritmu rozdelí do N zhlukov podľa hodnoty pixelov [25]. Zhluk je možné popísať ako kolekciu podobných elementov v obraze. Hodnota N môže byť volená manuálne, alebo vybratá podľa heuristickej funkcie. Tento spôsob segmentácie nemusí vrátiť optimálny výstup. Kvalita výstupu závisí na voľbe počiatočných hodnôt zhlukov, a hodnote N (obrázky 3.4 a 3.5). Určenie počtu zhlukov môže byť manuálne, náhodné, alebo určené podľa heuristiky obrazu.

K-means je zhlukovacia iteratívna metóda založená na vytvorení stredov zhlukov (náhodne alebo podľa heuristiky), pridelení každého pixelu do zhluku tak, že je minimalizovaná vzdialenosť medzi stredom zhluku a pixelom a prepočítanie nových stredov na základe pixelov v zhluku pridelených v predchádzajúcom kroku. Tieto dva kroky sú opakované dovtedy, pokiaľ žiaden z pixelov nezmení zhluk.



Obr. 3.4: Zhlukovanie pomocou K-means $N = 4$.

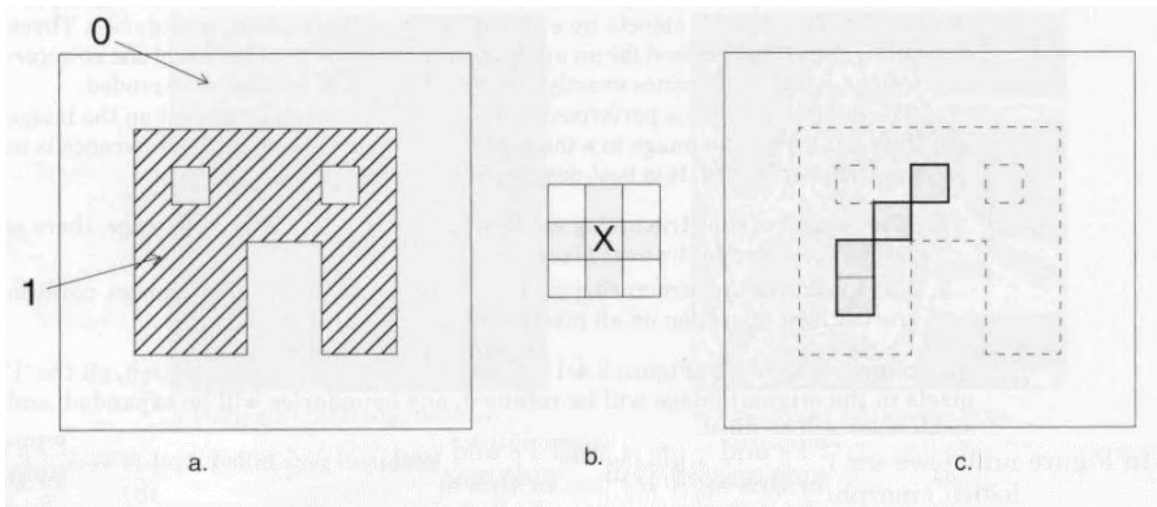


Obr. 3.5: Zhlukovanie pomocou K-means $N = 2$.

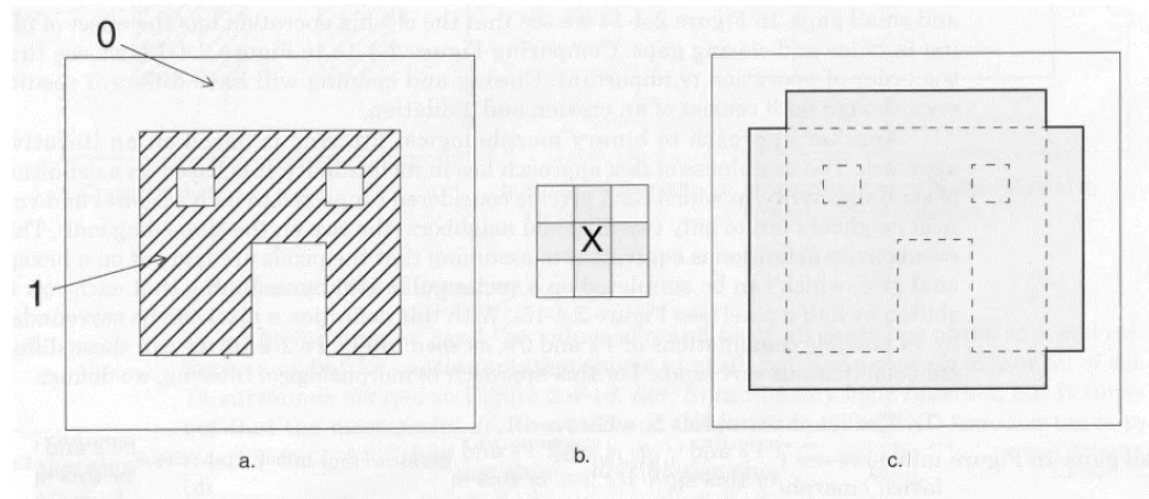
3.1.4 Rozširovanie a erózia

Táto metóda je vhodná pre spracovanie binarizovaných obrazov. Používa sa na vyplnenie malých medzier v bielom objekte na čiernom pozadí, alebo opačne, na odstránenie šumu z pozadia obrazu. Rozširovanie spôsobuje zväčšovanie plochy objektu, to znamená, že nežiadúce nevyplnené časti budú prepojené. Naopak, erózia objekty znižuje, čo znamená, že šum v pozadí objektov, ktorý by mohol narúšať ďalšiu prácu s objektom je odstránený. Metóda umožňuje presné určenie masky, ktorá bude použitá, čo rozhoduje o tom, ako presne budú objekty eróziou alebo rozširovaním ovplyvnené. Metódy sú založené na posúvaní konvolučnej masky po obraze, ak ide o eróziu, viz obrázok 3.6, aktuálny pixel nadobúda

hodnotu 0 ak má aspoň jeden z okolitých pixelov hodnotu 0. Pri rozširovaní (obrázok 3.7) pixel nadobúda hodnotu 1, ak má aspoň jeden zo susedov hodnotu 1.



Obr. 3.6: Erózia [31]: a) Pôvodný obraz, b) Použitá maska, c) Výsledný obraz



Obr. 3.7: Rozširovanie [31]: a) Pôvodný obraz, b) Použitá maska, c) Výsledný obraz

3.1.5 Detekcia hrán

Detekcia hrán je často používaná metóda pri segmentácii obrazu. Obrisy objektu a hrany sú získavané na základe prudkých zmien jasnosti alebo farby v obraze. Zmeny v týchto vlastnostiach obrazu môže spôsobovať napríklad osvetlenie scény, orientácia povrchu alebo zmeny materiálu [3]. Detekcia hrán je dôležitým krokom pri analýze a spracovaní obrazu, rozpoznávaní vzorov a detekcii objektov v oblasti počítačového videnia. Je dostupných mnoho techník detekcie hrán ako napríklad Robertsova, Sobelova, Laplasova a Cannyho detekcia hrán. Cannyho detekcia hrán (obrázok 3.9) patrí medzi pokročilejšie techniky detekcie hrán. Pozostáva z eliminácie šumu v obraze pomocou gaussovho filtra, následné určenie

gradientu, nájdenie lokálnych maxím a eliminácie nevýznamných hrán. Cannyho detekcia hrán používa pár 3x3 konvolučných masiek a je znázornená na obrázku 3.8.

-1	0	+1	+1	+2	+1
-2	0	+2	0	0	0
-1	0	+1	-1	-2	-1
G_x			G_y		

Obr. 3.8: Konvolučné masky použité pri Cannyho detekcii hrán.



Obr. 3.9: Ukážka Cannyho detekcie hrán.

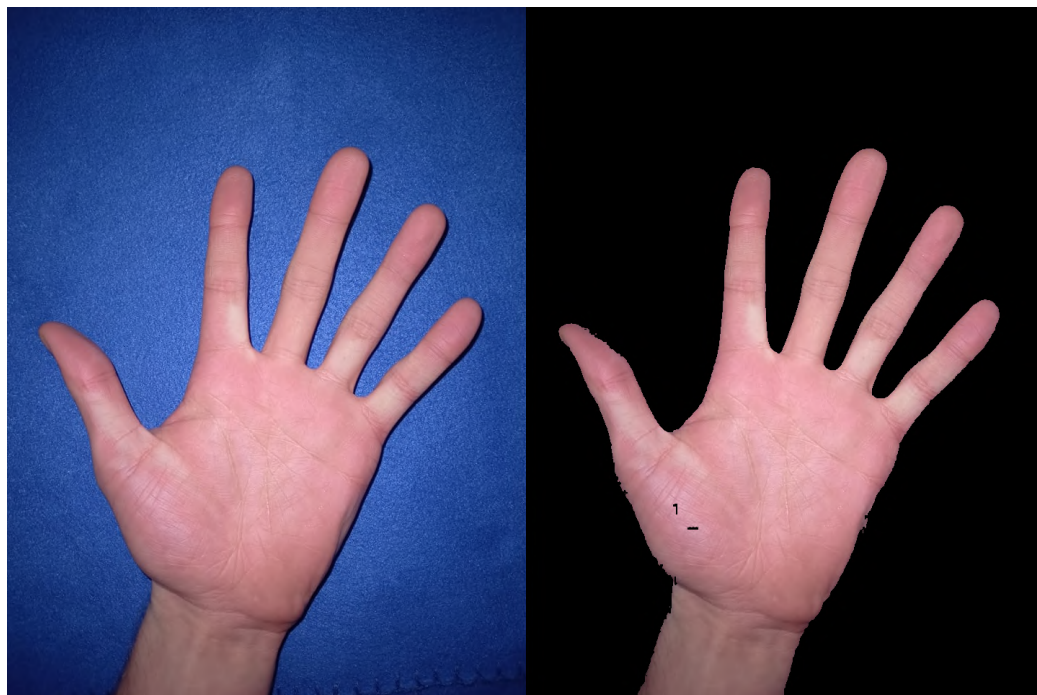
3.2 Metódy detekcie objektu

Sekcia sa zaoberá používanými metódami detekcie objektov v obraze. Cieľom detekcie objektov je automaticky nájsť hľadaný objekt a vytvoriť jeho model pre nasledujúce spracovanie. Pre detekciu sa využíva mnoho metód, ktoré je možné rozdeliť do nasledujúcich kategórií.

3.2.1 Detekcia na základe príznakov

Metódy detekcie založené na príznakoch fungujú na základe extrakcii základných rysov objektu a následné overenie existencie týchto rysov v štatistickom modeli. Tieto metódy sú jednoduché na implementáciu avšak ich spoľahlivosť je veľmi ovplyvnená faktormi ako je kvalita osvetlenia, komplexnosť pozadia. Príkladom je metóda detekcie ruky na základe farby kože [15]. Hlavnou myšlienkou tejto metódy je vyhodnotenie každého pixelu na základe jeho farby a priradenie mu hodnoty 0 alebo 1. Pixely 1 vo výslednom obraze reprezentujú časti obrazu, na ktorých sa nachádza ľudská koža, naopak pixely s hodnotou 0

neobsahujú kožu. Táto metóda je silno závislá od kvality a farby osvetlenia. Pri optimálnom pozadí a osvetlení, ako je znázornené na obrázku , táto metóda dosahuje pomerne uspokojivé výsledky. Pri neoptimálnom pozadí, obrázok 3.11, je ťažké určiť prah na základe ktorého sa oddeľujú pixely kože od pixelov ktoré neobsahujú kožu, čo vedie k neuspokojivým výsledkom.



Obr. 3.10: Detekcia ruky na základe farby kože s optimálnym pozadím.



Obr. 3.11: Detekcia ruky na základe farby kože s neoptimálnym pozadím.

3.2.2 Detekcia na základe porovnávania šablón (Template matching)

Pri tejto metóde sú vytvorené šablóny pre popis hľadaného objektu [11]. Je využívaná v mnohých odvetviach ako sú spracovanie signálu, počítačové videnie, spracovanie obrazu a videa. V oblasti detekcie objektu je za pomoci odpovedajúcich hodnôt vstupného obrazu a šablóny možné detegovať hľadaný objekt. Metóda sa zameriava na lokalizáciu šablóny vo vstupnom obraze. Najjednoduchšou formou je algoritmus *Full Search*, ktorý je založený na výpočte skóre podobnosti šablóny pre každú pozíciu vo vstupnom obraze. Po vypočítaní je určený prah, na základe ktorého sú oddelené objekty, ktoré spadajú pod úroveň prahu, a sú označené ako hľadaný objekt. Nevýhodou tejto metódy je potreba vytvoriť šablóny, čo môže byť časovo veľmi náročné.

3.2.3 Znalostné metódy

Metódy založené na vedomostiach o tom, ako hľadaný objekt vyzerá. Každý objekt je možné popísať pravidlami a vzťahmi medzi nimi. Kľúčom metódy je extrakcia príznakov objektu na vstupnom obraze, ich následná identifikácia a rozhodnutie o tom, či objekt vyhovuje kritériám hľadaného objektu. Pri detekcii ruky môžeme vychádzať z poznatkov o tom ako ruka vyzerá. Skladá sa z dlane - ovál, a piatich prstov - výbežky. Na základe týchto informácií môžeme definovať pravidlá, ktoré popisujú ľudskú ruku. Jedným z problémov tejto metódy je, že nie je jednoduché správne preložiť vedomosti o objekte do pravidiel, ktoré ho popisujú. Ak sú pravidlá príliš komplexné, nemusí dôjsť k detekcii objektu. Naopak, ak sú pravidlá príliš jednoduché dochádza k veľkému množstvu falošných pozitív. Pri detekcii ruky môže byť taktiež problematické detegovať ruku pod uhlom ku kamere.

Známou metódou detekcie príznakov je SIFT (Scale-invariant feature transform) metóda, ktorá je využívaná v oblasti počítačového videnia, 3D modelovaní, rozpoznávanie

gest. SIFT kľúčové body objektu, ako napríklad rohy, sú najprv extrahované z referenčných obrázkov hľadaného objektu. Objekt je rozpoznávaný na základe porovnávania referenčných príznakov s príznakmi objektov vo vstupnom obraze.

3.2.4 Konvolučné neurálne siete

Konvolučné neurálne siete (ďalej už len KNS) sú umelé neurálne siete ktoré sa používajú na analýzu obrazu v oblasti strojového učenia. KNS vykazujú veľké rozdiely od tradičných prístupov ku klasifikácii objektov. Boli inšpirované biologickým procesom fungovania neurónov v zrakovej kôre mozgu. KNS využívajú rôzne vrstvy, ktoré sú nevyhnutné pre spracovanie obrazu, za účelom minimalizácie potrebného predspracovania. Problém detekcie objektov v obraze pomocou KNS pozostáva z rozhodnutia o tom, kde sa objekty v obraze nachádzajú, a do ktorej kategórie objekty zapadajú [37]. Keďže v obraze sa môže nachádzať viacero objektov s rôznym pomerom strán v rôznych pozíciách, je potrebné skenovať celý obraz pomocou posuvných okien. Napriek tomu, že tento krok dokáže odhaliť všetky polohy objektov v obraze, je výpočetne náročný a má nedostatky. Pri veľkom počte posuvných okien sa výpočetná náročnosť zvyšuje, pri príliš malom počte je možné, že niektoré časti obrazu budú analyzované nesprávne. Pre rozpoznanie rôznych objektov je potrebná extrakcia ich vizuálnych príznakov. Na extrakciu sa využívajú algoritmy ako SIFT [24] alebo HOG [14]. Na základe príznakov sú objekty klasifikované.

Kapitola 4

Návrh algoritmu

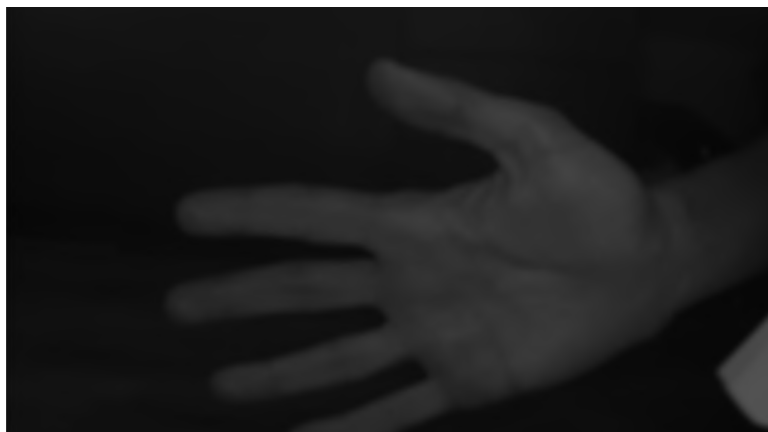
4.1 Predspracovanie obrazu

Pred lokalizáciou ruky v obraze je potrebné ho najprv upraviť, tak aby bola lokalizácia jednoduchšia. Fotografia je prevedená do odtieňov šedej, a následne je rozmazaná pomocou aplikácie filtru (rovnica 4.1) na každý pixel. Filter je postupne posúvaný po vstupnom obraze 4.1, v každom kroku je vypočítaný priemer pixelov a originálny pixel je nahradený výsledkom priemerovania. S väčšími rozmermi dochádza k silnejšiemu rozmazaniu vstupného obrazu 4.2

$$K = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

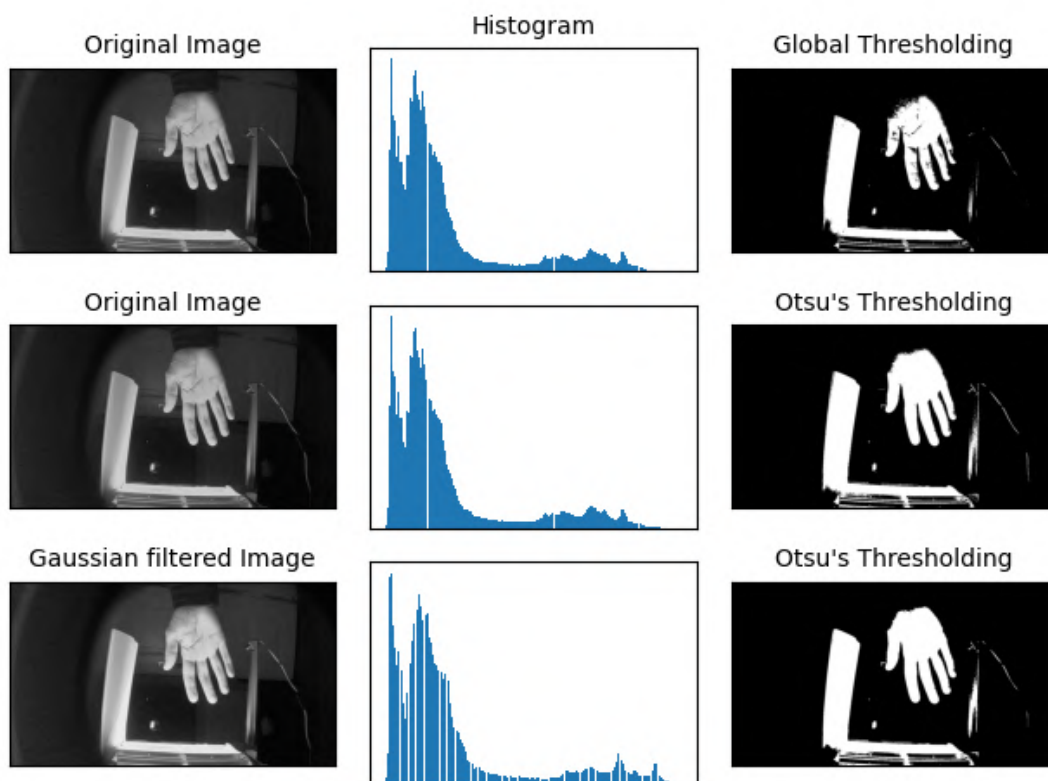


Obr. 4.1: Vstupný obraz.



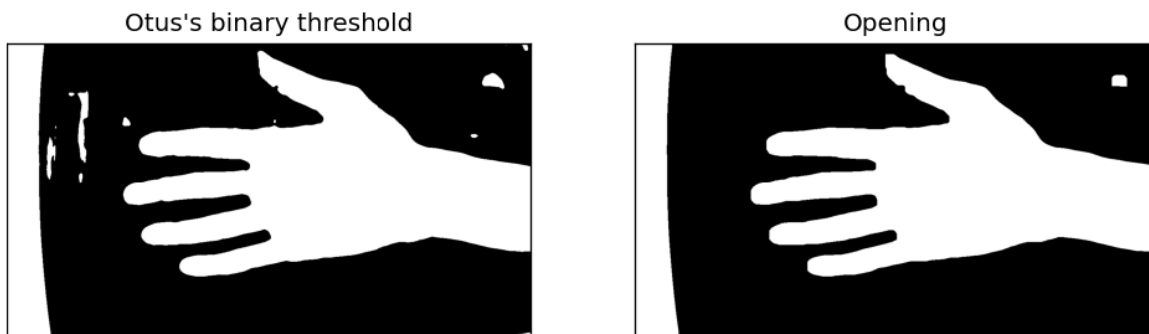
Obr. 4.2: Obráz po spracovaní.

Ďalším krokom je prahovanie vyhladeného obrazu. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté kombináciou Gaussovskej vyhladzovacej funkcie a Otsuovej metódy prahovania. Otsuova metóda [4] je automatická metóda určovania prahu, ktorá vychádza z relatívneho histogramu a je založená na štatistických výpočtoch. Metóda predpokladá existenciu dvoch tried, bodov objektov a bodov pozadia, ktoré sú oddelené prahom. Základnou myšlienkou metódy je nájsť stred medzi krivkami histogramu predstavujúcimi popredie a pozadie.



Obr. 4.3: Použitie Otsuovej metódy.

Ďalej sú použité morfologické transformácie, medzi základné morfologické operácie patrí erózia a rozšírenie. Základnou myšlienkou erózie je narušiť hranice objektu v popredí. Maska sa posúva po pixeloch obrázku, ako v 2D konvolúcii. Ak majú všetky pixely v maske hodnotu 1, hodnota pôvodného pixelu sa zmení na 1, inak je pixel vymazaný. Rozšírenie funguje opačne, ak má aspoň jeden pixel v okolí hodnotu 1, pôvodný pixel sa nastaví na 1. Transformácia *opening* 4.4, je kombináciou týchto techník, najprv je použitá erózia, a následne rozširovanie. Využíva sa najmä pri odstraňovaní hluku z obrazu.



Obr. 4.4: Použitie erózie a rozširovania na binarizovaný obraz.

4.2 Lokalizácia ruky - Prirovnávanie šablón

Najčastejšie používanou metódou na extrakciu ruky z fotografie je rozpoznávanie farby kože [35]. Pixely obrazu sú spracované postupne a vyberané sú pixely, ktorých farba sa zhoduje s farbou pleti. Táto metóda však nie je vyhovujúca pre všetky typy fotografií. Metóda neberie do úvahy farbu pleti človeka. Podobne na fotografie s farebným osvetlením ruky, alebo príliš komplexným pozadím je táto metóda neúčinná z dôvodu neschopnosti spoľahlivo oddeliť ruku od pozadia len na základe farby pleti.

Pre fotografie s farebným osvetlením je potreba použiť kombináciu segmentačných techník pre presné určenie hraníc ľudskej ruky v obraze. Používanou metódou je algoritmus lokalizácie objektu v obraze. Je založený na porovnávaní príznakov vstupného obrazu s referenčnými kontúrami hľadaného objektu [16]. Na vstupný obraz je najprv aplikovaná Gaussovská vyhladzovacia metóda [32], založená na Gaussovej funkcii 4.2.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.2)$$

Pre každý pixel je vypočítaná nová hodnota podľa váženého priemeru okolitých pixelov, čo spôsobuje celkové vyhladenie obrazu.

Následným krokom je porovnávanie častí predspracovaného obrazu so šablónou (template matching) [11]. Metóda funguje na princípe hľadania najpravdepodobnejšieho výskytu objektu, definovaného explicitne šablónou, vo vstupnom obraze. Keďže kombinácia pixelov hľadaného objektu na vstupnom obraze je ovplyvnená rôznofarebným osvetlením, je potrebné vstupný obraz najprv spracovať vyššie popísanými metódami a použiť binarizované šablóny [18]. Bežne používanou technikou *Chamferove porovnávanie* [5], ktoré je založené na počítaní *Chamferovej vzdialenosti* medzi vstupným obrazom a šablónou pomocou vzdialenostnej transformácie obrazu [12], kde každý pixel reprezentuje jeho vzdialenosť k najbližšiemu pixelu hrany.

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

 \Rightarrow

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	2	2	2	2	1	0	0
0	1	2	3	3	2	1	0	0
0	1	2	2	2	2	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

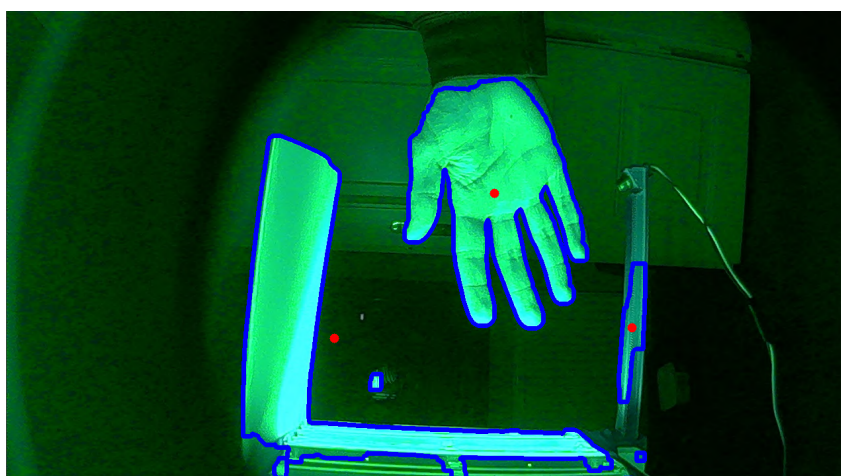
Obr. 4.5: Vzdialenostná transformácia binárneho poľa.

Prikladanie šablóny v obraze prebieha na základe posúvania okna po x a y osiach obrazu a prepočítavanie numerického indexu, ktorý určuje ako veľmi sa šablóna podobá práve prehladáwanej časti obrazu. Po určení hodnôt sa v obraze nájde miesto najpravdepodobnejšieho výskytu hľadaného objektu na základe najvyššieho numerického pixelu.

4.3 Lokalizácia ruky - Geometria kontúr

Keď sú z obrazu odstránené nežiadúce objekty v pozadí, sú v ňom nájdené kontúry, ktoré ohraničujú objekty v popredí. Kontúra [2] sa definuje ako krivka spájajúca všetky body hraníc objektu. Kontúry objektu sú užitočným nástrojom pri analýze tvaru a charakteristických črt objektu, ďalej využívaných pri rozpoznávaní objektov. V obraze sa okrem kontúry ruky nachádzajú aj kontúry iných objektov, ktoré boli ponechané v obraze po spracovaní. Na zamedzenie spracovania kontúr, ktoré sú príliš malé na to, aby boli hľadaný objekt, prebieha kontrola obsahu kontúry. Ak je kontúra príliš malá je odstránená.

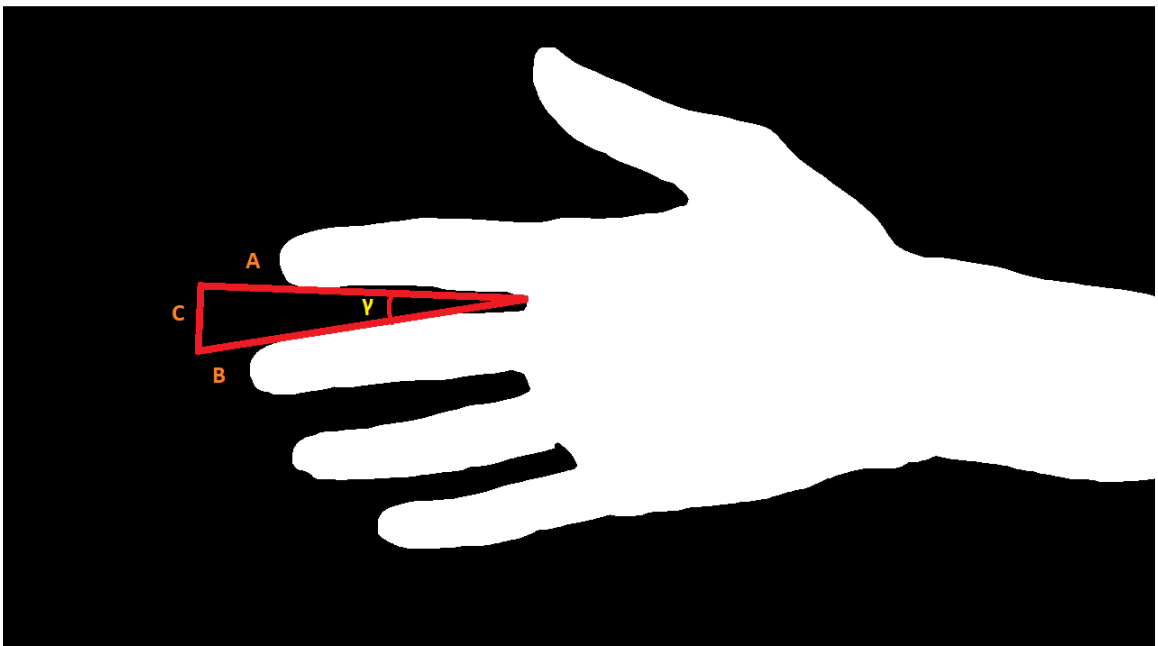
Ľudská ruka sa z pohľadu tvaru objektu dá popísať ako konkávny objekt s piatimi výbežkami, kde štyri z nich smerujú do jednej strany a jeden, palec, je mierne odklonený. Tieto informácie je možné použiť pri zisťovaní toho, či môže daná kontúra reprezentovať ruku. Ďalšou dôležitou vlastnosťou ruky je, že stred masy sa bude vždy nachádzať vo vnútri kontúry 4.6. Ak sa pri kontúre stane, že stred masy sa nachádza mimo objektu, kontúra je eliminovaná, a považovaná za kontúru iného objektu ako ľudskej ruky.



Obr. 4.6: Stred masy kontúr.

Po odstránení nevyhovujúcich kontúr je potrebné overiť tvar zvyšných kontúr a nájsť tú, ktorá reprezentujú ľudskú ruku. Algoritmus vychádza zo známej techniky formácie konvexných hraníc (convex hull), a používa kosínusovú vetu na rozpoznanie prstov. Táto funkcia vytvára krivky okolo objektu tak, aby bol výsledný tvar konvexný. Následne je možné porovnať konvexnú krivku a pôvodný tvar kontúry a nájsť najväčšie odchýlky. Miesta, kde je odchýlka veľká, napríklad medzery medzi prstami, sú vyznačené ako body. Pomocou kosínusovej vety 4.3 je možné overiť uhol medzi potencionálnymi prstami. Ak je uhol menší ako 90 stupňov, je konvexná odchýlka označená ako medzera medzi prstami, viz obrázok 4.7. Objekt s počtom výbežkov rovným päť je označený ako ruka.

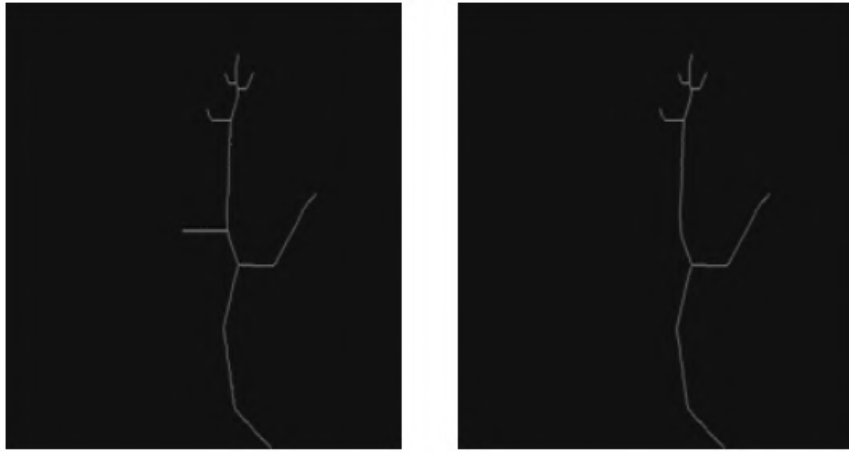
$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}\right) \quad (4.3)$$



Obr. 4.7: Výpočet uhlu medzi prstami.

4.4 Detekcia častí ruky

Po lokalizácii ruky a jej extrakcii je potrebné identifikovať jej jednotlivé časti, prsty a dlaň. Lokalizácia dlane je prevedená pomocou získania súradníc stredu masy, po úspešnej segmentácii sa stred masy ľudskej ruky nachádza v oblasti dlane. Pre identifikáciu prstov ruky je potrebné získať jej najjednoduchšiu reprezentáciu, toto je docielené stenčovací algoritmom (thinning algorithm). Stenčovací algoritmus zjednodušuje binarizované objekty na ich najjednoduchšiu reprezentáciu o šírke jedného pixelu pomocou prechádzania obrazu a odstraňovania okrajových pixelov. Algoritmus končí v bode, keď neexistuje žiaden ďalší pixel ktorý by bolo možné odstrániť aby sa neporušila spojitost objektu.



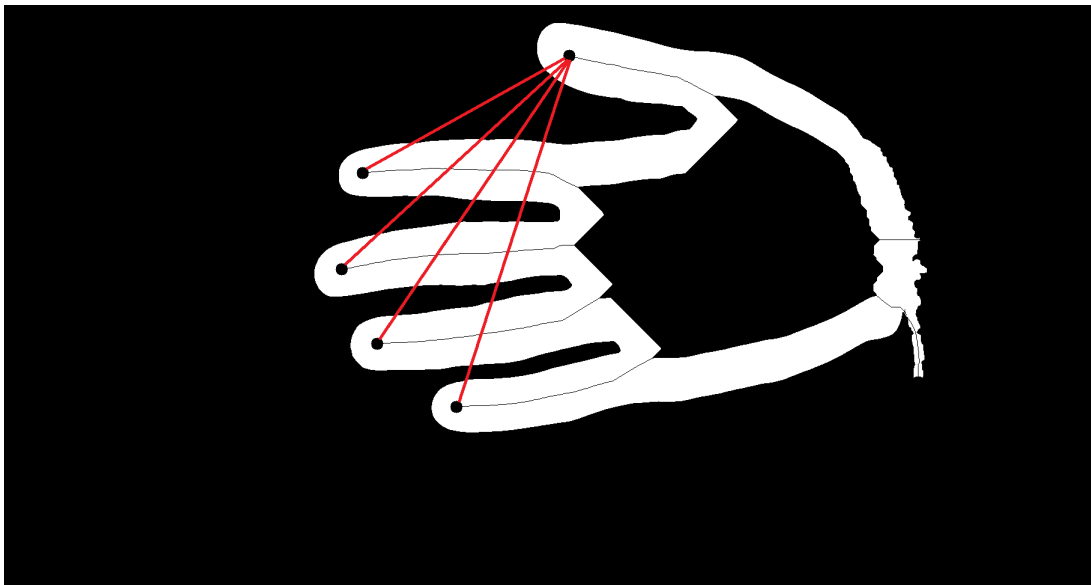
Obr. 4.8: Stenčovací algoritmus pre získanie jednoduchej reprezentácie. [15]

Následným krokom je extrakcia koncových bodov ktorý je prevedený pomocou aplikácie 3×3 masky 4.4 na ruku v zjednodušenej podobe.

$$kernel = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 10 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Pre nájdenie koncových bodov je potrebné nájsť pixely s hodnotou 1 ktoré majú práve jeden susedný pixel s hodnotou 1. Maska je navrhnutá tak, že po jej aplikácii na obraz bude výsledná hodnota pixelov ktoré majú práve jedného suseda rovná 11. Pri hľadaní koncových bodov častokrát dochádza k tomu, že sa takýto bod vyskytne mimo oblasti prsta. Pre zistenie toho, ktoré koncové body reprezentujú prsty, a ktoré nie, je použitý algoritmus, ktorý počíta vzdialenosti medzi koncovými bodmi. Päť koncových bodov, ktoré sa nachádzajú najbližšie pri sebe sú označené ako body reprezentujúce končeky prstov. Algoritmus je založený na prechádzaní všetkých bodov, a spočítavaní vzdialenosti ku každému zvyšnému bodu. Výsledné vzdialenosti ku každému koncovému bodu sú uložené, porovnané a zoradené. Body, ku ktorým sú priradené najvyššie hodnoty vzdialeností sú eliminované tak, aby zostalo výsledných päť bodov s najnižšími hodnotami.

Rozlišovanie prstov prebieha pomocou identifikácie palca, a následnej identifikácie ostatných prstov na základe polohy palca. Palec je nájdený na základe jeho vzdialenosti od ostatných prstov. Vzdialenosť k ostatným prstom bude väčšia ako ktorýkoľvek iný prst (obrázok 4.9). Zvyšné prsty sú identifikované na základe ich vzdialenosti od polohy palca získanej v predchádzajúcom kroku.



Obr. 4.9: Vzdialenosť palca od ostatných prstov.

Kapitola 5

Implementácia

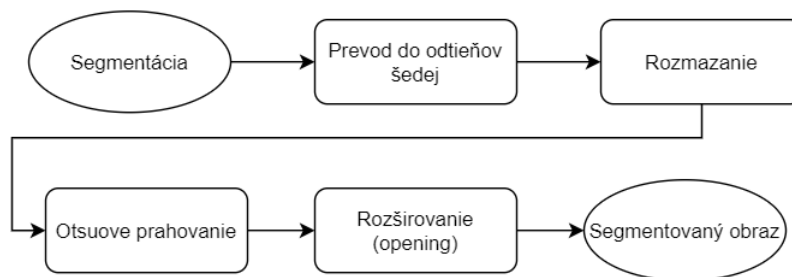
Kapitola sa venuje popisu implementácie metód popísaných v kapitole 4. Aplikácia je implementovaná v jazyku Python 3.9, využíva najmä funkcie knižnice *OpenCV*. Implementácia je rozdelená do viacerých modulov, ktoré sú popísané v nasledujúcich sekciách.

5.1 Knižnica OpenCV

OpenCV je multiplatformová open-source knižnica napísaná v jazyku C/C++, ktorá obsahuje algoritmy zamerané na počítačové videnie. Knižnica obsahuje viac ako 2500 algoritmov určených pre prácu s obrazom a je možné s ňou pracovať v jazykoch C/C++, Java a Python. Obsahuje klasické ale aj moderné riešenie problémov z oblasti počítačového videnia a strojového učenia. Algoritmy môžu byť použité na rozpoznávanie tvárí, klasifikáciu ľudského správania a sledovanie pohybu vo videách, extrakciu 3D modelov objektov, hľadanie podobných obrázkov v databáze, sledovanie pohybu očí a podobne. Knižnica je používaná vo výskumných skupinách, firmách a štátnych podnikoch [1].

5.2 Segmentácia

Segmentácia vstupného obrazu je implementovaná v skripte *segment.py*. Priebeh toku skriptu je znázornený na obrázku 5.1.



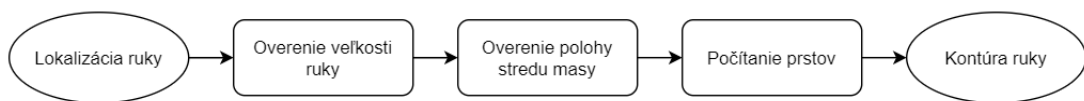
Obr. 5.1: Diagram toku skriptu *segment.py*

Modul prijíma ako parameter vstupný obraz, a jeho výstupom je obraz spracovaný segmentačnými metódami. Obraz je prevedený do odtieňov šedej pomocou funkcie *cvtColor*, následne je šedý obraz rozmazaný aplikáciou 5x5 rozmazávacej masky. Funkcia knižnice

OpenCV *threshold* zabezpečuje prahovanie za použitia Otsuovej prahovacej metódy. Výsledný obraz prahovania je uložený v premennej *thresh*, na ktorý sú ďalej aplikované morfológické funkcie. Morfológická funkcia *morphologyEx* s argumentom *cv2.MORPH_OPEN* použitím 3x3 masky počas piatich iterácií vykonáva proces opening, ktorý je kombináciou erózie a rozširovania ako bolo popísané v kapitole 4. Po vykonaní segmentácie obrazu je výsledný obraz vo formáte numpy array uložený do premennej *segmented*, z tohto obrazu sú ďalej extrahované kontúry pomocou OpenCV funkcie *findContours*.

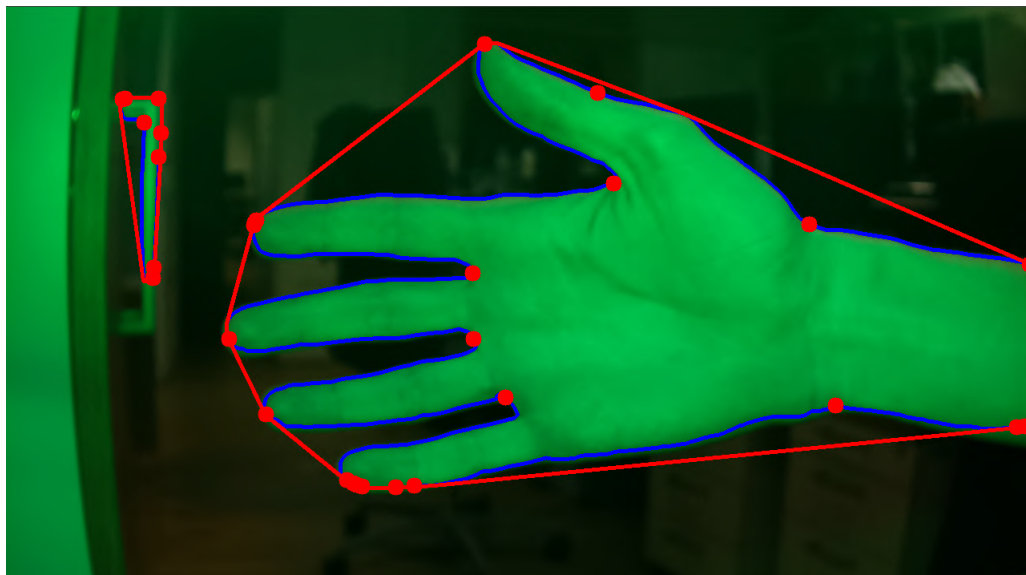
5.3 Lokalizácia ruky

Analýza kontúr je implementovaná v module *contours.py*. Priebeh toku skriptu je znázornený na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Diagram toku skriptu *contours.py*

Modul prijíma kontúry segmentovaného obrazu a nájde tú, ktorá reprezentuje ruku. Modul beží v hlavnom cykle, kde je analyzovaná vždy jedna kontúra. Na začiatku je spočítaný obsah kontúry pomocou funkcie *contourArea*, ak je obsah príliš malý, pokračuje sa na ďalšiu kontúru, zamedzí sa tak spracovávaníu pozostatkov pozadia zo segmentácie. Pokiaľ je kontúra dostatočne veľká, sú z kontúry vytvorené konvexné hranice, a uložené do premennej. Na základe týchto bodov bude ďalej počítaný počet prstov. Pomocou funkcie *convexityDefects* sú nájdené defekty konvexných hraníc vzhľadom na pôvodnú kontúru 5.3.



Obr. 5.3: Defekty konvexivity.

Následne je v skripte *contours.py* volaná funkcia *check_center*. Funkcia slúži na overenie toho, či sa stred masy nachádza vo vnútri kontúry. Pre vypočítanie X 5.1 a Y 5.2 súradníc

stredú masy sú použité momenty obrazu. Momenty sa používajú na výpočet rôznych vlastností obrazu. Sú to vážené priemery intenzity pixelov, zvyčajne také, ktoré nesú atraktívne vlastnosti pre ďalší výpočet dôležitých informácií o obraze.

$$C_x = \frac{M_{10}}{M_{00}} \quad (5.1)$$

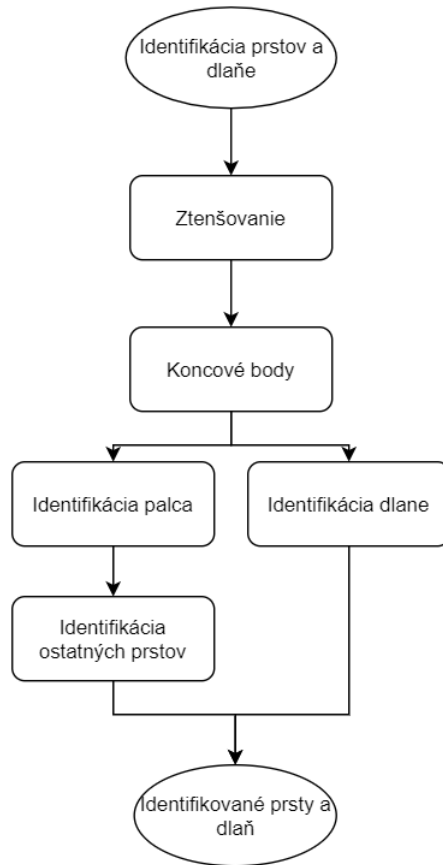
$$C_y = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (5.2)$$

Funkcia z knižnice OpenCV *pointPolygonTest* umožňuje otestovať to, či sa daný bod nachádza v uzavretej oblasti kontúry, alebo mimo nej. Funkcia vracia hodnotu -1 ak sa bod nachádza mimo kontúry, 0 ak sa nachádza na kontúre a 1 je bod vo vnútri. Funkcia *check_center* vráti hodnotu True, ak sa bod nachádza vo vnútri.

Po overení polohy stredú masy objektu, je vykonaná funkcia *count_fingers*, ktorá ako argumenty prijíma kontúru a body defektov v konvexivite. Úlohou tejto funkcie je spočítať potencionálne prsty v kontúre. Vychádza z defektov v konvexivite tvaru. Na základe ktorých je pomocou kosínusovej vety vypočítaný uhol medzi tromi bodmi, z ktorých dva sú vzdialené body od stredú masy (končeky prstov) a jeden reprezentuje spoj medzi dvomi prstami. Ak je uhol väčší ako 90 stupňov, počítadlo pre počet prstov je inkrementované a proces sa opakuje pre ďalšie tri body. Pre správne určenie počtu prstov je potrebné na konci pridať k počítadlu hodnotu 1, pretože dva susedné prsty uzatvárajú vždy len jeden uhol. Ak je návratová hodnota funkcie rovná päť, kontúra je označená ako ruka.

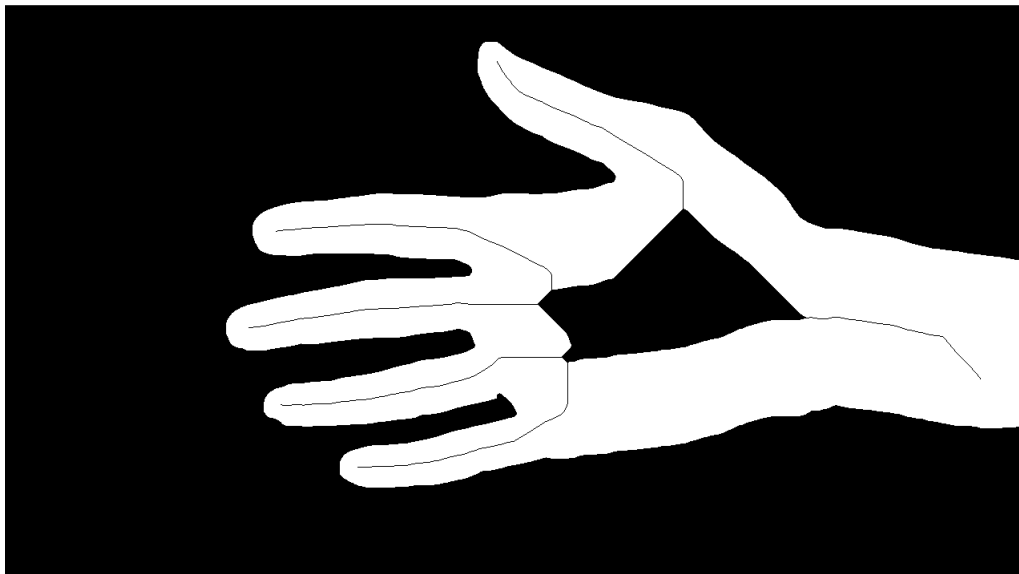
5.4 Identifikácia prstov a dlane

Lokalizácia prstov a dlane je vykonávaná v module *fingers.py*. Priebeh toku skriptu je znázornený na obrázku 5.4. Modul sa skladá z viacerých funkcií z ktorej každá má za úlohu vykonanie inej časti pri identifikácii častí ruky. V tejto časti modul pracuje výhradne s kontúrou, ktorá bola vyhodnotená ako ruka, ako je popísané v predchádzajúcej sekcii.



Obr. 5.4: Diagram toku skriptu *fingers.py*

Z hlavného skriptu je volaná funkcia *identify* ktorá prijíma ako argumenty pôvodný obraz a binárnu masku segmentovanej ruky. Modul *fingers.py* beží v tejto funkcii skadiaľ sú volané ďalšie funkcie. Po predaní binárnej masky je využitá funkcia *skeletonize*, táto funkcia zabezpečuje čiastočnú skeletonizáciu vstupnej masky. Na obrázku 5.5 biela farba reprezentuje pôvodnú vstupnú masku, a čierna výsledok čiastočnej skeletonizácie.

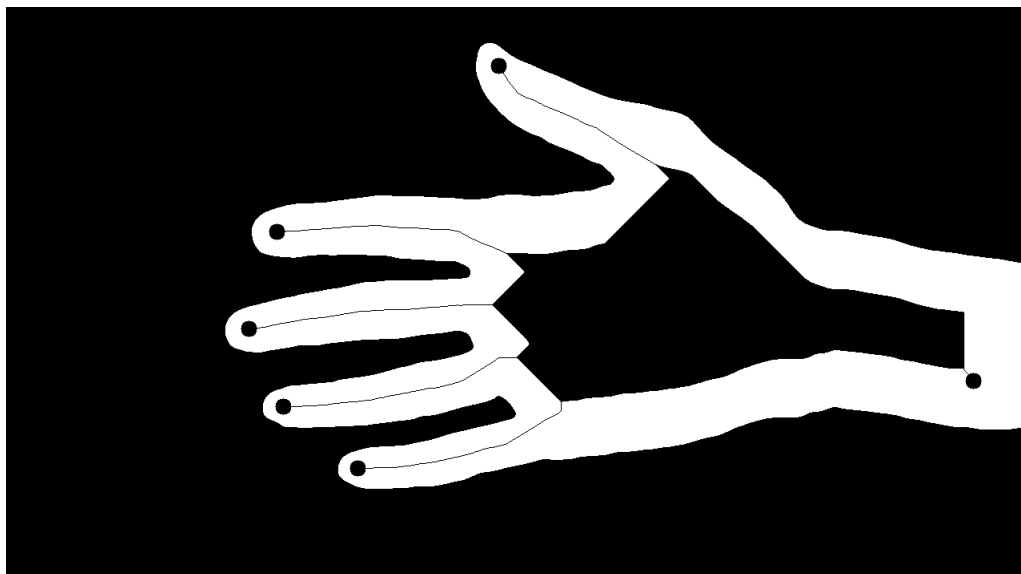


Obr. 5.5: Čiastočná skeletonizácia.

Následne je volaná funkcia *skeleton_endpoints*, hľadá koncové body ako je popísané v kapitole 4. Funkcii je predaný skelet z predchádzajúcej časti, a je vytvorená konvolučná maska na nájdenie koncových bodov (maska 5.3).

$$kernel = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 10 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Pomocou OpenCV funkcie *filter2D*, ktorá prijíma vstupný obraz a masku, pomocou ktorej bude obraz filtrovaný. Funkcia aplikuje konvolučnú masku 5.3 na obraz, ktorý je uložený ako 2D pole hodnôt. Princíp funkcie spočíva v hľadaní bielych pixelov v obraze, ktoré majú práve jedného suseda. Takéto pixely budú mať po aplikácii hodnotu 11. Miesta, kde sa hodnota pixelu rovná 11, sú nájdené, a označené ako koncové body. Návratovou hodnotou funkcie *skeleton_endpoints* je 2D pole hodnôt, v ktorom pixely ktoré reprezentujú koncové body (viz obrázok 5.6) majú hodnotu 1, a ostatné hodnotu 0.



Obr. 5.6: Vizualizácia koncových bodov.

Obraz s pixelmi s hodnotou 1, je následne v hlavnej funkcii prekonvertovaný na zoznam súradníc pre zjednodušenie ďalšej práce s týmito hodnotami. Následne je volaná funkcia *determine_fingers*, ktorá prijíma ako argument súradnice všetkých koncových bodov získaných v predchádzajúcej časti. Zmyslom funkcie je nájsť päť súradníc bodov, ktoré reprezentujú konce prstov. Ak je funkcii predaný zoznam súradníc o dĺžke päť, je funkcia ukončená a vracia pôvodný zoznam súradníc. Ak je dĺžka väčšia ako päť, funkcia pomocou dvoch vnorených for cyklov počíta vzdialenosť od bodu, po každý ďalší bod. Celkové vzdialenosti sú uložené v zozname pre každý bod. Po ukončení prepočítavania vzdialenosti funkcia vyhodnocuje ktorým piatim bodom sú priradené najmenšie hodnoty tak, že postupne odstraňuje body s najvyššími hodnotami, pokiaľ nezostáva posledných päť hodnôt. Funkcia vracia zoznam piatich súradníc.

Pre identifikáciu jednotlivých prstov sú určené dve funkcie, funkcia *find_thumb* a *identify_all_fingers*. Pre určenie prstov na ruke bola zvolená metóda určenia polohy palca, a následná identifikácia ostatných prstov. Funkcia *find_thumb* prijíma ako argument pole piatich súradníc, a jej výstupom sú súradnice palca. Funguje na podobnom princípe ako funkcia *determine_fingers*, počíta vzdialenosť každého bodu v poli k ostatným bodom. Funkcia vychádza z predpokladu že vzdialenosť palca od ostatných prstov bude vždy väčšia, ako vzdialenosť každého iného prsta od ostatných. Vzdialenosť bodov je spočítavaná v zanorenom for cykle, a výsledné súradnice s najvyššou hodnotou sú vrátené ako návratová hodnota funkcie. Pôvodné nezoradené pole súradníc reprezentujúcich prsty, a X a Y súradnica palca sú predané funkcii *identify_all_fingers*, ktorá zoradí pole na základe vzdialenosti od palca. Výstupom je zoradené pole obsahujúce zoradené páry X a Y súradníc prstov, kde na indexe 0 je palec, a na indexe 4 malíček. Pre lokalizáciu dlane je použitý výpočet súradníc stredu masy ako je popísané v kapitole 4.

Kapitola 6

Zhodnotenie práce a experimenty

Kapitola sa venuje popisu priebehu experimentovania a testovania implementácie a návrhom na zlepšenie. Rozoberá zistené poznatky pri implementácii jednotlivých častí algoritmu. Ďalej popisuje očakávaný výsledok riešenia v porovnaní s dosiahnutým a návrhy na ďalšie pokračovanie v tejto práci.

6.1 Dataset

Dataset vstupných obrázkov 6.1 pozostáva z fotografií ruky vytvorených pri osvetlení rôznymi vlnovými dĺžkami svetla na rôznom pozadí. Na fotografiách sa častokrát nachádzajú okolité objekty, ktoré sú taktiež osvetlené.



Obr. 6.1: Ukážka datasetu.

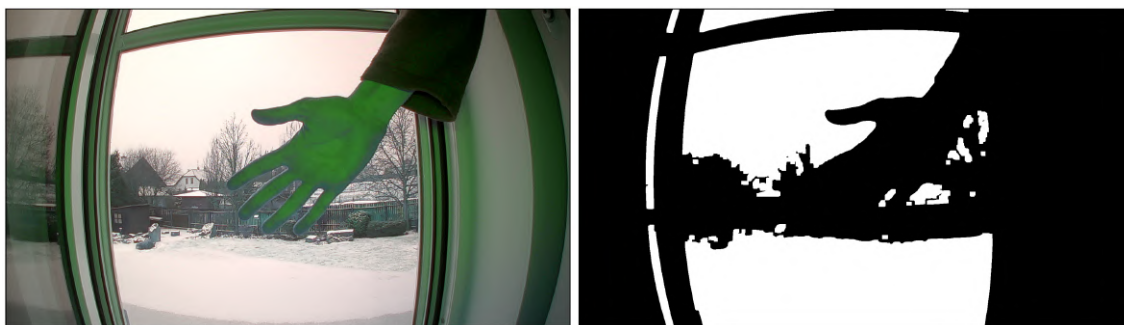
6.2 Segmentácia

V časti segmentácie boli testované rôzne prístupy v snahe nájsť čo najviac robustné riešenie odstránenia nežiadúceho pozadia v snímkach. Boli testované rôzne metódy spomenuté v kapitole 3. Prvotne bol testovaný algoritmus K-means použitý pri segmentácii obrazu. Pri jeho použití bolo možné pomerne s dobrou úspešnosťou segmentovať obrázky s nie príliš komplexným pozadím, pri fotografiách s príliš slabým osvetlením alebo pozadím algoritmus zlyhával. Ďalšou nevýhodou bola neschopnosť určiť univerzálny počet zhlukov K, tak aby segmentácia fungovala správne, čo spôsobovalo zlievanie pozadia s popredím (viz obrázok 6.2). Následná práca s takýmto obrazom by bola náročná, najmä z dôvodu neschopnosti správne určiť hranice objektu. Časová náročnosť zhlukovania patrí medzi vyššie v porovnaní s ostatnými prahovacími metódami.



Obr. 6.2: Segmentácia pomocou K-means.

Pre prahovanie obrazu bola zvolená Otsuova prahovacia metóda v kombinácii s úpravou obrazu ako bolo popísané v kapitole 3. Algoritmus pracuje spoľahlivo pri snímkach kde je ruka dostatočne osvetlená, avšak pri snímkach s príliš svetlým pozadím, sa niekedy nepodarí ruku segmentovať (obrázok 6.3). Hlavným dôvodom prečo je v týchto prípadoch segmentácia neúspešná je to, že ruka aj pozadie majú príliš podobnú farbu alebo intenzitu. Táto podobnosť spôsobuje to, že po aplikácii prahovacej metódy nie je ruka správne segmentovaná, alebo chýbajú niektoré jej časti.



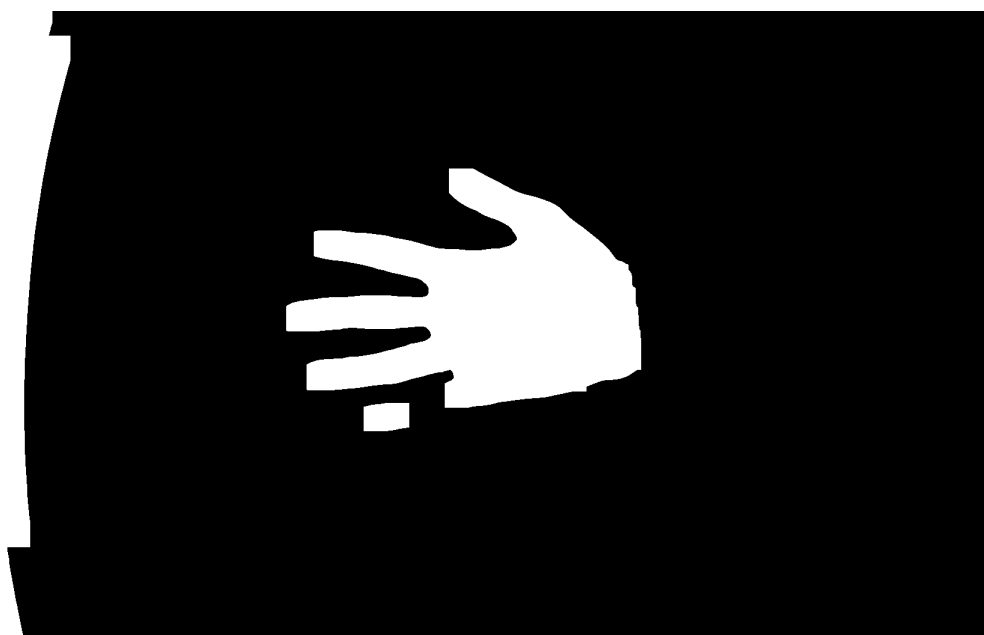
Obr. 6.3: Neúspešná segmentácia pomocou Otsuovej metódy.

Pri používaní morfolologickej transformácie *opening* na odstránenie zvyšných prvkov pozadia po realizácii Otsoveho prahovania, bolo experimentované s rôznymi maskami a rôznym počtom iterácií. Pri príliš nízkom počte iterácií neboli prvky pozadia dostatočne odstránené (viz obrázok 6.4) a narušovali ďalšiu prácu s obrazom.



Obr. 6.4: Nízky počet *opening* iterácií.

Naopak pri vysokom počte iterácií boli z obrazu odstránené dôležité časti ruky, ako napríklad časti prstov (viz obrázok 6.5). Pri detekcii častí ruky by nebolo možné s takýmto obrazom správne pracovať.



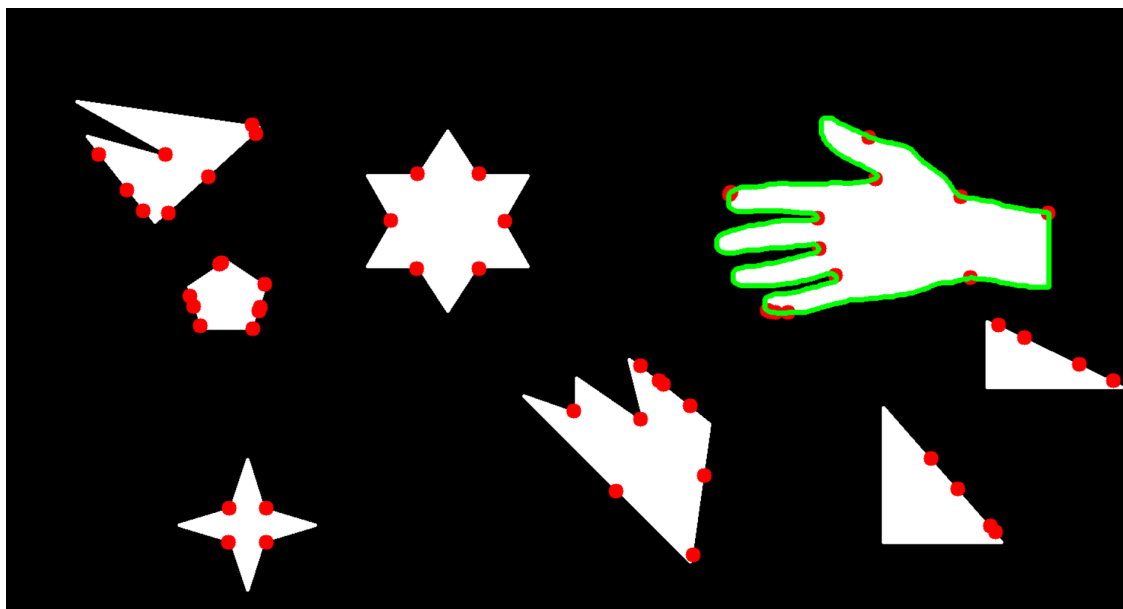
Obr. 6.5: Vysoký počet *opening* iterácií.

Po experimentácii s rôznymi veľkosťami masky a počtom iterácií, bola zvolená 3x3 maska, s počtom iterácií päť, keďže vykazovala najlepšie výsledky a pomer medzi odstránením pozadia a zachovaním geometrie ruky.

6.3 Lokalizácia ruky

Pôvodný návrh lokalizácie popísaný v kapitole 4 založený na použití metódy prirovnávania šablón sa po testovaní javil ako nevhodný. Hlavným dôvodom prečo algoritmus zlyhával bolo to, že tvar ruky na fotografii nie je vždy rovnaký. Medzery medzi prstami a sklon ruky vzhľadom ku fotoaparátu sa z fotografie na fotografiu mení, čo znamená, že by bolo potrebné pre úspešné rozpoznanie tvaru ruky vytvoriť veľké množstvo šablón. S veľkým množstvom šablón by sa časová náročnosť zvyšovala.

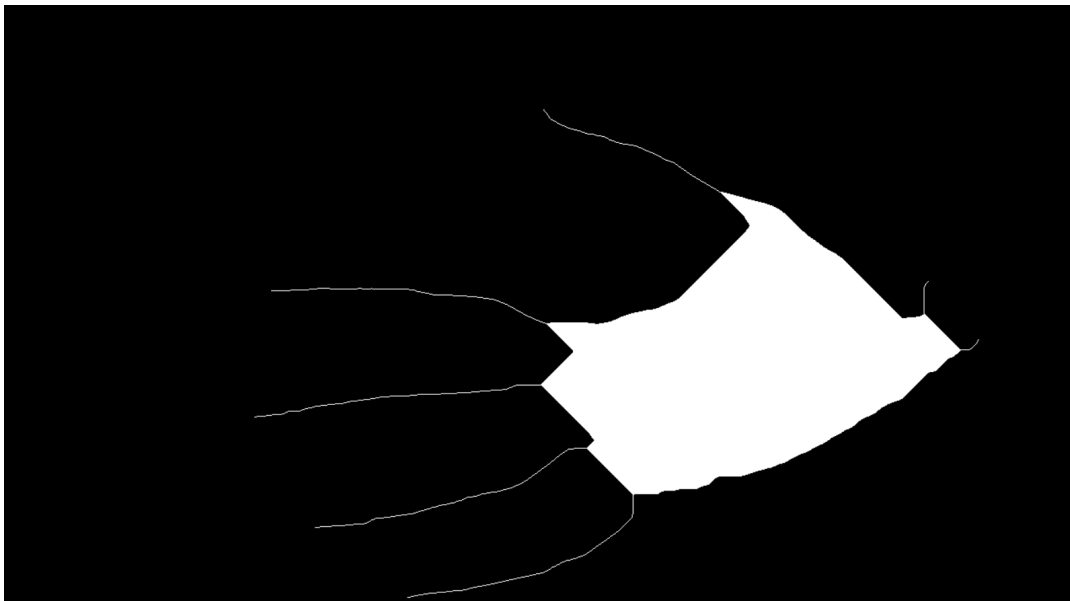
Ako riešenie problému lokalizácie bol zvolený algoritmus založený na analýze geometrie ruky pomocou kontúr. Po úspešnej segmentácii ruky vo vstupnom obraze, dokáže algoritmus spoľahlivo rozlíšiť ostatné objekty z pozadia od ľudskej ruky. Testovanie funkčnosti prebiehalo pomocou analýzy rôznych geometrických tvarov na čiernom pozadí (obrázok 6.6).



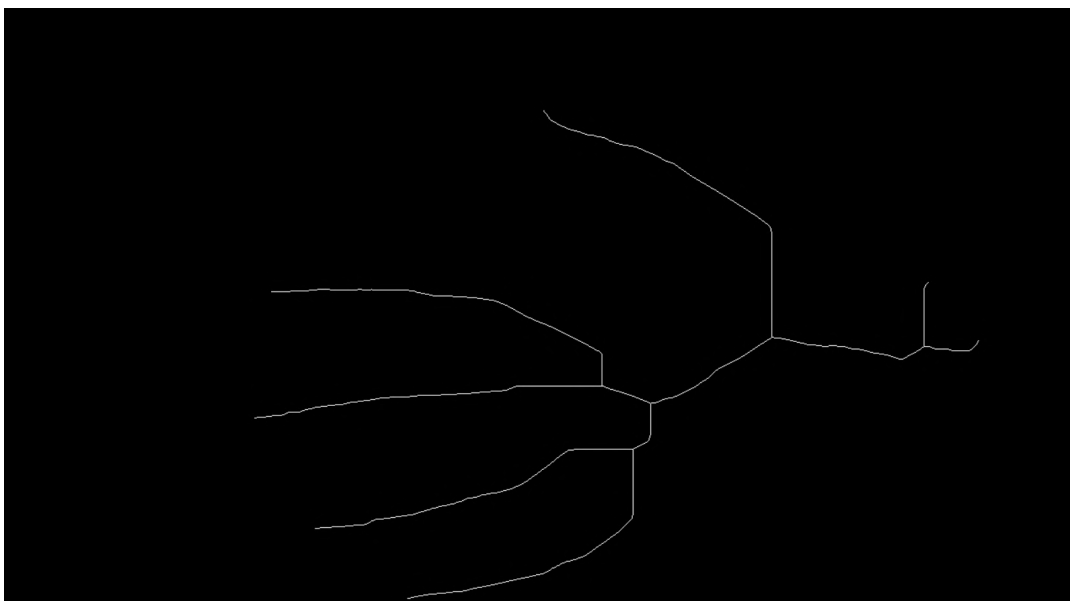
Obr. 6.6: Testovanie funkčnosti rozpoznávania kontúry ruky.

6.4 Identifikácia prstov a dlane

Identifikácia prstov ruky je časovo najnáročnejšou časťou algoritmu. Použitý stenčovací algoritmus zaberá až 40 % celkového času. Za účelom zrýchlenia algoritmu v tejto časti, bolo zvolené čiastočné stenčovanie. Pre úspešné nájdenie koncových bodov nie je potrebné stenčiť celú plochu, ale len okrajové časti ruky, ktoré reprezentujú koncové časti prstov. Čiastočné stenčovanie je v priemere až o 80 % rýchlejšie ako úplne stenčovanie, výsledky stenčovania vidno na obrázkoch 6.8 a 6.7. Pre ešte výraznejšie urýchlenie tejto časti algoritmu je znížené vstupné rozlíšenie vstupného obrázku. Príliš veľké zníženie rozlíšenia obrazu by však mohlo negatívne ovplyvniť schopnosť algoritmu identifikovať časti ruky.

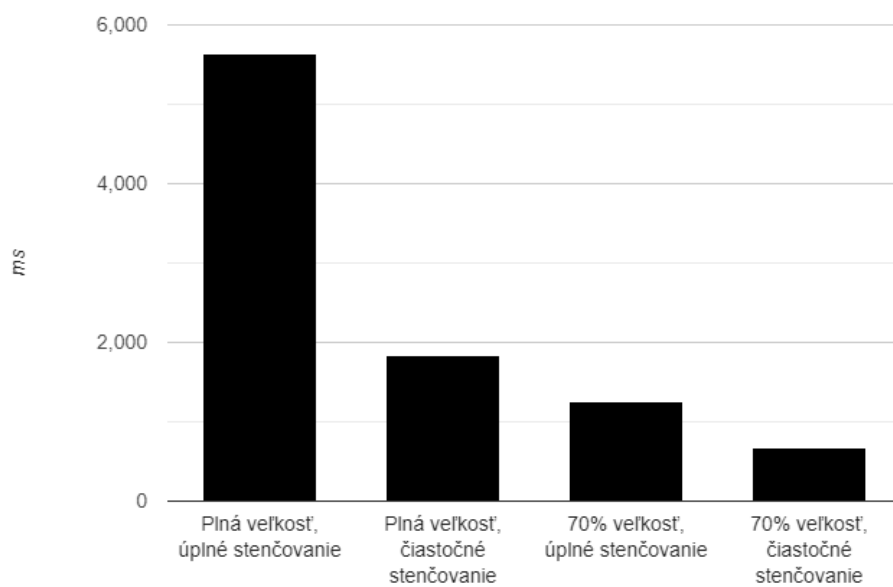


Obr. 6.7: Čiastočné stenčovanie.



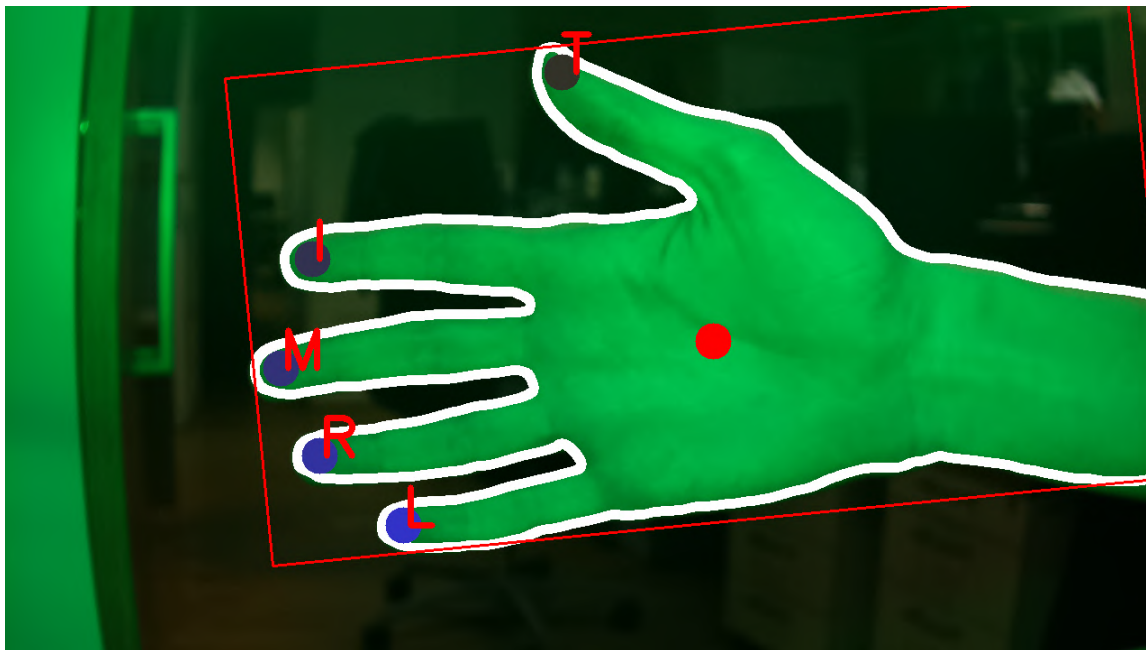
Obr. 6.8: Úplné stenčovanie.

Graf 6.9 demonštruje časovú náročnosť algoritmu po zmene veľkosti obrazu, a obmedzení počtu iterácií stenčovacieho algoritmu. Kombinácia čiastočného stenčovania a 70 % veľkosti obrázka bola zvolená ako najlepšia z pohľadu zrýchlenia algoritmu a zachovania kvality obrazu potrebnej pre analýzu častí ruky.



Obr. 6.9: Graf rýchlosti algoritmu

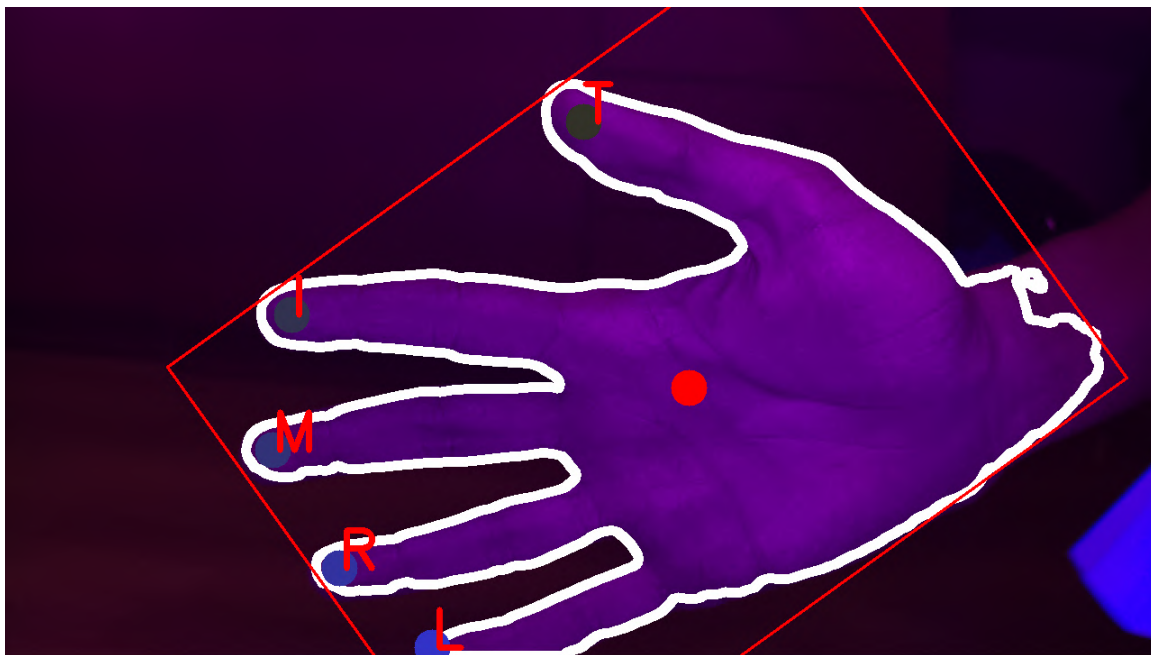
6.5 Ukážky výstupu



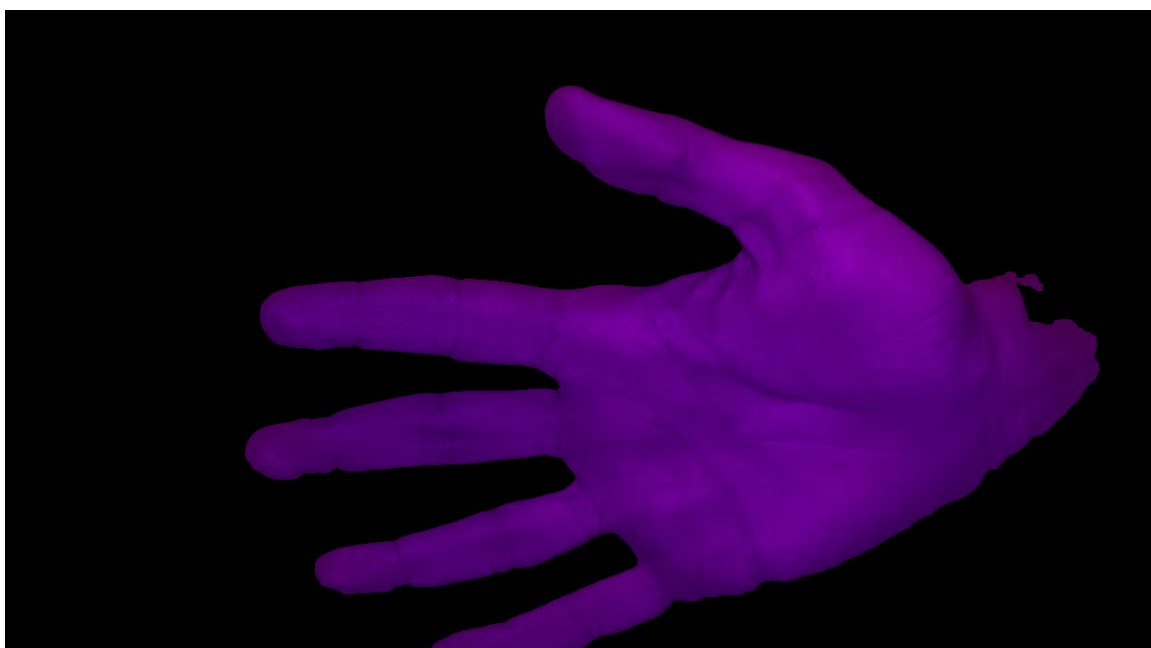
Obr. 6.10: Ukážka výstupu identifikácie častí ruky.



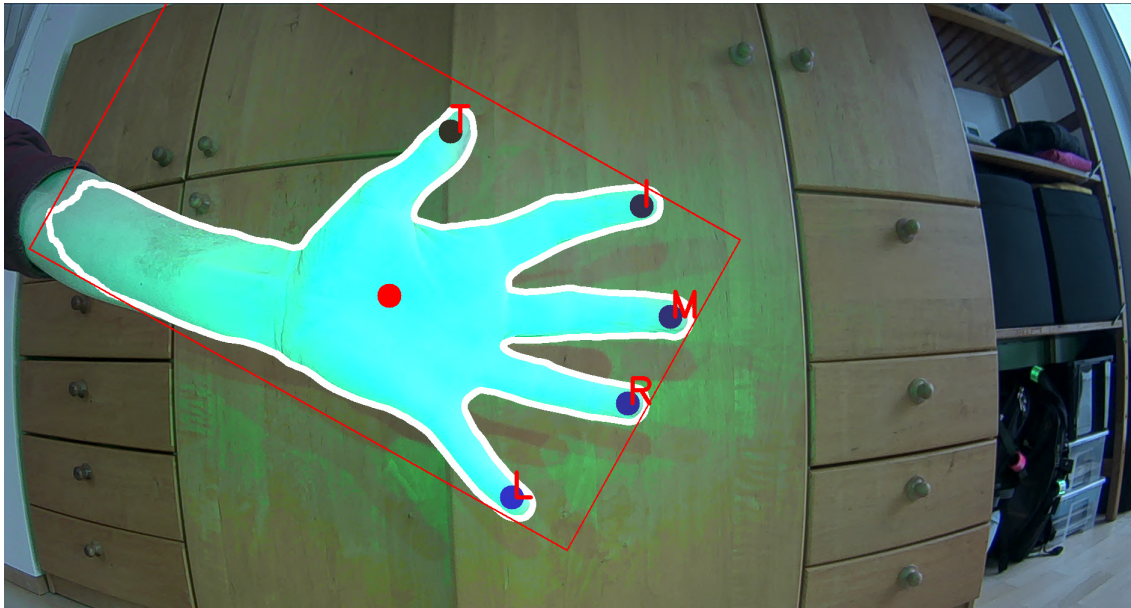
Obr. 6.11: Ukážka výstupu extrakcie ruky.



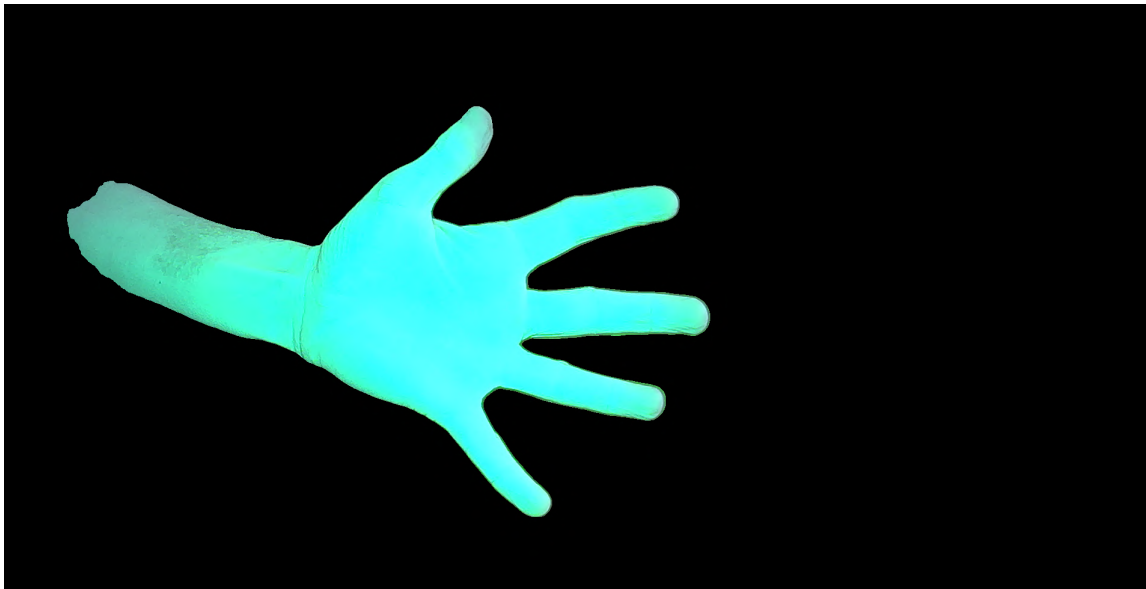
Obr. 6.12: Ukážka výstupu identifikácie častí ruky.



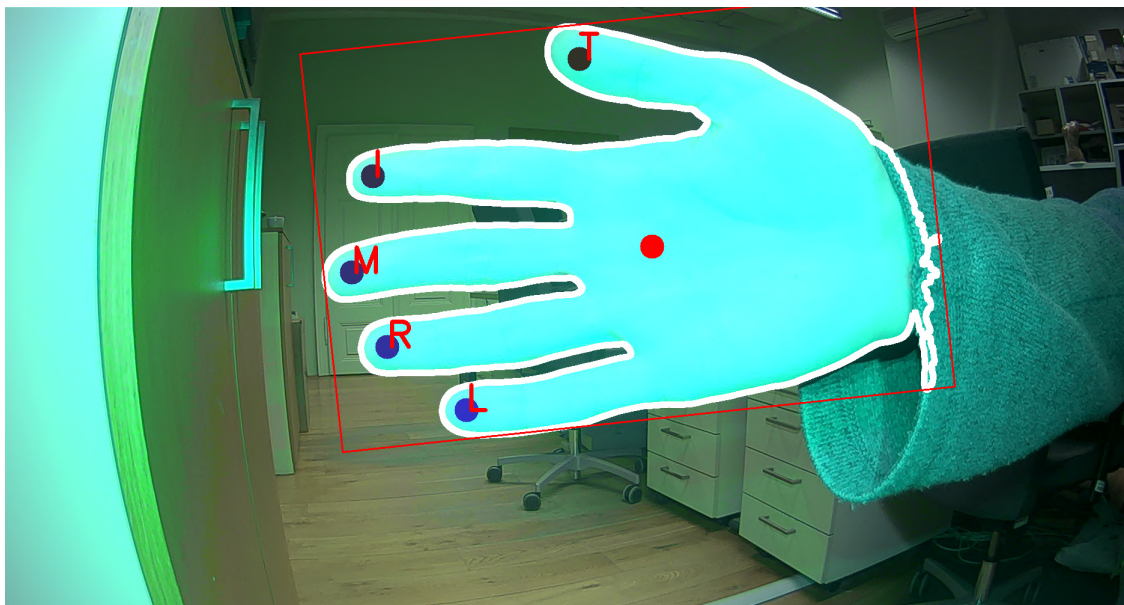
Obr. 6.13: Ukážka výstupu extrakcie ruky.



Obr. 6.14: Ukážka výstupu identifikácie častí ruky.



Obr. 6.15: Ukážka výstupu extrakcie ruky.



Obr. 6.16: Ukážka výstupu identifikácie častí ruky.



Obr. 6.17: Ukážka výstupu extrakcie ruky.

Kapitola 7

Záver

Cieľom práce bolo navrhnúť a implementovať algoritmus schopný extrahovať ľudskú ruku z fotografie s komplexným pozadím a lokalizovať jej časti. V práci boli popísané princípy a metodiky čoraz populárnejších biometrických systémov, ich výhody, nedostatky a spôsob ich využitia v oblasti bezpečnosti. Pre úspešnú realizáciu zadania bolo potrebné naštudovať metódy segmentácie, detekcie objektov v obraze a techniky potrebné pre lokalizáciu častí ruky. Bolo zistené, že pre úspešnú extrakciu ruky a lokalizáciu jej častí z obrazu je potrebné použiť kombináciu rôznych techník spracovania obrazu. Pri implementácii boli použité viaceré metódy spracovania obrazu a detekcie objektu.

Naštudované a popísané časti boli využité pre implementáciu algoritmu ktorý dokáže detegovať ruku s farebným osvetlením a identifikovať jej časti. Algoritmické riešenie problému je založené na základe geometrie ľudskej ruky a využíva najmä funkcie python knižnice *OpenCV*. Pri implementácii boli použité rôzne algoritmy ako Otsuova prahovacia metóda, analýza kontúr na základe geometrie alebo stenšovací algoritmus. Algoritmus pre extrakciu ruky bol testovaný na rôznych vstupných obrazoch s rozličným pozadím. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri dostatočne osvetlenej ruke bez ohľadu na farbu osvetlenia, alebo pozadia.

V tejto práci boli splnené všetky požadované body. Unikátnosť geometrie ľudskej ruky umožňuje identifikáciu osôb na základe jedinečných črt ruky. Na túto prácu bude ďalej naviazané detekciou živosti z extrahovanej ruky, ktorá je využívaná na rozlíšenie falzifikátov biometrických vzoriek ruky. Ďalším možným pokračovaním tejto práce je analýza častí ruky a ich vzájomnej polohy, na základe ktorej by bolo možné biometricky identifikovať osoby.

Literatúra

- [1] *About OpenCV*. Dostupné z: <https://opencv.org/about/>.
- [2] *Contour Approximation Method*. Dostupné z: https://docs.opencv.org/3.4/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html.
- [3] ANSARI, M., KURCHANIYA, D. a DIXIT, M. A Comprehensive Analysis of Image Edge Detection Techniques. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*. November 2017, zv. 12, s. 1–12. DOI: 10.14257/ijmue.2017.12.11.01.
- [4] BANGARE, S., DUBAL, A., BANGARE, P. a PATIL, S. Reviewing Otsu’s Method For Image Thresholding. *International Journal of Applied Engineering Research*. Máj 2015, zv. 10, s. 21777–21783. DOI: 10.37622/IJAER/10.9.2015.21777-21783.
- [5] BARROW, H. G., TENENBAUM, J. M., BOLLES, R. C. a WOLF, H. C. Parametric Correspondence and Chamfer Matching: Two New Techniques for Image Matching. In: San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1977, s. 659–663. IJCAI’77.
- [6] BASHIR, M. a KEMPF, F. Advanced Biometric Pen System for Recording and Analyzing Handwriting. *Journal of Signal Processing Systems*. 2012, zv. 68, s. 75–81.
- [7] BAYRAMOGLU, N. Y. a BAZLAMACCI, C. F. Recursive Shortest Spanning Tree Algorithms for Image Segmentation. In: *EUROCON 2005 - The International Conference on Computer as a Tool*. 2005, sv. 2, s. 979–982. DOI: 10.1109/EURCON.2005.1630111.
- [8] BAČA, M., GRD, P. a FOTAK, T. Basic Principles and Trends in Hand Geometry and Hand Shape Biometrics, New Trends and Developments in Biometrics, Dr. Jucheng Yang (Ed.),. In: November 2012, s. 77–99. ISBN 978-953-51-0859-7.
- [9] BENZIANE, S. a BENYETTOU, A. Biometric Technology Based on Hand Vein. *ORIENTAL JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE TECHNOLOGY*. December 2013, zv. 6, s. 401–4012.
- [10] BHATT, S. a SANTHANAM, T. Keystroke dynamics for biometric authentication — A survey. In: *2013 International Conference on Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering*. 2013, s. 17–23. DOI: 10.1109/ICPRIME.2013.6496441.
- [11] BIANCO, S., BUZZELLI, M. a SCHETTINI, R. Object Detection Using Feature-based Template Matching. In: Marec 2013, sv. 8661, s. 86610C. DOI: 10.1117/12.2006224.

- [12] BORGEFORS, G. Hierarchical chamfer matching: a parametric edge matching algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1988, zv. 10, č. 6, s. 849–865. DOI: 10.1109/34.9107.
- [13] CHOWDHURY, M. H. a LITTLE, W. D. Image thresholding techniques. In: *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing. Proceedings*. 1995, s. 585–589. DOI: 10.1109/PACRIM.1995.519599.
- [14] DALAL, N. a TRIGGS, B. Histograms of oriented gradients for human detection. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. 2005, sv. 1, s. 886–893 vol. 1. DOI: 10.1109/CVPR.2005.177.
- [15] DAWOD, A., ABDULLAH, J. a ALAM, M. Hand Feature Detection from Skin Color Model with Complex Background. In: . November 2010. DOI: 10.5176/978-981-08-7656-2ATAI2010-29. ISBN 9789810876562.
- [16] DAWOUD, N. N., SAMIR, B. B. a JANIER, J. Article: Fast Template Matching Method based Optimized Sum of Absolute Difference Algorithm for Face Localization. *International Journal of Computer Applications*. March 2011, zv. 18, č. 8, s. 30–34.
- [17] 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>.
- [18] GAVRILA, D. A Bayesian, Exemplar-Based Approach to Hierarchical Shape Matching. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. September 2007, zv. 29, s. 1408–1421. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1062.
- [19] GRUNDMANN, M., KWATRA, V., HAN, M. a ESSA, I. Efficient hierarchical graph-based video segmentation. In: *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2010, s. 2141–2148. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5539893.
- [20] GUTHIER, B., HO, K., KOPF, S. a EFFELSBERG, W. Determining exposure values from HDR histograms for smartphone photography. In: . Október 2013, s. 425–426. DOI: 10.1145/2502081.2502252.
- [21] JABIN, S. a ZAREEN, F. Biometric signature verification. *International Journal of Biometrics*. Január 2015, zv. 7, s. 97. DOI: 10.1504/IJBM.2015.070924.
- [22] JAIN, A. a DUTA, N. Deformable matching of hand shapes for user verification. In: *Proceedings 1999 International Conference on Image Processing (Cat. 99CH36348)*. 1999, sv. 2, s. 857–861 vol.2. DOI: 10.1109/ICIP.1999.823019.
- [23] KINDT, E. *Privacy and Data Protection Issues of Biometric Applications*. Január 2013. ISBN 978-94-007-7521-3.
- [24] LOWE, D. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. November 2004, zv. 60, s. 91–. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

- [25] NAMEIRAKPAM, D., SINGH, K. a CHANU, Y. Image Segmentation Using K -means Clustering Algorithm and Subtractive Clustering Algorithm. *Procedia Computer Science*. December 2015, zv. 54, s. 764–771. DOI: 10.1016/j.procs.2015.06.090.
- [26] RAGHAVENDRA, R. a BUSCH, C. Hand Dorsal Vein Recognition: Sensor, Algorithms and Evaluation. In: . Október 2015. DOI: 10.1109/IST.2015.7294557.
- [27] RIBALDA, R., GLEZ DE RIVERA, G., DE CASTRO, A. a GARRIDO, J. A mobile biometric system-on-token system for signing digital transactions. *IEEE Security Privacy*. 2010, zv. 8, č. 2, s. 13–19. DOI: 10.1109/MSP.2010.1.
- [28] SAHOO, P., SOLTANI, S. a WONG, A. A Survey of Thresholding Techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. Február 1988, zv. 41, s. 233–260. DOI: 10.1016/0734-189X(88)90022-9.
- [29] SANTOS SIERRA, A. de, SÁNCHEZ ÁVILA, C., BAILADOR, G. a CASANOVA, J. Unconstrained and Contactless Hand Geometry Biometrics. *Sensors (Basel, Switzerland)*. December 2011, zv. 11, s. 10143–64. DOI: 10.3390/s111110143.
- [30] SINGH, A., AGRAWAL, A. a PAL, C. Hand geometry verification system: A review. In: . November 2009, s. 1 – 7. DOI: 10.1109/ICUMT.2009.5345652.
- [31] STASTNY, J. a MINAŘÍK, M. A Brief Introduction to Image Pre- Processing for Object Recognition. In: . Január 2007.
- [32] STOCKMAN, G. a SHAPIRO, L. G. *Computer Vision*. 1st. USA: Prentice Hall PTR, 2001. 137-150 s. ISBN 0130307963.
- [33] SUBBAN, R. a MANKAME, D. A Study of Biometric Approach Using Fingerprint Recognition. *Lecture Notes on Software Engineering*. Január 2013, s. 209–213. DOI: 10.7763/LNSE.2013.V1.47.
- [34] TOPALOGLU, N. Revised: Fingerprint classification based on gray-level fuzzy clustering co-occurrence matrix. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*. Január 2013, zv. 31, s. 1307–1316.
- [35] VEZHNEVETS, V., SAZONOV, V. a ANDREEVA, A. A Survey on Pixel-Based Skin Color Detection Techniques. Marec 2004.
- [36] YÜKSEL, A., AKARUN, L. a SANKUR, B. Biometric Identification through Hand Vein Patterns. In: *2010 International Workshop on Emerging Techniques and Challenges for Hand-Based Biometrics*. 2010, s. 1–6. DOI: 10.1109/ETCHB.2010.5559295.
- [37] ZHAO, Z.-Q., ZHENG, P., XU, S.-T. a WU, X. Object Detection With Deep Learning: A Review. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. Január 2019, PP, s. 1–21. DOI: 10.1109/TNNLS.2018.2876865.
- [38] ZOU, Y., DONG, F., LEI, B., FANG, L. a SUN, S. Image thresholding based on template matching with arctangent Hausdorff distance measure. *Optics and Lasers in Engineering*. 2013, zv. 51, č. 5, s. 600 – 609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.12.016>. ISSN 0143-8166.

Príloha A

Obsah priloženého pamäťového média

- PDF text bakalárskej práce
- Zdrojové súbory \LaTeX pre vysádzanie bakalárskej práce
- Zdrojové súbory implementovaného algoritmu
- Ukážky výstupu algoritmu