

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

BIOMETRICKÉ TESTOVÁNÍ ŽIVOSTI – MECHANICKÉ VLASTNOSTI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KATEŘINA ZAKLOVÁ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

BIOMETRICKÉ TESTOVÁNÍ ŽIVOSTI – MECHANICKÉ VLASTNOSTI

BIOMETRICAL LIVENESS DETECTION – MECHANICAL CHARACTERISTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

KATEŘINA ZAKLOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MARTIN DRAHANSKÝ, Ph.D.

BRNO 2014

Abstrakt

Práce je zaměřena na mechanické metody testování živosti u otisků prstů. Teoretická část popisuje biometrické systémy, měření jejich spolehlivosti, druhy senzorů a některé z metod pro určování živosti. Pro tuto práci byly podrobněji nastudovány dvě metody – určování živosti podle pachu a určování živosti podle tělesné teploty. Práce se rovněž zabývá implementací aplikace na určování živosti podle teploty a popisem a vyhodnocením provedených experimentů.

Abstract

Main focus of this thesis is the detection of liveliness of the finger by the means of mechanical methods. Theoretical part of the thesis describes biometric systems, their reliability metrics, various kinds of sensors and methods of liveness detection. Two methods are covered in detail – liveness detection by odor and liveness detection by temperature. The thesis also illustrates implementation of the application for liveness detection by temperature and evaluates range of experiments carried out during the research.

Klíčová slova

biometrie, biometrický systém, senzor, otisky prstů, testování živosti, elektronický nos, pach, termokamera, teplota

Keywords

biometrics, biometric system, sensor, fingerprint, liveness detection, e-nose, electronic nose, odor analysis, thermocam, temperature

Citace

Kateřina Zaklová: Biometrické testování živosti – mechanické vlastnosti, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2014

Biometrické testování živosti – mechanické vlastnosti

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením pana doc. Ing., Dipl.-Ing. Martina Drahanského, Ph.D. a uvedla jsem všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

.....

Kateřina Zaklová

19. května 2014

Poděkování

Zde bych chtěla poděkovat svému vedoucímu panu doc. Drahanskému za odborné vedení a cenné rady při tvorbě této práce. Také bych chtěla poděkovat řadě dobrovolníků, kteří se účastnili experimentů.

© Kateřina Zaklová, 2014.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod	3
2	Biometrie	4
2.1	Historie	4
2.2	Identita, identifikace a verifikace	5
2.2.1	Identita	5
2.2.2	Identifikace	5
2.2.3	Verifikace	6
2.3	Biometrický systém	6
3	Hodnocení spolehlivosti biometrických systémů	9
3.1	FAR – Míra chybného přijetí	10
3.2	FRR – Míra chybného odmítnutí	10
3.3	FMR – Míra chybné shody	10
3.4	FNMR – Míra chybné neshody	10
3.5	ROC křivka	11
3.6	DET křivka	12
4	Otisky prstů	13
4.1	Charakteristiky otisku prstu	13
4.2	Zpracování otisků prstů	17
4.3	Typy senzorů	18
4.3.1	Optická technologie	18
4.3.2	Kapacitní technologie	18
4.3.3	Ultrazvuková technologie	19
4.3.4	Elektrooptická technologie	19
4.3.5	Tlaková technologie	19
4.3.6	Termická technologie	19
4.4	Metody detekce živosti	19
4.4.1	Teplota	20
4.4.2	Elektrické vlastnosti kůže	20
4.4.3	Bioimpedance	20
4.4.4	Tělesný pach	20
5	Určování živosti podle tělesného pachu	21
5.1	Elektronický nos	21
5.1.1	Cyranose® 320	21
5.1.2	7100 zNose	21

5.1.3	4600 zNose	22
5.1.4	Další možnosti	22
5.2	Návrh zařízení	23
5.3	Vyhodnocení poznatků	24
6	Určování živosti podle tělesné teploty	25
6.1	Pyrosenzor	25
6.2	Termokamera	26
6.2.1	FLIR Thermacam E300	26
6.3	Měření	26
6.4	Určování živosti	27
6.4.1	Body pro měření teplotních rozdílů.	28
6.4.2	Průměrná teplota	28
6.4.3	Maxima a minima	29
6.5	Implementace	29
6.5.1	Použité algoritmy	29
6.5.2	Zpracování vstupu	31
6.5.3	Detekce prstu	31
6.5.4	Body pro měření teploty	31
6.5.5	Průměrná teplota	32
6.5.6	Minima a maxima	32
6.5.7	Vyhodnocení vzorku	32
6.6	Shrnutí experimentů	32
7	Závěr	34
A	Obsah CD	37
B	Výsledky experimentů	38
B.1	Živé prsty	38
B.2	Neživé prsty	40
B.3	Předměty imitující prsty	41

Kapitola 1

Úvod

Využití biometrie se v dnešní době stále více rozšiřuje. Ať už se jedná o čtečky otisků prstů, rozpoznání obličeje kamerou na počítačích a chytrých mobilních telefonech, přístupy do různých institucí nebo doklady totožnosti s biometrickými údaji.

Všechny zmiňované způsoby identifikace spadají do situací, kde je vyžadována určitá míra bezpečnosti. My lidé identifikujeme ostatní osoby podle vzhledu, hlasu, chování, písma, jména nebo dokladů totožnosti. Pokud tuto identifikaci mají provádět počítače, pak je třeba sledovat znaky jako zmíněné otisky prstů, rysy obličeje, obraz duhovky nebo sítnice oka, hlas aj. Již řadu let existuje rozpoznávání na základě čipových karet, PIN kódů a přístupových hesel, avšak naše biometrické údaje se dají mnohem hůře zfalšovat a narozdíl od karet a hesel je téměř nemožné je ztratit.

Tato práce se zaměřuje především na otisky prstů a detekci živosti. Kapitola 2 se zabývá biometrií jako takovou a její historií a popisuje vlastnosti biometrických systémů. V kapitole 3 jsou shrnuty poznatky ohledně metod určování spolehlivosti biometrických systémů a následující kapitola 4 se věnuje samotným otiskům prstů, způsobu jejich zpracování, sensorům a metodám pro detekci živosti. Kapitola 5 již zkoumá samotnou metodu detekce živosti podle tělesného pachu a kapitola 6 popisuje metodu určování živosti pomocí teploty, implementaci aplikace na určování živosti a výsledky experimentů. Podrobné záznamy o experimentech jsou pak přiloženy v příloze. Kapitola 7 vyhodnocuje získané poznatky ohledně zkoumání zmíněných metod.

Kapitola 2

Biometrie

Slovo biometrie pochází z řečtiny a skládá se ze slov „bios“ (život) a „metron“ (měřítko). Biometrie v IT [17] je automatické rozpoznávání lidských jedinců na základě anatomických a behaviorálních rysů. Mezi anatomické rysy řadíme otisk prstu, snímek duhovky, sítnice, termogram obličeje, rysy obličeje, geometrii ruky aj. Mezi behaviorální rysy patří například způsob chůze, podpis (dynamické vlastnosti), gestikulace obličeje nebo hlas.

Biometrie má řadu kladů i záporů, mezi klady řadíme například vyšší bezpečnost a pohodlí, méně pokusů o popření identity, biometrické vlastnosti téměř nelze ztratit, přenést nebo zapomenout, a rovněž odrazuje potenciální uživatele od podvodů. Mezi zápory patří ztráta soukromí, nutná detekce živosti, výstupem je pouze nejednoznačné skóre porovnání, biometrické znaky nelze anulovat v případě prozrazení, biometrický systém je napadnutelný.

2.1 Historie

Používání biometrických vlastností je známo již z dob dávných. Téměř denně rozpoznáváme osoby kolem nás podle jejich vzhledu a chování. Všechny tyto informace můžeme zaznamenat a zpracovat.

Nejstarší záznamy o užití biometrie se dochovaly z Číny ze 14. století našeho letopočtu, jedná se však pouze o kresby na skalních stěnách nebo otisky prstů na keramice, tudíž se nedají považovat za průkazný materiál. Během 19. století n.l. se rozšířila identifikace pomocí biometrických znaků. W. J. Herschel začal v roce 1858 používat otisky prstů jako stvrzení od indických dělníků při přebírání výplat [7]. Později sbíral otisky prstů pro vlastní výzkum. Dalším průkopníkem v oblasti biometrických vlastností byl F. Galton, nejdříve se zabýval dědičností vlastností od rodičů, později přišel s vědním oborem zabývajícím se měřením částí lidského těla a nakonec zavedl daktyloskopii a prosadil ji do policejní praxe [28]. V roce 1924 došlo k založení oddělení pro identifikaci otisků prstů u FBI. V roce 1965 byl poprvé použit daktyloskopický systém AFIS (*Automated Fingerprint Identification System*). V USA se nyní používá IAFIS (*Integrated Automated Fingerprint Identification System*). Tento systém nyní obsahuje asi 104 milionů otisků prstů. Reakce na vyhledání otisku v databázi trvá průměrně 27 minut pro kriminální případy, pro běžné civilní případy je to 1 hodina 12 minut [10]. Mnoho dalších subjektů a států (Evropská Unie, Kanada, Velká Británie, Argentina, Itálie, Chile, Dánsko aj.) používá své vlastní systémy, a to nejen pro identifikaci zločinců, ale i pro kontroly dokladů, pobírání dávek, vedení databáze azylantů aj.

2.2 Identita, identifikace a verifikace

Tyto tři pojmy se objevují v biometrii velmi často, ve zkratce si je tedy vysvětlíme.

2.2.1 Identita

Každý z nás má jednoznačnou charakteristiku, tu nazýváme identita [22]. V biometrii rozlišujeme mezi fyzickou a elektronickou identitou, kde fyzická identita je definována naším vzhledem a chováním, a pro každého člověka na světě je jedinečná. Oproti tomu, elektronických identit můžeme mít hned několik, jedná se například o účty na různých elektronických portálech, identifikační karty aj.

Identita je založena na [4]:

- něčem, co víme – znalost (heslo, PIN, tajné tlačítko),
- něčem, co máme – vlastnictví (klíč, čipová karta, token),
- něčem, co jsme – biometrie (vzhled, chování).

V ohledu k přístupu do biometrického systému rozlišujeme několik druhů identity [7]:

- **Pozitivní** – uživatel tvrdí, že je v systému registrován a požaduje do něj přístup.
- **Negativní** – uživatel tvrdí, že v systému ještě registrován není a požaduje do něj přístup. Jedná se o tzv. negativní rozpoznávání.
- **Implicitní** – uživatel musí svoji identitu zadat a systém ji buď potvrdí nebo odmítne.
- **Explicitní** – systém vyhledá identitu a buď ji nalezne nebo nikoliv.
- **Identita právoplatného uživatele** – u pozitivního rozpoznávání se jedná o identitu osoby, která je zaregistrována v systému, u negativního rozpoznávání tato osoba ještě v systému registrována není.
- **Identita útočníka** – u pozitivního rozpoznávání je to osoba, která se snaží neoprávněně získat přístup – použitím identity jiné osoby. U negativního rozpoznávání se osoba snaží získat opakovaný nebo vícenásobný přístup.

2.2.2 Identifikace

Pomocí identifikace zjišťujeme identitu osoby [22]. Tato osoba zadá do systému biometrickou vlastnost, ne však identitu samotnou – tu musí rozpoznat systém. Následně dojde k porovnání vzorku se všemi vzorky uloženými v databázi, a pokud došlo ke shodě, systém nám sdělí identitu nebo seznam kandidátů. V opačném případě skončí s výsledkem nenalezené identity. Toto porovnání nazýváme 1:N nebo 1:MANY. Příkladem identifikačních systémů může být AFIS nebo databáze azylantů.

2.2.3 Verifikace

Jedná se o ověřování fyzické identity na základě poskytnuté elektronické identity [22]. Po porovnání aktuálního a referenčního vzorku systém buď povolí uživateli přístup nebo jej zamítne. Toto porovnání nazýváme 1:1. Příkladem verifikace může být přístupový systém do továrny nebo přihlášení k emailové službě.

S výše zmíněnými pojmy souvisí taktéž autentizace. Tento proces potvrzuje hodnověrnost osoby a můžeme se s ním setkat u systémů pro identifikaci i verifikaci, například přístupové nebo daktyloskopické systémy.

2.3 Biometrický systém

Biometrický systém obecně sestává ze dvou modulů [4]:

- registrační modul,
- verifikační/identifikační modul.

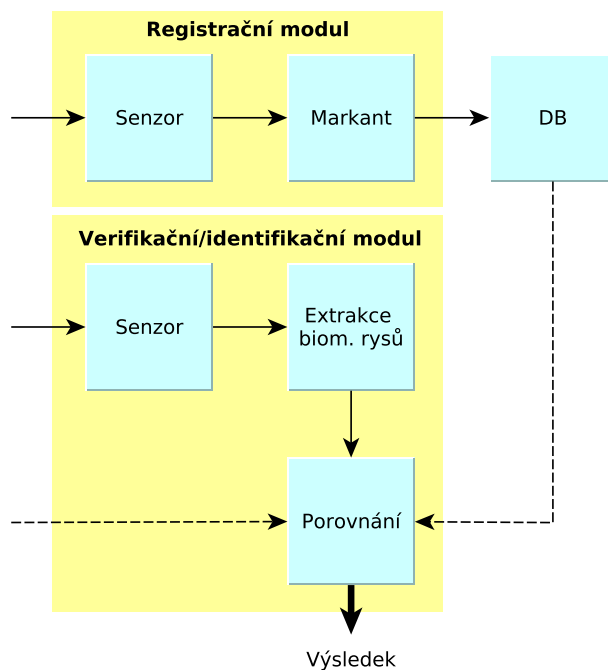
Nejdříve je nutné vložit identitu uživatele do registračního modulu, poté je možné používat verifikační/identifikační modul.

Oba moduly se skládají z několika částí – biometrický senzor, biometrický markant, porovnávací modul a databáze (viz obrázek 2.1).

- **Biometrický senzor** – zajišťuje získání vzorku a převedení do elektronické podoby, je součástí registračního i verifikačního/identifikačního modulu.
- **Biometrický markant** – extrahuje rysy z biometrického vzorku na vstupu, často rovněž vylepšuje kvalitu získaných dat, stejně jako senzor patří oběma modulům.
- **Porovnávací modul** – porovnává rysy biometrických markantů se vzorky uloženými v databázi. Na základě míry shodnosti vzorků pak obdržíme výsledek.
- **Databáze** – registrační modul do ní ukládá vzorky, verifikační/identifikační modul potom používá tato uložená data k porovnání s aktuálními vzorky na vstupu.

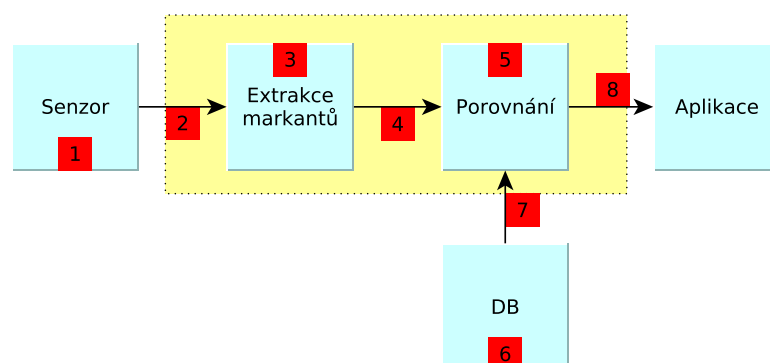
Každý biometrický systém má však i své slabiny. Tato slabá místa jsou znázorněna na obrázku 2.2.

1. **Podvržení biometrické vlastnosti** – útočník předloží senzoru padělek biometrické charakteristiky, například umělý prst.
2. **Replikace starých dat** – jedná se o opětovné zaslání již použitého vzorku, útočník zachytává signály mezi senzorem a extraktorem a následně pronikne do systému.
3. **Modifikace extrakce rysů** – funkce pro extrakci markantů může být útočníkem modifikována, aby produkovala jím zvolené výsledky.
4. **Syntetický vektor rysů** – jde o modifikaci/záměnu biometrických vlastností, které byly získány z extraktoru, musíme ale znát reprezentaci těchto dat.
5. **Změna porovnání** – hodnotu prahu porovnání nastavuje útočník dle vlastní potřeby.
6. **Modifikace šablony** – vzorek uložený v databázi je nahrazen nebo pozměněn, poté dojde k úspěšnému rozpoznání.



Obrázek 2.1: Blokové schéma biometrického systému.

7. **Blokování kanálu** – útočník napadne cestu mezi porovnávacím modulem a databází a zamění nebo upraví data, která si tyto dva moduly vyměňují. V podstatě se jedná o DoS (*Denial of service*) útok.
8. **Změna výsledku** – útočník dokáže zaměnit výsledek celé operace, tím pádem systém úplně odstaví.



Obrázek 2.2: Slabá místa v biometrickém systému.

Charakteristiky, které lze rozpoznat biometrickým systémem, dělíme na anatomické a behaviorální, jak již bylo řečeno v úvodu kapitoly 2. Anatomické vlastnosti, zvané také

statické, jsou vlastnosti pevné, které nelze lehce ovlivnit. Naproti tomu vlastnosti behaviorální, jinak zvané dynamické, jsou lehce ovlivnitelné, neboť jsou spojeny s akcí uživatele.

Na základě sledování těchto vlastností dělíme biometrické systémy na unimodální a multimodální systémy [28].

Unimodální biometrický systém snímá pouze jednu biometrickou charakteristiku. Jeho nevýhodou je nižší spolehlivost, avšak náklady na jeho pořízení jsou také nižší.

Multimodální biometrický systém využívá kombinace několika biometrických vlastností (například snímání obličeje a duhovky oka) nebo více příznaků jedné vlastnosti (například dynamické a statické vlastnosti podpisu), tyto vlastnosti jsou poté zpracovány prostřednictvím algoritmů daného snímače. Takový systém je jednak více spolehlivý a odolnější proti útokům a falšování, také je však mnohem dražší.

Důležité kritérium pro nasazení biometrického systému jsou charakteristiky biometrických vlastností [6].

- **Univerzalita (U)** – každý člověk má danou biometrickou vlastnost.
- **Jedinečnost (J)** – žádní dva lidé nemají totožnou biometrickou vlastnost.
- **Konstantnost (K)** – daná biometrická vlastnost se nemění s časem.
- **Získatelnost (Z)** – biometrickou vlastnost je možné kvantitativně změřit.
- **Výkonnost (V)** – biometrická vlastnost se nemění ani nestárne (ovlivňuje výkon systému).
- **Akceptovatelnost (A)** – člověk je ochotný nechat se nasnímat.
- **Odolnost proti útokům (O)** – míra obtížnosti vytvoření falešné kopie dané biometrické vlastnosti.
- **Náklady (N)** – finanční zátěž při pořízení a údržbě biometrického systému.
- **Další aspekty** – spolehlivost (osvětlení, teplota, brýle, čepice, zranění aj.), údržba, dostupnost, použitelnost, anonymita aj.

Souhrn jednotlivých charakteristik v souvislosti s biometrickými vlastnostmi znázorňuje tabulka 2.1.

	U	J	K	Z	V	A	O	N
Obličej	vysoká	nízká	stře dní	vysoká	nízká	vysoká	nízká	nízké
Otisk prstu	střední	vysoká	vysoká	střední	vysoká	střední	vysoká	nízké
Geom. ruky	střední	střední	střední	vysoká	střední	střední	střední	střední
Žíly ruky	střední	střední	střední	střední	střední	střední	vysoká	střední
Duhovka	vysoká	vysoká	vysoká	střední	vysoká	nízká	vysoká	vysoké
Sítnice	vysoká	vysoká	střední	nízká	vysoká	nízká	vysoká	vysoké
Podpis	nízká	nízká	nízká	vysoká	nízká	vysoká	nízká	nízké
Hlas	střední	nízká	nízká	střední	nízká	vysoká	nízká	nízké
Termogram	vysoká	vysoká	nízká	vysoká	střední	vysoká	vysoká	vysoké

Tabulka 2.1: Vlastnosti biometrických charakteristik [7].

Kapitola 3

Hodnocení spolehlivosti biometrických systémů

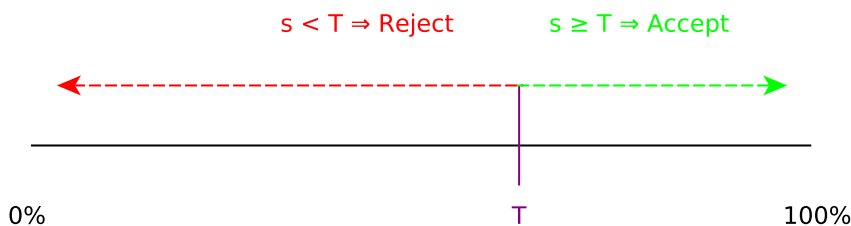
Charakteristiky biometrických vlastností jsme si již uvedli, pokud však potřebujeme spolehlivý biometrický systém, je třeba otestovat i konkrétní zařízení. Pro testování spolehlivosti bylo zavedeno několik metrik, ke kterým se dostaneme později.

V úvodu kapitoly 2 bylo řečeno, že v biometrii rozlišujeme tři typy klasifikace [22]:

- **verifikace** – ptáme se, zda množina rysů R patří k osobě O z celkového počtu osob N ,
- **identifikace** – ptáme se, která množina rysů R z celkového počtu osob N patří osobě O ,
- **rozpoznávání** – ptáme se, které třídě patří sémantický obsah rysů R .

V ideálním případě nedojde pro biometrický systém k žádné chybě, prakticky je však tento stav nemožný. Problémem je změření přesnosti.

Extrahovaný vzorek je porovnáván se šablonou v systému a jako výsledek dostaneme skóre porovnání s , což je míra shody obou vzorků. Celkový výsledek pak závisí na nastavení prahu systému, pokud skóre spadá do rozsahu pro přijetí, jedná se o shodu (viz obrázek 3.1).



Obrázek 3.1: Oblast přijetí a odmítnutí v závislosti na prahu T a skóre porovnání s [7].

Na základě porovnání můžeme dojít k následujícím výsledkům [24]:

- **Správné přijetí** – osoba A je přijata jako osoba A (angl. *true acceptance*).

- **Správné odmítnutí** – osoba A je odmítnuta jako osoba B (angl. *true rejection*).
- **Chybné přijetí** – osoba A je přijata jako osoba B (angl. *false acceptance*).
- **Chybné odmítnutí** – osoba A je odmítnuta jako osoba A (angl. *false rejection*).

Je zřejmé, že ve dvou případech se jedná o chybu – chybné přijetí a chybné odmítnutí. Pro hodnocení těchto chyb používáme následující metriky.

3.1 FAR – Míra chybného přijetí

FAR, *False Acceptance Rate*, je pravděpodobnost, že biometrický systém klasifikuje dva odlišné biometrické vzory jako shodné, a tím způsobí selhání při přijetí možného útočníka. Do celkového počtu porovnání započítáváme i pokusy, které selhaly ještě před samotným porovnáním.

Míru chybného přijetí spočítáme:

$$FAR = \frac{\text{Počet porovnání rozdílných vzorů vedoucích ke shodě}}{\text{Celkový počet porovnání rozdílných vzorů}} \quad (3.1)$$

3.2 FRR – Míra chybného odmítnutí

FRR, *False Rejection Rate*, je pravděpodobnost, že biometrický systém klasifikuje dva shodné biometrické vzory jako odlišné a tím způsobí selhání při odmítnutí oprávněného uživatele.

Míru chybného odmítnutí spočítáme:

$$FRR = \frac{\text{Počet porovnání shodných vzorů vedoucích k neshodě}}{\text{Celkový počet porovnání shodných vzorů}} \quad (3.2)$$

3.3 FMR – Míra chybné shody

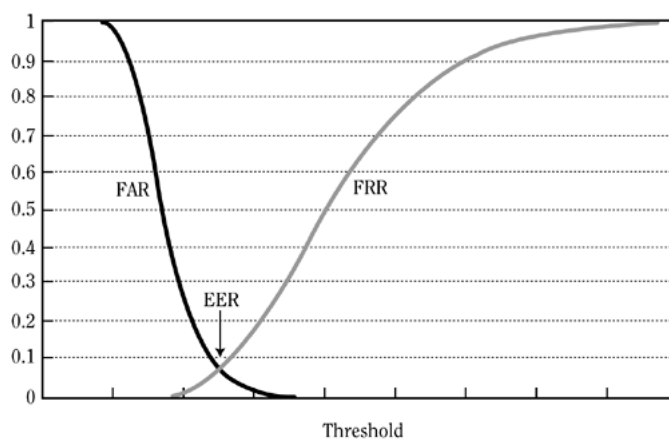
Definice FMR, *False Match Rate*, se shoduje s definicí FAR, je zde však rozdíl – do celkového počtu porovnání nezapočítáváme pokusy, které selhaly před porovnáním samotným. Vzorec pro výpočet je obdobný jako pro metriku FAR.

3.4 FNMR – Míra chybné neshody

Definice FNMR, *False Non-Match Rate*, je identická s definicí FRR, rovněž zde ale do celkového počtu porovnání nezapočítáváme pokusy, které selhaly ještě před porovnáním. FNMR vypočítáme podle obdobného vzorce jako FRR.

Všechny zmíněné míry se používají pro měření výkonnosti biometrických systémů. Závisí na nastavení porovnávacího prahu T a typicky se používají u ROC (*Receiver Operating Curve*) a DET (*Detection Error Trade-off*) křivek [24]. U ideálního systému by neexistovalo žádné chybné přijetí ani chybné odmítnutí. Takový systém však neexistuje. Proto musíme chybovost regulovat nastavením prahu. Pokud posuneme práh na vyšší hodnotu, zvýší se i FRR, tím pádem vzroste počet případů, kdy systém odmítne oprávněného uživatele.

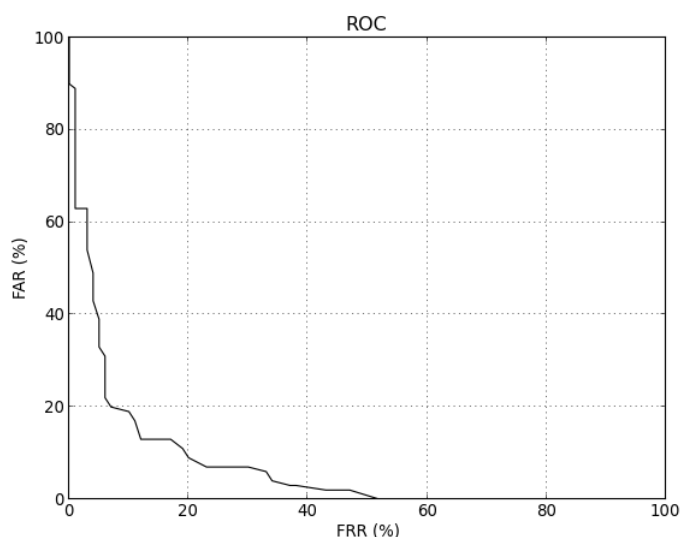
Zároveň ale klesne FAR a sníží se i počet případů, kdy systém povolí přístup nepovolaným uživatelům. Ideální hodnota prahu se nazývá **EER** (*Equal Error Rate*, míra vyrovnanosti chyb) a jedná se o bod, kde jsou FAR i FRR na stejné míře (viz obrázek 3.2).



Obrázek 3.2: Závislost metrik FAR a FRR [24].

3.5 ROC křivka

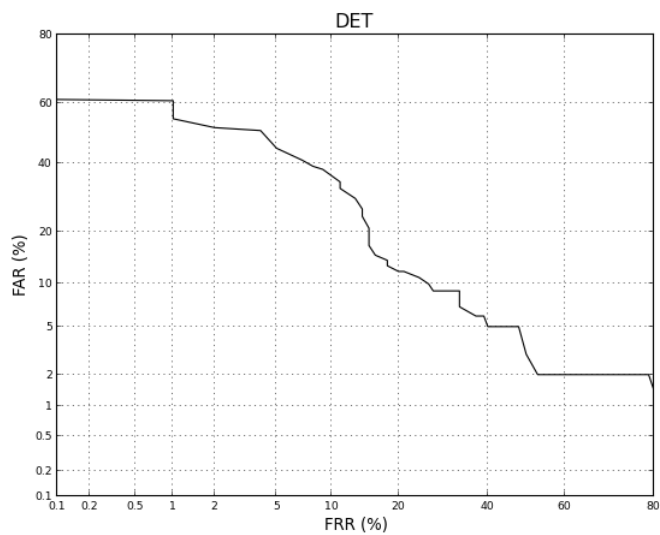
ROC, *Receiver Operating Curve*, je míra, která se nejčastěji používá pro vyjádření výkonnosti systému. Umožňuje snadné srovnání různých biometrických systémů a v současné době je standardem pro popis jejich vlastností. ROC křivky nejčastěji zobrazují FNR vůči FNMR nebo FRR vůči FAR. Křivka zároveň má závislost vynášených hodnot na prahu rozhodování.



Obrázek 3.3: ROC křivka [14].

3.6 DET křivka

DET, *Detection Error Trade-Off*, je ekvivalentem pro ROC křivku. Rovněž se používá pro vyjádření výkonnosti systému, liší se však reprezentace hodnot zanášených do grafu.



Obrázek 3.4: DET křivka [14].

Kapitola 4

Otisky prstů

Každý z nás má na povrchu prstů **papilární linie**. Jedná se o vyvýšené reliéfy kůže (vysoké 0,1 – 0,4 mm) [1], které se formují již v embryonálním vývoji. Struktura papilárních linií je pro každého člověka unikátní (i v případě dvojčat) – to umožňuje podle nich rozlišovat jednotlivé osoby mezi sebou.

Již v kapitole 2 bylo zmíněno, že první záznamy o použití otisků prstů se dochovaly z Číny ze 14. století n.l. Umělci si tímto způsobem označovali vyrobenou keramiku. J. Ch. A. Mayer v roce 1977 publikoval dílo o jedinečnosti otisků prstů u lidí. V roce 1823 J. E. Purkyně rozdělil otisky do devíti tříd [28], avšak nezmínil možnost využití otisků pro identifikaci lidí. Pro identifikaci jako takovou je začal používat až W. J. Herschel v druhé polovině 19. století n.l. Roku 1880 navrhl H. Faulds používání otisků k identifikaci osob, přičemž otisky byly získávány pomocí inkoustu. V roce 1891 zavedl J. Vucetich používání otisků pro kriminalistické účely. F. Galton se rovněž zabýval otisky prstů, vydal o nich knihu a také se zabýval pravděpodobností shody dvou otisků.

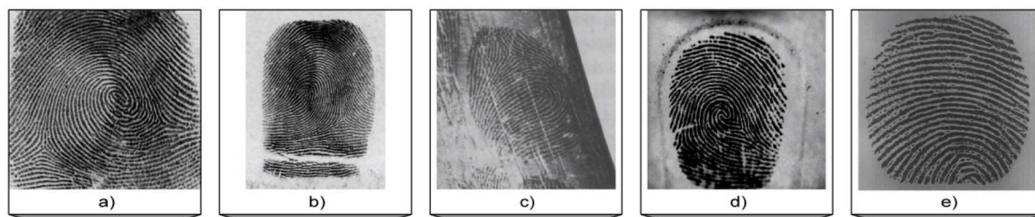
Na základě výzkumu byly v oboru daktyloskopie stanoveny tyto zákony [4]:

- Žádní dva lidé na světě nemají otisky prstů se stejnou strukturou papilárních linií.
- Struktura papilárních linií se za celý život člověka nemění.
- Papilární linie nelze pozměnit nebo odstranit, je to možné pouze za předpokladu, že porušíme epidermální vrstvu kůže.
- Veškeré změny ve struktuře linií jsou natolik malé, že spadají pod limit tolerance a nebrání klasifikaci.

4.1 Charakteristiky otisku prstu

Existují tři typy otisků prstů (viz obrázek 4.1):

- válený (barvený, rolovaný),
- píchaný (živý),
- latentní (skrytý).



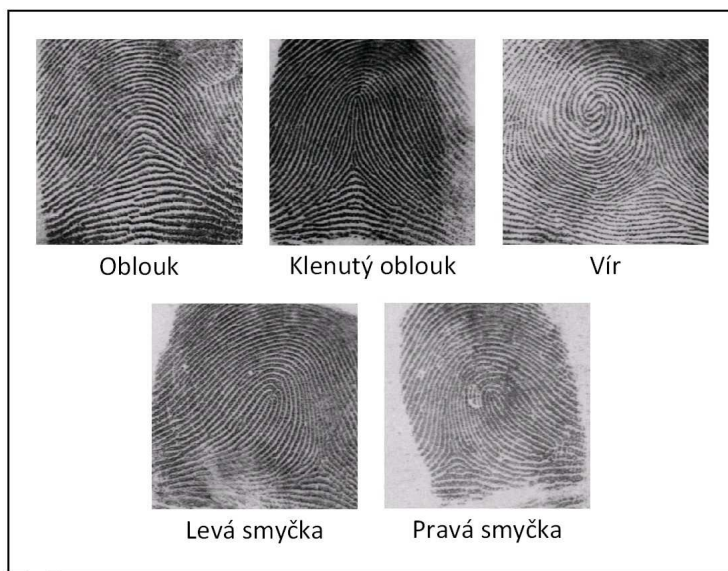
Obrázek 4.1: Otisky prstů: válený (a, b), píchaný (d, e), latentní (c) [5].

Některé otisky prstů však nejsou vhodné pro automatické rozpoznávání, například u lidí, kteří trpí kožními onemocněními nebo mají poraněná bříška prstů v takové míře, že jsou poškozeny jejich papilární linie.

Podle vzoru, který vytvářejí papilární linie, rozlišujeme následující **třídy otisků prstů**:

- oblouk (*arch*),
- klenutý oblouk (*tended arch*),
- spirála/závit/vír (*whorl*),
- levá smyčka (*left loop*),
- pravá smyčka (*right loop*),
- dvojitá smyčka (*twin loop*).

Některé ze zmíněných tříd znázorňuje obrázek 4.2.



Obrázek 4.2: Třídy otisků prstů [4].

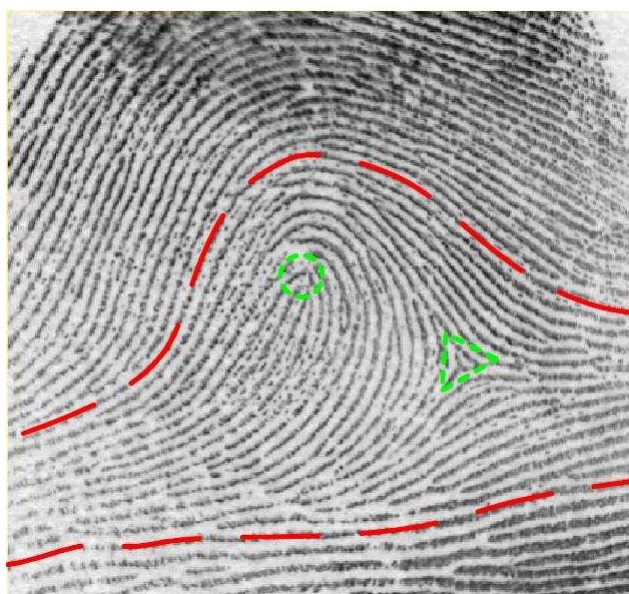
V systémech AFIS pro klasifikaci otisků se používá Henryho klasifikační schéma, to pracuje pouze se třemi základními třídami – oblouk, smyčka a vír. Další třídy jsou potom

odvozeny od tříd základních. Klasifikační systém byl pojmenován podle E. Henryho, který se také věnoval výzkumu otisků prstů.

Pro klasifikaci otisků v daktyloskopických systémech se používají všechny třídy kromě dvojité smyčky.

Klasifikace funguje na základě několika znaků (viz obrázek 4.3) [6]:

- **Delta** – místo v otisku, ve kterém probíhají papilární linie do tří směrů (mohou se vyskytnout i dvě delty).
- **Jádro** – střed otisku, najdeme ho v místě nejspodnějšího vyklenutí papilárních linií.
- **Typové linie** – označují prostor mezi nejspodnější linií patřící k deltě a najsvrchnější linií patřící ke středu.



Obrázek 4.3: Rysy otisků prstů: delta Δ , jádro \bigcirc , typové linie – – – [6].

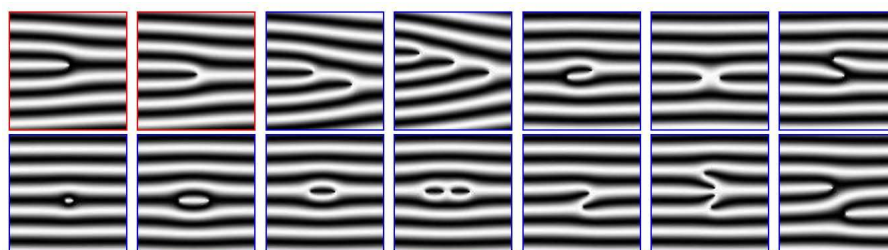
Otisky prstů rozlišujeme na základě markantů. **Markanty** jsou speciální útvary vytvářené papilárními liniemi. Druhy markantů jsou znázorněny na obrázku 4.4. Mezi základní typy markantů patří [7]:

- **ukončení** (*line ending*, a),
- **jednoduchá vidlička/rozdvojení** (*simple bifurcation*, b).

Jako další příklady markantů lze uvést [7]:

- **dvojitá vidlička** (*double bifurcation*, c),
- **trojitá vidlička** (*triple bifurcation*, d),
- **hák** (*hook*, e),

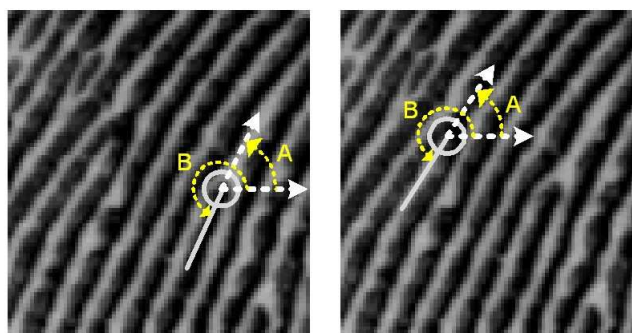
- křížení (*crossing*, f),
- boční kontakt (*side contact*, g),
- bod (*point*, h),
- interval (*interval*, i),
- jednoduchá smyčka (*single whorl*, j),
- dvojitá smyčka (*double whorl*, k),
- jednoduchý most (*single bridge*, l),
- dvojitý most (*twin bridge*, m),
- průsečná linie (*through line*, n).



Obrázek 4.4: Typy markantů. Horní řada zleva: a, b, c, d, e, f, g, dolní řada zleva: h, i, j, k, l, m, n [4].

U přístupových systémů se používá pouze ukončení a vidlička, naopak u daktyloskopických systémů je využíváno mnohem více markantů, než zde uvedené.

Směr, ve kterém by v markantu pokračovala papilární linie, nazýváme **orientace markantu** [6]. Pro vyznačení orientace se používají dvě notace: standardní a FBI/AFIS (viz obrázek 4.5).



Obrázek 4.5: Orientace markantu: standardní a FBI notace [4].

4.2 Zpracování otisků prstů

Jak bylo popsáno v podkapitole 2.3, každý biometrický systém se skládá ze dvou modulů – registračního a identifikačního/verifikačního. Uživatel se obvykle registruje tak, že několikrát (zpravidla 3-5x) přiloží prst na plochu snímače, přičemž systém dané vzorky zprůměruje takovým způsobem, aby získal co nejkvalitnější šablonu. Proces identifikace/verifikace probíhá obdobným způsobem, ale může dojít k situaci, kdy otisky prstů od různých uživatelů budou podobné, nebo naopak, otisky prstů pocházející ze stejného prstu budou odlišné.

Zpracování otisku prstu probíhá v několika krocích [28]:

- **Vstupní obraz** – Jde o získání obrazu otisku prstu ze senzoru, případně z jiné předlohy. Dostaneme digitální formu otisku, která obsahuje množství šumu. Tento šum je třeba následně odstranit. Je důležité sledovat, zda snímáme válené, píchané nebo latentní otisky prstů a rovněž je nutné dbát na znečištění prstu, poranění a další vlivy. Zároveň musíme kontrolovat, zda se jedná o živý prst nebo například falešný otisk nalepený na živém prstu.
- **Pole orientací** – Nejdříve se z okolí pro každý bod v obrazu vypočítá směr papilární linie (pokud se na ní bod přímo nachází, určuje její směr), poté je aplikována transformace na blokové pole orientací, které je následně namapováno na původní obraz otisku prstu.
- **Extrahované linie** – Obraz je znovu upraven a výsledkem jsou černobílé papilární linie. Mezi zmíněné úpravy patří například škálování histogramu a kontrola kvality vstupního vzorku. Pro filtrování u pole orientací je využívána 2D Gaborova funkce, ve frekvenční doméně se potom používá dolní propust, filtr Butterworth, filtr Ikonomopoulos nebo filtr Sherlock. Pro prahování obrazu slouží mimo jiné tzv. schéma RAT (*Regional Average Thresholding*). To rozdělí obrázek na bloky 8×8 pixelů, vypočítá v těchto oblastech průměrnou hodnotu šedé, pro levou část 8×4 pixelů nastaví tuto hodnotu šedé a posune se o 4 pixely vpravo. Po dosažení pravého okraje se posune o 8 pixelů dolů a začne opět analogicky.
- **Ztenčené linie** – Dojde ke ztenčení papilárních linií na 1 pixel, k tomu je využíván algoritmus, který sníží počet pixelů na obrazu papilární linie tak, aby měla tloušťku pouze 1 pixel. Papilární linie však nesmějí ubývat v žádném směru. Mezi nejpoužívanější metody pro ztenčení papilárních linií patří metoda Emyroglu.
- **Markanty** – Nakonec dojde k detekci a extrakci markantů, pracuje se pouze se dvěma základními typy markantů – ukončení linie a vidličkou; ostatní typy markantů jsou od nich odvozeny. Ke každému markantu je pak ukládána jeho pozice (souřadnice), typ (ukončení/vidlička) a gradient (orientace/sklon linie), a výsledek extrakce je porovnán se vzorkem z databáze.

Rozlišujeme několik druhů metod pro rozpoznávání otisků prstů [7]:

- Metody založené na markantech – jsou nejčastěji používané, porovnávají dvě množiny markantů. Např. Hongova metoda staví na faktu, že jednotlivé papilární linie probíhají vůči sobě paralelně a maximální úroveň šedé dosahují právě uprostřed linie samotné. Otisk prstu je násoben dvěma maskami s posunem fáze o 180° . Další metodou založenou na markantech je Rathova metoda.

- Metody založené na korelaci – jsou výpočetně velmi náročné, využívají 2D korelaci mezi vstupním obrazem a šablonou v databázi.
- Metody založené na vlastnostech papilárních linií – zkoumají tvar linií, jejich orientaci, frekvenci aj. Mají nízkou rozlišovací schopnost, ale často se používají zároveň s metodami založenými na markantech.

4.3 Typy senzorů

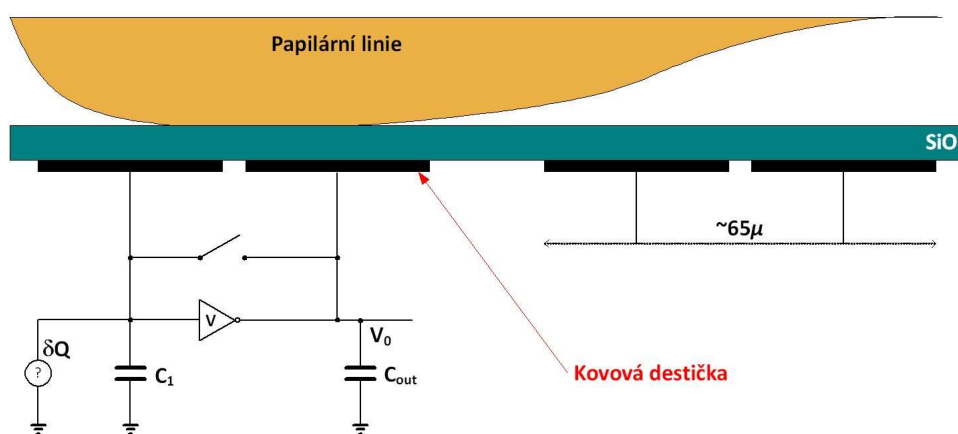
Ačkoliv je v některých institucích stále využíváno otisku prstu na papírovou kartu a následné manuální nascanování do PC, moderní metody využívají několik základních typů senzorů. Sledovanými měřítky u těchto senzorů je především rozlišení, snímací plocha, počet bitů pro kódování barvy, geometrická přesnost a kvalita obrazu. Tato práce se zabývá mechanickými metodami určování živosti u otisků prstů, tím pádem se blíže zaměříme pouze na některé druhy senzorů.

4.3.1 Optická technologie

Princip této technologie je následující – uživatel přiloží prst na plochu senzoru (ne vždy, existují i bezkontaktní optické senzory) a plocha prstu je osvětlena zdrojem světla. Následně kamera nasnímá obraz, který je dále zpracován.

4.3.2 Kapacitní technologie

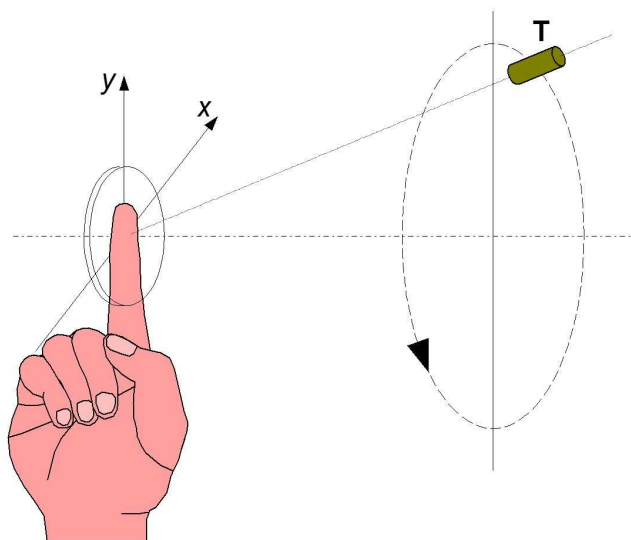
Kapacitní senzor je složen z matice malých vodičů pokryté nevodivou vrstvou oxidu křemičitého. Tyto vodiče jsou mnohem jemnější než papilární linie na povrchu prstu. Přiložením prstu pak vzniknou nad vodiči kondenzátory a jejich výstupem je hodnota, která odpovídá překryvu plochy. Princip je znázorněn na obrázku 4.6. Podobně založená je také e-field technologie.



Obrázek 4.6: Kapacitní technologie [6].

4.3.3 Ultrazvuková technologie

Ultrazvuková technologie je postavena na ultrazvukovém rotujícím vysílači, který je zároveň i přijímačem a rotuje po kruhové dráze a snímá otisk prstu. Ultrazvukové vlny dokáží proniknout i pod povrch prstu, takže je poměrně snadné odhalit falešný otisk/umělý prst. Technologie je vyobrazena na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Ultrazvuková technologie [6].

4.3.4 Elektrooptická technologie

Elektrooptický senzor [16] je složen ze čtyř vrstev, uživatel přitlakem na plochu senzoru vybudí dotyk vrstev a tím i emitování světla, které projde do senzoru.

4.3.5 Tlaková technologie

Tlakový senzor [16] se skládá ze tří vrstev, kde dvě jsou z elektrovedivého materiálu a mezi ně je vložen nevodivý gel. Přiložením prstu na senzor pak dojde ke stlačení gelu a vodivé vrstvy se dotknou.

4.3.6 Termická technologie

Termická technologie [16] je založena na tepelném záření – papilární linie prstu vyzařují mnohem více tepla než prohlubně mezi nimi, tyto vlastnosti snímá pyroelektrická buňka.

4.4 Metody detekce živosti

Existuje množství metod pro určování živosti u technologie otisků prstů. Jsou založeny na sledování některé charakteristické vlastnosti pro lidské tělo, například elasticita nebo změna barvy kůže, spektrální vlastnosti, nasycenost krve kyslíkem, puls, pocení, tělesný pach, teplota nebo elektrické vlastnosti kůže. Tato práce je zaměřena na metody mechanické, nikoliv optické, proto si přiblížíme pouze několik principů z výše jmenovaných.

4.4.1 Teplota

Tato poměrně jednoduchá metoda měří teplotu kůže prstu během snímání otisku. Teplota kůže se však dá ovlivnit řadou faktorů. Závisí na ročním období, fyzickém a psychickém stavu člověka nebo na podmínkách okolního prostředí, tím pádem se její rozmezí mění od 25 °C do 37 °C. Teplota kolísá i během samotného snímání, tím pádem je měření obtížnější.

4.4.2 Elektrické vlastnosti kůže

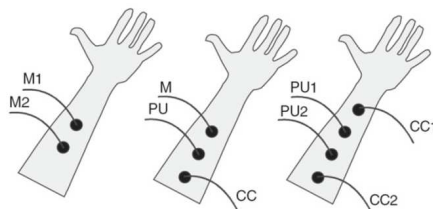
Princip je založen na vodivých vlastnostech kůže. Biometrický systém by v takovém případě musel obsahovat elektrody a elektronickou jednotku pro vyhodnocení.

Vodivost lidské kůže je založena na vlhkosti, ta je ovlivňována jak fyzickým a psychickým stavem člověka, tak vnějšími vlivy. Bylo experimentálně zjištěno, že vodivost kůže se pohybuje od 20k Ω do 3M Ω [5]. Útočníkovi k oklamání senzoru stačí namočit umělý prst do solného roztoku nebo slin a systém ho detekuje jako prst živý.

Relativní permitivita rovněž závisí na vlhkosti zkoumaného materiálu, v tomto případě potenciálnímu útočníkovi postačí namočit umělý prst do roztoku tvořeného z 90% alkoholem a z 10% vodou [13].

4.4.3 Bioimpedance

Princip vyžaduje umístění elektrod na předloktí nebo jinou část těla uživatele [5]. V elektrodách potom probíhá střídavý proud a mezi nimi dochází k měření impedance, která závisí na změně frekvence střídavého proudu. Impedance potom může odrážet změny v krevním oběhu, srdeční činnost, nervovou aktivitu, krevní tlak aj. Nejčastěji používané systémy pro měření bioimpedance jsou znázorněny na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8: Elektrody pro měření bioimpedance (M – měření a přenos proudu, CC – přenos proudu, PU – zaznamenávání signálu) [5].

4.4.4 Tělesný pach

Metoda je založena na použití tzv. elektronického nosu a poprvé ji představil D. Baldisserra [13]. Tento přístroj obsahuje množství malých chemických čidel, která dokáží detekovat molekuly odpařující se z prstu přiloženého na senzor. Zařízení by mělo být umístěno v bezprostřední blízkosti snímací plochy pro otisk. Získání a zpracování pachu trvá přibližně 10-15 sekund, a jakmile na senzoru není žádný prst, analyzuje pachy z okolí. Tato technologie se při experimentech ukázala jako poměrně spolehlivá, problém však nastal s falešnými otisky z želatiny, v tomto případě senzor nedokázal rozpoznat rozdíl oproti lidské kůži [13].

Kapitola 5

Určování živosti podle tělesného pachu

Pro výzkum v rámci této práce byla zvolena metoda určování živosti podle tělesného pachu. Nejdříve jsem se zaměřila na samotné elektronické nosy.

5.1 Elektronický nos

Elektronický nos se skládá ze tří částí: zaváděcí modul, detekční modul a výpočetní modul. V zaváděcím modulu je analyzován a následně uložen do paměti nový chemický vzorek, detekční modul obsahuje senzory, které reagují na kontakt s pachem, a výpočetní modul pak vzorek vyhodnocuje.

Jak již bylo řečeno, každý elektronický nos sestává z pole chemických čidel pro detekci pachů. Většinou se jedná o MOSFET tranzistory, vodivé polymery, křemíkové mikrováhy nebo systém pro měření povrchových akustických vln. Může jít i o kombinaci několika zmíněných technologií. Při kontaktu s konkrétním pachem nebo výparem dojde k fyzické změně senzoru. Ta je zaznamenána, převedena na signál a následně vyhodnocena.

Byly zkoumány dostupné možnosti ohledně elektronických nosů. Nejznámější v tomto odvětví jsou následující přístroje.

5.1.1 Cyranose[®] 320

Cyranose[®] 320 od americké společnosti Cyrano Sciences je poměrně kompaktní a rychlý. Váží kolem 1 kilogramu a je schopný rozpoznat vzorek pachu přibližně během 10 sekund. Přístroj obsahuje pole 32 nanokompozitních chemických senzorů na bázi polymeru, které detekují různé pachy a výpary [25]. Nejdříve je nutné nos vytrénovat na vzorcích pachů, se kterými se bude později pracovat, ty se ukládají do vestavěné databáze. Jakékoliv pachy, se kterými se následně pracuje, se porovnávají s těmito uloženými vzorky [25].

5.1.2 7100 zNose

Tento elektronický nos je velmi přesný a dokáže rozpoznat vzorek v množství menším než 50 pikogramů. Analýza vzorku trvá 10-60 sekund. Jedná se však o rozměrný přístroj, který váží téměř 14 kilogramů [9], proto se domnívám, že případná integrace se senzorem pro snímání otisků prstů by mohla být poměrně obtížná.



Obrázek 5.1: Cyranose[®] 320 [25].



Obrázek 5.2: 7100 zNose [9].

5.1.3 4600 zNose

Jedná se o novější variantu 7100 zNose. Zařízení je rovněž velmi přesné v rozpoznávání vzorků, je však mírně rychlejší. Analýza v nejkratším případě zabere pouhých 5 sekund, nejdéle může e-nose zpracovávat vzorek 60 sekund [8]. Přístroj je stejně jako jeho předchůdce poměrně rozměrný.

5.1.4 Další možnosti

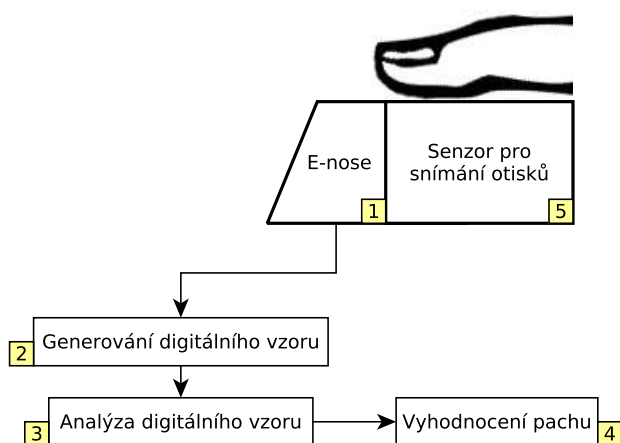
Všechny tři přístroje jsou velmi nákladné, proto se ještě nabízí možnost sestavit si vlastní senzor na snímání pachů. Takový senzor bude výrazně levnější, jeho sestavení popisuje např. tento článek [18].



Obrázek 5.3: 4600 zNose [8].

5.2 Návrh zařízení

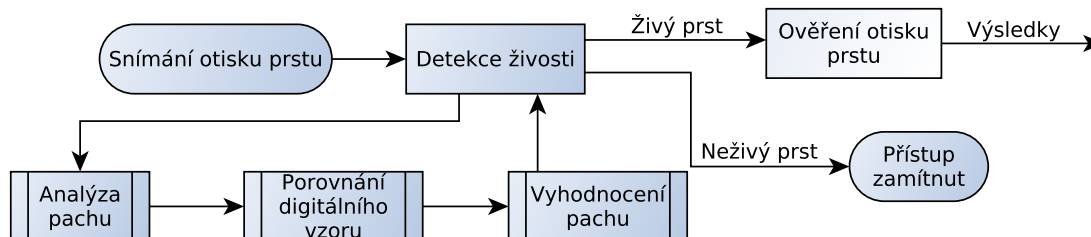
Výsledné zařízení by mělo sestávat z elektronického nosu Cyranose[®] 320 a senzoru pro snímání otisků. Senzor by mohl být kapacitní, optický nebo tlakový, elektronický nos však musí být v jeho dostatečné blízkosti, aby bylo možné detekovat pachy a zároveň snímat otisk prstu. Rovněž je třeba se zamyslet nad umístěním elektronického nosu vůči senzoru pro snímání otisků, neboť v případě, kdy útočník použije tenký falešný otisk nalepený na špičce prstu, je tu potenciální možnost, že při špatném umístění senzoru bude neoprávněně vpuštěn do systému. Tyto případy je však nutné experimentálně ověřit. Návrh systému zobrazuje schéma 5.4.



Obrázek 5.4: Systém pro snímání otisků a detekci živosti.

Následně by mělo dojít k testování nejrůznějších vzorků: čisté prsty, osoby s ušpiněnými prsty od různých látek, osoby s nalakovanými nehty, umělé prsty a předměty imitující lidské prsty, falešné otisky nalepené na živých prstech. Nejdříve by došlo ke snímání otisku samotného a poté by byla detekována živost prstu. Na základě provedených testů by bylo vyhodnoceno, zda je metoda úspěšná, a kde jsou její slabá a silná místa.

Jak již bylo zmíněno u Cyranose[®] 320, zařízení je nutné nejprve naučit rozpoznávat různé vzorky, a až na základě pachů uložených v databázi je možné vyhodnocovat vzorek k porovnání. Senzory elektronického nosu reagují na výpary a pachy zvětšením, změnou vodivosti uhlíkových drah a následným nárůstem hodnoty odporu. Změny odporu jsou pak zachyceny jako digitální vzor, který slouží pro rozlišení jednotlivých pachů. Jednotlivé fáze vyhodnocení prstu znázorňuje diagram 5.5.



Obrázek 5.5: Stavový diagram snímání prstu s detekcí živosti podle pachu.

5.3 Vyhodnocení poznatků

Po zhodnocení všech dostupných možností jsem kontaktovala distributora Cyranose[®] 320 – společnost Sensigent, pro poskytnutí dalších informací k elektronickému nosu. Dodání zařízení by však bylo zdlouhavé a komplikované a pravděpodobně bych nestihla provést potřebné experimenty v daných termínech, proto jsem nakonec zvolila metodu určování živosti podle teploty a rozhodla se pokračovat ve výzkumu ohledně elektronických nosů v rámci diplomové práce.

Kapitola 6

Určování živosti podle tělesné teploty

Vybraná metoda využívá ke snímání teploty bezdotykový pyrosenzor nebo termokameru. Nejdříve je třeba pořídit snímky prstů, na základě kterých budeme určovat teplotní vlastnosti kůže.

6.1 Pyrosenzor

Pyrosenzor slouží k bezkontaktnímu snímání teploty předmětů ve svém okolí. Pro experimenty byl dostupný senzor CEM DT-8810, který mimo jiné umožňuje i laserové zaměření snímané plochy. Senzor měří v rozsahu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $270\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 6.1: Měření pomocí pyrosenzoru.

6.2 Termokamera

Termokamery se využívají také k bezkontaktnímu měření teploty. Dochází k analýze rozložení teplotního pole na povrchu zkoumaného předmětu (v tomto případě prstu nebo náhražky prstu) [11]. Každý předmět, jehož teplota je větší než absolutní nula, vyzařuje energii – kamera pak měří množství této infračervené energie [26].

Termokamera se skládá z optiky, detektoru a elektroniky pro zpracování a prezentaci obrazu. Optiku většinou tvoří spojka z germánia, nemá optický zoom a propouští jen některé vlnové délky záření. Detektor převádí infračervené záření na elektrický signál, který je následně převeden na výsledný termogram pomocí elektroniky pro zpracování a prezentaci obrazu [27].

6.2.1 FLIR Thermacam E300

Pro experimenty jsem použila termokameru FLIR Thermacam E300 dostupnou v biometrické laboratoři. Zařízení dokáže měřit v rozsahu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností na $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledné obrázky jsou pak v dostatečném rozlišení pro další zpracování (640×480 pixelů).

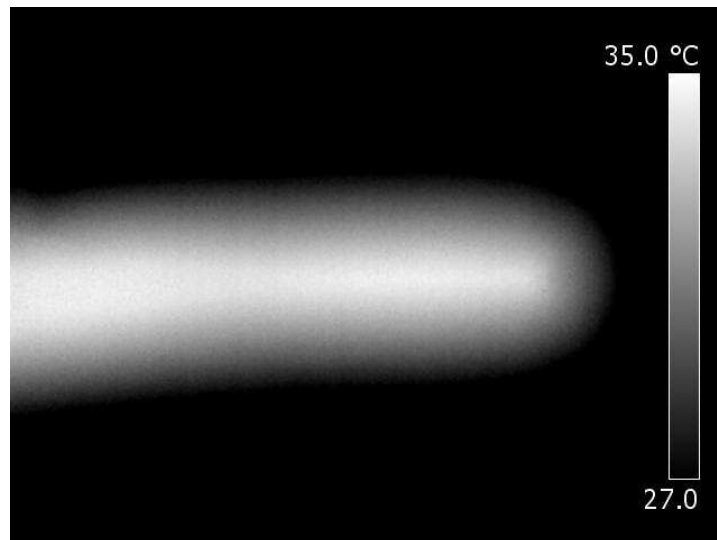


Obrázek 6.2: FLIR Thermacam E300 [23].

6.3 Měření

Pro vyhodnocování teplotních vlastností kůže bylo nejdříve nutné získat dostatečné množství vzorků. Došlo k nafocení několika desítek snímků. Termokamera měla nastavený emisní koeficient odpovídající lidské kůži a pevně daný teplotní rozsah $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, neboť při použití proměnlivého rozsahu by nebylo možné určovat přesnou teplotu. Za předpokladu, že každý snímek by měl jiný teplotní rozsah, docházelo by k případům, kde by rozdílné teploty byly prezentovány stejnou hodnotou šedé barvy ve snímku.

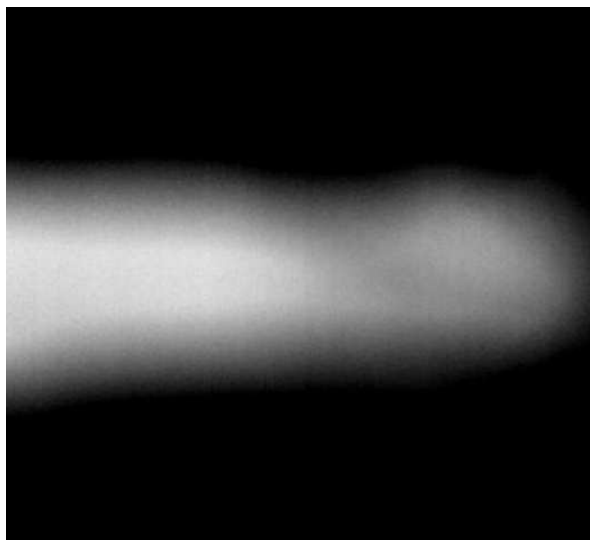
Jelikož rozdíly mezi jednotlivými živými prsty byly minimální, snímala jsem testovaným osobám všech deset prstů. Dále jsem snímala prsty s nalepenými otisky z gumy, silikonu, latexu a papíru. Jako neživé imitace prstu bylo nutné vybrat předměty z různých materiálů s podobným tvarem jako prst, které lze zahřát na tělesnou teplotu, aby bylo možné vysledovat rozdíly oproti živým prstům i jednotlivým předmětům navzájem. Zvolila jsem zapalovač, zvýrazňovací fix, vařečku, lžíci, špičku deštníku, plastové ramínko na šaty a rukojeť posuvného měřítka. Testované subjekty musely být na levé straně záběru, aby nezasahovaly do stupnice, kterou kamera znázorňuje na pravé straně fotky.



Obrázek 6.3: Živý prst.

6.4 Určování živosti

Při porovnávání snímků živých a neživých prstů jsem vypožorovala, že nalepený otisk na prstu v množství případů poměrně rychle chladne, a nejrychleji chladne u okrajů. Tím pádem je špička prstu s otiskem tmavší než zbytek prstu, a pokud stihne otisk více vychladnout, hranice mezi okrajem otisku a prstem je viditelná pouhým okem. Všechny otisky jsme pochopitelně před měřením zahřáli na tělesnou teplotu, některé z nich však měnily teplotu rychleji, např. otisky z gumy.



Obrázek 6.4: Prst s falešným otiskem z gumy.

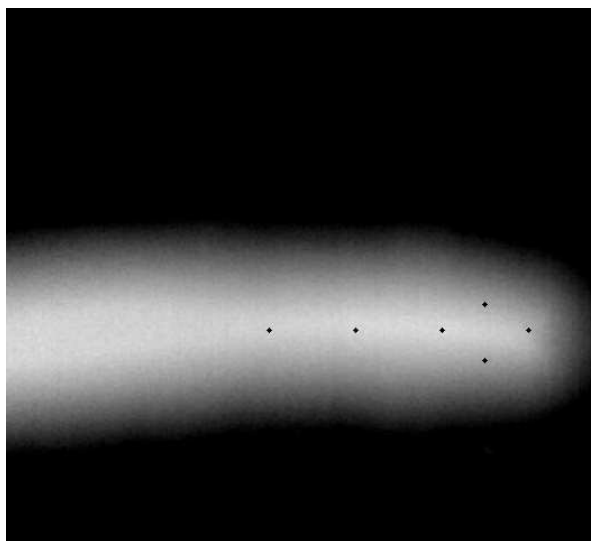
Na základě srovnání snímků živých a neživých prstů jsem se rozhodla určovat živost podle několika faktorů:

- porovnávání teploty v určených bodech na prstu,
- průměrná teplota prstu,
- nejteplejší a nejchladnější plochy na prstu a jejich poměr k celkové ploše prstu.

Pro každý zkoumaný předmět jsem si stanovila stupnici od 0 do 100 bodů. Za „míru živosti“ jednotlivých rysů pak přičítám kladné body. U porovnávání teploty v bodech může předmět získat 0-40 bodů, za průměrnou teplotu 0-30 bodů, za místa s minimální a maximální teplotou 0-15 bodů pro každý případ. Všechna zmíněná skóre se potom sečtou a prst je určen za živý v případě, že dosáhne minimálního skóre 40 bodů.

6.4.1 Body pro měření teplotních rozdílů.

Ze zkoumaných snímků jsem vypožadovala body na prstu, ve kterých se ve většině případů lišily teploty živého prstu a falsifikátu. Těchto bodů je celkem 6. První 4 z nich jsou umístěny po podélné ose prstu a mají mezi sebou vzdálenost poloviny šířky prstu. Takové umístění jsem zvolila kvůli zmíněným falešným nalepeným otiskům – z teploty bodů je pak patrné, že na prstu je nalepené cizí těleso. Další 2 body jsem umístila na okraji prstu ve vzdálenosti jedné šestiny šířky prstu od středu prstu. Body jsou naznačeny na obrázku 6.5.



Obrázek 6.5: Body pro měření teplotních rozdílů.

6.4.2 Průměrná teplota

Dalším ze zkoumaných faktorů, které ovlivňují živost, je průměrná teplota předmětu. Vypožadovala jsem, že falešné prsty měly v množství případů nižší průměrnou teplotu než prsty živé. Problém však nastane při měření osoby, která má studené ruce, proto má hodnocení tohoto faktoru při určování živosti nižší váhu než body pro měření teplotních rozdílů.

6.4.3 Maxima a minima

Posledním kritériem jsou teplotní minima a maxima na prstu. U živého prstu klesá teplota více u okrajů, u středu prstu je téměř stejná. Využila jsem tedy prahování pro výpočet nejteplejší plochy prstu ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), např. pokud má nejteplejší bod na prstu $34,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, pak počítám plochu pro $34,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $34,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a porovnávám ji s plochou celého prstu. Analogicky postupuji pro nejchladnější plochu prstu, neboť živý prst je nejchladnější na svém obrysu, u neživého prstu je tato plocha větší. Viz obrázek 6.6.



Obrázek 6.6: Teplotní maxima (vlevo) a minima (vpravo).

6.5 Implementace

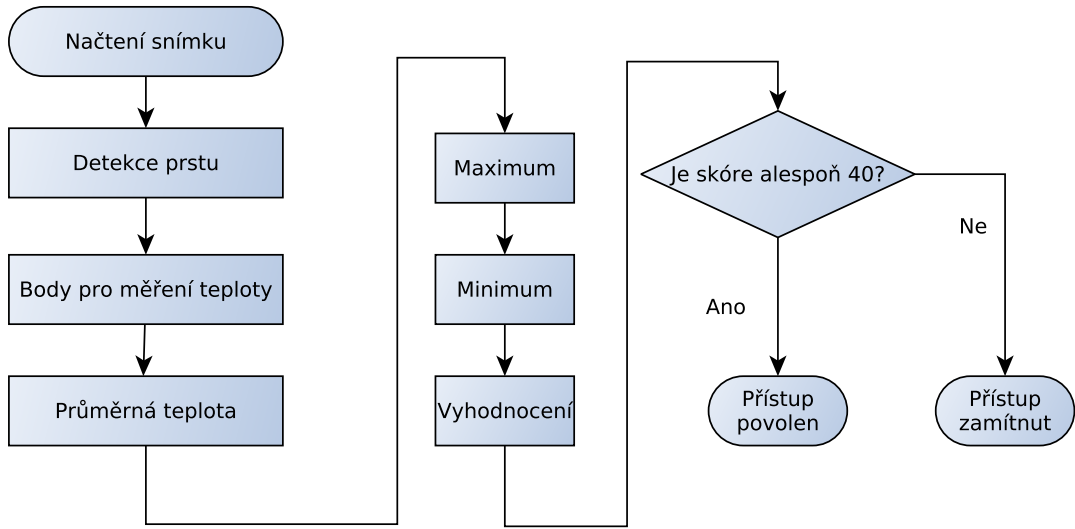
Pro implementaci programu na porovnávání živosti jsem využila knihovnu pro zpracování obrazu OpenCV (angl. *Open Source Computer Vision Library*) ve verzi 2.4.6. Tato knihovna obsahuje více než 2500 algoritmů, které je možné využít pro rozpoznávání tváře, identifikaci objektů v obraze, klasifikaci lidských akcí ve videu, pohyb kamery, zachycení pohybujících se objektů, extrahování 3D modelů, spojení více snímků do jednoho, nalezení shodných snímků v databázi nebo snímání pohybu očí a jiné. OpenCV je kompatibilní s programovacími jazyky C++, Java, Python a Matlab/Octave [15]. Z uvedených jazyků jsem si zvolila Python ve verzi 2.7.5. Výsledná aplikace se nachází na přiloženém CD (příloha A), základní funkcionality je pak nastíněna v diagramu 6.7.

6.5.1 Použité algoritmy

Gaussův filtr je jedna z nejčastějších metod pro odstranění šumu ze snímku. Využívá diskrétní konvoluce s maskou určenou prostřednictvím 2D Gaussovy funkce, hodnoty pro jednotlivé pixely se vypočítají podle vztahu 6.1 [2]:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6.1)$$

Kde x, y jsou souřadnice pixelu a σ je standardní odchylka (běžně v rozmezí 1 až 1,4).



Obrázek 6.7: Základní logika aplikace.

Hodnota každého pixelu je určena průměrem jeho a jeho nejbližších sousedů. Součet prvků matice konvolučního jádra po vynásobení vahou matice pak musí být roven jedné, aby nedocházelo ke změně jasu v obraze [3].

Prahování pomocí metody Otsu redukuje snímek ve stupních šedi na binární obraz. Algoritmus určí hodnotu optimálního prahu, který odděluje pozadí a popředí snímku [12]. K hledání prahu dochází na základě výpočtu vnitřního rozptylu (angl. *within variance*) a mezi-rozptylu (angl. *between variance*), podle vztahů 6.2 a 6.7:

$$\sigma_w^2(t) = n_B(t)\sigma_B^2(t) + n_F(t)\sigma_F^2(t) \quad (6.2)$$

kde

$$n_B(t) = \sum_{i=0}^{t-1} p(i), \quad (6.3)$$

$$n_F(t) = \sum_{i=t}^{N-1} p(i), \quad (6.4)$$

$$\sigma_B^2(t) = \text{vážená suma rozptylu pozadí (pod hodnotou prahu)}, \quad (6.5)$$

$$\sigma_F^2(t) = \text{vážená suma rozptylu popředí (nad hodnotou prahu)}. \quad (6.6)$$

$[0, N - 1]$ je pak počet úrovní intenzit v obraze.

$$\sigma_b^2(t) = n_B(t)n_F(t)[\mu_B(t) - \mu_F(t)] \quad (6.7)$$

kde σ^2 je vážená suma suma rozptylu a μ je průměrná hodnota intenzity.

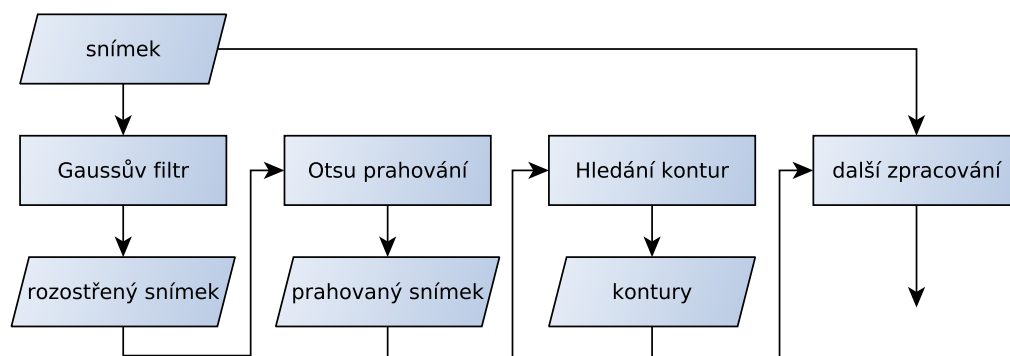
Cílem je najít práh t takový, který minimalizuje vnitřní rozptyl nebo maximalizuje mezi-rozptyl [20].

6.5.2 Zpracování vstupu

Program načítá snímky z podsložky zadané argumentem při spuštění. V případě, že není specifikována složka, načítá snímky ze složky samples.

6.5.3 Detekce prstu

Detekování pozice prstu na snímku zpracovává funkce `pointTemp()`. K rozpoznání obrysů prstu využívám funkce OpenCV `cv2.findContours()`. Pokud však zpracovávám nekvalitní snímek, nejdříve je nutné ho rozostřit pomocí Gaussova filtru. V opačném případě není možné detekovat kontury prstu. Pro rozostření snímku používám funkci `cv2.GaussianBlur()` s velikostí konvoluční matice 5×5 a standardní odchylkou $\sigma = 0$, což znamená, že odchylka je vypočítána z délky a šířky snímku. V souvislosti s detekcí kontur jsem narazila na další problém s nekvalitními snímky – u některých z nich nebylo možné detekovat souvislou konturu, proto bylo třeba snímek upravit ještě jednou, a to pomocí Otsu prahování [19]. Prahování obrazu zpracovává funkce `cv2.threshold()`. Otsu metodu určuje extra argument funkce `cv2.THRESH_OTSU`, jako práh funkce může být nastavena 0, neboť bude nahrazena nově vypočítanou hodnotou prahu. Potom je obrys detekován u velké většiny snímků. Jakmile program najde obrys prstu, jeho kontury se uchovávají ve vektoru `contours`, který je aplikován na původní neupravený snímek pro další výpočty. Pokud bychom použili upravený snímek, vypočítané hodnoty by byly zkreslené. Zpracování snímku před další manipulací je znázorněno v diagramu 6.8.



Obrázek 6.8: Zpracování snímku.

6.5.4 Body pro měření teploty

Body pro měření teplotních rozdílů určí podle postupu zmíněného v podsekcí 6.4.1. K výpočtu souřadnic využívám funkci `moments()` [21]. Funkce zpracovává údaje o jednotlivých částech kontur a vypočítá souřadnice středu objektu ohraničeného konturami. Z kontur se dále určí souřadnice hraničních bodů prstu. Pomocí středových a okrajových bodů následně vypočítám souřadnice bodů pro měření teploty a na těchto souřadnicích pouze načtu hodnoty pixelů. K přepočtu hodnoty pixelu na stupně Celsia pak dochází podle následujícího vztahu:

$$teplota = hodnotaPixelu \cdot \frac{8}{255} + 27 \quad (6.8)$$

6.5.5 Průměrná teplota

Průměrnou teplotu prstu obstarává funkce `averageTemp()`. Obrázek procházím v cyklech a teplotu jednotlivých bodů na povrchu prstu ukládám do pole, ze kterého se nakonec vypočítá průměrná hodnota. Přepočítání na teplotní hodnotu probíhá podle stejného vztahu jako u teplotních bodů v předchozím odstavci.

6.5.6 Minima a maxima

Teplotní maxima na prstu zpracovává funkce `maxTemp()`. Nejdříve je nutné nalézt pixel na povrchu prstu s nejvyšší hodnotou. To provádím pomocí prahování. Začínám na nejvyšší hodnotě (255) a práh v každém kroku snižuji o 0,1 °C. Ve chvíli, kdy dojde k nalezení bodu s nejvyšší hodnotou, nastavím hodnotu prahu o 0,5 °C níže a vypočítám plochu pokrytou nenulovými pixely a porovnáím ji s plochou celého prstu.

Funkce pro výpočet minima se jmenuje `minTemp()` a funguje podobně jako funkce pro výpočet maxima. Nejdříve dojde k hledání pixelu s nejnižší hodnotou, přičemž je uvažováno, že hodnota pixelů v pozadí je nulová, tím pádem práh musí být vyšší než 0. Po nalezení minima je navýšen práh o 0,5 °C a vypočítána plocha a porovnána s celou plochou prstu.

6.5.7 Vyhodnocení vzorku

K vyhodnocení prstu na vstupu pak slouží funkce `evaluate()`. Funkce dostane na vstup pole se všemi potřebnými údaji o snímku, které byly vypočítány při předcházejícím zpracování snímku. Na základě údajů získaných z experimentů pak vyhodnocuje jednotlivé faktory pro určení živosti, a podle jejich hodnot přičítá vzorku kladné body. Dochází k hodnocení průměrné teploty prstů, teplotních rozdílů mezi určenými body na prstu, průměrné teploty určených bodů, teplotního maxima a plochy s minimální teplotou. Plocha s maximální teplotou ani hodnota teplotního minima nakonec nebyly zahrnuty do hodnocení, neboť rozdíly mezi živými a neživými prsty u těchto faktorů se ukázaly jako minimální. Následně dojde k sečtení jednotlivých hodnot, a pokud vzorek dosáhne minimálně 40 bodů ze 100, je prohlášen za živý prst.

6.6 Shrnutí experimentů

Celkem bylo testováno 152 vzorků. Jak jsem již zmínila, nešlo jen o živé prsty, ale i o prsty s nalepenými otisky nebo o neživé předměty. Celkem 88 vzorků byly živé prsty. Zbýlých 64 vzorků byly falsifikáty. Výsledky měření jsou podrobně rozepsány v příloze B.

Experimenty ukázaly, že metoda se neřadí mezi nejspolehlivější. Přibližně 24% živých prstů bylo chybně odmítnuto jako neživé. V případě neživých prstů bylo chybně přijato přibližně 9% vzorků. Nejvíce chybně přijatých vzorků bylo mezi prsty s otisky ze silikonu. Dále byl chybně přijat snímek prstu s otiskem z gumy a snímek nahřátého zapalovače. Domnívám se však, že v situaci, kdy bych měla k dispozici opravdu tenké umělé otisky (například ze silikonu nebo latexu), byla by spolehlivost zařízení mnohem nižší. Bohužel jsem neměla možnost otestovat umělý prst, tím pádem nemohu určit, zda by mémi experimenty

prošel nebo byl správně odmítnut jako neživý předmět. Shrnutí experimentů zobrazuje tabulka 6.1. Vztahy 6.9 a 6.10 znázorňují výpočet míry chybného přijetí (FAR) a chybného odmítnutí (FRR).

	Živé prsty	Neživé prsty
Celkem	88	64
Správně přijato	67	-
Chybně odmítnuto	21	-
Správně odmítnuto	-	58
Chybně přijato	-	6

Tabulka 6.1: Shrnutí experimentů.

$$FAR = \frac{6}{64} = 9,38\% \quad (6.9)$$

$$FRR = \frac{21}{88} = 23,86\% \quad (6.10)$$

Z výsledků experimentů vyplývá, že pokud použijeme neživou imitaci prstu, která bude mít podobný tvar a teplotní rozložení jako prst a zároveň bude opatřena otiskem prstu, je zde určitá pravděpodobnost, že zařízení potenciálního útočníka přijme. To samé platí pro útočníka, který použije velmi tenké falešné otisky, termokamera pak nerozpozná teplotní rozdíl, neboť otisk se bude chovat stejně jako povrch prstu.

Algoritmus pro vyhodnocování živosti je poměrně přísný, proto byl práh pro povolení/zamítnutí otisku určen na 40 bodů ze 100. V případě, že měříme živý prst, který má nižší teplotu, pravděpodobně dojde k chybnému odmítnutí a bude potřeba prst zahřát na vyšší teplotu. U experimentování nastal problém především u osob, kterým se nedokrvují ruce, jejich prsty pak byly několikrát chybně zamítnuty. Po zahřátí rukou třením však byli přijati bez problémů.

Jak vyplývá z hodnot FAR a FRR, určovat živost jen na základě teploty prstu není dostatečně spolehlivé, ideální systém by musel využít kombinaci této metody s některou z dalších metod, aby bylo možné dosáhnout uspokojivého výsledku.

Kapitola 7

Závěr

V rámci této práce jsem se seznámila s oblastí zpracování otisků prstů a metodami určování jejich živosti. Část práce byla úspěšně prezentována na konferenci STUDENT EEICT 2014. Z dostupných mechanických metod jsem si zvolila pachovou a teplotní metodu.

Po důkladném zkoumání pachové metody jsem bohužel nemohla provést potřebné experimenty, neboť nebylo možné sehnat elektronický nos. Proto jsem se dohodla s vedoucím práce na provedení teoretického rozboru a návrhu koncepce řešení. Dle dostupných zdrojů se však metoda jeví jako spolehlivá.

Další rozsáhlou částí práce je metoda teplotní. Pro tuto metodu již bylo možné provést množství experimentů, jejichž výsledky jsou popsány v sekci 6.6.

Metoda se podle výsledků experimentů ukázala jako méně spolehlivá ve srovnání s jinými metodami pro určování živosti. Potenciální útočník může poměrně jednoduše senzoru podstrčit falešný otisk nebo předmět imitující prst a má poměrně vysokou pravděpodobnost, že bude přijat. Postačí použít předmět, který se tvarem co nejvíce podobá prstu, a dostatečně ho zahřát. Naproti tomu, osoby, kterým se nedostatečně prokrvují prsty, budou odmítnuty jako neživé, stejně jako osoby, které např. přijdou k senzoru z chladného prostředí. Kladem metody je jednoznačně bezkontaktní a rychlé snímání, pokud bychom však uvažovali reálné využití, bylo by třeba metodu zkombinovat s některou z dalších metod určování živosti, abychom dosáhli vyšší spolehlivosti systému.

Literatura

- [1] BONFIG, K. W.; DRAHANSKÝ, M.: *Biometrie*. b-Quadrat Buchverlag, první vydání, 2004, ISBN 3-933609-02-X, 153 s.
- [2] BRADSKI, G.; KAEHLER, A.: *Learning OpenCV*. O'Reilly Media, Inc., první vydání, 2008, ISBN 978-0-596-51613-0, 555 s.
- [3] BURLAK, V.: *Vyhledávání textu*. Diplomová práce, Brno: Vysoké učení technické. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008.
- [4] DRAHANSKÝ, M.: Biometrické systémy: studijní opora [online]. https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/BIO/private/BIO_Studijni_opora.pdf, 2006, [cit. 2014-01-08].
- [5] DRAHANSKÝ, M.: *Fingerprint Recognition Technology – Related Topics*. Lambert Academic Publishing, první vydání, 2011, ISBN 978-3-8443-3007-6, 172 s.
- [6] DRAHANSKÝ, M.; HEJTMÁNKOVÁ, D.: Rozpoznávání podle otisků prstů: přednáška [online]. https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/BIO/private/04_BIO_Prednaska_Hejtmankova.pdf, 2009, [cit. 2014-01-08].
- [7] DRAHANSKÝ, M.; ORSÁG, F.; kolektiv: *Biometrie*. Computer Press, první vydání, 2011, ISBN 978-80-254-8979-6, 294 s.
- [8] Electronic Sensor Technology: Model 4600 – Mobile Ultra-Fast GC Analyzer [online]. <http://www.estcal.com/spec%20sheets/4600spec.pdf>, 2014, [cit. 2014-03-05].
- [9] Electronic Sensor Technology: Model 7100 – Fast GC Analyzer [online]. <http://www.estcal.com/spec%20sheets/7100spec.pdf>, 2014, [cit. 2014-03-03].
- [10] FBI.gov: IAFIS [online]. http://www.fbi.gov/about-us/cjis/fingerprints_biometrics/iafis/iafis, 2014, [cit. 2013-12-30].
- [11] FLIR Systems Inc.: FLIR Thermal Imaging, Night Vision and Infrared Camera Systems [online]. <http://www.flir.com/CZ/>, 2013, [cit. 2014-04-06].
- [12] GREENSTED, A.: Otsu Thresholding [online]. <http://www.labbookpages.co.uk/software/imgProc/otsuThreshold.html>, 2010, [cit. 2014-05-12].
- [13] HEJTMÁNKOVÁ, D.: Spoofing and anti-spoofing methods for fingerprint sensors [online]. https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/BIO/private/Metody_testovani_zivosti.pdf, 2009, [cit. 2014-02-27].

- [14] Idiap Research Institute: Performance Evaluation [online]. <https://www.idiap.ch/software/bob/docs/releases/last/sphinx/html/TutorialsPerformance.html>, 2013, [cit. 2013-12-28].
- [15] Itseez: About OpenCV [online]. <http://opencv.org/about.html>, 2014, [cit. 2014-05-11].
- [16] JAIN, A. K.; FLYNN, P.; ROSS, A. A.; aj.: *Handbook of Biometrics*. Springer, první vydání, 2004, ISBN 978-0-387-71040-2, 548 s.
- [17] JAIN, A. K.; LI, S. Z.: *Encyclopedia of Biometrics: A - H. Vol. 1*. Springer, první vydání, 2009, ISBN 978-0-387-73004-2, 730 s.
- [18] MACÍAS, M. M.; AGUDO, J. E.; MANSO, A. G.; aj.: A Compact and Low Cost Electronic Nose for Aroma Detection [online]. *Sensors*, ročník 13, č. 5, 2013. URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/5/5528>
- [19] MALÝ, T.: *Biometrické testování živosti založené na elektrických a tepelných vlastnostech*. Diplomová práce, Brno: Vysoké učení technické. Fakulta informačních technologií, 2011.
- [20] MORSE, B. S.: Lecture 4: Thresholding [online]. http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MORSE/threshold.pdf, 2000, [cit. 2014-05-13].
- [21] OpenCV dev team: Structural Analysis and Shape Descriptors [online]. http://docs.opencv.org/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html, 2014, [cit. 2014-05-01].
- [22] RAK, R.; MATYÁŠ, V.; ŘÍHA, Z.; aj.: *Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích*. Grada Publishing, první vydání, 2008, ISBN 978-80-247-2365-5, 631 s.
- [23] Redbay.ru: Imager FLIR ThermoCAM E300 [online]. [http://www.redbay.ru/product/teplovizor-flir-thermacam-e300-/,](http://www.redbay.ru/product/teplovizor-flir-thermacam-e300-/) 2014, [cit. 2014-04-08].
- [24] REID, P.: *Biometrics for Network Security*. Prentice Hall PTR, první vydání, 2003, ISBN 0-13-101549-4, 288 s.
- [25] Sensigent – Intelligent Sensing Solutions: Cyranose®320 [online]. <http://www.sensigent.com/products/C320%20Datasheet.pdf>, 2014, [cit. 2014-03-03].
- [26] Termokamera.cz: Termokamera - princip a funkce [online]. <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/>, 2014, [cit. 2014-04-06].
- [27] Termokamera.cz: Termokamera - princip a funkce [online]. <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>, 2014, [cit. 2014-04-06].
- [28] WAYMAN, J.; JAIN, A. K.; MALTONI, D.; aj.: *Biometric Systems – Technology, Design and Performance Evaluation*. Springer, první vydání, 2005, ISBN 1-85233-596-3, 370 s.

Dodatek A

Obsah CD

- Zdrojový kód bakalářské práce (.tex) a elektronická verze ve formátu PDF
- Program pro určování živosti
- Uživatelský návod k programu
- Databáze snímků

Dodatek B

Výsledky experimentů

B.1 Živé prsty

Snímek	A/R	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt6	Průměr	Max	Min
IR_0010.jpg	R	30,01	30,86	31,24	31,58	30,20	30,29	29,54	32,36	27,16
IR_0011.jpg	R	29,32	30,23	30,95	31,99	29,70	28,98	29,32	32,55	27,16
IR_0013.jpg	A	32,90	33,90	34,06	34,00	33,15	32,27	31,27	34,62	27,16
IR_0014.jpg	A	32,77	34,03	34,03	33,96	33,24	32,05	31,30	34,62	27,16
IR_0015.jpg	A	30,80	31,17	31,80	33,81	31,86	30,23	30,76	34,81	27,16
IR_0016.jpg	A	27,16	28,51	30,83	33,24	31,93	27,13	31,02	34,91	27,16
IR_0026.jpg	A	31,61	32,96	32,87	33,37	31,20	32,27	30,67	33,96	27,16
IR_0027.jpg	A	31,45	32,68	33,02	33,31	31,17	32,27	30,73	33,96	27,16
IR_0029.jpg	A	31,45	32,27	32,36	32,99	32,43	30,70	30,80	33,78	27,16
IR_0031.jpg	R	30,17	30,70	31,24	31,74	31,67	28,91	30,29	32,36	27,16
IR_0033.jpg	A	31,24	31,55	32,21	33,21	33,15	29,23	31,02	33,68	27,16
IR_0034.jpg	A	31,89	32,62	32,36	32,49	31,11	32,96	30,61	33,49	27,16
IR_0036.jpg	R	33,02	33,12	32,62	32,43	32,52	32,84	30,61	33,40	27,16
IR_0037.jpg	R	32,55	33,78	33,18	32,84	32,55	32,55	30,55	33,96	27,16
IR_0038.jpg	A	31,39	32,18	32,49	32,40	30,76	30,92	30,20	32,84	27,16
IR_0039.jpg	R	30,48	31,33	31,89	31,83	31,02	29,95	29,98	32,27	27,16
IR_0040.jpg	R	31,27	31,99	32,18	31,99	30,67	30,58	30,14	32,36	27,16
IR_0041.jpg	R	29,10	29,60	29,76	29,98	29,60	28,85	29,01	30,86	27,16
IR_0042.jpg	R	29,70	30,17	30,70	30,95	30,36	29,29	29,42	31,80	27,16
IR_0044.jpg	A	32,43	32,99	32,80	32,27	33,12	31,49	30,70	33,49	27,16
IR_0045.jpg	A	32,46	32,68	32,74	32,36	31,96	31,49	30,55	33,02	27,16
IR_0046.jpg	A	32,11	32,52	32,46	32,21	31,96	31,77	30,39	32,65	27,16
IR_0047.jpg	A	32,36	32,96	33,02	32,74	31,74	32,24	30,80	33,21	27,16
IR_0056.jpg	R	30,61	31,58	31,55	31,67	31,30	30,23	29,67	32,08	27,16
IR_0057.jpg	A	31,89	33,62	33,90	34,03	31,42	33,15	31,05	34,06	27,16
IR_0058.jpg	A	33,09	34,09	34,03	33,87	32,27	33,12	31,20	34,15	27,16
IR_0059.jpg	A	32,96	34,09	33,93	33,87	33,18	32,36	31,08	34,44	27,16
IR_0060.jpg	A	32,87	34,06	34,09	34,03	33,15	32,58	31,02	34,44	27,16
IR_0061.jpg	A	32,52	33,53	33,53	33,81	32,08	32,24	30,86	34,25	27,16
IR_0062.jpg	A	32,65	33,46	33,34	33,62	32,11	32,08	30,89	33,96	27,16
IR_0064.jpg	A	32,84	34,47	34,31	34,03	32,11	33,24	31,30	34,62	27,16
IR_0065.jpg	A	32,30	33,68	33,71	33,93	31,80	32,80	31,02	34,53	27,16
IR_0066.jpg	A	30,86	32,11	33,68	34,75	32,11	30,14	31,20	34,91	27,16
IR_0067.jpg	A	31,11	32,33	34,09	34,91	32,58	30,61	31,52	34,91	27,16
IR_0068.jpg	A	31,17	32,18	33,87	34,65	32,11	30,58	31,14	34,91	27,16

Snímek	A/R	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt6	Průměr	Max	Min
IR_0069.jpg	A	31,33	32,08	33,18	34,44	31,74	30,64	30,92	34,91	27,16
IR_0070.jpg	A	31,71	32,40	33,81	34,53	31,77	30,95	31,05	34,91	27,16
IR_0071.jpg	A	31,14	32,05	34,03	34,97	32,43	30,33	31,27	34,91	27,16
IR_0072.jpg	A	30,48	31,80	33,12	34,87	32,15	30,14	30,73	34,91	27,16
IR_0074.jpg	A	30,86	32,90	32,93	33,21	30,86	31,99	30,67	34,06	27,16
IR_0075.jpg	A	30,95	32,84	32,80	33,15	30,89	31,86	30,55	33,96	27,16
IR_0082.jpg	A	30,67	31,42	32,77	34,03	30,39	29,98	30,61	34,53	27,16
IR_0085.jpg	A	31,49	31,89	31,64	32,15	31,27	31,71	30,42	33,40	27,16
IR_0087.jpg	R	31,33	31,49	31,55	31,49	31,52	30,67	30,04	31,80	27,16
IR_0088.jpg	A	32,24	32,62	32,55	32,05	32,02	31,55	30,29	32,74	27,16
IR_0089.jpg	R	32,24	32,55	32,33	32,24	32,18	31,89	30,29	32,84	27,16
IR_0090.jpg	A	32,74	33,27	33,27	33,34	32,24	32,21	30,70	33,49	27,16
IR_0091.jpg	A	31,67	33,21	33,34	33,18	32,74	31,45	30,55	33,49	27,16
IR_0099.jpg	A	31,27	31,99	31,99	32,05	31,39	30,89	29,95	32,46	27,16
IR_0100.jpg	A	31,11	31,89	31,83	27,00	30,73	31,24	29,82	32,65	27,16
IR_0102.jpg	R	30,70	31,24	31,52	31,64	30,20	31,67	29,92	32,65	27,16
IR_0104.jpg	A	33,27	33,62	33,75	33,84	33,59	32,84	31,11	34,15	27,16
IR_0105.jpg	A	32,84	33,43	33,59	34,00	33,27	32,62	31,17	34,34	27,16
IR_0106.jpg	A	32,74	33,49	33,65	34,12	33,24	32,27	31,24	34,44	27,16
IR_0107.jpg	A	33,49	34,34	34,18	34,31	33,09	33,43	31,52	34,62	27,16
IR_0108.jpg	A	32,24	34,06	33,96	34,09	33,71	31,96	31,11	34,53	27,16
IR_0109.jpg	A	34,12	34,97	34,69	34,97	34,03	33,59	31,61	34,91	27,16
IR_0110.jpg	A	33,53	34,78	34,69	34,84	33,27	33,21	31,30	34,91	27,16
IR_0111.jpg	A	31,58	32,24	32,24	31,86	31,58	31,36	29,95	32,46	27,16
IR_0112.jpg	R	31,30	32,24	32,15	31,74	31,08	31,33	29,85	32,46	27,16
IR_0120.jpg	A	33,15	33,93	33,93	34,12	33,46	32,65	31,39	34,53	27,16
IR_0121.jpg	A	33,34	34,03	34,06	34,28	33,65	32,62	31,49	34,53	27,16
IR_0122.jpg	A	31,64	33,96	34,34	34,37	33,93	31,36	31,55	34,91	27,16
IR_0123.jpg	A	32,96	34,40	34,53	34,56	33,43	32,62	31,45	34,91	27,16
IR_0130.jpg	R	31,02	30,80	30,33	30,20	30,89	30,92	29,48	31,42	27,16
IR_0131.jpg	R	30,48	30,04	30,55	30,70	29,89	30,33	29,64	31,99	27,16
IR_0132.jpg	A	31,86	32,74	33,68	33,53	31,55	32,15	31,08	33,96	27,16
IR_0133.jpg	A	31,86	32,58	32,93	32,46	32,08	31,80	30,67	33,02	27,16
IR_0136.jpg	A	31,93	32,40	32,40	32,30	31,14	31,99	30,26	32,74	27,16
IR_0158.jpg	A	33,78	34,18	34,31	34,25	34,22	33,56	31,49	34,62	27,16
IR_0159.jpg	A	33,09	34,15	34,00	33,65	33,09	33,78	31,14	34,34	27,16
IR_0165.jpg	A	33,02	33,53	33,40	33,15	33,02	32,62	30,92	33,68	27,16
IR_0166.jpg	A	32,33	33,31	33,59	33,31	33,15	31,86	30,92	33,87	27,16
IR_0167.jpg	A	32,77	33,05	32,99	32,74	32,99	31,77	30,48	33,59	27,16
IR_0168.jpg	A	33,53	34,31	33,68	33,56	34,50	34,00	31,45	34,72	27,16
IR_0169.jpg	A	33,71	33,93	33,65	33,37	34,47	33,78	31,39	34,81	27,16
IR_0170.jpg	A	33,87	33,84	33,49	33,49	33,53	33,93	31,30	34,53	27,16
IR_0171.jpg	A	33,46	34,18	33,68	33,40	33,75	34,31	31,20	34,53	27,16
IR_0172.jpg	A	32,80	33,78	33,56	33,27	33,71	32,58	30,86	34,15	27,16
IR_0173.jpg	A	32,71	34,00	33,62	33,53	32,74	33,53	30,89	34,25	27,16
IR_0175.jpg	A	32,43	33,31	33,31	32,87	32,36	32,68	30,51	33,59	27,16
IR_0176.jpg	A	32,52	34,06	34,00	33,43	32,87	33,34	30,61	34,25	27,16
IR_0177.jpg	R	31,45	33,24	33,59	33,62	32,02	31,86	30,17	33,96	27,16
IR_0178.jpg	R	32,49	33,93	32,71	32,36	32,90	33,56	30,33	34,34	27,16
IR_0179.jpg	R	32,90	33,49	32,36	32,36	33,02	33,12	30,33	34,06	27,16
IR_0180.jpg	A	32,43	33,12	32,87	32,49	31,86	33,31	30,48	33,78	27,16
IR_0181.jpg	R	32,52	33,15	32,15	31,93	32,71	32,99	30,23	33,68	27,16
IR_0182.jpg	R	31,36	32,11	31,14	30,89	32,18	31,89	29,73	32,65	27,16

B.2 Neživé prsty

Snímek	A/R	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt6	Průměr	Max	Min
Otisky z gumy										
IR_0024.jpg	A	30,01	30,61	30,73	31,30	30,42	28,73	30,23	33,02	27,16
IR_0025.jpg	R	29,85	31,02	31,30	31,96	30,67	30,45	30,64	33,31	27,16
IR_0028.jpg	R	29,79	30,73	31,27	31,86	29,73	29,92	29,76	32,46	27,16
IR_0030.jpg	R	30,20	31,55	31,45	30,92	29,51	31,11	29,85	31,61	27,16
IR_0032.jpg	R	29,13	30,29	32,30	33,02	32,49	27,75	30,76	33,49	27,16
IR_0035.jpg	R	31,55	31,52	31,64	32,36	30,17	32,58	30,55	32,93	27,16
IR_0083.jpg	R	30,26	31,49	32,68	33,68	29,85	30,89	30,61	34,44	27,16
IR_0086.jpg	R	30,89	31,74	31,45	31,83	31,11	31,08	30,07	33,12	27,16
IR_0113.jpg	R	31,14	31,80	31,74	31,55	30,58	30,98	29,73	31,99	27,16
IR_0114.jpg	R	30,61	31,52	31,36	31,55	30,14	31,30	29,82	32,18	27,16
IR_0124.jpg	R	29,95	30,95	30,92	30,89	30,58	30,92	30,04	31,42	27,16
IR_0125.jpg	R	30,04	31,14	31,05	31,11	30,64	30,70	29,89	31,61	27,16
IR_0126.jpg	R	29,98	31,17	31,02	30,92	30,51	30,86	29,85	31,33	27,16
Otisky ze silikonu										
IR_0020.jpg	A	31,11	31,58	32,65	33,34	31,83	30,61	30,67	33,68	27,16
IR_0021.jpg	A	31,11	31,30	32,55	33,87	31,96	30,95	30,80	34,25	27,16
IR_0022.jpg	A	32,02	32,74	33,43	33,84	32,90	32,21	31,39	34,15	27,16
IR_0023.jpg	A	31,74	32,65	33,37	33,75	32,77	31,99	31,36	34,06	27,16
IR_0078.jpg	R	30,92	32,55	32,21	32,05	31,27	31,36	30,23	33,31	27,16
IR_0081.jpg	R	31,05	32,74	32,46	32,65	31,33	31,52	30,55	33,40	27,16
IR_0084.jpg	R	30,73	31,74	32,84	33,90	30,42	30,70	30,51	34,44	27,16
IR_0115.jpg	R	30,89	32,30	32,77	32,93	31,20	30,95	30,23	33,21	27,16
IR_0117.jpg	R	30,92	32,15	32,68	32,74	30,80	30,95	30,17	32,93	27,16
IR_0118.jpg	R	31,27	32,33	32,80	32,96	31,02	30,95	30,23	33,12	27,16
IR_0127.jpg	R	30,14	31,42	31,83	32,15	30,95	30,42	30,23	32,36	27,16
IR_0128.jpg	R	30,04	31,30	31,89	32,30	30,89	30,70	30,36	32,46	27,16
IR_0129.jpg	R	29,92	31,49	31,93	32,43	31,17	30,80	30,39	32,55	27,16
Otisky z latexu										
IR_0073.jpg	R	30,67	32,71	33,12	33,75	30,73	32,65	30,64	34,15	27,16
IR_0079.jpg	R	28,98	29,76	29,98	30,42	29,48	29,04	28,91	30,67	27,16
IR_0080.jpg	R	28,79	29,76	29,95	30,23	29,35	28,85	28,85	30,76	27,16
IR_0048.jpg	R	30,64	31,74	31,71	31,83	31,05	30,86	29,85	32,65	27,16
IR_0049.jpg	R	31,02	32,40	32,40	32,62	31,27	31,83	30,04	32,93	27,16
IR_0050.jpg	R	30,67	31,52	31,30	31,74	30,95	30,11	29,79	32,65	27,16
IR_0053.jpg	R	31,27	32,77	32,30	31,33	31,02	32,49	29,82	33,02	27,16
IR_0055.jpg	R	30,89	31,96	31,83	31,30	31,20	30,89	29,64	31,99	27,16
IR_0092.jpg	R	30,55	30,89	31,20	31,58	30,36	29,92	29,73	32,08	27,16
IR_0094.jpg	R	30,04	30,67	31,11	31,11	29,42	30,11	29,45	31,61	27,16
IR_0095.jpg	R	30,04	30,67	30,98	30,89	29,48	29,82	29,51	31,33	27,16
IR_0096.jpg	R	30,64	31,11	31,39	31,67	30,20	30,42	29,64	31,99	27,16
IR_0097.jpg	R	30,92	31,39	31,80	31,99	30,23	30,86	29,85	32,08	27,16
IR_0098.jpg	R	31,05	31,64	31,80	32,02	30,51	30,86	29,85	32,18	27,16
Otisky z papíru										
IR_0101.jpg	R	30,29	31,67	32,02	32,05	31,05	31,14	29,70	32,18	27,16
IR_0103.jpg	R	31,02	32,46	32,65	32,36	31,45	31,64	30,07	32,74	27,16
IR_0134.jpg	R	31,02	31,17	31,36	31,14	30,61	30,58	29,57	31,80	27,16
IR_0135.jpg	R	31,64	31,71	31,74	31,30	31,27	31,30	29,82	31,99	27,16
IR_0137.jpg	R	31,36	32,43	32,27	31,86	31,55	31,93	29,95	32,65	27,16
IR_0139.jpg	R	30,61	30,98	31,05	30,89	30,11	30,42	29,45	31,33	27,16
IR_0141.jpg	R	29,95	30,83	30,92	31,27	30,70	30,01	29,57	31,52	27,16

Snímek	A/R	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt6	Průměr	Max	Min
IR_0142.jpg	R	30,89	31,71	31,83	27,94	31,30	30,64	29,82	32,08	27,16
IR_0161.jpg	R	31,49	33,02	32,15	31,93	32,36	32,58	30,58	33,31	27,16
IR_0164.jpg	R	31,55	31,58	31,99	32,80	31,71	31,33	30,51	33,12	27,16
IR_0174.jpg	R	31,05	32,52	32,36	32,46	30,76	32,02	30,20	33,21	27,16
Prsty v gumových rukavicích										
IR_0155.jpg	R	29,54	30,14	30,42	30,58	29,82	29,42	29,32	31,14	27,16
IR_0156.jpg	R	29,95	30,33	30,36	30,23	30,01	30,20	29,16	30,58	27,16
IR_0157.jpg	R	29,54	29,76	29,42	29,48	29,98	29,60	28,69	30,29	27,16

B.3 Předměty imitující prsty

Snímek	A/R	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt6	Průměr	Max	Min
Zapalovač										
IR_0145.jpg	A	32,30	33,24	33,75	33,81	33,24	32,30	30,86	34,25	27,16
Zvýrazňovací fix										
IR_0144.jpg	R	28,66	29,07	29,29	29,45	28,82	28,79	28,79	30,86	27,16
IR_0146.jpg	R	31,33	32,84	33,21	33,56	32,11	32,05	30,48	33,59	27,16
IR_0147.jpg	R	30,76	32,24	32,55	32,68	31,36	31,71	30,14	32,84	27,16
Posuvné měřítko										
IR_0148.jpg	R	29,67	30,33	29,42	28,82	30,26	30,45	28,63	31,14	27,16
Vařečka										
IR_0149.jpg	R	28,69	29,54	29,73	29,98	28,79	29,54	28,98	30,95	27,16
IR_0150.jpg	R	28,60	28,98	29,20	29,38	28,73	28,57	28,60	30,11	27,16
Lžice										
IR_0151.jpg	R	28,60	28,88	29,13	30,83	28,44	28,66	28,35	31,80	27,16
Špička deštníku										
IR_0152.jpg	R	30,67	31,93	33,49	34,00	30,86	30,83	30,64	34,15	27,16
Plastové ramínko na šaty										
IR_0153.jpg	R	28,60	28,98	29,16	29,64	28,66	28,51	28,66	30,01	27,16