



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**BEZKONTAKTNÍ AUTENTIZACE UŽIVATELE POMOCÍ
SENZORU LEAP MOTION**

CONTACTLESS USER AUTHENTICATION USING LEAP MOTION SENSOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB LUKÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL NAJMAN

BRNO 2018

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2017/2018

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Lukáč Jakub**

Obor: Informační technologie

Téma: **Bezkontaktní autentizace uživatele pomocí senzoru Leap Motion**
Contactless User Authentication Using Leap Motion Sensor

Kategorie: Zpracování obrazu

Pokyny:

1. Seznamte se se senzorem Leap Motion a s jeho SDK.
2. Nastudujte principy a metody autentizace uživatele pomocí geometrie ruky.
3. S pomocí senzoru Leap Motion vytvořte dataset obsahující snímky rukou uživatelů.
4. Navrhněte a implementujte metodu využívající senzor Leap Motion pro autentizaci uživatele.
5. Metodu vyhodnoťte na vytvořeném datasetu.

Literatura:

- DE-SANTOS-SIERRA, Alberto, et al. Unconstrained and contactless hand geometry biometrics. *Sensors*, 2011, 11.11: 10143-10164.
- CHAN, Alexander; HALEVI, Tzipora; MEMON, Nasir. Leap motion controller for authentication via hand geometry and gestures. In: *International Conference on Human Aspects of Information Security, Privacy, and Trust*. Springer, Cham, 2015. p. 13-22.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 až 3.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

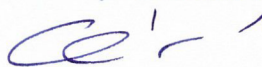
Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Najman Pavel, Ing.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
602 00 Brno, Bězetčehova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký
vedoucí ústavu

Abstrakt

Bezkontaktná autentizácia užívateľov nabera ako nová technológia na popularite. Poznatky v spracovaní obrazu a ich aplikácia prispeli k vzniku zariadení akým je ovládač Leap Motion. Toto zariadenie od firmy s rovnakým názvom Leap Motion inc. dokáže určovať polohu ruky v priestore a rozpoznávať jednoduché gestá. Táto práca sa zaoberá aplikáciou dát z rozhrania tohto ovládača pri identifikácii osôb. Využité sú už overené charakteristiky geometrie ruky, ako šírky a dĺžky prstov. Cieľ práce je najmä overiť použitie tohto na trhu dostupného a cenovo nenáročného senzoru pri rozpoznávaní. Užívateľ si toto zariadenie pravdepodobne nezakúpi kvôli jeho vlastnosti autentifikácie osôb, no môže využívať túto jednoduchú formu zabezpečenia bez akejkoľvek ďalšej investície. Nakoniec, výsledky práce ukazujú presnosť okolo 99 % na menšej vzorke ľudí, ktorá pripomína práve domáce použitie.

Abstract

Contactless authentication of users has grown in popularity as a new technology. Recent findings in the field of computer vision and its applications have contributed to the emergence of new devices such as Leap Motion controller. This device is capable of precise recognition of hand positions and simple gestures identification. This paper presents an application of data gathered from controller's interface and using them for user identification. Proposed solution uses hand geometry to evaluate the recognition process where this accessible and inexpensive device can be used. Therefore, the user can easily benefit from this extra feature coming with the new device. To conclude, the results show overall accuracy over 99 % on a relatively small dataset.

Kľúčové slová

Leap Motion, biometria, geometria ruky, bezkontaktné snímanie rúk, autentizácia, rozpoznávanie

Keywords

Leap Motion, biometrics, hand geometry, contactless hand scanning, authentication, recognition

Citácia

LUKÁČ, Jakub. *Bezkontaktní autentizace uživatele pomocí senzoru Leap Motion*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Pavel Najman

Bezkontaktní autentizace uživatele pomocí senzoru Leap Motion

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Pavla Najmana. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....

Jakub Lukáč
16. mája 2018

Podakovanie

Rád by som poďakoval vedúcemu tejto práce, Ing. Pavlovi Najmanovi, za podnety a nápady vedúce k výsledkom práce a ústretovosť pri spolupráci. Zároveň sa chcem vedúcemu práce poďakovať za poskytnutie prototypu aplikácie, na ktorú táto práca nadviazala. Za ochotu a trpezlivosť ďakujem aj ľuďom, ktorí poskytli nevyhnutné testovacie dáta k tejto práci.

Obsah

1	Úvod	3
2	Biometria a jej aplikácie	5
2.1	Biometria	5
2.2	Súčasná aplikácia biometrie	6
2.3	Jednotlivé charakteristiky ruky	6
2.4	Kvalita informácií	7
2.5	Zaznamenávanie charakteristík	7
2.5.1	Typy záznamových technológií	8
2.5.2	Prehľad zariadení	8
3	Identifikácia pomocou charakteristík rúk	9
3.1	Geometria ruky	9
3.2	Bezpečnosť a súkromie	10
3.3	Zariadenia umožňujúce snímanie geometrie rúk	10
4	Zariadenie Leap Motion	12
4.1	Konštrukcia senzora	12
4.2	Technológie	13
4.3	Presnosť	15
5	Realizácia dátového súboru	17
5.1	Forma dátovej databázy	17
5.1.1	Pozícia ruky pri snímaní	18
5.2	Zbieranie dát	18
6	Autentizácia s využitím Leap Motion	20
6.1	Konkrétne charakteristiky anatómie ruky	20
6.1.1	Využité charakteristiky	20
6.2	Implementácia a použité metódy	21
7	Vyhodnotenie extrahovaných charakteristík	23
7.1	Klasifikácia charakteristík	23
7.2	Opis klasifikačných experimentov	23
7.3	Výsledky rozpoznávania	24
7.4	Dosahovaná presnosť rozpoznávania	25
8	Záver	26

Literatúra	27
A Extrahované charakteristiky	30
B Histogramy dát charakteristik z Leap Motion API	31

Kapitola 1

Úvod

V súčasnej dobe prevláda trend identifikácie užívateľa bez potreby kontaktu so samotným zariadením, ktoré danú identifikáciu zabezpečuje. Hlavnými predstaviteľmi sú predovšetkým rozpoznávanie tváre (facial recognition) a rozpoznávanie na základe vzorov dúhovky (iris recognition). Tieto techniky sa už dnes dostávajú do komerčných zariadení. Oblasťou alebo skôr časťou tela, ktorá je ešte stále spojená najmä s autentizáciou pomocou dotyku senzora, je ruka. S pokrokom v oblasti spracovania obrazu a v oblasti klasifikácie a rozpoznávania sa však aj tu dajú hľadať spôsoby, ako využiť biometriu ruky bez potreby kontaktu so sensorom. Týmto problémom sa zaoberá aj táto práca, v spojení s využitím zariadenia Leap Motion, ktoré je už dnes komerčne dostupné.

Zariadenie Leap Motion sa začína čoraz viac dostávať do povedomia ľudí a to najmä s narastajúcou popularitou technológií okolo virtuálnej reality. Leap Motion je vstupné zariadenie, snímajúce polohu a pohyb rúk užívateľa. Zároveň umožňuje aj detekciu jednoduchých gest. S každoročným príchodom nových okuliarov pre virtuálnu realitu, je tento ovládač prirodzeným riešením pre ovládanie takéhoto užívateľského prostredia. Zariadenie vykazuje značnú presnosť¹ na malé vzdialenosti a preto sa nám naskytá otázka jeho použitia pri autentifikácii užívateľov. Hlavným cieľom projektu je prísť s návrhom charakteristických znakov ruky, na základe ktorých bude možné rozlíšiť jednotlivých užívateľov iba pomocou dát z ovládača Leap Motion. Je potrebné zachytiť snímky a dáta z ovládača a vhodne ich archivovať. Tieto dáta sú nevyhnutné pre návrh systému ako takého. Kvalita a forma dostupných dát určuje limity systému, s ktorými sa treba pri návrhu a implementácii vyrovnáť.

Táto práca je členená do nasledujúcich celkov: V Kapitole 2 sú popísané metódy využívané za účelom zaznamenávania charakteristík človeka, ich aplikácia a limitujúce faktory, ako napríklad unikátnosť vzhľadom na populáciu. Kapitola 3 nadviaže na už spomínanú detekciu užívateľa, ale už z konkrétneho pohľadu 2D charakteristík, ktoré môžeme nájsť na ruke, a ktoré môžeme zaznamenať na trhu dostupnými senzormi. Následne v Kapitole 4 je popísané zariadenie Leap Motion použité v tejto práci ako senzor pre zaznamenanie významných črt rúk. Informácie o konštrukcii, technológiách a ovládaní tohto senzora, spolu s údajmi o presnosti a jeho využiteľnosti, budú zhrnuté práve v tejto kapitole. V Kapitole 5 sú popísané dáta, ktoré sú v rámci tejto práce zozbierané a následne použité v ďalších častiach práce. Vzhľadom na dáta, ktoré je možné zaznamenať zariadením Leap Motion, sú vhodné charakteristiky ruky použité pre účely ďalšieho vývoja, uvedené v Kapitole 6.

¹Viac o presnosti zariadenia je popísané v Podkapitole 4.3, kde sú uvedené konkrétne hodnoty od výrobcu ako aj experimentálne údaje z nezávislých štúdií

Extrahované charakteristiky sú následne vyhodnotené za pomoci klasifikačného algoritmu v Kapitole 7. V tejto kapitole je tiež popísaný postup a experimentovanie týmito s rysmi rúk. Kapitola 8 obsahuje posledné zhrnutie tejto práce, jej výsledkov a zároveň možné modifikácie a rozšírenia, ktoré by mohli byť smerodajné pre prípadné nadväzujúce práce.

Kapitola 2

Biometria a jej aplikácie

V tejto kapitole sú ozrejmene hlavné dôvody, prečo využiť charakteristiky človeka pri overovaní a určovaní identity užívateľa. Popísané sú aj jednotlivé skupiny charakteristík, ktoré je možné nájsť na ruke človeka a spôsoby ako ich zaznamenať, a aj riziká spojené s ich aplikáciou. V neposlednom rade sa krátko pozrieme na zariadenia, ktoré sú takéhoto záznamu schopné, ale aj na komplexné riešenia ktoré implementujú celý proces autentizácie.

2.1 Biometria

Identifikácia na základe biometrie¹ ruky patrí bez pochyb k najstarším metódam rozpoznávania osôb. Bez dlhého uvažovania väčšine z nás napadne v súvislosti s touto problematikou určovanie totožnosti za pomoci unikátnych papilárnych línií na končekoch prstov – odtlačkov prstov. Okrem tohto dobre známeho príkladu, existuje značná variabilita ďalších znakov špecifických pre každého jednotlivca. Rozdeľujeme ich do dvoch hlavných skupín: fyziologické znaky a behaviorálne znaky [10]. Prvé spomenuté sa vyznačujú lepšou stabilitou s postupom času, teda nie sú do takej miery ovplyvnené návykmi či starnutím osoby. Patria sem technológie zaoberajúce sa skenom dúhovky, tváre, ucha, ruky, záznamom hlasu, ale napríklad aj štruktúrou ciev sietnice, dlane a iných jedinečných častí tela.

Následne, medzi znaky založené na správaní človeka zaraďujeme napríklad vlastnoručný podpis (metriky – dynamika písania, sklon pera, no aj samotný tvar výsledného podpisu), chôdzu alebo štýl písania na klávesnici počítača. Zatiaľ menej preskúmanými a menej praktickými, z pohľadu záznamu a analýzy, sú biologické charakteristiky, ako DNA² alebo srdcová aktivita. Táto práca sa zameriava hlavne na fyzické znaky, menovite na tie na rukách.

Unikátnosť spomenutých biometrických informácií je na toľko významná, že tieto znaky začali prenikať do oblasti elektronickej verifikácie osôb. Zvýšenie bezpečnosti sa núka ako hlavná výhoda použitia takýchto identifikátorov. Heslo v podobe ruky užívateľa nie je možné stratiť, zabudnúť a je komplexnejšie ako bežne volené heslá. Zároveň je vhodnou implementáciou možné vytvoriť užívateľsky prívetivé riešenie. Využitie jedinečných črt rúk otvára možnosti pre rôzne autorizačné aplikácie, ktoré už dnes prenikajú do spotrebnej elektroniky. Predpokladá sa, že v budúcnosti tento trend bude len narastať vďaka pokroku v oblasti, dostupnosti senzorov a predovšetkým vďaka jednoduchosti použitia.

¹Biometria – rozpoznávanie ľudských jedincov na základe ich charakteristických anatomických a behaviorálnych znakov [8]

²DNA – Deoxyribonukleová kyselina, zodpovedá za uchovanie genetickej informácie bunky

2.2 Súčasná aplikácia biometrie

V oblasti bezpečnosti neposkytuje biometria nič iné ako koncept jednoznačnej identifikácie osôb. Tieto poznatky sa využívajú už niekoľko desaťročí, avšak najmä klesajúce náklady takéhoto riešenia v poslednej dobe dovolili viac a viac aplikácii. A to spolu popri zaručení dôležitých cieľov ako sú jednoduchosť použitia a hlavne presnosť. Príkladom je oblasť daktyloskopie, vedy skúmajúcej odtlačky prstov, ktorá sa rozšírila do každodenného bežného života ľudí. Praktické využívanie techník z tejto oblasti, predovšetkým vo forenznej vede, zaručilo značnú popularitu tejto metódy. Spolu so stále klesajúcou cenou a dostupnosťou záznamových zariadení vzrastá integrácia týchto technológií do koncových zariadení. Takéto formy uplatnenia majú snahu minimalizovať mieru zložitosti systému, pri zachovaní istej úrovne bezpečnosti, zväčša aspoň takej akú majú už existujúce alternatívne riešenia.

Ďalším praktickým využitím, s dopadom na širokú verejnosť, je zakomponovanie automatizovaného rozpoznávania osôb do procesu hraničnej kontroly. Doklady totožnosti vždy obsahovali a stále obsahujú biometrické dáta v podobe fotografie osoby, ktorej patria. Informácie v nich boli v posledných rokoch rozšírené o odtlačky prstov a v kombinácii s identifikáciou tváre umožnili vznik automatizovanej kontrole. Tú je možné zažiť osobne už dnes, napríklad na veľkých letiskách. Štandardné kontroly postupne integrujú elektronické brány podobné tej na Obrázku 2.1b. Tento prístup je zároveň aplikáciou viacúrovňového systému, teda využitie viac ako jednej skupiny charakteristík. Podobné postupy sú využívané na miestach, kde je presnosť systému nevyhnutná. Takéto riešenia majú očakávané zložitejší proces autentizácie.

2.3 Jednotlivé charakteristiky ruky

Autentizácia na základe charakteristík ruky je jedným z hlavných výstupov tejto práce. Anatómia ruky poskytuje mnoho možností ako tieto znaky zaznamenávať. Zároveň na ruke možno snímať viacero na sebe nezávislých skupín unikátnych črt: už bol spomenutý sken odtlačkov prstov, podobný charakter má aj odtlačok dlane, prípadne odtlačky kĺbových spojení na prstoch ruky[19]. Všetky tieto znaky sú založené na jedinečnosti papilárneho terénu, ktorý pokrýva povrch končatín.

Zaujímavým znakom je aj ruka samotná, jej tvar a proporcie. Tento spôsob sa javí ako jednoduchý, no štúdie ukazujú, že na malom množstve používateľov, rádovo niekoľko desiatok jedincov, takéto riešenie funguje (prehľadná tabuľka s výsledkami vybraných textov je súčasťou práce [20]).

Ďalšou fyziologickou črtou nachádzajúcou sa v oblasti ruky je cievna štruktúra tkaniva tejto končatiny. Cievny sieť je zvyčajne pri snímaní za viditeľného svetla veľmi výrazná, pretože sú ukryté pod kožou. Obrazce tvorené žilami sa počas života nemenia a sú jedinečné v rámci populácie. Vzor je možné pozorovať za pomoci infračerveného svetla a to vďaka krvi. Hemoglobín, ktorý je súčasťou krvi, absorbuje toto infračervené svetlo viac ako okolité tkanivo a cievy tak na snímke vyniknú. Takáto metóda záznamu produkuje kvalitné vzorky, je však treba poznamenať, že niektoré výsledky môžu byť ovplyvnené nepresnosťami. Dôvodom je hrubá koža pokrývajúca skenovanú časť, alebo silná vrstva podkožného tuku. Zvyčajným zdrojom týchto informácií je dlaň, prsty alebo predlaktie. Špecifickým sú končeky prstov, ktoré sú tiež vhodné pre takúto identifikáciu. Ponúkajú ešte väčšiu mieru bezpečnosti, nakoľko je ich ťažšie sfaľšovať najmä v porovnaní s odtlačkami prstov. Odtlačky prstov sú ľahko zneužitelné, z dôvodu, že ich človek zanecháva na predmetoch, ktorých sa

dotkne. Spoločnosti už dnes ponúkajú riešenia, ktoré fungujú na základe týchto „cievnych odtlačkov prstov“. Použitie je rôzne, od prístupu do budov po platenie v obchode.

2.4 Kvalita informácií

Klasické aplikácie, využívajúce istú formu hesla ako prístupového tokenu, porovnávajú tento údaj, s referenčným údajom v databáze pričom táto zhoda musí byť jednoznačná. Teda všetky časti, znaky ak ide o textové heslo, zadaného údaje sa musia zhodovať s referenciou v danom poradí. Naopak, v biometrii takéto porovnanie nie je celkom možné. Aj v zariadeniach, ktoré vynucujú rovnakú polohu snímanej časti tela pri zázname, bude dochádzať k odlišnostiam medzi získanými dátami tej istej osoby. Výsledné merania senzorom môžu byť ovplyvnené faktormi ako sú okolité svetlo, či zdravotný stav užívateľa. Zhoda teda pripúšťa istú variabilitu medzi aktuálne zistenou informáciou a tou referenčnou.

Kvalita signálu, ktorý nesie informáciu o osobe, musí byť teda otázkou skúmania. Kritéria sa v koncových aplikáciách môžu líšiť, avšak vždy je treba posúdiť, či je informácia, ktorú sa snažíme zachytiť, súčasťou vstupného signálu. Ďalej je možné skúmať presnosť záznamu, napríklad obsahom šumu v signáli. Referenčný vzor je zvyčajne tvorený za pomoci niekoľkých meraní, pri ktorých sú popísané faktory dôležité a môžu ovplyvniť presnosť aplikácie. Počet záznamov je v tomto prípade závislý najmä na vôli užívateľa a jednoduchosti opakovania merania. Avšak, experimenty výkonnosti systémov ukazujú jasný trend, ak je referenčná vzorka vytvorená z dát s dobrou kvalitou, je dosahovaná dostatočná presnosť pri identifikácii vzorky s nižšou kvalitou. Naopak, ak je referenčná vzorka nízkej kvality, tak nezávisle od kvality porovnáwanej vzorky, systém vykazuje zníženú úspešnosť identifikácie [10]. Systém je dokonca možné ďalej zlepšovať – s každou úspešnou identifikáciou je možné upraviť referenčný model systému a tým zlepšiť jeho presnosť.

2.5 Zaznamenávanie charakteristík

Osoba, žiadajúca o udelenie prístupu, si je zvyčajne vedomá, že prebieha jej identifikácia. Vo väčšine prípadov aj sama poskytne daný biometrický údaj, v podobe v akej je snímanie najpresnejšie. Nasleduje identifikácia osoby pomocou porovnania práve zaznamenaných charakteristík. Tie sú porovnané so všetkými dostupnými vzormi v databáze a osobe je udelený prístup užívateľa s najväčšou zhodou. Prípadne je využitá metóda nastavenia prahu. Ak sa aj tá najpodobnejšia vzorka zhoduje z rozdielom väčším ako je hodnota prahu, tak je užívateľovi odmietnutý prístup do systému. Toto opatrenie zamedzuje človeku s podobnými črtami byť identifikovaný ako niekto iný.

Takýto systém implementuje *identifikáciu* osoby, označujeme ho tiež ako tzv. *one-to-many* systém. Doplnkom tohto prístupu je poskytnutie systému, okrem biometrickej informácie, aj unikátny identifikátor, ktorý však môže byť verejný, napríklad meno. Systém v takomto prípade iba overí či sa práve získané biometrické údaje o osobe, ktorá má v systéme uložený referenčný vzor identifikovaný poskytnutým tokenom, zhodujú. Ide tu teda už iba o *verifikáciu*, že osoba je naozaj osobou, ktorou tvrdí, že je. Systém tiež voláme *one-to-one* systém.

Iný prístup využitia poznatkov z oblasti snímania črt človeka vedie k identifikácii osôb bez ich priameho vedomia. Ak bol pre danú osobu, či skupinu osôb vytvorený referenčný profil, je takáto plošná identifikácia jednoducho realizovateľná. Snímanie je možné využiť na verejných priestranstvách, či už za účelom hľadania osôb alebo na monitorovanie. Prípadne

na rôzne štatistické aplikácie, zisťovanie pomeru medzi mužmi a ženami, sčítanie osôb na frekventovaných miestach a iné. Riešenie má isté limitácie, vo všetkých prípadoch treba uvážiť mieru nepresnosti výsledkov a dopad na súkromie skúmanej vzorky ľudí.

2.5.1 Typy záznamových technológií

Dostupné technológie a zariadenia schopné záznamu biometrických informácií:

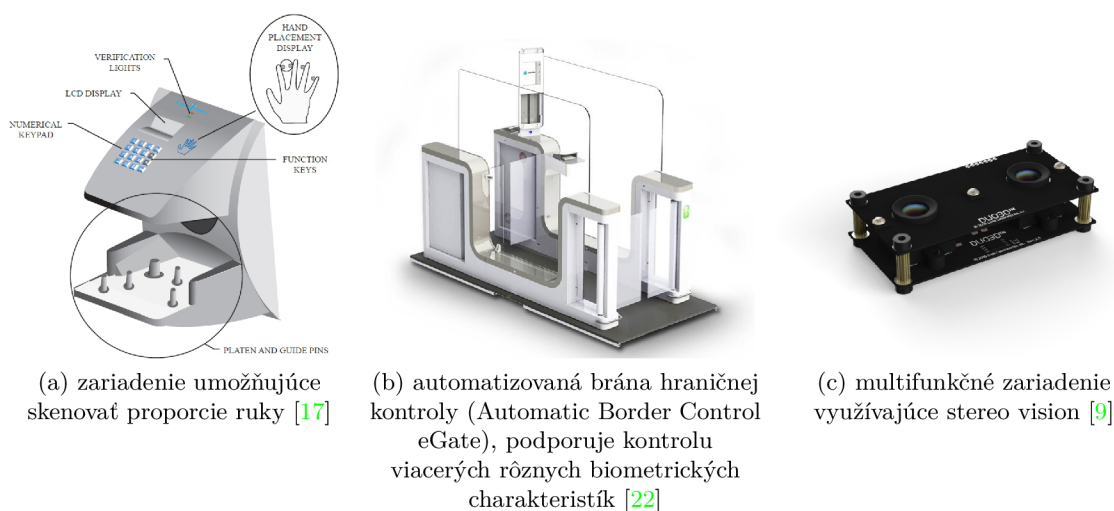
- mechanické – rôzne tlakové snímače
- akustické – obraz vytvorený za pomoci ultrazvuku, mikrofón
- optické
 - kamera pre zachytenie viditeľného svetla
 - kamera pre zachytenie infračerveného svetla
 - termokamera

Ďalej môžeme zariadenia rozdeliť do dvoch skupín podľa typu snímania:

- skúmaná časť tela musí byť pri skenovaní v kontakte so senzorom alebo jeho časťami
- časť tela nie je v akomkoľvek priamom kontakte so zariadením
 - zariadenie však môže vyžadovať umiestnenie časti tela do istej polohy v jeho operačnom priestore

2.5.2 Prehľad zariadení

Zariadenia a metódy pomocou, ktorých je možné uchovávať biometrické dáta sa vyvíjajú už viac ako jedno storočie. Už spomínanú geometriu ruky, ktorá je dôležitá v rámci tejto technickej správy, vie zaznamenávať niekoľko typov zariadení. Veľmi nepraktické, ale skoré riešenie prinieslo zariadenie využívajúce pre správne umiestnenie ruky systém kolíkov. Informácie o ruke následne zaznamenala kamera, ukážka Obrázok 2.1a.



Obr. 2.1: Vybrané zariadenia umožňujúce záznam biometrických znakov

Kapitola 3

Identifikácia pomocou charakteristík rúk

Spôsoby rozpoznávania osôb spomenuté v predošlej Kapitole 2 sú viac do detailov opísané práve tu. Hlavne metódy a technológie, ktoré sú pre túto prácu dôležité, menovite záznam charakteristík ruky optickým zariadením. Potom sú popísané aj samotné znaky, ktoré špecifikujú proporcie ruky.

Morfológia ruky sa začala automatizovane vyhodnocovať ako jeden z prvých biometrických údajov. Prvé aplikácie boli predovšetkým v udeľovaní prístupu na pracoviská alebo monitorovanie príchodov a odchodov pracovníkov. Používané zariadenia boli podobné tomu na Obrázku 2.1a. Dnes, najmä vďaka pokroku v oblasti spracovania obrazu, sme schopní túto metódu identifikácie realizovať pomocou jednoduchších, menších a predovšetkým dostupnejších senzorov. To všetko bez potreby akéhokoľvek kontaktu so zariadením. Navyše pokrok otvára nové možnosti realizácie a umožňuje vznik rôznorodých inovatívnych aplikácií.

3.1 Geometria ruky

Ruka človeka ponúka mnoho unikátnych znakov, na základe ktorých je možné identifikovať danú osobu. Zároveň ide o ľahko dostupnú a polohovateľnú časť tela. Ako už bolo spomenuté, odtlačky prstov sú dominantné v rámci tejto časti tela. Širokej verejnosti sú všeobecne známe ako unikátny identifikátor. Avšak povrch a tkanivo ruky skrýva aj ďalšie znaky, ktoré stoja za to preskúmať. Z pohľadu biológie ide o stabilné črty poskytujúce dobrý zdroj informácií.

Patria tu znaky opisujúce štruktúru ruky ako celku. Sú to často vzdialenosti medzi jednotlivými významnými bodmi ruky: šírka a dĺžka jednotlivých prstov alebo dlane, no aj ich hrúbka či celkový povrch. Prípadne je ruka spätne modelovaná vhodným algoritmom, ktorý generuje jej presnú trojdimenzionálnu predlohu. Z predlohy je potom možné zistiť, okrem už spomenutých charakteristík, aj zaoblenie povrchu prstov [16]. Stabilita týchto znakov závisí hlavne na anatómii končatiny, teda od jej vnútornej štruktúry, ktorá je tvorená a limitovaná kosťami.

Tieto charakteristiky sú iba v malej miere ovplyvniteľné externými vplyvmi. Menšie poranenia nezabraňujú ich zosnímaniu do takej miery ako napríklad pri odtlačkoch prstov. Takéto riešenie je tiež vhodné na pracoviskách, kde pravidelne dochádza k znehodnocovaniu iných foriem charakteristík. Dôvodom môže byť hlavne manuálna práca: ruky pokryté

olejom, nadmerne znečistené ruky alebo zvráskavenie kože spôsobené dlhým vystavením vlhkému prostrediu, či vode. Naopak, šperky alebo umelé nechty by mohli byť už problémom, keďže priamo menia tvar ruky. To predovšetkým v prípade, že nie sú nosené pravidelne. Systém je v prípade potreby možné navrhnuť tak, aby aktualizoval model osoby s každou jej úspešnou identifikáciou. To dá systému schopnosť kompenzovať drobné zmeny, spôsobené aj zmenou hrúbky tukovej vrstvy v tkanivách, či už spomínaným nosením šperkov.

Prítomnosť charakteristík je veľmi dôležitým faktorom v biometrii. Geometria ruky je veľmi dobre akceptovaná v rámci populácie [11], ktokoľvek bez vážnej deformácie ruky je schopný využívať túto formu identifikácie. Navyše snímanie je jednoduché a možnosť extrahovať jednotlivé metriky dovoľuje použiť algoritmy klasifikácie nenáročné na spracovanie.

3.2 Bezpečnosť a súkromie

Presnosť zaznamenávania biometrických informácií, spolu s úspešnosťou klasifikácie sú faktory ovplyvňujúce celkovú bezpečnosť výsledného riešenia. Systém zvyčajne chráni prístup k citlivým dátam alebo fyzický prístup do budov, preto je nutné zvážiť mieru rizika v každom jednotlivom prípade. Takéto zistenia následne porovnať s úspešnosťou autentizácie dostupných technológií. Vyhodnotiť, ako veľmi je daná metóda presná, nie je jednoduché. Identifikácia osôb na základe ich charakteristík nevyužíva úplnú zhodu s predlohou. To otvára možnosti potenciálneho získania neoprávneného prístupu, a teda zneužitia chránených informácií.

Výhodou biometrie je však to, že unikátne črty nie sú prenositeľné alebo odcudziteľné, tak ako heslá, či prístupové karty. Neprenositeľnosť charakteristík umožňuje udeliť prístup k chráneným informáciám špecifickej osobe a iba tá ho môže využiť. Všetko za predpokladu, že vybrané črty sú unikátne v rámci populácie. Fyziologické črty sú zvyčajne nemenné, čo je z pohľadu identifikácie žiadaná vlastnosť. To zároveň znamená, že ak dôjde k ich kompromitácii, stávajú sa tieto charakteristiky natrvalo menej bezpečné. Ak dôjde k strate údajov, je na ich základe možné vytvoriť atrapy pripomínajúce jednotlivé časti tela a následne ich využiť na prelomenie biometrického systému. Príkladom je vytvorenie a použitie odtlačkov prsta osoby, ktorá potrebné informácie zanechala na nejakom držanom predmete. Zariadenia z tohto dôvodu využívajú prídavné senzory, ktoré majú za úlohu odhaliť falzifikáty. Senzory overujú živosť vzorky, ktorú práve zaznamenávajú. Okrem toho, tieto senzory môžu odhaliť aj ďalšie potenciálne riziko biometrie – snímanie bez vôle alebo vedomia užívateľa.

Kontúry ruky z pohľadu bezpečnosti nie sú považované za veľmi dobré znaky umožňujúce presnú identifikáciu, pretože ich unikátnosť je limitovaná. Rozpoznávanie založené iba na geometrii ruky nie je vhodné pre systémy s potrebou identifikácie veľkého počtu osôb [15].

3.3 Zariadenia umožňujúce snímanie geometrie rúk

Ako bolo spomenuté, geometria nie je najpresnejší a najbezpečnejší typ identifikácie, preto je treba obzvlášť pri tejto metóde dbať na presnosť dát zo senzora. Určenie presnej polohy snímaného objektu v priestore bol problém [20], ktorý prvé zariadenia riešili umiestnením ruky na referenčnú plochu. Tá mohla byť pevne daná, okrem sklonu a vzdialenosti od senzora vynucovali takéto zariadenia aj presnú polohu prstov, čo nemusí byť vždy jednoduché, viď Obrázok 2.1a. Presná pozícia pri zaznamenávaní zaručovala dobré výsledky. Následne boli obmedzenia minimalizované zariadeniami využívajúcimi iba referenčnú plochu, podobne ako je to napríklad pri skeneroch dokumentov.

Pokrok v rozpoznávaní objektov a určení ich polohy v snímke z kamery umožnil vznik bezkontaktného snímania kontúr ruky. Presnosť zariadení sa zvýšila natolko, že tieto informácie môžu byť základom systému pre identifikáciu osôb. Na trhu je niekoľko zariadení, ktoré takýto záznam umožňujú: DUO3D¹ – na Obrázku 2.1c, Intel RealSense Camera² [21], Leap Motion³ – použitý pre účely tejto práce.

¹<https://duo3d.com/>

²<https://software.intel.com/en-us/realsense/>

³<https://www.leapmotion.com/>

Kapitola 4

Zariadenie Leap Motion

Po vysvetlení spôsobov detekcie vo všeobecnosti bude v tejto kapitole popísaný senzor použitý ako vstupné zariadenie pre účely tejto práce. Senzor od firmy Leap Motion inc. nesúci rovnaký názov Leap Motion je zariadenie umožňujúce kontinuálnu detekciu oboch rúk užívateľa vo vymedzenom priestore. Zariadenie prešlo viac ako ročným vývojom a od roku 2013 je dostupné na trhu pre širokú verejnosť. Firma ďalej voľne ponúka a vyvíja príslušný software, ktorý slúži ako ovládač (z ang. *device driver*) pre prístup k zariadeniu. Súčasťou ovládača je aj služba, ktorá zabezpečuje spracovanie údajov zo senzora. Vizualizácia na Obrázku 4.1 zobrazuje senzor Leap Motion a jeho štruktúru.

Nasledujúce podkapitoly stručne popisujú hardwarovú štruktúru, spracovanie obrazových informácií a praktické aspekty senzora, ako presnosť a využiteľnosť. Vzhľadom na to, že zariadenie je proprietárny senzor, je táto kapitola založená na informáciách z oficiálneho blogu výrobcu zariadenia [3] a ďalej doplnená zisteniami z iných prác.

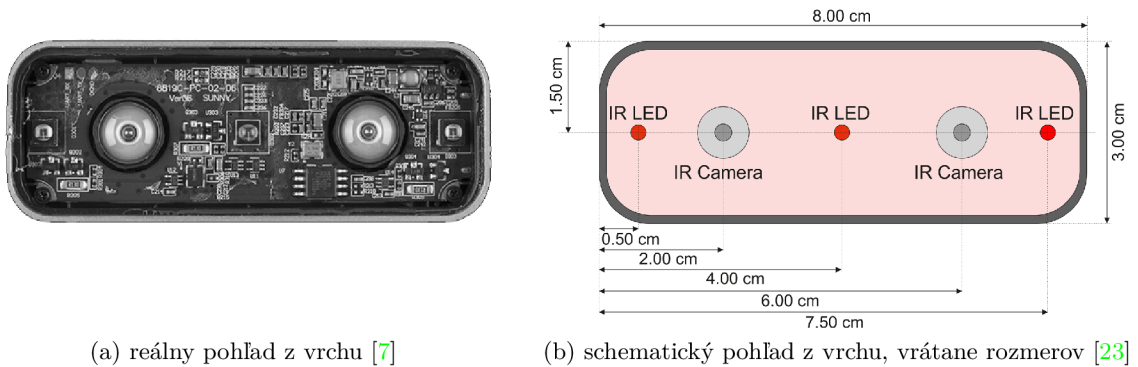


Obr. 4.1: Vizualizácia hlavných hardwarových súčasti senzora Leap Motion [6]

4.1 Konštrukcia senzora

Senzor je malé kompaktné zariadenie, jeho rozmery umožňujú mnoho aplikácií. Konštrukcia senzora umožňuje jeho jednoduchú inštaláciu napríklad na okuliare pre virtuálnu realitu. Samotný výrobca Leap Motion inc. ponúka samolepiaci držiak pre uchytenie senzora na okuliare.

Hlavnou prednosťou zariadenia sú však dve kamery, schopné zaznamenať dopadajúce infračervené svetlo. Zdrojom infračerveného svetla sú tri LED diódy umiestnené v jednej línii spolu s kamerami v hornej časti zariadenia Leap Motion. Vyžarované svetlo je mimo viditeľného spektra človeka. Obrázok 4.2 popisuje uloženie týchto hlavných hardwarových komponentov. Kamery sú umiestnené vo vzdialenosti 40 mm od seba. Pevne daná vzdialenosť umožňuje senzoru rekonštrukciu scény iba za pomoci obrázkov získaných z dvojice kamier a využitím pokročilých algoritmov. Širokouhlé objektívy kamier umožňujú snímanie priestoru pred zariadením v uhloch 120° až 150° a vzdialenosti až 80 cm od stredu zariadenia. Táto vzdialenosť bola navýšená použitím nového softwaru pre spracovanie dát a je ďalej limitovaná intenzitou infračerveného svetla dodaného z diód na zariadení. Ďalším dôležitým parametrom pre kontinuálne snímanie je počet snímok za sekundu – každá z kamier zariadenia je schopná zaznamenať od 20 do 200 snímok za sekundu. Tento počet závisí na aktuálnych nastaveniach, ale aj na dostupnej výpočtovej kapacite. Premennivá rýchlosť snímania (najmä neočakávaná vyššia rýchlosť snímania) môže negatívne ovplyvniť koncovú aplikáciu pracujúcu so zariadením. [1, 6]



(a) reálny pohľad z vrchu [7]

(b) schematický pohľad z vrchu, vrátane rozmerov [23]

Obr. 4.2: Konštrukcia zariadenia Leap Motion, zobrazenie najdôležitejších komponentov nachádzajúcich sa v hornej časti senzora – infračervené stereo kamery a IR LED (InfraRed Light-Emitting Diode – infračervená svetelná dióda) zdroje svetla

4.2 Technológie

Leap Motion je predovšetkým zariadením umožňujúcim pomerne jednoduché ovládanie výpočtového zariadenia, ku ktorému je pripojené. Senzor je bez potreby držania čohokoľvek v ruke, či potreby vyznačenia významných bodov na ruke užívateľa, schopný detekovať gestá potrebné pre ovládanie tomu prispôbovaných aplikácií. Zároveň umožňuje zaujímavé využitie tejto technológie v prípadoch, kedy je použitie tradičných ovládacích periférií ako sú myš a klávesnica veľmi nepraktické. Samostatnou oblasťou, kde tento senzor nachádza obzvlášť veľmi slubné uplatnenie, je virtuálna realita. Ďalším príkladom netradičného, sekundárneho využitia je aj aplikácia popísaná v tejto technickej správe – autentifikácia užívateľa za pomoci dát zo senzora.

Detekcia rúk, ako už bolo spomenuté, je realizovaná pomocou snímania okolitého priestoru v bezprostrednej blízkosti nad zariadením. Dve kamery zariadenia nepretržite zaznamenávajú odrazené infračervené svetlo. Obrazové dáta z kamier je možné vizualizovať pomocou intenzity dopadajúceho infračerveného svetla. Takto prezentované dáta majú formu 8-bitových čiernobielych obrázkov [13], viď Obrázok 5.2. Leap Motion ako ovládač však nie

je iba dobré dostupný kompaktný hardware, hlavná časť detekcie prebieha v software. Algoritmy pre analýzu obrazu a rekonštrukciu scény bežia mimo firmou predávané zariadenie, všetko toto zabezpečuje dodávaný software. Ten sa inštaluje na výpočtovom zariadení, ku ktorému je Leap Motion pripojený.

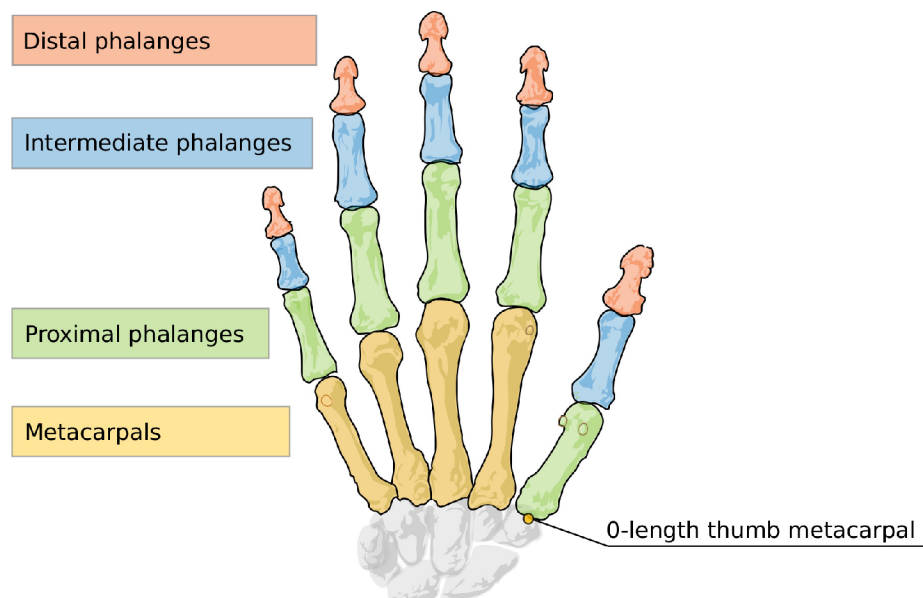
Vstupom pre detekčný software sú oba obrázky z kamier. Predmety v snímanom okolí nad sensorom by mali byť dostatočne dobre osvetlené vďaka LED diódam senzoru a typicky sú objekty jedinými jasnými predmetmi v scéne [13]. To umožňuje ešte jednoduchšiu separáciu rúk a držaných nástrojov od okolitého pozadia.

Nespracované dáta sú teda vstupom pre Leap Motion službu, ktorá zároveň zabezpečuje komunikáciu so samotným zariadením. Keďže vstupom sú dáta získane z oboch kamier a vzájomná vzdialenosť medzi nimi je známa, je možné iba pomocou aplikovania pokročilých metód pre spracovanie obrazu rekonštruovať polohu objektov v 3D scéne. Tento princíp určovania polohy a sledovania objektov v priestore sa nazýva tzv. *stereo vision*. Metóda hľadá podobnosti v oboch obrázkoch a následne dopočíta vzdialenosti objektov od záznamového zariadenia. Stereo vision senzory sú často využívané v robotike, pri pohybe robota za účelom vyhnúť sa prekážkam.

Leap Motion software ďalej klasifikuje rozpoznané objekty. Software je schopný okrem samotných rúk rozpoznať aj rôzne *pointable*¹ objekty, v literatúre sa tieto objekty tiež nazývajú nástroje. Takéto objekty sú držané v ruke a je možné nimi ukazovať na iné reálne či virtuálne objekty v scéne. Posledná verzia softwaru je schopná taktiež rozpoznať jednotlivé kosti ruky užívateľa. Na Obrázku 4.3 je vidieť, ako sú jednotlivé kosti rozpoznané – dostupné sú informácie o farebne zvýraznených kostiach. Takýto stupeň dostupných detailov umožňuje lepšiu a prirodzenejšiu interakciu s užívateľom. Koncové aplikácie sú schopné poskytnúť spätnú väzbu v reálnom čase, keďže s týmito dátami je veľmi ľahké realisticky vizualizovať pohyby rozpoznané sensorom. Systém má však aj svoje obmedzenia. [14] Poloha častí ruky, ktoré na daných dátach zo senzora chýbajú, sú iba odhadnuté, avšak presnosť je veľmi limitovaná. Využívanie situácií, kedy sú prsty v inej ako natiahnutej polohe, by sa malo v aplikáciách čo najviac obmedziť.

Konkrétne detaily implementácie a použité technológie pri vývoji ovládača Leap Motion firma Leap Motion inc. verejne neposkytuje.

¹Objekty, ktoré pripomínajú svojím tvarom natiahnutý prst, zväčša podlhovasté úzke objekty podobné ceruzke či peru.



Obr. 4.3: Schéma ruky tak, ako je rozpoznaná a dostupná cez Leap Motion software, posledná verzia umožňuje prístup k detailnému modelu ruky, vrátane polohy prstov a kosti na nich [14]

4.3 Presnosť

To ako sa hodnoty, namerané akýmkoľvek zariadením schopným zaznamenať geometrické črty ruky užívateľa líšia od tých reálnych, hrá v aplikácii akú popisuje táto správa veľmi dôležitú rolu. Pri identifikácii môže ľahko dôjsť k prípadu autentizácie nesprávneho užívateľa. Zariadenie Leap Motion má podľa jeho výrobcu dosahovať presnosť snímania polohy končiek prstov okolo jednej stotiny milimetra. Táto presnosť je však dosahovaná veľmi sporadicky. Práca si nemá za to overiť presnosť použitého senzora a informácie v tejto podkapitole budú založené na prácach, ktoré experimentálne zisťovali danú presnosť.

Je prirodzené odhadovať, že presnosť určovania polohy bude menšia pri sledovaní dynamického objektu ako pri určovaní polohy rovnakého objektu v pokoji. Štúdia, ktorá použila ako referenčnú sústavu údaje hodnôt polohy sledovaného objektu z priemyslového robota, udáva odchýlku senzora menej ako 0,2 mm pre statický objekt a priemernú presnosť pre objekty v pohybe 1,2 mm, a celkovo bola dosiahnutá veľmi priaznivá presnosť, priemerná odchýlka činila 0,7 mm [23]. Tento experiment sa zaoberal aj presnosťou pri opakovanom zisťovaní tej istej polohy, výsledky ukázali, že senzor je v takomto prípade schopný udávať opakovane pozíciu objektu s odchýlkou menšou ako 0,17 mm.

Ďalšie experimenty ukazujú, že presnosť sa môže líšiť aj v rámci priestoru, v ktorom je senzor schopný sledovať pohyby rúk. Pri sledovaní ruky vzdialenej 250 mm a viac od senzora bol zaznamenaný značný pokles presnosti [12]. Podobný pokles presnosti bol nameraný aj v rámci ostatných osí, avšak nie tak enormný ako pri priamom vzdialovaní sa od senzora (v smere osi y sústavy zariadenia, viď Obrázok 5.1). Najlepšie výsledky určovania polohy sú teda dosahované v oblasti 150 mm až 250 mm priamo nad sensorom. V tejto oblasti dokonca táto štúdia udáva merania s presnosťou akú deklaruje výrobca. Ďalším faktorom vplývajúcim na presnosť senzora je rýchlosť snímania, tú nie je možné ovplyvniť ani nastaviť. Je plne v réžii zariadenia ako rýchlo poskytuje nové snímky koncovej aplikácii. Zistená

frekvencia bola v priemere menšia ako 40 Hz, to sa však s novou verziou software javí ako čoraz menší problém.

Presnosť je potrebné zvážiť pri praktickom využití záverov tejto práce. Aspekt akým je presnosť zariadenia, je dôležité vyhodnotiť predovšetkým v aplikáciách identifikácie užívateľa a predísť tak zneužitiu systému.

Kapitola 5

Realizácia dátového súboru

Pri realizácii zberu dát od užívateľov je nutné sa priblížiť čo najviac spôsobu realizácie potenciálnej konečnej aplikácii. Testovacie dáta sú teda zaznamenané s dôrazom na získanie informácií, ktoré sú neskôr použité na rozpoznávanie charakteristík ruky. Užívatelia boli uvedení do modelovej situácie, kedy mali do systému nahráť informácie o proporciách ich rúk. Viac o detailoch výsledného súboru dát, ale aj priebehu jeho tvorby je spomenuté ďalej.

5.1 Forma dátovej databázy

Použitie zariadenie momentálne umožňuje prístup k dvom hlavným typom informácií: primárne sú dostupné spracované informácie o presnej polohe rúk a sekundárne priamo dáta z kamier senzoru. Leap Motion SDK¹ od verzie 2.1.0 sprístupňuje obrazové dáta z jeho dvoch kamier [13]. Obraz z nich tvoria hodnoty intenzity zachyteného infračerveného svetla. Aplikáčn rozhranie ďalej umožňuje serializáciu² jednotlivých **Frame** objektov, ktoré nesú už spracované informácie o rozpoznávaných rukách v scéne. Oba typy údajov sú súčasťou vytvorenej databázy.

Dáta sú hierarchicky usporiadané do zložiek s náhodným názvom. Každá s nich obsahuje údaje od jednej osoby, ďalej separované na informácie o ľavej a pravej ruke. Následne, každý zaznamenaný rámec pozostáva z binárnych dát objektu **Frame** a separátne sú uložené ľavý a pravý snímok z kamier senzora. Uložené snímky majú formát *YAML*, ktorý je z dôvodu optimalizácie ešte navyše komprimovaný. Vybraný formát umožňuje jednoduchú rekonštrukciu všetkých potrebných dát, tak ako keby boli zaznamenané samotným senzorom. Konkrétny obsah tvorí serializovaný objekt 2D matice snímky, doplnený o pomocné informácie. Veľkosť celého setu dát je približne okolo 350 kB.

Informácie, ktoré sú súčasťou výslednej databázy, sú získané iba za pomoci jedného samostatného zariadenia Leap Motion. Prístup ku všetkým použitým údajom bol cez aplikáčn rozhranie ovládača. Ovládací panel zariadenia z dôvodu ochrany súkromia umožňuje vypnutie prístupu k obrazovým dátam z jeho dvoch kamier. Toto nastavenie (*General* → *System* → *Allow Images*) bolo počas celého priebehu testovania povolené. Neboli použité iné zariadenia, ani žiadne neštandardné postupy získavania ďalších dodatočných informácií. To umožňuje výsledky práce ďalej prakticky aplikovať a využiť rovnaké postupy získavania dát.

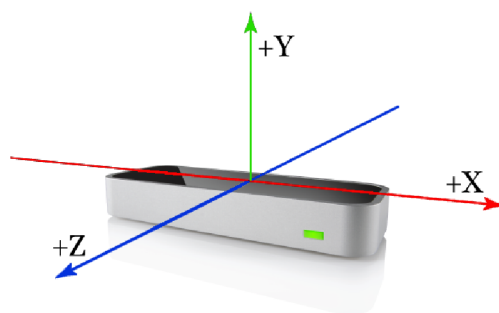
¹SDK – software development kit, aplikáčn rozhranie zariadenia

²Serializácia je proces transformácie dátového objektu na formát, ktorý je možné uschovať alebo preposlať, a neskôr znovu rekonštruovať pôvodný objekt, vrátane jeho vnútorného stavu. Zvyčajným formátom je transformácia na textový reťazec. [5]

5.1.1 Pozícia ruky pri snímaní

Úlohou užívateľa bolo počas snímania umiestniť ruku, tak aby bola detektovaná zariadením. Leap Motion má pomerne veľký operačný priestor a ako je spomenuté v podkapitole 4.3, najlepšia presnosť snímania je pri umiestnení ruky priamo nad zariadenie. Prototyp použitej aplikácie pre zber dát, navedie užívateľa pomocou pokynov na obrazovke, aby umiestnil ruku na miesto, ktoré vykazuje potrebnú presnosť. Ruku je potrebné držať paralelne s rovinou obsahujúcou vrchnú časť senzora.

Ruka je snímaná iba, ak celá spadá do vymedzenej oblasti. Tá sa nachádza vo výške 125 až 175 v smere osi y zariadenia. Oblasť je široká 200 mm a dlhá 200 mm, odpovedajúce súradnice v príslušných osiach sú -100 až 100 pre x a -70 až 130 pre z . Súradnice sú udané v milimetroch adekvátne k súradnicovému systému zariadenia, viď Obrázok 5.1. Táto oblasť stále umožňuje istý pohyb ruky počas zaznamenávania, čo je však očakávané. Úplne statickú polohu v bezkontaktnom systéme ani nie je možné dosiahnuť.



Obr. 5.1: Vizualizácia súradnicového systému zariadenia Leap Motion [2]

5.2 Zbieranie dát

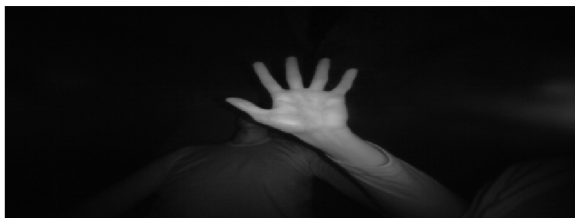
Snímanie rúk účastníkov prebiehalo v niekoľkých fázach. Líšili sa rôznymi svetelnými podmienkami, priestormi záznamu, prípadne postojom tela osoby. Niektorí účastníci stáli a nakláňali sa smerom k senzoru, iní sedeli s lakťami položenými na stole. Každé sedenie pozostávalo z modelovej úlohy vytvoriť vzor oboch rúk v systéme pre identifikáciu osôb na základe charakteristík geometrie ruky. Vytváranie referenčného vzoru pozostávalo z desiatich meraní – postupne 5 meraní pravej ruky a následne 5 meraní ľavej ruky. Každé jednotlivé meranie zahŕňovalo vytvorenie 30 rámcov dát, ktoré boli následne uložené do spomínaných súborov.

Diverzita užívateľov bola nasledovná: dátové súbory obsahujú údaje od 17 užívateľov, z toho je 6 žien a 11 mužov. Vekový rozsah bol približne 18 až 45 rokov. Ruky žiadneho z účastníkov neboli nijako viditeľne hendikepované. Dataset teda tvorí 5100 rámcov s podrobnými informáciami o rukách subjektov.

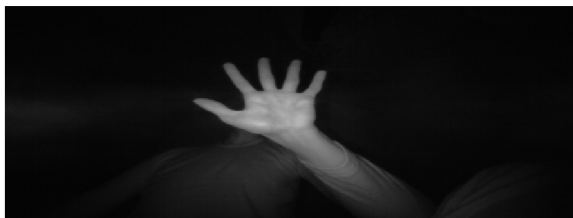
Užívatelia nemali zásadný problém s jednotlivými meraniami. Zo začiatku trvalo, kým pochopili kam majú umiestniť ruku a zorientovali sa v spôsobe inštrukcií použitých v prototypu aplikácie. Po pár pokusoch už však nemali problém a zbieranie údajov sa výrazne zrýchlilo najmä pre ľavú ruku, druhú v poradí. Menšie komplikácie nastali iba v prípadoch, keď mechanizmus detekcie rúk zariadenia označil pravú ruku za ľavú a naopak. Spôsob určovania je súčasťou aplikačného rozhrania a je plne autonómny. Riešením bolo ruku odstrániť zo zorného poľa kamier a meranie opakovať.

Pred finálnym zberom dát boli uskutočnené pokusné merania na malej vzorke osôb, približne 5 užívateľov. Tie viedli k doladeniu parametrov záznamu. Keďže užívatelia musia držať ruku vo vymedzenom priestore nad sensorom určitú dobu, bola táto doba znížená na minimum. Pôvodné nastavenia zaznamenávali 100 rámcov a meranie opakovali trikrát, avšak užívatelia komentovali dlhý čas záznamu jednotlivých meraní ako nepohodlný. Dôsledkom čoho bolo, že pri načítavaní rámcov neudržali ruku vo vyhradenom priestore po dobu potrebnú na zachytenie daného počtu rámcov. Čoho dôvodom je aj, že iba snímky ktoré dosahujú potrebnú kvalitu sú zaznamenávané. Tento aspekt znižuje frekvenciu záznamu a predlžuje tak dobu jedného merania, čo vo výsledku znamená lepšiu presnosť dát, no horšiu použiteľnosť riešenia.

Výsledný dataset svojím rozsahom simuluje menšiu skupinu užívateľov. Pre lepšiu predstavu môže táto vzorka tvoriť užívateľov chytrej domácnosti so vstavaným sensorom. Identifikácia následne môže rozoznať osobu, ktorá systém práve používa a aplikovať ňou preferované nastavenia. Vzhľadom na už spomínané limitácie presnosti tejto metódy by malo ísť skôr o menej citlivé dáta. V prípade potreby systém môže užívateľa stále požiadať o ďalšie overenie identity.



(a) ľavý snímok



(b) pravý snímok

Obr. 5.2: Ukážka zozbieraných snímok – jeden rámeček tak ako je zaznamenaný zariadením Leap Motion

Kapitola 6

Autentizácia s využitím Leap Motion

Ďalším krokom vo využití biometrických charakteristík pre účely autentizácie je ich spracovanie.

6.1 Konkrétne charakteristiky anatómie ruky

Charakteristiky popisujúce geometriu ruky netreba nejako veľmi predstavovať. Súčasťou prác iných autorov sú zväčša tie, ktoré by sa mohli zdať ako príliš samozrejmé, no aj tak sa ich jedinečnosť javí ako dostatočná. Patria tu rôzne variácie šírky prstov a dlane. Šírku je možné merať na viacerých miestach pozdĺž jednotlivých častí ruky. Ďalším oblúbeným znakom je dĺžka prstov a medzi menej používané patria napríklad obvod každého z prstov alebo veľkosť ich povrchu. Všetky tieto charakteristiky a metódy ich výberu sa osvedčili pri aplikáciách rozpoznávania osôb [16, 18, 19, 21]. Jednotlivé črty sú teda vyberané na základe ich vlastností a efektivity, ktoré boli testované pri použití s inými kamerami vhodnými pre záznam geometrie rúk.

Všetky spomenuté údaje opisujúce kontúry ruky majú formu reálneho čísla. Spracovaním obrazových dát na vektor význačných charakteristík značne klesne objem dát, ktorý je potrebné uložiť do databázy. Geometria ruky teda patrí medzi formy identifikácie, ktoré je možné takto zefektívniť a minimalizovať na problém hľadania najbližšieho podobného vektoru. V prípade vektorov s rovnakou dimenziou sa tento problém dá riešiť pomocou Euklidovskej, Mahalanobisovej alebo Hammingovej vzdialenosti, prípadne iných. Dôraz pri výbere črt musí byť na unikátne črty. To znamená, že výsledné vektory charakteristík dvoch rozličných osôb by mali mať čo najväčšiu vzájomnú vzdialenosť. Je nutné povedať, že charakteristiky, ktoré spĺňajú tieto vlastnosti pre jednu databázu, nemusia fungovať pre databázu s údajmi od iných osôb. Prípadne nebude možné plne zaručiť zistenú presnosť klasifikácie pre databázu obsahujúcu oveľa viac osôb. To aj za predpokladu, že predošlé zistenia vykazujú dobrú presnosť rozpoznávania pre dané dáta.

6.1.1 Využitie charakteristiky

Výsledné charakteristiky je možné vidieť na názornej vizualizácii, Obrázok 6.1. Proporciiu ruky opisujú dĺžky jednotlivých prstov. Ďalej ich šírky, konkrétne hodnoty šírky v jednej a dvoch tretinách dĺžky každého prsta, vynímajúc palec. Šírka palca je meraná iba raz a to

v jeho polovici. Následne sú zistené vzdialenosti medzi bodmi, ktoré sa nachádzajú v strede začiatku každého prsta a konca dlane. Tie sú ešte doplnené o šírku dlane v jej hornej časti. Celkovo je určených 21 hodnôt popisujúcich geometriu tejto končatiny.

Charakteristiky dostupné cez rozhranie Leap Motion Aplikačné rozhranie ovládača vytvára prístup k charakteristikám ako sú dĺžky prstov a jednotlivých ich článkov. Ďalej aj k ich šírke a potom šírke dlane, respektíve šírke zápästia. Tieto údaje sú súčasťou modelu ruky, no aj dokumentácia uvádza, že sa jedná iba o odhadované hodnoty. Jednoduchý prístup umožňuje zahrnúť tieto charakteristiky do procesu rozpoznávania a skúmať ich dopad na celkovú presnosť systému.



Obr. 6.1: Vizualizácia charakteristík, ktoré sú extrahované z dát zaznamenaných ovládačom Leap Motion – farebne sú znázornené jednotlivé charakteristiky: oranžovou farbou dĺžky prstov, svetlomodrou farbou šírky prstov, fialovou šírka dlane, odtieňmi ružovej vzdialenosti medzi stredmi začiatkov prstov

6.2 Implementácia a použité metódy

Aplikačné rozhranie ovládača Leap Motion podporuje širokú škálu rôznych programovacích jazykov. Implementačným jazykom tejto práce je jazyk *C++*, v konkrétnej verzii jeho štandardu z roku 2014. Doplnený populárnou knižnicou pre spracovanie obrazu *OpenCV*¹. V prípade záznamu dát do súborovej databázy dopĺňa štandardné nástroje jazyka použitá knižnica *boost::filesystem*², ktorá umožňuje jednoduchú organizáciu dát do priečinkov. Zároveň je však použitá aj pri spätnom čítaní dát.

Základom môjho riešenia je prototyp aplikácie *HandBiometrics*³ poskytnutý vedúcim tejto práce Ing. Pavlom Najmanom. Táto aplikácia bola modifikovaná pre potreby záznamu dát a vytvorenie dátového súboru, tak aby boli naplnené požiadavky spojené s ďalšou implementáciou. Implementácia extrakcie charakteristík dopĺňa poskytnutý projekt, a zároveň využíva jeho metódy nájdenia kontúr ruky a ďalšie pomocné funkcie. Súčasťou pôvodného prototypu boli aj niektoré využité charakteristiky.

Pomocou modifikovanej aplikácie je vytvorená štruktúra súborov s dátami, ktoré sú následne spracované. Implementovaný program extrakcie údajov popisujúcich geometriu ruky teda pracuje už iba so spomínanou databázou. Objekty, ktoré zapuzdrujú definované cha-

¹OpenCV – <https://opencv.org/>

²boost::filesystem – https://www.boost.org/doc/libs/1_67_0/libs/filesystem/doc/index.htm

³HandBiometrics – https://git.fit.vutbr.cz/inajman/Hand_Biometrics

rakteristiky sú však natolko štruktúrované, že navrhnuté riešenie je možné použiť priamo s dátami zo zariadenia. Čiže generovať vektory charakteristík na základe aktuálnych rámcov. Už uložené informácie sú rekonštruované do pôvodnej podoby pomocou procesu deserializácie. Obrazové dáta sú spracované v súčinnosti s údajmi o polohe ruky z Leap Motion rámcov.

Použité metódy určia miesta v obraze, ktoré predstavujú významné body na ruke. Je určená aj orientácia ruky, dlane a prstov čo vedie k vymedzeniu ďalších orientačných bodov. Polohy význačných bodov, získané z obrázkov, sú následne transformované na odpovedajúci bod v snímanom priestore. Výsledné súradnice zahrňujú aj údaje o výške, ktorý umožňuje jednoduchú extrakciu vzdialeností z takýchto trojdimenzionálnych súradníc. Spôsob merania napomáha získaniu presných údajov o ruke, bez nutnosti tieto dáta ďalej normalizovať, keďže body by mali odpovedať bodom na povrchu kože ruky. Použitý prístup naplno využíva benefity presnej detekcie polohy ruky samotným ovládačom.

Výstupom extrakcie charakteristík je teda súbor vektorov, kde každý vektor predstavuje rámec zo spracovaného datasetu. Vytvorená podpora ponúka následné možnosti uloženia týchto informácií do formátov, ktoré sú vhodné pre ďalšie spracovanie a klasifikáciu. Hlavička súboru s ukázkou vektora hodnôt je súčasťou Prílohy [A](#).

Kapitola 7

Vyhodnotenie extrahovaných charakteristík

Táto kapitola hodnotí prípadné praktické využitie vyššie uvedených charakteristík geometrie ruky. Využitie metódy postupne prezentujú presnosť rozpoznávania osôb s využitím rôznych algoritmov rozpoznávania. Takéto výsledky ovplyvnia ďalšiu využiteľnosť skúmaných biometrických údajov v praxi a teda v koncových aplikáciách.

7.1 Klasifikácia charakteristík

Princíp rozpoznávania osôb je vo všeobecnosti založený na porovnaní aktuálne zaznamenaných biometrických informácií s už spracovanými vzormi. Jednotlivé stratégie a algoritmy riešia tento problém rôzne, niektoré porovnávajú údaje voči všetkým vzorom a volia najpodobnejšiu zhodu ako identitu osoby. Iné optimalizujú porovnanie a vytvárajú model osoby z dát, ktorými disponujú. Rôzne algoritmy majú teda odlišnú náročnosť, ale aj presnosť vzhľadom na dostupné charakteristiky.

Všetky výsledky sú založené na práci s nástrojom *WEKA*¹. Nástroj ponúka užívateľské rozhranie, ktoré zastrešuje mnohé algoritmy klasifikácie a umožňuje ich testovať na danej vzorke dát. Pri procese klasifikácie tento software vygeneruje model na základe vybraného algoritmu a následne ponúka niekoľko stratégií na testovanie presnosti modelu. Výsledky a zistenia uvedené nižšie sú testované pomocou krížovej validácie, pri rozdelení vstupných dát na 10 rovnako veľkých podmnožín. Čo znamená, že deväť podmnožín slúži k vytvoreniu modelu a desiatu podmnožina na testovanie. Proces sa opakuje tak aby každá podmnožina bola práve raz testovacou množinou. Výsledky, ako si algoritmus poradil v klasifikácii dát, sú priemerom výsledkov všetkých opakovaní. Tento prístup zaručuje, že presnosť rozpoznávania bola overená pre každý vstupný vektor charakteristík.

7.2 Opis klasifikačných experimentov

Nad zvolenými charakteristikami je uskutočnených niekoľko porovnaní s cieľom zistiť aké vlastnosti majú vybrané charakteristiky ruky. Spracované dátové súbory sú rozdelené, podľa hodnôt popisujúcich proporciu ruky, na tie získané spracovaním dát z ovládača a zvlášť na údaje už dostupné cez aplikačné rozhranie. Zároveň je vytvorený referenčný súbor vektorov obsahujúci zjednotenie týchto informácií.

¹WEKA – Waikato Environment for Knowledge Analysis

Zaznamenané vzory jednotlivých osôb obsahujú obe ruky a tieto dáta je možné aj ďalej separovať. Ďalším pokusom je preto možnosť, vyhodnotiť presnosť charakteristík pre ľavú a pravú ruku zvlášť. V tomto prípade je vhodné porovnať, ktorá ruka vykazuje lepšiu presnosť. Dôležité je aj zistenie aký dopad na rozpoznávanie jednotlivých užívateľov bude mať určovanie nielen ich identity, ale aj konkrétnej ruky. Rozhodnutie mať dve odlišné triedy pre ľavú a pravú ruku osoby môže byť v prípade rúk kontraproduktívne, keďže sú obe veľmi podobné. Symetrické dáta nemusia byť problém pre vybrané algoritmy klasifikácie. Spojením týchto tried dostávame dvojnásobný počet dát od jednej osoby, čo vo výsledku môže viesť k vytvoreniu presnejších modelov identifikácie.

Dôležitým porovnaním v oblasti biometrie je presnosť samotných algoritmov, ktoré je možné využiť na rozlišovanie medzi osobami. Použité metódy, vrátane extrahovania údajov, majú vplyv na konečnú aplikáciu, limitujú použitie takéhoto systému v praxi, napríklad potrebným výpočtovým výkonom. Výpočtový čas modelu je preto zahrnutý vo výsledkoch spolu so štatistickými informáciami pre jednotlivé algoritmy a vstupné dáta. Z algoritmov sú použité, algoritmus nájdenia najbližších susedov (k -NN klasifikátor), ako zástupca jednoduchého spôsobu využívajúceho Euklidovskú vzdialenosť medzi vektormi charakteristík. Do porovnania sú ďalej zahrnuté metódy *Support vector machines (SVM)*, *Perceptron* a *Random forest*. Posledná menovaná metóda vykazuje dobré výsledky v predošlých pokusoch podobnej aplikácie zariadenia Leap Motion [4], navyše je vhodná práve pre menšie súbory dát. Všetky metódy sú použité v rámci nástroja WEKA, konkrétne už ponúkané implementované verzie týchto algoritmov.

7.3 Výsledky rozpoznávania

Zozbierané a spracované dáta priniesli dobré výsledky na danej menšej skupine ľudí z opísaného dátového súboru. Merania ukazujú, že použité charakteristiky dokážu rozlíšiť jednotlivé osoby. Pri použití algoritmu SVM je len 5 vzoriek identifikovaných nesprávne, to predstavuje menej ako 0,01 % z celkového počtu vzoriek. V Tabuľke 7.1 sú uvedené jednotlivé presnosti klasifikácie vzoriek. Metrika, ktorá vyjadruje kvalitu rozpoznávania, je percentuálna úspešnosť správne klasifikovaných vzoriek pri validácii každého z algoritmov. Hodnota bližšia 100 % predstavuje lepší výsledok použitého algoritmu. Parameter metódy k -NN je $k = 3$. Počas testovania bolo vyskúšaných niekoľko hodnôt a vybraná hodnota vykazuje priemernú presnosť spomedzi všetkých ostatných. Čas potrebný pre vytvorenie modelu algoritmu SVM je 4,95 sekundy. Pre podobne presnú metódu Random forest je tento čas 5-krát menší, iba 0,91 sekundy, pričom chybné klasifikovaných je 14 vzoriek.

Zozbierané dáta z aplikačného rozhrania Leap Motion vo výsledku vykázali úplnú koreláciu medzi jednotlivými charakteristikami geometrie ruky. Z tohto dôvodu sú tieto charakteristiky redukované na iba na jednu z nich, ktorou je práve šírka dlane. Čo je možné vidieť aj na histogramoch v Prílohe B.

Tabuľka 7.2 ukazuje ako presné sú vybrané klasifikátory v prípade, že užívateľ použije iba jednu z rúk. Výsledky metódy Random forest však ukazujú, že pri zvolení správneho klasifikátora na výbere ruky nezáleží. Tento algoritmus vykazuje celkovo veľmi pozitívne výsledky naprieč všetkými testovacími scenármi.

Model	Počet správne klasifikovaných vzoriek (%)			
	3-NN	SVM	Perceptron	Random forest
Charakteristiky získané z obrazových dát	99,3922	99,9020	72,4510	99,7255
Charakteristiky z Leap Motion SDK	88,4118	58,3529	7,2549	92,5098
Kombinácia oboch uvedených	99,7647	99,9608	78,7255	99,8627

Tabuľka 7.1: Dosiahnuté presnosti extrahovaných charakteristík vzhľadom na použité algoritmy

Model	Počet správne klasifikovaných vzoriek (%)			
	3-NN	SVM	Perceptron	Random forest
Vzorky iba z ľavej ruky	100	100	91,4118	99,8039
Vzorky iba z pravej ruky	99,4510	99,8431	88,5490	99,8039
Vzorky z oboch rúk	99,3922	99,9020	72,4510	99,7255
Vzorky z oboch rúk, separátne triedy pre každú ruku	98,7451	99,8627	73,4706	99,6078

Tabuľka 7.2: Dosiahnuté presnosti charakteristík ľavej a pravej ruky vzhľadom na použité algoritmy, použité sú charakteristiky získané iba z obrazových dát

7.4 Dosahovaná presnosť rozpoznávania

Proces vyhodnotenia biometrických charakteristík je zložitý problém a výsledky sú priamo závislé na veľkosti dát, ktoré sú pre ich získanie použité. Presnosť identifikácie sa potom odvíja od pomeru odmietnutých užívateľov voči tým, ktorí boli identifikovaní ako niekto iný, a bol im udelený prístup do systému s touto identitou. Výsledky na vzorke sedemnástich osôb sú priaznivé, no dobrá presnosť na malej vzorke ľudí nemusí nutne znamenať to isté na inej väčšej skupine. Limitom biometrie je jedinečnosť vybraných hodnôt jednotlivca, z čoho vyplýva, že viac vzoriek môže poukázať na podobnosti medzi osobami. Dôsledkom čoho dôjde k väčšiemu prekrytiu klasifikovaných tried a nepresnostiam v identifikácii.

Výsledky z predošlej podkapitoly ukazujú, že použitie systému na autentizáciu pomocou Leap Motion je možné. Využitie zariadenia by v budúcnosti mohlo zahŕňať napríklad prístup k užívateľskému profilu alebo inteligentné užívateľské rozhranie, ktoré by takéto rozpoznávanie vedelo využiť. Mohlo by ísť aj o identifikáciu na pozadí, spojenú napríklad s kalibráciou celého systému. Prípadne iná akákoľvek aplikácia s rádovo desiatkami užívateľov by bola možná.

Presnosť nie je jediný aspekt bezpečného riešenia. Zariadenie Leap Motion je schopné rozoznať aj atrapy objektov podobných rukám. Táto vlastnosť bola nakoniec aj využitá pri testovaní presnosti senzora. Je však mimo rozsah tejto práce zisťovať, ako veľmi sú charakteristiky proporcie ruky náchylné na takéto zneužitie.

Kapitola 8

Záver

Pomocou zariadenia Leap Motion bolo overené, že obrazové dáta poskytnuté týmto senzom tvoria perspektívny základ pre identifikáciu osôb. Dosahovaná presnosť bola 99,7255 % pri použití metódy Random forest, ktorá vykazovala dobré výsledky vo všetkých vykonaných pokusoch, pri zachovaní priaznivej časovej náročnosti na generovanie modelu klasifikátora.

Iné práce, najmä tie z obdobia keď sa Leap Motion ešte len dostával na trh dosahovali výrazne menšiu presnosť na podobne veľkej vzorke ľudí. No experimenty v práci [4] už naznačili, že pokrok danej technológie je enormný, ich presnosť bola 99,9667 % pre statickú identifikáciu. Momentálne aplikačné rozhranie ponúka prostriedky a dostatočnú presnosť na to, aby zariadenie bolo použité na autentizáciu osôb, napríklad v aplikáciách s menším počtom ľudí. Je nutné však spracovať dáta zo senzorov zariadenia a nespoliehať sa na hodnoty popisujúce proporciu vnútorného modelu ruky aplikačného rozhrania.

Nadväzujúce práce by mohli využiť zistené výsledky a využiť ich pri tvorbe konečnej aplikácie, ktorá by bola dostupná cez obchod s aplikáciami určenými pre ovládač Leap Motion – *Airspace*. Aplikácia by mohla rozširovať možnosti prístupu do operačného systému alebo slúžiť ako identifikačný nástroj pre online aplikácie akou je napríklad *AltSpaceVR*. Prípadne môže zariadenie dopĺňať iné biometrické senzory a tak zvýšiť presnosť identifikácie.

Iné riešenia by mohli viac preskúmať autentifikáciu, ktorá by prebiehala vo väčšom vymedzenom priestore, než je ten využitý pre záznam dát tejto práce. Respektíve identifikáciu v pohybe, no stále s využitím iba prostej geometrie rúk. To všetko za predpokladu ďalšieho skúmania presnosti rozpoznávania. Iný spôsob využitia, ktorý sa v tejto práci už okrajovo spomínal a bol by zároveň veľmi zaujímavý. V nadväznosti na ďalší typ biometrie ruky, by za pokus stálo využiť dáta z kamier zariadenia na podkožnú detekciu štruktúry žíl. Presnosť dostupných dát je však otázna, tieto charakteristiky však môžu účelne doplniť geometriu ruky a zároveň výrazne zvýšiť presnosť identifikácie.

Literatúra

- [1] Controller, Leap Motion SDK and Plugin Documentation. [Online; navštívené 15.04.2018].
URL <https://developer.leapmotion.com/documentation/cpp/api/Leap.Controller.html>
- [2] Coordinate Systems. [Online; navštívené 05.05.2018].
URL <https://developer.leapmotion.com/documentation/cpp/devguide/Leap.Coordinate.Mapping.html>
- [3] Leap Motion / Blog. 2017, [Online; navštívené 04.04.2018].
URL <http://blog.leapmotion.com/>
- [4] Chan, A.; Halevi, T.; Memon, N.: Leap motion controller for authentication via hand geometry and gestures. ročník 9190, 2015: s. 13–22,
doi:10.1007/978-3-319-20376-8_2.
- [5] Cline, M.: C++ FAQ: "What's this "serialization" thing all about?". Červen 2015, [Online; navštívené 06.05.2018].
URL <https://web.archive.org/web/20150405013606/http://isocpp.org/wiki/faq/serialization>
- [6] Colgan, A.: How Does the Leap Motion Controller Work? 2014, [Online; navštívené 25.03.2018].
URL <http://blog.leapmotion.com/hardware-to-software-how-does-the-leap-motion-controller-work/>
- [7] Colgan, A.: The Alignment Problem: How to Position Cameras for Augmented Reality. Červen 2015, [Online; navštívené 02.04.2018].
URL <http://blog.leapmotion.com/alignment-problem-position-cameras-augmented-reality/>
- [8] Dražanský, M.; Orság, F.; Doležel, M.: *Biometrie*. Brno: M. Dražanský], první vydání, 2011, ISBN 978-80-254-8979-6.
- [9] DUO3D: DUO MLX. [Online; navštívené 04.30.2018].
URL <https://duo3d.com/product/duo-minilx-lv1>
- [10] Fournier, R.; Nait-Ali, A.: Introduction to Biometrics. In *Signal and Image Processing for Biometrics*, Digital Signal and Image Processing Series, Wiley-ISTE, 2012, ISBN 9781848213852, s. 1–13.

- [11] Fournier, R.; Nait-Ali, A.: Introduction to Hand Biometrics. In *Signal and Image Processing for Biometrics*, Digital Signal and Image Processing Series, Wiley-ISTE, 2012, ISBN 9781848213852, s. 149–166.
- [12] Guna, J.; Jakus, G.; Pogačnik, M.; aj.: An Analysis of the Precision and Reliability of the Leap Motion Sensor and Its Suitability for Static and Dynamic Tracking. *Sensors*, ročník 14, č. 2, 2014: s. 3702–3720, ISSN 1424-8220, doi:10.3390/s140203702. URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/2/3702>
- [13] He, J.: Image API Now Available for v2 Tracking Beta. 2014, [Online; navštívené 13.04.2018]. URL <http://blog.leapmotion.com/image-api-now-available-v2-tracking-beta/>
- [14] Horowitz, K.: Skeletal Tracking 101: Getting Started with the Bone API and Rigged Hands. 2014, [Online; navštívené 03.04.2018]. URL <http://blog.leapmotion.com/skeletal-tracking-101-getting-started-with-the-bone-api-and-rigged-hands/>
- [15] Jain, A. K.; Ross, A.; Prabhakar, S.: An introduction to biometric recognition. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, ročník 14, č. 1, 2004: s. 4–20, ISSN 1051-8215, doi:10.1109/TCSVT.2003.818349.
- [16] Kanhangad, V.; Kumar, A.; Zhang, D.: A Unified Framework for Contactless Hand Verification. *Information Forensics and Security, IEEE Transactions on*, ročník 6, č. 3, 2011: s. 1014–1027, ISSN 1556-6013, doi:10.1109/TIFS.2011.2121062.
- [17] Lenvica: HandPunch 3000 – Hand Punch Device. [Online; navštívené 04.30.2018]. URL <http://www.lenvica.com/product/hand-punch-3000-hand-punch-device/>
- [18] Michael, G. K. O.; Connie, T.; Hoe, L. S.; aj.: Locating geometrical descriptors for hand biometrics in a contactless environment. In *2010 International Symposium on Information Technology*, ročník 1, June 2010, ISSN 2155-8973, s. 1–6, doi:10.1109/ITSIM.2010.5561318.
- [19] Michael, G. K. O.; Connie, T.; Teoh, A. B. J.: A contactless biometric system using multiple hand features. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, ročník 23, č. 7, 2012: s. 1068–1084, ISSN 1047-3203, doi:10.1016/j.jvcir.2012.07.004.
- [20] de Santos-Sierra, A.; Sánchez-Ávila, C.; Pozo, G. B. D.; aj.: Unconstrained and Contactless Hand Geometry Biometrics. *Sensors*, ročník 11, č. 11, 2011: s. 10143–10164, ISSN 1424-8220, doi:10.3390/s111110143.
- [21] Svoboda, J.; Bronstein, M. M.; Draňanský, M.: Contactless biometric hand geometry recognition using a low-cost 3D camera. In *2015 International Conference on Biometrics (ICB)*, May 2015, ISSN 2376-4201, s. 452–457, doi:10.1109/ICB.2015.7139109.
- [22] Vision-Box: Automatic Border Control (ABC) eGate. [Online; navštívené 04.30.2018]. URL <https://www.vision-box.com/>

- [23] Weichert, F.; Bachmann, D.; Rudak, B.; aj.: Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller. *Sensors*, ročník 13, č. 5, 2013: s. 6380–6393, ISSN 1424-8220, doi:10.3390/s130506380.
URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/5/6380>

Príloha A

Extrahované charakteristiky

Súbor obsahujúci extrahované charakteristiky:

- hlavička súboru
- príklad dátového vektora

```
@RELATION "hand_geometry"
@ATTRIBUTE ThumbLen NUMERIC
@ATTRIBUTE ThumbW NUMERIC
@ATTRIBUTE IndexLen NUMERIC
@ATTRIBUTE IndexUpperW NUMERIC
@ATTRIBUTE IndexLowerW NUMERIC
@ATTRIBUTE MiddleLen NUMERIC
@ATTRIBUTE MiddleUpperW NUMERIC
@ATTRIBUTE MiddleLowerW NUMERIC
@ATTRIBUTE RingLen NUMERIC
@ATTRIBUTE RingUpperW NUMERIC
@ATTRIBUTE RingLowerW NUMERIC
@ATTRIBUTE PinkyLen NUMERIC
@ATTRIBUTE PinkyUpperW NUMERIC
@ATTRIBUTE PinkyLowerW NUMERIC
@ATTRIBUTE ThumbIndexMids NUMERIC
@ATTRIBUTE ThumbMiddleMids NUMERIC
@ATTRIBUTE ThumbPinkyMids NUMERIC
@ATTRIBUTE IndexRingMids NUMERIC
@ATTRIBUTE MiddleRingMids NUMERIC
@ATTRIBUTE MiddlePinkyMids NUMERIC
@ATTRIBUTE PalmUpperW NUMERIC
@ATTRIBUTE class {IKEEFB5Q,PUVOKLSK,741C2UOS,LTMOCYKH,LOVT2WEB,K7HJEAX3,
  UTOP21L0,7B93ALY1,7TE97D9A,G132P1KG,PHPH30Q7,MAG1K3QL,CD51NKTQ,N4NZOYHZ,
  SEOGA953,5M2YAK8Q,QOU8GI8G}

@DATA
52.5359,27.4937,69.7541,15.8197,19.5127,77.5728,16.5787,19.8371,74.1133,
  16.1798,21.5234,57.8786,17.4844,19.3314,60.3044,76.716,100.847,43.0993,
  21.9075,50.2548,88.799,IKEEFB5Q
```

Príloha B

Histogramy dát charakteristík z Leap Motion API



Obr. B.1: Histogramy poukazujúce na úplnú koreláciu dát získaných z aplikačného rozhrania zariadenia Leap Motion, vizualizácia pomocou nástroja WEKA