



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole**

**Automatické odečítání antropometrických rozměrů
z obrázku**

**Automatic Extraction of Antropometrical Features
from Images**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Komunikační technika

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

**Aida Madelkhanova
Praha 2017**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Madelkhanova** Jméno: **Aida** Osobní číslo: **434977**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Komunikační technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Automatické odečítání antropometrických rozměrů z obrázku

Název bakalářské práce anglicky:

Automatic Extraction of Antropometrical Features from Images

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s metodami detekce a určování rozměrů objektů v obraze. Navrhněte metodu odečítání antropometrických parametrů ovlivňujících HRTF (Head Related Transfer Function) z fotografií. Navrženou metodu implementujte (např. Matlab) a experimentálně ověřte.

Seznam doporučené literatury:

[1] Dyussekenova, S.: Modelování HRTF. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra radioelektroniky.
[2] Prakash, S; Gupta, P.: Ear Biometrics in 2D and 3D. Localization and Recognition. Singapore:Springer, 2015, pp. 21-49. ISBN 978-981-287-374-3

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Stanislav Vitek Ph.D., 13137

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **25.05.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Abstrakt

Cílem práce je návrh, realizace a testování systému automatického odečítání antropometrických parametrů ovlivňujících HRTF (Head-related transfer function) z fotografií. Teoretická část se věnuje studiu stávajících měřicích metod. Popisuje postupy předzpracování obrazů, způsoby extrakce obrazových příznakových bodů. Implementace systému v Matlabu a analýza výsledků testování algoritmu tvoří praktickou část.

Klíčová slova

Extrakce příznaků, počítačové vidění, detekce, rozpoznání, segmentace, antropometrie.

Abstract

The aim of this thesis is design, realization and testing the system of automatic antropometrical feature extraction influencing HRTF (Head-related transfer function) from images. The theoretical part is devoted to the study of existing measuring methods. Describes image pre-processing techniques, how to extract image features. Implementation of the system in Matlab and analysis of test results form the practical part of the thesis.

Key words

Feature extraction, computer vision, detection, recognition, segmentation, anthropometry.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Antropometrie	3
3	Počítačové vidění	5
3.1	Automatické měření antropometrických parametrů.....	5
3.1.1	2D metody.....	5
3.1.2	Rekonstrukce 3D scény.....	9
3.2	Obrazové příznaky	11
3.2.1	Detekce významných bodů	11
3.2.2	Detekce hran	12
3.2.3	Houghova transformace	12
3.3	Rozpoznávání objektů v obraze	14
3.3.1	Detektor objektů v obraze Viola-Jones	14
4	Návrh automatického měřicího systému.....	17
4.1	Vliv kamery na přesnost měření	17
4.1.1	Snímání obrazu	17
4.1.2	Kalibrace kamery	18
4.1.3	Převod do skutečných měřítek	20
4.2	Předzpracování obrazu.....	21
4.2.1	Detekce ušního boltce	22
4.2.2	Hranová detekce.....	23
4.2.3	Identifikace geometrických tvarů.....	25
4.3	Automatická lokalizace orientačních bodů.....	26
4.3.1	Parametry hlavy a torza.....	27
4.3.2	Extrakce antropometrických parametrů ucha.....	29
4.4	Implementace.....	31
5	Výsledky měření	33
6	Závěr	35
	Zdroje.....	36
	Příloha A Výsledky testování algoritmu.....	38
	Příloha B Obsah přiloženého CD.....	41

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Výsledky měření antropometrických rozměrů. Převzato a přeloženo z [2]	7
Tabulka 3.2: Výsledky měření. Převzato a přeloženo z [8].....	9
Tabulka 3.3: Výsledky antropometrických měření manekýna. Převzato a přeloženo z [10]	10
Tabulka 3.4: Výsledky antropometrických měření člověka. Převzato a přeloženo z [10]	11
Tabulka 5.1. Obvodové rozměry	33
Tabulka 5.2. Antropometrické rozměry ušního boltce	34

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Antropometrické rozměry hlavy a torso [4]	3
Obrázek 2.2: Antropometrické rozměry ušního boltce [4]	4
Obrázek 3.1: Blokové schéma obrazového systému [6]	6
Obrázek 3.2: Aproximace tvaru (a) krku (b) hrudníku [6].....	6
Obrázek 3.3: Osm případů směrů segmentů čáry [8].....	8
Obrázek 3.4: Výsledky extrakce orientačních bodů [8].....	8
Obrázek 3.5: (a) Vzorová mřížka v ImageTwin skeneru (b) 3D skener Cyberware (c) Skenovací kabina SYMCAD [9]	9
Obrázek 3.6: (a) konfigurace systému (b) pozice kamer (c) obklopující válec [10].....	10
Obrázek 3.7: Reprezentace přímky v prostoru (x,y) [13]	13
Obrázek 3.8: Základní sada Haarových filtrů [16].....	15
Obrázek 4.1: Pózy	17
Obrázek 4.2: Model pin hole kamery [18].....	18
Obrázek 4.3: (a) chyby reprojekce (b) rekonstrukce 3D scény	20
Obrázek 4.4: Zorné pole	21
Obrázek 4.5: Detekce ušního boltce v obraze.....	22
Obrázek 4.6: Barevné rozdělení HSV modelu	23
Obrázek 4.7: Aditivní míchání barev	23
Obrázek 4.8: Detekce obrysů těla	24
Obrázek 4.9: Segmentace obrazu ušního boltce	25
Obrázek 4.10: Aplikace Houghovy transformace: (a) lokalizace ramen (b) identifikace ušního boltce.....	25
Obrázek 4.11: (a) (b) Automaticky detekované extrémní body siluety [21]	26
Obrázek 4.12: Aproximace tvaru: (a) elipsa (b) kružnice.....	27
Obrázek 4.13: Identifikované antropometrické parametry hlavy a torso	28
Obrázek 4.14: Identifikace rozměrů ušního boltce: (a) šířka ušního boltce (b) uhel natočení.....	29
Obrázek 4.15: (a) detekce významných bodů (b) postup lokalizace orientačních bodů (c) identifikované rozměry	30
Obrázek 4.16: Nedetekované parametry ušního boltce [4].....	30
Obrázek 4.17: Uživatelské prostředí.....	31

1 Úvod

Antropometrie je obor zabývající se srovnávacími měřeními lidského těla a jeho částí. Antropometrie hraje důležitou roli v lékařství, kriminalistice, sportu, výrobě oblečení a techniky. Tradiční přístup měření antropometrických parametrů člověka používající měřicí pásky a posuvná měřítka je časově náročný a často není přesný. S rozvojem počítačového vidění vznikají různé automatizované metody obdržení antropometrických rozměrů. V posledních letech značně rozrostl zájem o 2D a 3D počítačové systémy, používající automatickou extrakci obrazových příznaků. Extrakce příznakových bodů se uplatňuje v mnoha oborech, jako jsou 3D rekonstrukce lidského těla, bezkontaktní měření rozměrů objektů, segmentace a detekce části těla a rozpoznání lidských činů.

Provádí se aktivní výzkum metod schopných nahradit ruční měření. V [1], [2] jsou reprezentovány systémy extrakce rozměrů objektu z 2D obrazů. Existují metody měřící rozměry 3D modelu lidského těla, rekonstruovaného z 2D snímků člověka. Většina navržených přístupů se zaměřuje na zjištění rozměrů potřebných pro výrobu oblečení.

Antropometrická měření se dnes používají v širokém spektru vědeckých a technických oborů. V akustice antropometrické rozměry ucha, hlavy a torza jsou používány pro získání HRTF. HRTF (Head-related transfer function) přenosová funkce vztažená k hlavě popisuje, jak ucho přijímá zvuk z určitého bodu v prostoru. HRTF je individuální pro každý subjekt, takže její přímé měření je velmi pracné. Kvůli složitosti měření HRTF se vyvíjejí jiné metody získání této funkce ([3]), které nevyžadují tolik úsilí.

Cílem práce je návrh, realizace a testování systému automatického odečítání antropometrických parametrů ušního boltce, hlavy a torza za účelem HRTF syntézy.

V následující, druhé kapitole jsou definovány antropometrické rozměry, které ovlivňují HRTF. Cílem výsledného programu je detekce a odečítání těchto rozměrů z obrazu.

Třetí kapitola se věnuje studiu stávajících měřicích systémů. Shrnuje jejich výhody a nevýhody a zkoumá použité postupy.

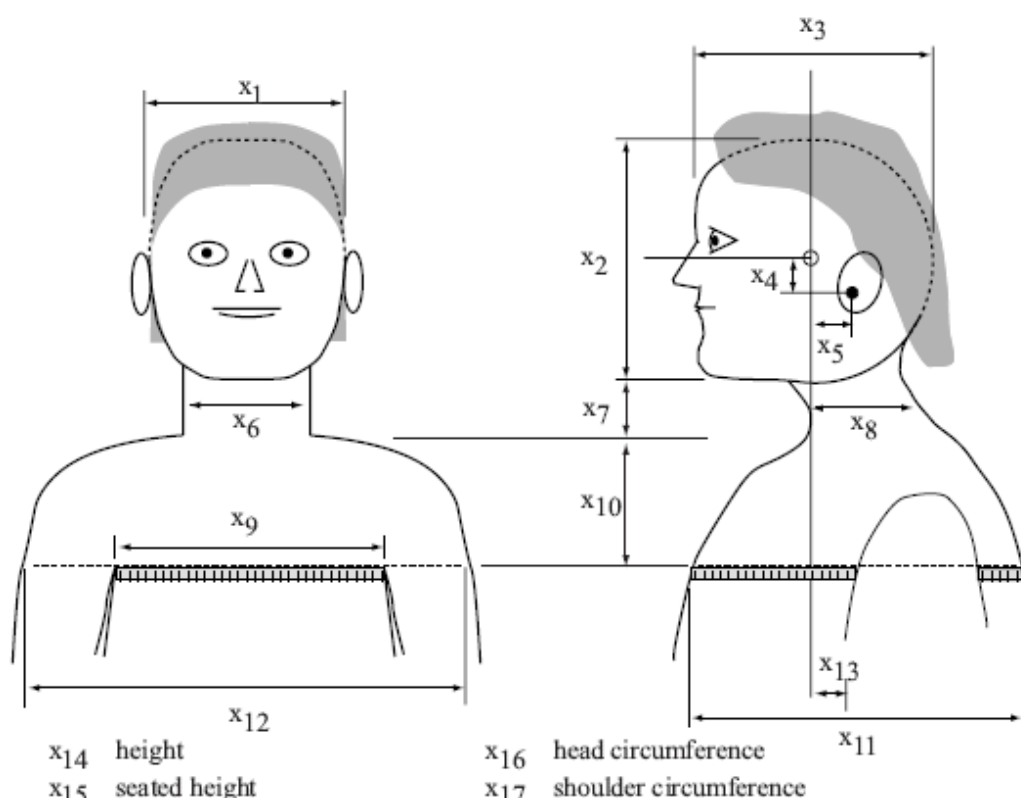
Čtvrtá kapitola se zabývá popisem navrhovaného systému. Uvádí postup předzpracování obrazu a přístupy detekce všech potřebných parametrů.

V páté kapitole jsou reprezentovány výsledky testování navrženého měřicího systému.

2 Antropometrie

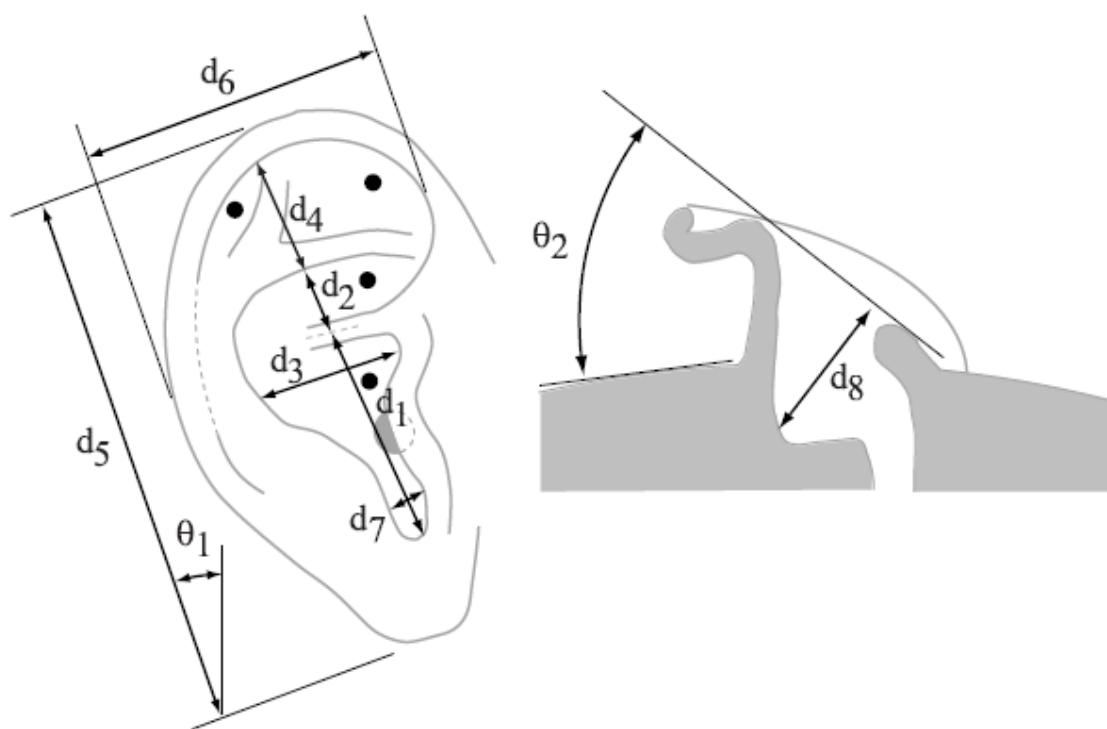
Antropometrie je obor zabývající se srovnávacími měřeními lidského těla a jeho částí. Zaměřuje se na měření tělesných znaků, jako je tvar těla a tělesné složení. Antropometrická měření se dnes používají v širokém spektru vědeckých a technických oborů.

Pro HRTF syntézu byla definována sada 27 antropometrických měření: 17 pro hlavu a torso a 10 pro ušní boltec. Antropometrické parametry, které byly zvolené, mají významný vliv na HRTF a jsou spolehlivě a rozumně snadno měřitelné [4].



Obrázek 2.1: Antropometrické rozměry hlavy a trupu [4]

- | | |
|--|---|
| x ₁ šířka hlavy | x ₁₀ výška horní části trupu |
| x ₂ výška hlavy | x ₁₁ hloubka horní části trupu |
| x ₃ hloubka hlava | x ₁₂ šířka ramen |
| x ₄ ušní boltec - posunutí dolů | x ₁₃ zarovnění hlavy |
| x ₅ ušní boltec - posunutí zpět | x ₁₄ výška |
| x ₆ šířka krku | x ₁₅ výška v sezení |
| x ₇ výška krku | x ₁₆ obvod hlavy |
| x ₈ hloubka krku | x ₁₇ obvod ramen |
| x ₉ šířka horní části trupu | |



Obrázek 2.2: Antropometrické rozměry ušního boltce [4]

- d_1 cavum concha - výška
- d_2 cymba concha - výška
- d_3 cavum concha - šířka
- d_4 výška fossa
- d_5 výška ušního boltce
- d_6 šířka ušního boltce
- d_7 intertragal šířka incisure
- d_8 cavum concha - hloubka
- θ_1 ušní boltce - úhel natočení
- θ_2 ušní boltce - úhel

3 Počítačové vidění

Počítačové vidění spočívá v analýze videa nebo obrazu. Snahou je porozumění jejich obsahu počítačovým zpracováním. Informace se získává přímo z obrazových dat. Využívá se zejména k rozpoznávání objektů ze zachyceného obrazu. K dalším úlohám počítačového vidění patří: sledování objektu, interpretace obrazu, zjišťování pozice objektů popř. kamery a rekonstrukce 3D scény. Počítačové vidění se používá v medicíně, průmyslu, armádě, strojovém vidění apod.

Organizace systému počítačového vidění je vysoce závislá na aplikaci. Některé systémy jsou samostatné aplikace, které řeší konkrétní problém měření nebo detekce, zatímco jiné představují dílčí část většího systému, který například obsahuje subsystémy pro ovládání mechanických pohonů, plánování, informační databáze apod. Existují však typické funkce, které se používají v mnoha systémech počítačového vidění: pořízení snímku, předzpracování a segmentace obrazu, extrakce obrazových příznaků, klasifikace objektů [5].

Jednou z možných aplikací počítačového vidění je měření v rovině, tj. měření rozměrů, polohy, orientace. Počítačové vidění umožňuje automatickou extrakci rozměrů objektu z fotografie.

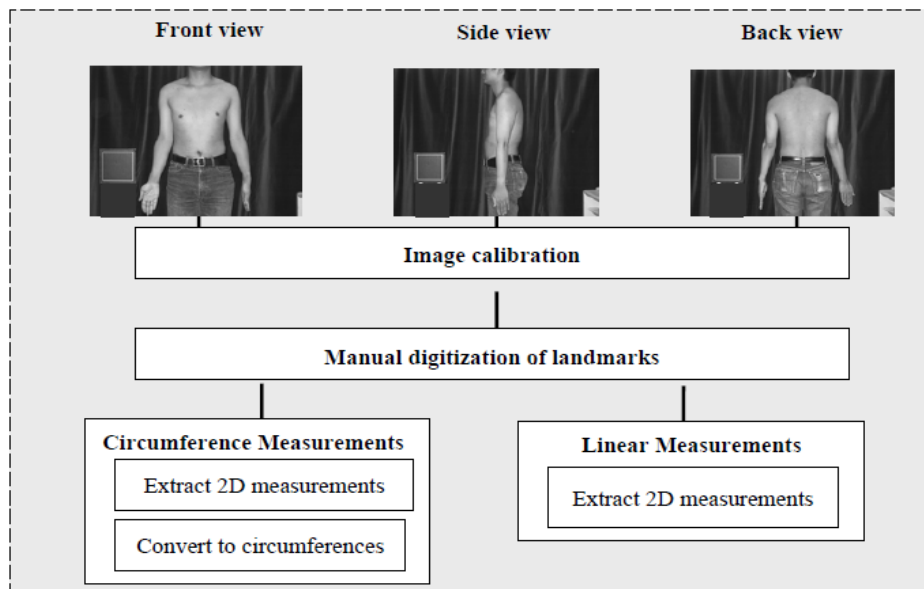
3.1 Automatické měření antropometrických parametrů

V posledních letech se provádí aktivní výzkum metod bezkontaktního měření antropometrických parametrů. Jedním z přístupů automatické extrakce rozměrů jsou počítačová měření založená na analýze obrazu. Zpracováním obrazu a geometrickou transformací mohou být antropometrické parametry získány přímo z pořízených 2D snímků člověka. Podobné nástroje se používají i při extrakci dat z videozáznamů. Obrazová měření mohou být rozdělena do dvou typů: 2D měření, při kterých antropometrické parametry jsou extrahovány z dvojrozměrných obrazů osoby, a měření 3D modelu těla člověka, rekonstruovaného ze 2D snímků. Popis stávajících měřicích systémů, jejich studie, výhody a nevýhody jsou popsány v následujících částech.

3.1.1 2D metody

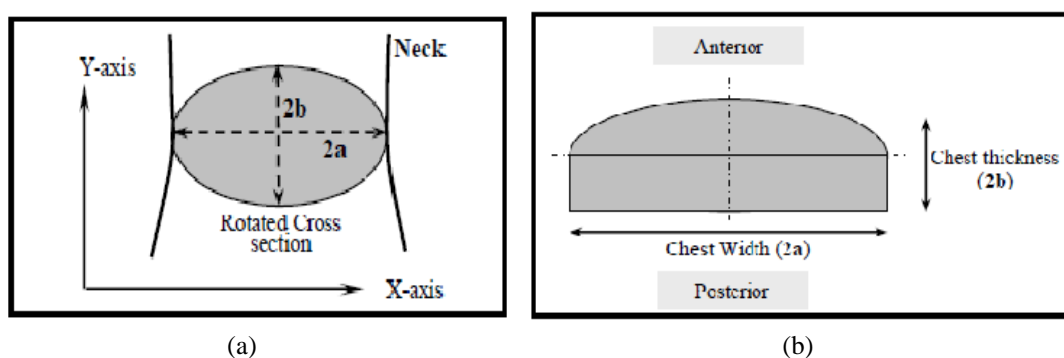
Při návrhu 2D měřicího systému se, za prvé, řeší způsob pořízení snímku. Tam patří výběr kamery a její kalibrace, která je nutná pro transformaci obrazových (v pixelech) souřadnic do skutečných. Pro extrakci většího počtu parametrů se objekt zachytí s různých pohledů. Po obdržení obrazů se provádí jejich analýza. V prvním kroku je třeba detekovat siluetu objektu v obraze. Na to se používají různé nástroje, jako jsou detekce hran a odečítání obrazu pozadí. Druhým krokem je extrakce orientačních obrazových bodů.

V [6] je popsán měřicí systém schopný transformovat 2D rozměry na lineární a obvodové antropometrické rozměry. Blokové schéma systému zahrnuje dvě synchronizované kamery a software pro zpracování obrazu. Pro zachycení čelních, zadních a bočních pohledů osoby byl použit barevný digitální fotoaparát Canon IXUS (1600 × 1200 pixelů). Každý digitální snímek byl zachycen s černou kalibrační plochou 15 cm x 15 cm.



Obrázek 3.1: Blokové schéma obrazového systému [6]

Anatomické orientační body byly vybrány ručně. Obvodové rozměry byly určeny aproximací tvaru příslušné části těla. Například obvod krku byl odhadnut pomocí elipsy (obr.3.2). Délky hlavní a vedlejší osy krku byly získány z čelních a bočních pohledů. Obvod hrudníku byl modelován kombinací obdélníku a elipsy.



Obrázek 3.2: Aproximace tvaru (a) krku (b) hrudníku [6]

Výsledky měření ukazují, že kvalita metody do značné míry závisí na správné identifikaci anatomických orientačních bodů a charakterizaci tvaru těla.

Poloautomatický systém v [7] představuje datový model siluety pro rekonstrukci modelu lidského těla z jedné, nebo více 2D fotografií. Objekt se fotil před modrým plátnem fotoaparátem Nikon Coolpix 5000 s rozlišením 1920×2560 pixelů. Rozlišení bylo sníženo na 480×640 pixelů pro urychlení procesu. Pro přizpůsobení modelu šablony cílovému objektu v obraze se používají 12~15 orientačních bodů siluety. Pouze omezenou sadu rysových bodů lze nalézt automaticky. Zbytek je ručně umísťován uživatelem.

V [2] je navržen systém bezkontaktní extrakce antropometrických rysů založený na analýze digitálních obrazů. Detekce siluety těla člověka se provádí metodou odčítání pozadí. Morfologické operace včetně eroze, dilatace, otevření a zavření jsou prováděny za účelem potlačení šumu a zjemnění obrysu siluety. Tento přístup je kombinován s algoritmem rozpoznání obličeje a detekcí hran. Kolem siluety se generuje konvexní obal, jehož defekty jsou použity pro extrakci antropometrických znaků.

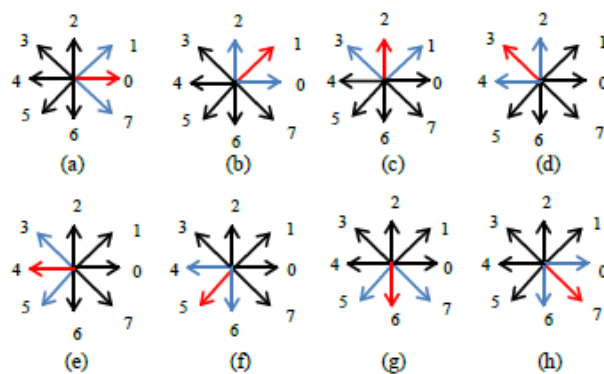
Navržená metoda byla otestována na 50 objektech (25 mužů a 25 žen). V tabulce 3.1 jsou uvedeny automaticky změřené rozměry lidského těla v porovnání s ručně změřenými rozměry.

Tabulka 3.1: Výsledky měření antropometrických rozměrů. Převzato a přeloženo z [2]

Rozměry těla	Ruční metoda	Metoda s konvexním obalem
Obvod hrudníku	87,98 cm	88,12 cm
Obvod pasu	67,95 cm	68,05 cm
Obvod boků	90,52 cm	91,68 cm
Obvod hrudníku	88,64 cm	89,02 cm
Obvod pasu	66,61 cm	67,13 cm
Obvod boků	93,58 cm	94,93 cm
Obvod hrudníku	87,22 cm	88,15 cm
Obvod pasu	67,19 cm	67,96 cm
Obvod boků	89,36 cm	89,01 cm
Obvod hrudníku	88,16 cm	89,46 cm
Obvod pasu	65,64 cm	66,42 cm
Obvod boků	92,17 cm	93,02 cm
Obvod hrudníku	90,96 cm	91,23 cm
Obvod pasu	71,44 cm	70,82 cm
Obvod boků	93,56 cm	94,19 cm
Obvod hrudníku	86,94 cm	87,12 cm
Obvod pasu	67,68 cm	68,12 cm
Obvod boků	85,28 cm	84,56 cm

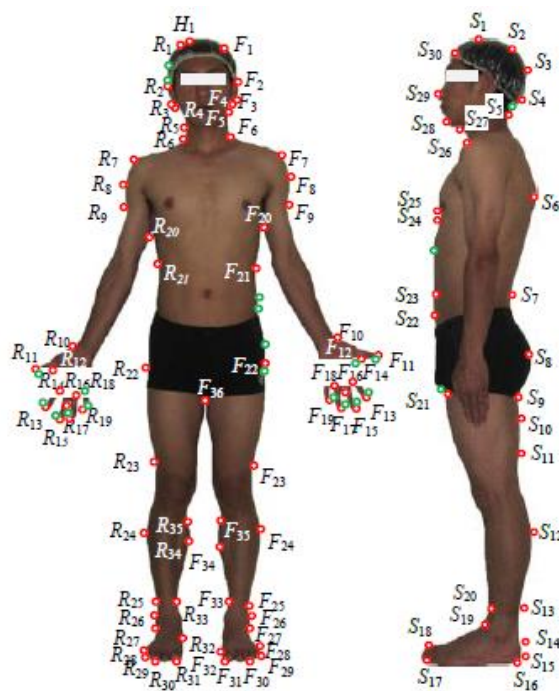
Měření se provádělo pomocí digitální kamery a listu A4 pro kalibraci. Chyby měření jsou většinou způsobeny rozlišením fotoaparátu nebo šumem okolí v blízkosti objektu.

Podobná technika je reprezentována v [8]. Kamera je umístěna ve vzdálenosti 5 m od objektů a ve výšce 1 m nad zemí. Jsou zachyceny čtyři snímky: dva pozadí a dva objektu. V experimentech byla použita kamera Canon SX130 s rozlišením 4000×3000 pixelů a s otevíracím bleskem pro snížení účinků stínění. Po odečtení pozadí a aplikací detektoru hran Canny se obdrží binární obraz siluety lidského těla. K reprezentaci siluetových křivek se používá Freemanův osmispojený řetězový kód. Čísla 0-7 se používají pro znázornění přírůstku o 45° proti směru hodinových ručiček. Navrhovaný algoritmus detekuje všechny odbočné body na siluetě porovnáním řetězových kódů. Odbočný bod s číslem, který se liší od počátečního bodu, lze považovat za rys v siluetové křivce, a uloží se v novém řetězci. Pro nový řetězec jsou body se směrovou změnou o 90° (tj. absolutní směrový rozdíl mezi dvěma body se rovná 2) považovány za znaky představující obrys lidského těla.



Obrázek 3.3: Osm případů směrů segmentů čáry [8]

Navrhovaná metoda byla otestována na deseti subjektech a všech 101 předdefinovaných rysových bodů bylo správně detekováno.



Obrázek 3.4: Výsledky extrakce orientačních bodů [8]

Výsledky testů deseti subjektů sestávajících se z pěti mužů a pěti žen jsou uvedeny v tabulce:

Tabulka 3.2: Výsledky měření. Převzato a přeloženo z [8]

Číslo, pohlaví, věk, výška, váha subjektu	Detekované body	Všechny detekované body
5, muž, 25-27, 172-189 cm, 64-70 kg	Čelo: 117-119 Profil: 31-33	Čelo: 71 Profil: 30
5, žena, 25-27, 155-161 cm, 50-55 kg	Čelo: 112-121 Profil: 31-34	

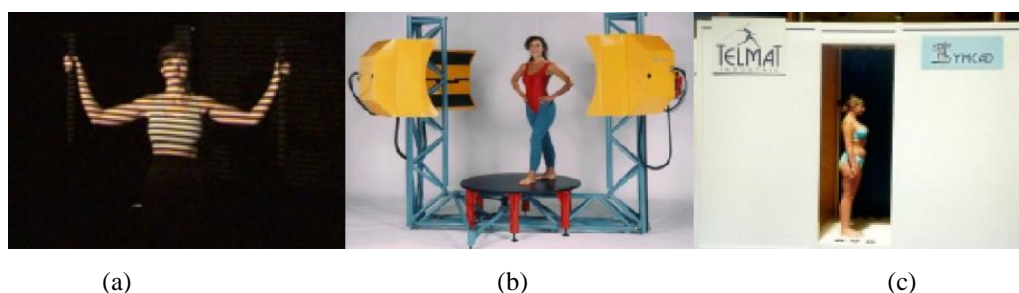
Analýza těchto bodů ukazuje, že tento přístup je spolehlivý a účinný.

3.1.2 Rekonstrukce 3D scény

Všechny 2D metody mají určitou míru přesnosti a spolehlivosti. Je to způsobeno tím, že tělo člověka není ploché a geometrická aproximace vnáší chybu v měření. Proto se vyvíjejí metody 3D rekonstrukci modelu lidského těla z obrazu.

Trojrozměrný model těla můžeme získat nejčastěji dvojitým způsobem, a to rekonstrukcí z 2D obrazu nebo pomocí zařízení, které je schopno zachytit 3D scénu přímo –tzv. 3D skener.

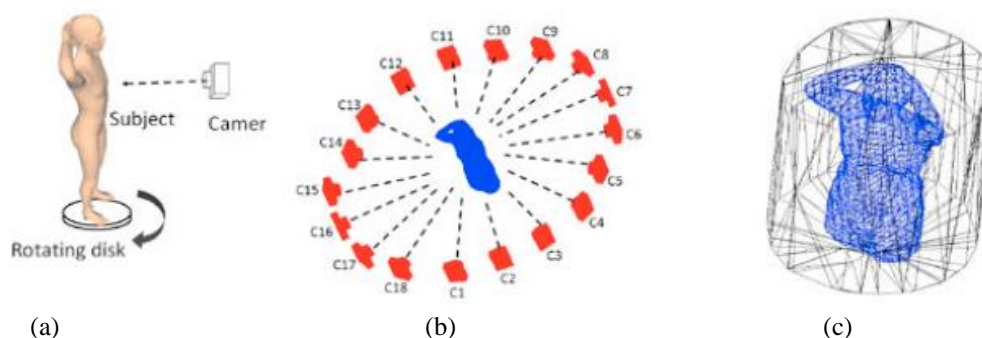
Trojrozměrné skenování těla je schopno zajistit nekonečný počet typů dat. Problém však existuje v odlišnosti technik měření používaných skenery. Značný rozdíl je v tom, jak každý snímač zachycuje konkrétní měření těla. V [9] se uvádí porovnání měřicích technik třech skenerů: ImageTwin, Cyberware, SYMCAD. ImageTwin skener využívá bílé světlo pro promítání dvourozměrné vzorkované mřížky na povrch těla člověka. Systém používá šest senzorů, každý z nich zachycuje plošný segment povrchu těla. Kombinací všech senzorů se vytvoří model lidského těla. Cyberware skener se skládá ze dvou věží s kulatou platformou mezi nimi. Každá věž je opatřena držákem s připojeným motorem, sloužícím k pohybu dvou snímacích hlav. Subjekt stojí na platformě. Skenovací hlavy se posouvají od hlavy subjektu dolů a skenují celé tělo. Skenovací systém SYMCAD se skládá z malého uzavřeného prostoru s osvětlenou stěnou, kamery a počítače. Objekt vstupuje do kabiny a stojí před osvětlenou stěnou. Obdrží se tři různé snímky objektu. Zachycené 3D snímky jsou pak zpracovány a zobrazeny na obrazovce počítače.



Obrázek 3.5: (a) Vzorová mřížka v ImageTwin skeneru (b) 3D skener Cyberware (c) Skenovací kabina SYMCAD [9]

3D skenery umožňují digitalizaci celého povrchu lidského těla a poskytují mnohem bohatší informaci o tvaru těla, než tradiční měření. Přestože práce s trojrozměrné skenery má tu výhodu, že zajišťuje velmi přesné a spolehlivé měření, skenovací zařízení je drahé a není vždy k dispozici. Navíc shromážděná data stále potřebují komplikovanou analýzu.

Dalším způsobem je rekonstrukce modelu lidského těla z 2D snímků. V [10] je popsán systém 3D rekonstrukce povrchu lidského těla. Navržený systém se skládá ze dvou hlavních složek: digitální fotoaparát s vysokým rozlišením a rotující disk. Obrázek 3.6(a) ukazuje náčrt konfigurace systému. Objekt stojí na disku, který se pomalu otáčí. Fotoaparát opakovaně pořizuje snímky. Frekvence snímání je přednastavena na jeden snímek na každých α stupňů rotace.



Obrázek 3.6: (a) konfigurace systému (b) pozice kamer (c) obklopující válec [10]

Algoritmus rekonstrukce zpracovává pořízené snímky. Za prvé se provádí kalibrační proces. Pak se vytvoří omezující 3D válec obklopující lidské tělo, jak je znázorněno na obrázku 3.6c. Válec se rozdělí na malé $n \times n \times n$ buňky. Pokud střed buňky je mimo siluety těla, buňka je klasifikována jako buňka pozadí. V opačném případě je klasifikována jako buňka popředí. Tím se extrahuje 3D trojúhelníková síť, ze které se po několika úpravách obdrží 3D model povrchu těla. Po 3D rekonstrukci povrchu těla lze provádět měření. Obvodové oblasti lze měřit jako průsečíky rekonstruovaného modelu a vhodné příčné roviny. Na povrchu těla se ručně vybere několik bodů, přes které se provádí rovina pro měření.

Byly provedeny dva pokusy rekonstrukce těla dětského manekýna a lidského subjektu. Experimentální výsledky za použití figuríny i lidského subjektu ukázaly, že navrhovaný systém je velmi přesný při měření různých antropometrických parametrů.

Tabulka 3.3: Výsledky antropometrických měření manekýna. Převzato a přeloženo z [10]

Metoda	Obvod pasu(cm)	Obvod boků(cm)	Poměr obvodu pasu a boků	Obvod krku(cm)	Obvod hrudníku(cm)
Ruční	44,45	46,99	0,9459	22,86	48,26
Měření ze 3D modelu	45,86 ±1,31	46,54 ±0,71	0,9851 ±0,011	23,13 ±1,09	50,47 ±0,71
3D model Relativní chyba	3,17% ±2,95%	-0,95% ±1,51%	4,14% ±1,14%	1,17% ±4,75%	4,57% ±1,47%

Tabulka 3.4: Výsledky antropometrických měření člověka. Převzato a přeloženo z [10]

Metoda	Obvod pasu(cm)	Obvod boků(cm)	Poměr obvodu pasu a boků	Obvod krku(cm)	Obvod hrudníku(cm)	Obvod ruky(cm)
Ruční	110,5	113	0,9736	38,7	114,6	35,3
Měření modelu	108,39 ±3,30	115,11 ±3,60	0,9419 ±0,027	40,46 ±1,18	110,89 ±1,38	33,78 ±0,76
Relativní chyba	-1,91% ±2,99%	1,42% ±3,17%	-3,26% ±2,76%	4,56% ±3,04%	-3,24% ±1,20%	-4,31% ±2,16%

3.2 Obrazové příznaky

Zpracování obrazových dat je zpravidla založeno na extrakci příznaků. Zpracováním dat se rozumí předzpracování, vyhledání objektů a porozumění obsahu obrazu. Detekce a porovnávání obrazových příznaků jsou základním prvkem mnoha aplikací v počítačovém vidění. Existují tři základní typy příznaků. První typ jsou klíčové body nebo významné body (nebo rohy). Další třídou důležitých rysů jsou hrany. Tyto typy příznaků mohou být dobrými indikátory hranic objektů v obraze. Hrany mohou být seskupeny do delších křivek a přímých segmentů, které lze přímo porovnávat nebo analyzovat [11].

3.2.1 Detekce významných bodů

Detekce rohů i jiných významných bodů je nepostradatelnou metodou při zpracování obrazu. Významným bodem může být roh, ale může se jednat například i o izolovaný bod významně lišící od svého okolí. Rohy jsou body v obraze, kde se potkávají dvě či více hran. V současné době je známo více metod detekce významných bodů, které pracují na odlišných principech. Nejrozšířenější metodou je algoritmus Harris Stephens [12], který je také znám jako Plessey algoritmus.

Harrisův operátor byl navržen roku 1988 Chrisem Harrisem a Mikem Stephensem. Operátor tvoří autokorelační, tzv. Hessova matice druhých parciálních derivací. Pro každý pixel (x, y) v obrázku se spočte autokorelační matice M :

$$M = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix} \quad (1)$$

Z determinantu a stopy matice se potom vypočte hodnota R , podle které lze úspěšně rozhodnout, zda se v daném bodě nachází roh

$$R = \text{Det}(M) - k * \text{Trace}^2(M) \quad (2)$$

Pokud je tento rozdíl větší než zadaná prahová hodnota, detekujeme významný bod. Harrisův detektor je velmi stabilní, je odolný vůči šumu i vůči rotaci [12]. Nevýhodou metody je vysoký počet chybně určených významných bodů.

3.2.2 Detekce hran

Každá hrana v obraze představuje jasovou nespojitost v obrazové funkci. Existuje mnoho způsobů, jak provést detekci hran, nicméně, většina metod může být seskupena do dvou kategorií, metody používající gradient jasové funkce nebo Laplaceův operátor jasové funkce [5].

Metoda gradientu detekuje hrany hledáním maxima a minima z první parciální derivace obrazové funkce. Výsledek operace gradientu je vektorová veličina mající absolutní hodnotu (udávající velikost změny jasové funkce) a směr (udávající směr největší změny jasové funkce):

$$\nabla f(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \bar{j} \quad (3)$$

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right)^2} \quad (4)$$

$$\varphi = \arg\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right) \quad (5)$$

Laplaceova metoda využívá operátor aproximující druhou derivaci obrazové funkce, který je roven nule v oblasti inflexního bodu každé hrany. Detekce průchodu nulou v obraze je vždy výpočetně výhodnější než hledání lokálního maxima mající vždy jinou velikost. Laplaceův operátor (tzv. Laplacián):

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (6)$$

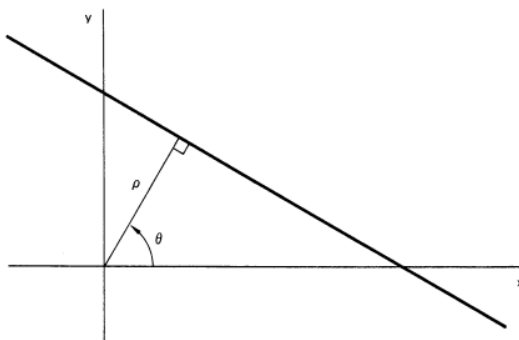
3.2.3 Houghova transformace

Houghova transformace [13] je metoda pro nalezení objektů v obraze. Při implementaci je třeba znát analytický popis tvaru hledaného objektu. Klasická Houghova transformace je především používána pro detekci jednoduchých objektů v obraze, jako jsou přímky, kružnice, elipsy atd. Zobecněná Houghova transformace je určena pro identifikaci objektů, jejichž hranice nelze popsat jednoduchými křivkami [14]. Hlavní výhodou je to, že tato metoda je odolná vůči porušení hledané křivky a je málo ovlivněná obrazovým šumem.

Klasická Houghova transformace je určena pro identifikaci přímek v obraze. Přímku v rovině lze popsat několika způsoby. Rovnice přímky se vyjádří v polárních souřadnicích:

$$x \sin\theta + y \cos\theta = \rho \quad (7)$$

kde ρ je délka normály od přímky k počátku souřadnic, θ je úhel mezi normálou a osou x , jak je vidět na obrázku:



Obrázek 3.7: Reprezentace přímky v prostoru (x,y) [13]

Jestliže se do předchozí rovnice dosadí souřadnice nějakého bodu (x_i, y_i) , pak množina všech možných řešení (ρ, θ) vytvoří v Houghově prostoru spojitou křivku. Po promítání do Houghova prostoru všech bodů ležících na nějaké přímce p je vidět, že se křivky odpovídající jednotlivým bodům (x_i, y_i) protnou v jediném bodě (ρ_0, θ_0) . Tato dvojice jsou ve skutečnosti hledané parametry přímky p .

Obdobný postup lze modifikovat pro hledání parametrů hranic objektů, které je možné popsat analytickou rovnicí. Například pro detekci kružnice popsané rovnicí:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (8)$$

kde a, b jsou souřadnice středu kružnice a R je poloměr. V tomto případě výpočetní náročnost algoritmu vzrůstá, protože jsou neznámé tři parametry, a tudíž Houghův prostor má dimenzi 3.

Houghova transformace se dnes v počítačovém vidění využívá velmi často. Příkladem mohou být různé algoritmy hledání určitého objektu v obraze.

3.3 Rozpoznávání objektů v obraze

Hlavním úkolem počítačového vidění je rozpoznávání objektů v obraze a videosekvencích. Detekce a sledování objektů hrají důležitou roli v mnoha aplikacích, jako je rozpoznání obličejů nebo emocí, navigace vozidel, sledování a autonomní směřování robotů. Detekce objektů je využívána i při návrhu automatických měřicích systému. V posledních desetiletích byla vyvinuta řada metod pro rozpoznávání objektů. Nejpoužívanější z nich jsou [15]:

- Detekce pomocí příznakového rozpoznání (Feature-based) porovnává shodnost hran a rohů.
- Template-based. Pokud je k dispozici šablona popisující konkrétní objekt, detekce objektů se stává procesem porovnání vlastností mezi šablonou a sekvencí obrazu, která je předmětem analýzy.
- Detekce založená na kaskádě klasifikátoru (Classifier Based)

3.3.1 Detektor objektů v obraze Viola-Jones

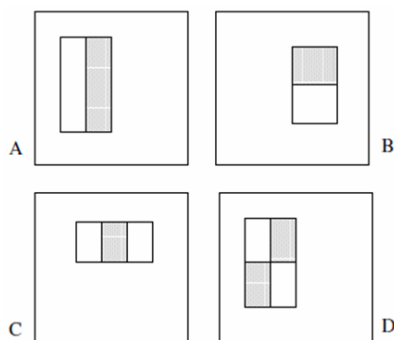
Detektor Viola-Jones [16] navržený pány Violou a Jonesem v roce 2001 je jedním z nejpoužívanějších nástrojů pro detekci objektu v obraze, který je schopen zpracovávat obrázky extrémně rychle při dosažení vysoké míry detekce. Algoritmus detekce a trénování byl implementován v programovém prostředí MATLAB s podporou knihovny Image Processing Toolbox. Objektový detektor v prostředí MATLAB je přizpůsoben (přetrénován) pro detekci obličejů, profil tváře, nosu, očí a horní části těla.

Jedná se o první real-time detektor objektů založený na výpočtu informativních příznaků, na jejich základě je rozhodnuto o existenci objektu v obraze. Algoritmus má tři klíčové složky pracující ve shodě s cílem umožnit rychlou a přesnou detekci: integrální obraz, klasifikační algoritmus AdaBoost a kaskáda klasifikátorů. Jako jednoduchý klasifikátor jsou použity Haarovy příznaky.

Integrální obraz je nová reprezentace vstupního obrazu, která umožňuje rychlé vyhodnocení používaných příznaků. Nalezení konkrétních Haarových filtrů, ze kterých jsou příznaky vypočteny, je proces nazývaný trénování. Trénování bylo realizováno pomocí algoritmu AdaBoost. Metoda pro kombinování složitějších klasifikátorů ve struktuře kaskády výrazně zvyšuje rychlost detektoru tím, že zaměřuje pozornost na slibné oblasti obrazu.

Detektor objektů třídí obrázky na základě hodnot jednoduchých příznaků. Snahou detektoru Viola-Jones je získat velkou řadu jednoduchých příznaků s minimálními výpočetními nároky. Takovým typem příznaků jsou Haarovy příznaky. Hodnota Haarova příznaku se vypočítá jako rozdíl sum pixelů obrazu odpovídající světlé části a sum pixelů odpovídajících tmavé části. Haarovy filtry jsou

plošnými detektory charakteristických rysů daného objektu. Existuje mnoho druhů Haarových filtrů, základní sada Haarových filtrů je na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Základní sada Haarových filtrů [16]

AdaBoost (zkratka pro Adaptive Boosting) je klasifikační algoritmus, který vychází z metody strojového učení. Základem je vytvoření více tzv. slabých klasifikátorů (weak learners) z trénovací množiny, jejichž přesnost se pohybuje kolem 50%. Postupně jsou pak přidávány další klasifikátory s obdobnou mírou přesnosti, čímž je vygenerován soubor klasifikátorů označovaný jako silný klasifikátor (strong learner), jehož celková klasifikační přesnost je libovolně vysoká vzhledem ke vzorkům v trénované množině – klasifikace byla zesílena [16] [17].

4 Návrh automatického měřicího systému

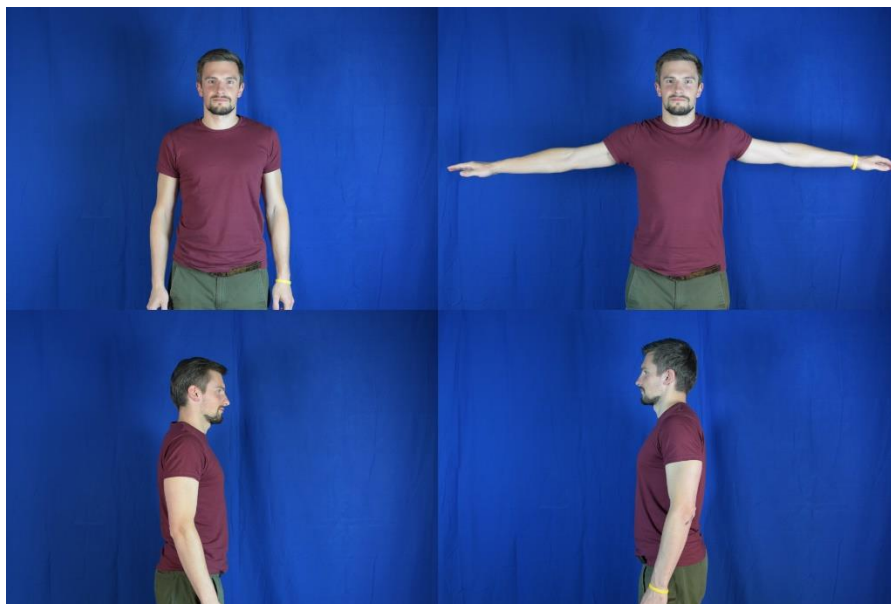
Měřicí metody popsané ve třetí kapitole mají své výhody a nevýhody. Všechny prozkoumané přístupy sloužily jako základ k návrhu vlastního automatického systému.

4.1 Vliv kamery na přesnost měření

Při návrhu měřicího systému se za prvé řeší postavení celé soustavy. Úspěšnost měření závisí na výběru fotoaparátu a světelných podmínkách. Cílem je získat kvalitní snímky pro další analýzu. Otázkou je způsob kalibrace kamery a převod obrazových měřítek do světových. Snahou je navrhnout funkční a jednoduše realizovatelný systém.

4.1.1 Snímání obrazu

Systém byl nastaven pro zachycení obrázků těla subjektu ze třech pohledů (čelní, levý, pravý). Objekt se fotí před modrým plátnem, což umožňuje spolehlivé oddělení popředí a pozadí. Barevné snímky jsou zachyceny pomocí digitálního fotoaparátu Nikon D5300 se snímačem CMOS a rozlišením 6000×4000 pixelů. Fotoaparát je umístěn před osobou na určité vzdálenosti. Objekt stojí ve standartních pózách, jak je znázorněno na obrázku 4.1. Všechny snímky jsou pořízeny jednou kamerou. Pro zachycení bočního pohledu se objekt otáčí o 90° doprava nebo doleva.



Obrázek 4.1: Pózy

Pro dosažení vysoké kvality obrazu je třeba zajistit dostatečné světelné podmínky. Ostré stíny na pozadí nebo nerovnoměrné osvětlení mohou vadit extrakci potřebných rozměrů. Při testování

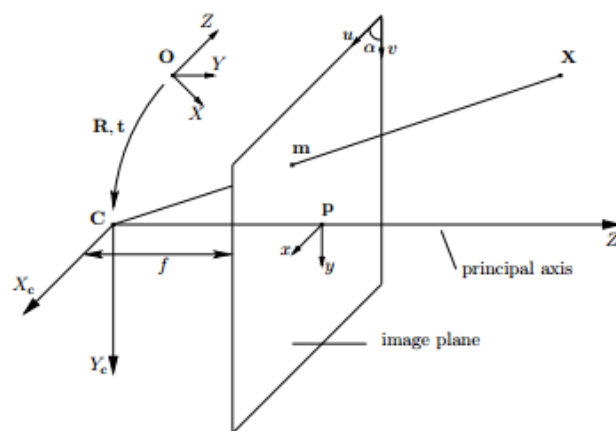
navrženého systému bylo použito profesionální osvětlovací zařízení studia. Lze dosáhnout dobrých výsledků i při denním světle za použití zářivek nebo LED reflektorů.

4.1.2 Kalibrace kamery

Geometrická kalibrace kamery [18] odhaduje parametry čočky a obrazového snímáče kamery. Tyto parametry se používají k opravě zkreslení objektivu, měření velikosti objektu v světových jednotkách nebo určení umístění kamery. Geometrická kalibrace kamery se obvykle provádí pomocí kalibračního vzoru, jehož geometrické vlastnosti jsou známy, například šachovnice.

Pro kalibraci v této práci byl použit model kamery navržený Jean-Yves Bouguetem [19]. Model obsahuje tzv. Camera obscura (pin hole komora). Camera obscura je idealizovaný matematický model pro reálné kamery, který se často liší od modelu ideálního perspektivního zobrazení. Proto pro přesnou reprezentaci skutečné kamery používaný model obsahuje navíc radiální a tangenciální zkreslení čočky.

Pin hole kamera je jednoduchá kamera bez čočky s malým otvorem. Světelné paprsky z vnější scény po průchodu otvorem promítají obrácený obraz na protější stěně kamery.



Obrázek 4.2: Model pin hole kamery [18]

Projekční paprsky se protínají v jediném bodě, kterým je střed kamery C a jeho vzdálenost od roviny snímku je ohnisková vzdálenost f . Na obr.1 je vidět, že se bod (X_c, Y_c, Z_c) v souřadnicích fotoaparátu promítá do bodu $(fX_c/Z_c, fY_c/Z_c)$ v obrazových souřadnicích. V homogenních souřadnicích lze tuto perspektivní projekci představit pomocí 3×4 promítací matice:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \approx \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Kalibrační algoritmus vypočítá matici kamery pomocí externích a vnitřních parametrů. Vnější parametry představují transformaci ze 3D světové souřadnicové soustavy na souřadnicový systém 3D kamery. Vnitřní parametry představují projektivní transformaci ze 3D souřadnic kamery do souřadnic snímků 2D.

V praxi 3D bod je vyjádřen v nějakém světovém souřadnicovém systému, který se liší od souřadnicového systému kamery. Pohyb mezi těmito souřadnicovými systémy je dán rotací \mathbf{R} a vektorem posunutí \mathbf{t} . Proto mapování 3D bodu \mathbf{X} na jeho obraz \mathbf{m} je dáno jako:

$$\mathbf{m} \simeq \mathbf{K} [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \mathbf{X}, \quad (10)$$

kde \mathbf{K} je kalibrační matice kamery obsahující pět vnitřních parametrů dírkové kamery. Obecná dírková kamera může být reprezentována homogenní maticí 3×4 :

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \quad (11)$$

kteřá se nazývá projekční matice kamery.

Kalibrační matice kamery nebere v úvahu zkreslení čočky, proto model kamery obsahuje radiální a tangenciální zkreslení čočky. Radiální zkreslení nastává, když se paprsky ohýbají v blízkosti okrajů čočky. Čím je menší objektiv, tím je větší zkreslení. Tangenciální zkreslení nastává, když objektiv a rovina obrazu nejsou paralelní. Zpravidla se tangenciální zkreslení neprojevuje v takové míře jako zkreslení radiální [18].

Kalibrace vnitřních parametrů kamery je provedena využitím Camera Calibration Toolbox v Matlabu [19] pomocí standardního kalibračního vzoru, u kterého jsou známy rozměry čtverců. Kalibrační šablona je zaznamenána v různých úhlech otočení vůči kameře. Na snímcích z kamery jsou automaticky identifikovány rohy obrazců a porovnáním s očekávanou pozicí a zjištěnou pozicí jsou určeny vnitřní parametry kamery. Výstupem je matice kamery a koeficienty nelineárního zkreslení. Čím více snímků bude otestováno, tím větší bude přesnost měření.

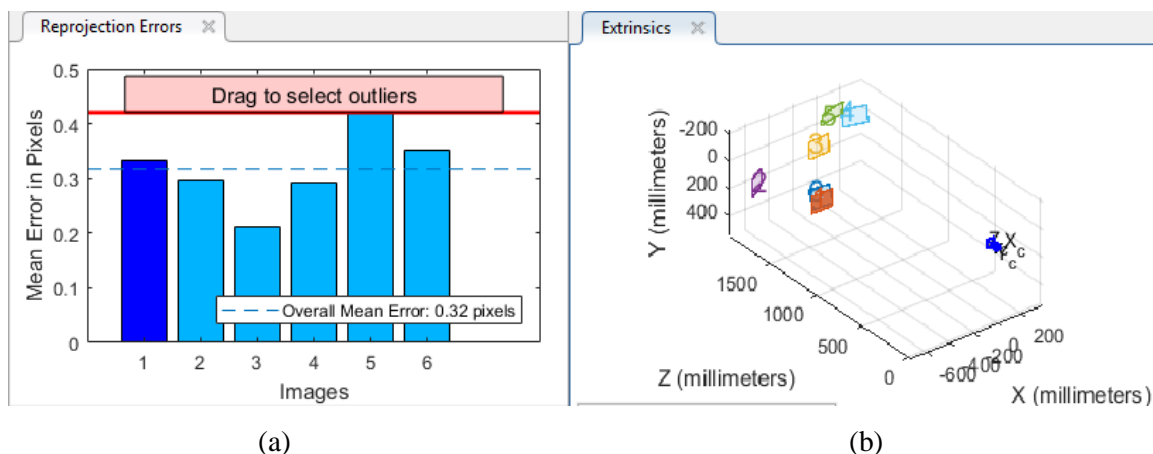
Při kalibraci kamery Nikon D5300 bylo použito 6 snímků. Vnitřní parametry kamery byly stanoveny jako:

$[f_x=6451,1 \quad f_y=6476,8]$ - ohnisková vzdálenost v pixelech

$[3195,6 \quad 1568,4]$ - souřadnice hlavního bodu

$[0,04723 \quad -0,43433 \quad 0,86708]$ – koeficienty radiálního zkreslení

$[-0,0171 \quad 0,00732]$ – koeficienty tangenciálního zkreslení



Obrázek 4.3: (a) chyby reprojekce (b) rekonstrukce 3D scény

Chyby reprojekce jsou vzdálenosti v pixelech mezi detekovanými a promítanými body. Aplikace Camera Calibration vypočítá chyby při projekci tím, že promítá body šachovnice ze světových souřadnic do souřadnic snímků. Pak se znovu porovnávají vygenerované body s odpovídajícími zjištěnými body. Obecně platí, že chyby reprojekce menší než jeden pixel jsou přijatelné. Aplikace Camera Calibration zobrazuje chyby reprojekce jako sloupcový graf (viz Obrázek 4.3a). Na sloupcovém grafu je zobrazena střední chyba na obrázek spolu s celkovou střední chybou.

Pomocí extrahovaných vnějších parametru lze provést rekonstrukci 3D scény (viz Obrázek 4.3b). Vnější parametry udávají vzdálenost a natočení kamery vůči měřené šachovnici.

4.1.3 Převod do skutečných měřítek

Kalibrací kamery získáváme vnitřní a vnější parametry kamery. Vnitřní parametry slouží k odstranění zkreslení objektivu. Vnější parametry kamery jsou poloha a natočení kamery v 3D prostoru. Používáme je pro transformaci obrazových souřadnic do skutečných, a tím můžeme zjistit reálné rozměry objektů. Při změně nastavení fotoaparátu se kalibrace stává neplatná. To není optimální pro automatické měření. Proto byl navržen jiný způsob převodu pixelových měřítek do skutečných.

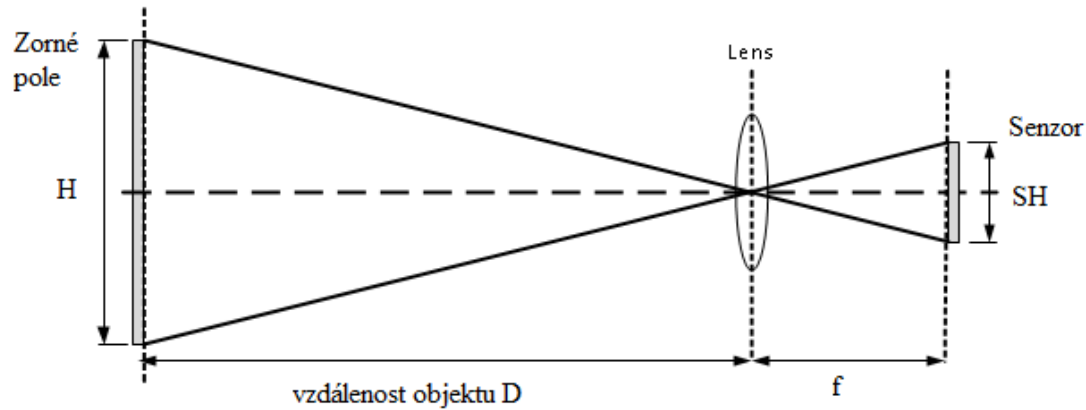
Používaná metoda je jednoduchá a vyžaduje pouze znalost vzdálenosti D objektu od kamery a typu senzoru fotoaparátu. Ohniskovou vzdálenost objektivu f se dá extrahovat přímo z obrazových dat.

Vypočteme velikost zorného pole. Necht' SH je výška senzoru v centimetrech, H je výška zorného pole kamery v centimetrech, jak je znázorněno na obrázku 4.4. Na základě podobnosti trojúhelníků platí:

$$\frac{H}{D} = \frac{SH}{f} \quad (12)$$

Z toho můžeme odvodit:

$$H = \frac{SH * D}{f} \quad (13)$$



Obrázek 4.4: Zorné pole

Nechť máme v obraze body $a(x_1, y_1)$ a $b(x_2, y_2)$. Vzdálenost mezi těmito body v pixelech se vypočte jako:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (14)$$

Tedy reálná vzdálenost mezi dvěma body:

$$C = \frac{d}{I} * H \quad (15)$$

kde I je výška snímku v pixelech.

4.2 Předzpracování obrazu

Cílem předzpracování je potlačit šum vzniklý při digitalizace obrazu, odstranit zkreslení, potlačit či zvýraznit rysy obrazu a zvýraznit hrany. Mezi základní metody předzpracování obrazu řadíme převedení na stupně šedi, úpravu jasu a kontrastu, filtraci, potlačení vlivu osvětlení, geometrické transformace a lokální předzpracování.

Segmentace je jedním z nejdůležitějších kroků analýzy obrazu. Jde o dělení obrazu do jednotlivých segmentů. Každému pixelu v obraze se přiřazuje štítek tak, že pixely se stejným štítkem mají určité vlastnosti. Cílem segmentace je zjednodušit reprezentaci obrazu pro snadnější analýzu. Segmentace se obvykle používá k lokalizaci objektu a nalezení jejich hranic v obraze.

V této práci cílem segmentace obrazu je detekce siluety těla člověka. Existuje celá řada segmentačních algoritmů. V [5] jsou popsány základní způsoby přístupu k segmentaci, do kterých patří: metody vycházející z detekce hran (angl. edge-based), metody orientované na regiony v obraze (region-based), statické a hybridní metody.

4.2.1 Detekce ušního boltce

Ucho je sluchový orgán obratlovců. Detailní struktura ucha je unikátní. Antropometrie ucha se znesnadňuje malými rozměry ušního boltce. Pro měření antropometrických rozměru ucha potřebujeme na obrázku označit oblast obsahující ušní boltce, se kterou budeme dále pracovat. Za tímto účelem se použije detektor objektu. Detektor lokalizuje ucho z obrazu z bočního pohledu a definuje oblast zájmu (obdélník, kruh) obklopující objekt. Pro detekci ušního boltce byl použit detektor Viola-Jones.



Obrázek 4.5: Detekce ušního boltce v obraze

V této práci obecný Viola-Jones detektor byl modifikován – přetrénován na detektor ušního boltce. Trénování je proces, při němž jsou nalezeny informativní příznaky dané množiny, v tomto případě boltce. Pro trénování kaskádního detektoru v prostředí Matlab byl použit nástroj `vision.CascadeObjectDetector`, který detekuje objekty v obrazech posouváním okna nad obrázkem. Detektor pak pro rozhodnutí používá kaskádový třídič, zda okno obsahuje objekt zájmu. Kaskádní třídič se skládá z etap, kdy každá etapa je soubor slabých žáků. Každá etapa třídiče označuje oblast definovanou aktuální polohou posuvného okna buď jako pozitivní nebo negativní. Pozitivní znamená, že byl nalezen objekt zájmu a negativní znamená, že nebyly nalezeny žádné objekty.

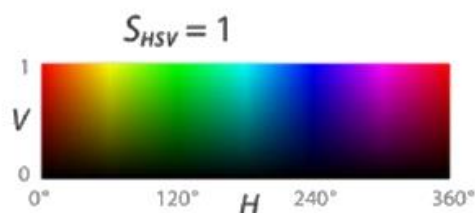
Kaskádní trénovací klasifikátor vyžaduje řadu pozitivních vzorků a sadu negativních snímků. K dosažení vhodné přesnosti detektoru se nastavuje počet etap, typ objektu a další parametry funkcí.

Pro trénování kaskádního detektoru byla vybrána databáze obrázků uší WPUT-The West Pommeranian University of Technology [20]. Databázi tvoří 2071 obrázků 501 subjektů všech věkových kategorií. Pro každý fotografovaný objekt databáze obsahuje od 4 do 8 snímků, které byly pořízeny v různé dny i za různých světelných podmínek. Databázi lze volně stáhnout z [21].

4.2.2 Hranová detekce

V [6] se pro získání obrysů používá odečtení obrazu pozadí. Metoda spočívá v porovnání obrazu popředí a obrazu pozadí. Počítají se hodnoty barevných rozdílů pixelů těchto dvou obrazů. Na základě spočtených rozdílů se pixelům pozadí přiřadí hodnota 0 a pixelům objektu 1. Tím se obdrží binární obraz siluety objektu.

Metoda odstranění pozadí uvedená v [22] využívá barevný model HSV (Hue-Saturation-Value). Model HSV má tři základní parametry: barevný tón (Hue), sytost (Saturation) a jas (Value). Barevný tón určuje převládající spektrální barvu, sytost příměs jiných spektrálních barev a jas příměs bílé barvy. Komponenta odstínu umožňuje detekci konkrétní barvy bez ohledu na množství dopadajícího světla.

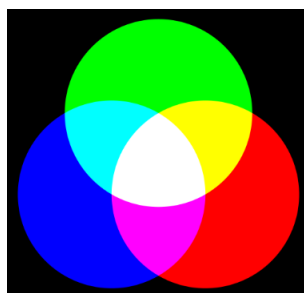


Obrázek 4.6: Barevné rozdělení HSV modelu [22]

Pro známou barvu pozadí se určuje její distribuce. Z obrázku je vidět, že zelená barva je rozložena kolem 120°, takže při zeleném pozadí se všechno kolem tohoto tonu vyznačí jako pozadí. Po detekci hran je nejdelší hrana vybrána jako obrys člověka a zbytek se odstraní.

Algoritmus segmentace obrazu použitý v této práci je podobný technice Greenscreen (též chroma key), která se široce používá pro odstranění jednobarevného pozadí. Pokud je známá barva zadní plochy, dá se jednoduše nalézt silueta objektu v popředí.

Používáme modré pozadí, takže potřebujeme označit všechny modré pixely v obraze. Pracujeme s RGB barevným modelem, který je aditivní. Každá barva je udána mohutností tří základních barev – komponent (červené, zelené a modré). Sloučením všech tří barev v plné intenzitě (255,255,255) vzniká bílá barva, nulové hodnoty (0,0,0) vytvářejí barvu černou, jak je vidět na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Aditivní míchání barev

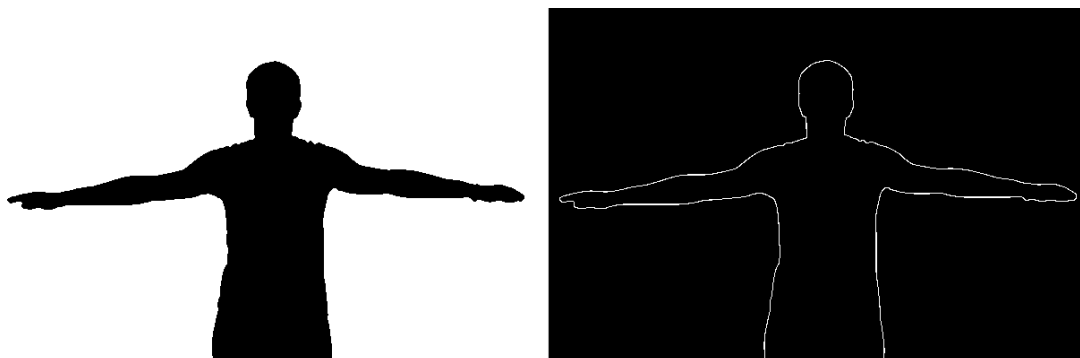
Hledáme pixely s vysokou komponentou modré barvy, a ostatní komponenty mají být nízké. Mohutnost modré barvy pixelu určíme ze vztahu:

$$b = B - \max(R, G) \quad (16)$$

Výsledky pro různé barvy:

(255, 0, 0)	→	-255
(0, 255, 0)	→	-255
(0, 0, 255)	→	255
(127, 127, 255)	→	128
(255, 0, 255)	→	0
(0, 255, 255)	→	0

Správnou prahovou hodnotu pro segmentaci modrých pixelů určíme experimentálně. Všechny pixely, mající mohutnost modré barvy větší než nastavená prahová hodnota, považujeme za pixely pozadí. Po odstranění pozadí na obrazu aplikujeme detekci hran, tím získáme binární obraz se siluetou objektu.



Obrázek 4.8: Detekce obrysů těla

Použitá technika odstranění pozadí je jednoduchá a efektivní. Můžeme ji použít i pro jiné barvy pozadí, jedná se jen o změnu pár řádků v kódu.

Pro analýzu obrazu ucha potřebujeme zcela jiný přístup, než byl použit při detekci siluety těla člověka. Extrakce potřebných obrysů ucha je komplikovaný úkol, který vyžaduje komplexní řešení.

Po aplikaci detektoru zjistíme pozici ucha v obraze. Pracujeme s označenou oblastí obsahující ušní boltec. Za prvé je třeba připravit obraz pro segmentaci. Při úpravách kvality obrazu jsou důležité různé typy filtrace. Filtrace obrazu slouží ke zvýraznění určité informace. Pro korekci ostroty použijeme filtr Maskování neostroty, který zaostřuje hrany objektů a grafických prvků, aniž by zvyšoval šum. Ostření obrazu představuje zvýraznění hran v obraze. Snímek je zaostřen odečtením rozostřené (neostrá) verze obrazu. Pak obraz vyfiltrujeme Gaussovým filtrem a tím potlačíme obrazový šum.

Na vyfiltrovaném obraze aplikujeme detektor hran Canny, čím získáme obrysy ucha. Nejdlejší detekovanou hranu považujeme za vnější hranu helixu. Hrany, které leží mimo vnější hranu, odstraníme pomocí konvexního obalu a morfologických operací.



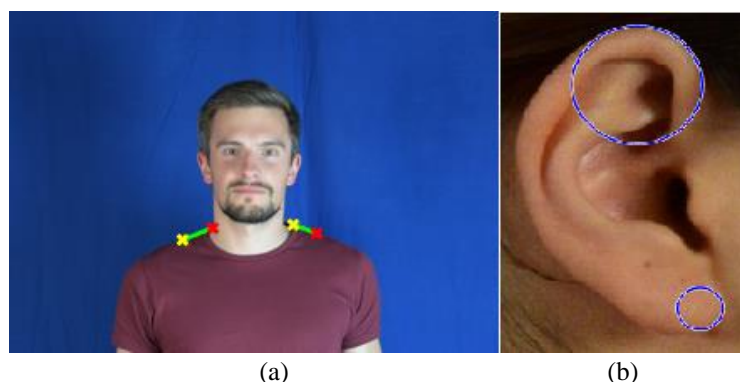
Obrázek 4.9: Segmentace obrazu ušního boltce

4.2.3 Identifikace geometrických tvarů

Automatická lokalizace orientačních anatomických bodů je komplikovaný problém. Identifikace jednoduchých geometrických tvarů v obraze usnadní a urychlí proces extrakce hledaných parametrů. Nástroj se dá použít pro detekci různých částí těla a ušního boltce (viz Obrázek 4.10). Identifikaci geometrických tvarů v obraze řeší Houghova transformace.

Houghovou transformaci používáme pro segmentaci těla. Aplikujeme ji na snímku z čelního pohledu pro detekci přímků a tím zjistíme pozici ramen v obraze.

Houghova transformace se uplatní i při analýze obrazu ušního boltce. Pomocí ní lokalizujeme dvě kružnice na snímku ucha, jak je znázorněno na obrázku 4.10. Tím se usnadní detekce ucha v obraze. Je vidět, že detekované kružnice jsou umístěny na okrajích ušního boltce. Dá se je výhodně použít pro vyznačení oblasti zajmu, tj. pro odstranění hran nepatřících k uchu samotnému.

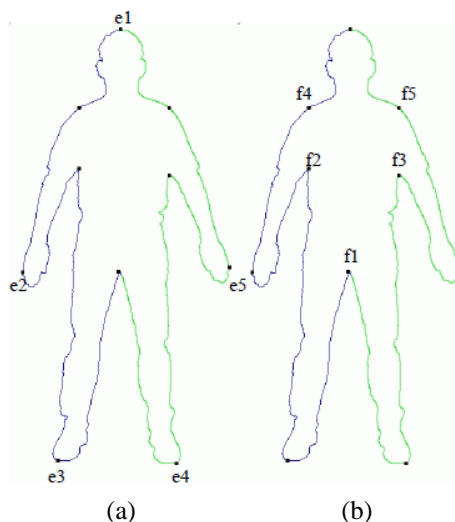


Obrázek 4.10: Aplikace Houghovy transformace: (a) lokalizace ramen
(b) identifikace ušního boltce

4.3 Automatická lokalizace orientačních bodů

Automatická lokalizace orientačních bodů je hlavním problémem extrakce antropometrických rozměrů. Ve většině existujících měřicích metodách ([6], [10]) se navrhuje ruční označení anatomických bodů.

Algoritmus extrakce popsáný v [23] je schopný detekovat pouze limitovaný počet orientačních bodů. Algoritmus prochází obrysy siluety a hledá pět extrémních bodů e1-e5, které odpovídají hlavě, rukám a nohám, jak je znázorněno na obrázku 4.11a. Extrémní body mohou být spolehlivě extrahovány pro všechny siluety, ale jejich poloha se významně liší v závislosti na postoji. Proto se extrémy používají k identifikaci pěti klíčových bodů f1-f5, které mohou být přesně umístěny i při velkých změnách siluety a pózy. Body odpovídají rozkroku, podpažním jamkám a ramenům, jak je znázorněno na obrázku 4.11b. Bylo zjištěno, že další potenciální rysy nelze spolehlivě lokalizovat, protože malé změny ve tvaru mohou způsobit velké rozdíly v poloze.



Obrázek 4.11: (a) (b) Automaticky detekované extrémní body siluety [23]

Systém popsáný v [2] používá zcela jiný přístup pro extrakci anatomických bodů. Orientační body jsou definované defekty konvexního obalu. Tímto způsobem se dají spolehlivě určit tři antropometrické rozměry: obvod hrudníku, obvod pasu a obvod boků. V závislosti na kvalitě obrazu lze taky zjistit délku rukou a nohou. Systém je schopen detekovat pouze malou množinu základních orientačních bodů.

Uvedené přístupy lokalizace orientačních bodů nejsou zcela aplikovatelné v našem případě. Je to způsobeno zejména tím, že existující metody jsou zaměřeny na detekci základních rozměrů torza. Antropometrické rozměry potřebné pro HRTF syntézu jsou specifické. Jedná se o 17 rozměrů hlavy a torza a 10 rozměrů ušního boltce. V následujících částech je popsán postup lokalizace a extrakce těchto parametrů.

4.3.1 Parametry hlavy a torza

Antropometrické rozměry lze rozdělit na výškové, šířkové a obvodové rozměry. Výškové a šířkové rozměry těla a jeho částí lze určit přímo ze dvojrozměrných obrazů. Obvodové rozměry zjistíme aproximací tvaru příslušných částí těla.

Šířka hlavy (čelní) se měří v nejšířším místě hlavy. V této práci šířku hlavy měříme přibližně nad úrovní očí, což v podstatě odpovídá největší šířce. Pro detekci očí v obraze se používá detektor Viola-Jones. Tím se zjednoduší náročnost algoritmu.

Hloubka hlavy (profilová šířka hlavy) se měří jako největší šířka hlavy od středního nadočnicového bodu k týlnímu bodu.

Obvod hlavy modelujeme elipsou tak, že hloubku a šířku hlavy považujeme za hlavní a vedlejší osy elipsy.



Obrázek 4.12: Aproximace tvaru: (a) elipsa (b) kružnice

Obvod elipsy se určí podle vztahu:

$$C \approx \pi * \left[3 * (a + b) - \sqrt{(3 * a + b) * (a + 3 * b)} \right] \quad (17)$$

Výšku hlavy měříme z profilového snímku jako vzdálenost od temena hlavy do úrovně brady. Temeno hlavy může být určeno jako nejvyšší bod siluety těla. Problémem je, že vlasy mohou zasahovat do tohoto orientačního bodu, což ztěžuje tuto lokalizaci. Výsledkem je, že naměřená hodnota je vyšší, než skutečně je.

Šířka krku (čelní) se měří jako nejmenší vzdálenost mezi bočními krčními body.

Hloubka krku (šikmá profilová šířka krku) se měří z profilového snímku mezi dvěma nejbližšími body siluety těla.

Obvod krku modelujeme kružnicí s průměrem rovným nejdelšímu šířkovému rozměru krku, tj. buď šířce, nebo hloubce krku. Experimentálně bylo stanoveno, že aproximace kružnicí je nejvhodnější.

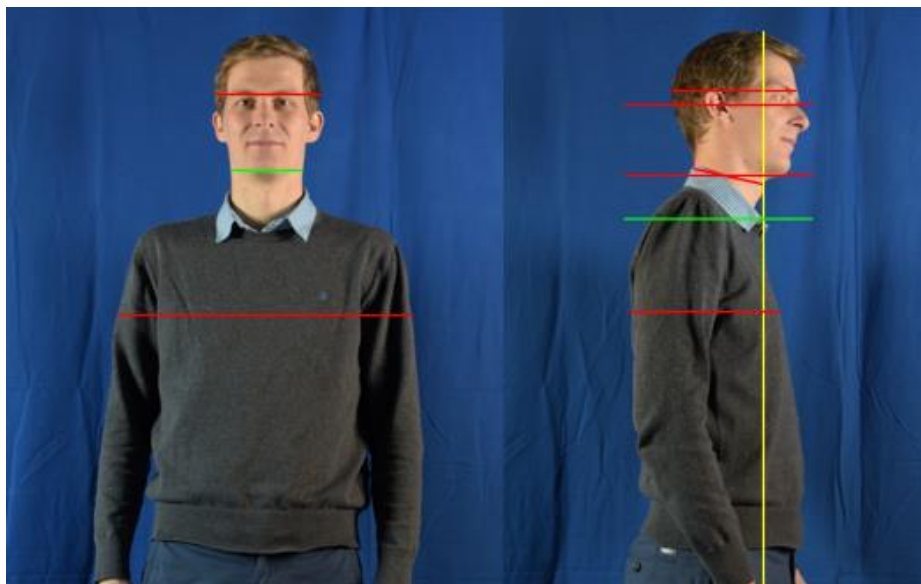
Výška krku v [4] je definována jako vzdálenost od bočního krčního bodu na kořeni krku do úrovně brady. Orientační body na kořeni krku lokalizujeme pomocí Hougovy transformace. Aplikujeme ji na snímku z čelního pohledu pro detekci přímek, a tím zjistíme pozici ramen v obraze (viz 4.2.3).

Šířka horní části trupu (nadprsí šířka hrudníku) se měří mezi předními podpažními body. Orientační body odpovídající podpažním jamkám zjistíme ze snímku člověka z čelního pohledu, zachyceného s roztaženými rukama.

Hloubka horní části trupu měříme z profilového snímku na stejné úrovni, co i nadprsí šířku hrudníku.

Šířku ramen stanovíme jako vzdálenost mezi dvěma okrajovými body siluety torza, měřenou na úrovni předních podpažních bodů.

Obvod ramen modelujeme elipsou. Za hlavní osu elipsy považujeme šířku ramen. Za vedlejší osu považujeme hloubku horní části torza.



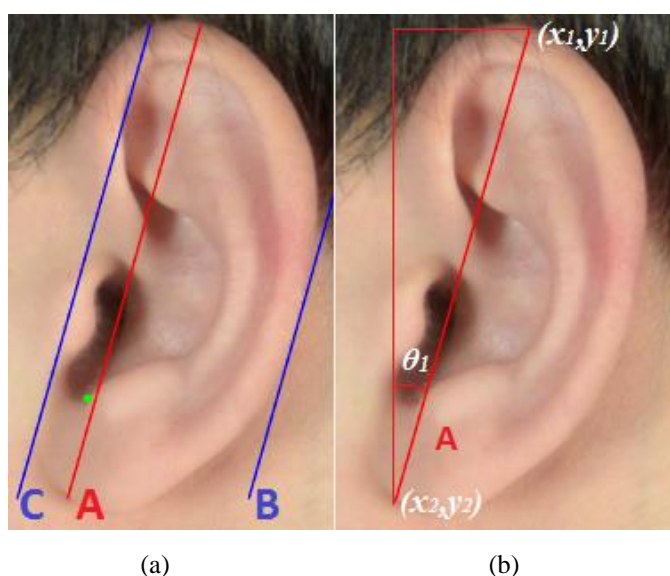
Obrázek 4.13: Identifikované antropometrické parametry hlavy a torza

4.3.2 Extrakce antropometrických parametrů ucha

Extrakce antropometrických parametrů ucha je velmi komplikovaný úkol. Spolehlivost měření hodně závisí na kvalitě obrazu, míře osvětlení a tvaru ucha. Struktura ušního boltce je unikátní, a proto efektivita určitého přístupu je omezená. Navíc postranní objekty (vlasy, náušnice, brýle) mohou zasahovat do měřených parametrů, čím se snižuje přesnost měření.

Výška ušního boltce se určí jako maximální vzdálenost dvou pixelů na vnější hraně ušního boltce. Maximální délka dlouhé osy ušního boltce (A na obrázku 4.14a).

Šířku ušního boltce stanovíme tak, že nakreslíme čáru B rovnoběžnou s A přes nejvzdálenější bod na vnější hraně ušního boltce. Nakreslíme čáru C rovnoběžnou s A a B přes nejvzdálenější bod vnitřní hrany ušního zavítu. Vzdálenost mezi čarami B a C je šířkou ušního boltce.

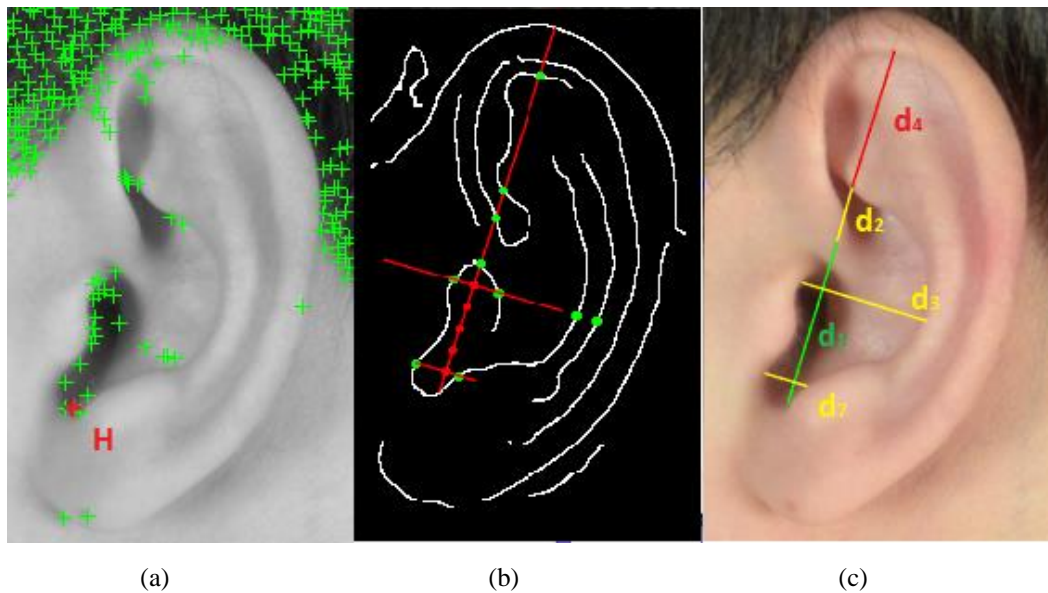


Obrázek 4.14: Identifikace rozměrů ušního boltce: (a) šířka ušního boltce
(b) uhel natočení

Uhel natočení ušního boltce (θ_1) je uhel, který svírá nejdelší osa ušního boltce A a kolmice k ose x obrazu. Uhel θ_1 se spočte jako:

$$\theta_1 = \arctan \left| \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} \right| \quad (18)$$

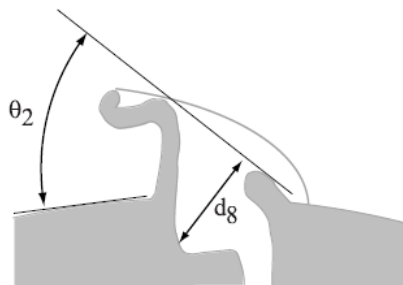
Pro identifikaci dalších parametrů použijeme detektor rohů v obraze. Detekce rohů je přístup používaný v počítačovém vidění pro extrakci určitých druhů obrazových příznaků. Detekce rohů se často používá při detekci pohybu, registraci snímků, sledování videa, segmentaci obrazu, 3D modelování a rozpoznávání objektů (viz 3.2.1).



Obrázek 4.15: (a) detekce významných bodů (b) postup lokalizace orientačních bodů (c) identifikované rozměry

Aplikujeme detektor rohů na obraz ušního boltce a určíme bod H (viz Obrázek 4.15). Potřebné orientační body identifikujeme jako průsečíky definovaných přímek a detekovaných hran ucha.

Navržená metoda měří osm z deseti předdefinovaných parametrů ušního boltce. Parametry θ_2 a d_8 nelze určit z 2D obrazu.

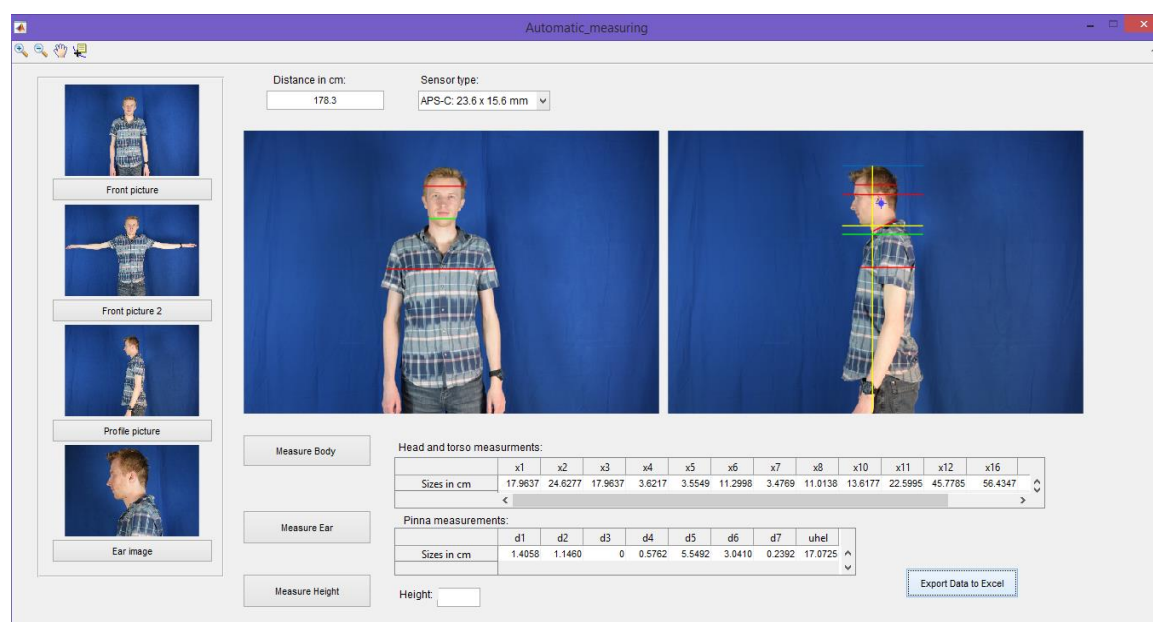


Obrázek 4.16: Nedetekované parametry ušního boltce [4]

4.4 Implementace

Algoritmus automatické detekce a odečítání antropometrických parametrů z obrazu byl implementován v programovém prostředí Matlab s podporou knihovny Image Processing Toolbox. Kalibrace kamery je provedena použitím knihovny Camera Calibration Toolbox. Obecný detektor objektů Viola-Jones byl natrénován na detekci ušního boltce pomocí nástroje vision.CascadeObjectDetector.

Algoritmus je tvořen celkem čtyřmi kroky. Prvním z těchto kroků je předzpracování obrazu. Poté se na obrazech aplikují detektory objektů a Houghova transformace, a tím jsou identifikovány příslušné části těla. Poté následuje segmentace, skládající se ze segmentace dle barvy, kde je obraz rozložen na obrazy popředí a pozadí, a detekce hran. V posledním kroku se provádí extrakce potřebných parametrů a převod obrazových měřítek do světových.



Obrázek 4.17: Uživatelské prostředí

5 Výsledky měření

Navržený systém automatického odečítání antropometrických parametrů člověka z obrazu byl realizován a otestován na jedenácti subjektech. Test se prováděl třikrát. Prvního měření se zúčastnili pouze dva subjekty, které byly vyfoceny z blízké vzdálenosti. Cílem bylo zajistit dostačující podmínky pro obdržení kvalitních obrazů ušního boltce. Během druhého testu byly získány snímky čtyř lidí, které jsou vhodné pro extrakci rozměrů torza a hlavy, ale nedá se z nich určit parametry ucha (viz Obrázek 4.13). Finálního testování se zúčastnilo pět subjektů. Změna nastavení ohniskové vzdálenosti čočky kamery zajistila možnost zachycení kvalitních obrazů těla a ušního boltce člověka. Celkem algoritmus extrakce antropometrických rozměrů torza a hlavy byl otestován na devíti subjektech a parametry ušního boltce byly změřeny u sedmi subjektů.

Tabulka 5.1. Obvodové rozměry

		Obvod krku (cm)	Obvod hlavy (cm)	Obvod ramen (cm)
Objekt 1	Automaticky	29,433	56,2054	94,0682
	Ručně	30	56	95,3
	Absolutní chyba	-0,567	0,205	-1,232
	Relativní chyba	-1,892%	0,367%	-1,293%
Objekt 2	Automaticky	35,3499	56,5733	111,5924
	Ručně	37,2	54,2	119,2
	Absolutní chyba	-1,850	2,373	-7,608
	Relativní chyba	-4,973%	4,379%	-6,382%
Objekt 3	Automaticky	37,3197	58,8172	112,4068
	Ručně	39,4	58	120,7
	Absolutní chyba	-2,080	0,817	-8,293
	Relativní chyba	-5,280%	1,409%	-6,871%
Objekt 4	Automaticky	40,0504	62,392	131,8114
	Ručně	38,4	59,6	122,9
	Absolutní chyba	1,650	2,792	8,911
	Relativní chyba	4,298%	4,685%	7,251%
Objekt 5	Automaticky	35,4993	56,4347	110,5877
	Ručně	37	56	112,8
	Absolutní chyba	-1,501	0,435	-2,212
	Relativní chyba	-4,056%	0,776%	-1,961%
Objekt 6	Automaticky	39,8105	55,6792	123,0992
	Ručně	41	56,3	122,9
	Absolutní chyba	-1,190	-0,621	0,199
	Relativní chyba	-2,901%	-1,103%	0,162%

V tabulce 5 jsou uvedeny některé výsledky testování algoritmu. Porovnávají se automaticky zjištěné a ručně změřené obvodové rozměry lidského těla. Obvodové rozměry byly modelovány geometrickými tvary (elipsa a kružnice). Nepřesnosti měření jsou hlavně výsledkem aproximací. Je zřejmé, že například obvod hlavy člověka netvoří dokonalou elipsu.

Je vidět, že největší chyby se vyskytují při měření obvodu ramen. Chyby mohou být způsobeny vlivem oblečení. Takže se pro dosažení lepších výsledků navrhuje fotit člověka v přiléhavém oblečení.

Ze 17 předdefinovaných antropometrických rozměrů hlavy a torza systém extrahuje 15 rozměrů. Rozměry x_9 a x_{13} (viz Obrázek 2.2) se nedají zjistit automaticky, jejich lokalizaci uživatel určí ručně.

Algoritmus automatického měření antropometrických parametrů ušního boltce byl otestován na sedmi subjektech. Kvalita a efektivita měření hodně záleží na způsobu předzpracování a segmentace obrazu. V tabulce 5.2 se uvádí porovnání automaticky zjištěných a ručně změřených parametrů ušního boltce vybraného subjektu. Z uvedených výsledků můžeme soudit, že navržený algoritmus zaručuje spolehlivé měření.

Tabulka 5.2. Antropometrické rozměry ušního boltce

	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	01
Automaticky	1,779	0,832	2	1,2886	6,9106	3,1989	0,4359	25,1718
Ručně	1,8	0,8	1,9	1,4	6,9	3	0,4	25,5
Absolutní chyba	-0,021	0,032	0,1	-0,1114	0,0106	0,1989	0,0359	-0,3282
Relativní chyba	-1,150%	4%	5,263%	-7,96%	0,154%	6,630%	0,08975	-1,29%

6 Závěr

Tato práce se zabývá návrhem systému automatického odečítání antropometrických parametrů ovlivňujících HRTF (Head-related transfer function) z fotografií. Je zaměřena na shrnutí všeho potřebného pro návrh automatického 2D antropometrického systému.

V první části této práce proběhlo seznámení s teorií, za účelem následného využití k sestavení algoritmu. Teoretická část obsahuje popis prakticky všech problematik, se kterými bylo nutné se při návrhu vypořádat. Byl proveden výzkum stávajících technik bezkontaktního měření. Ve třetí kapitole byl uveden stručný popis měřících metod, které sloužily jako inspirace při návrhu vlastního systému.

V druhé části této práce byly využity teoretické znalosti z první části k sestavení algoritmu navrženého v programovacím prostředí Matlab. Program Matlab byl vybrán k návrhu algoritmu z několika důvodů. Matlab poskytuje rozsáhlé specializované knihovny funkcí, ze kterých se hlavně použily Image Processing Toolbox, Camera Calibration Toolbox a Computer Vision System Toolbox. Prošli jsme kalibrací fotoaparátu. Byla navržena jednoduchá technika převodu obrazových souřadnic do skutečných bez použití kalibračního vzoru. Součástí práce tvoří i návrh detekčního algoritmu pro detekci ušního boltce v obraze. Za tímto účelem byl vybrán detektor objektů z obraze Viola-Jones, který byl natrénován na detekci ucha. Na sedmi otestovaných objektech detektor prokázal 100% úspěšnost.

Navržený systém byl otestován na jedenácti objektech. Systém spolehlivě identifikuje a odčítává 15 rozměrů hlavy a torza. Všechny požadované části těla byly úspěšně zjištěny. Detekce požadovaných parametrů ucha je ovlivněna výsledkem segmentace. U čtyřech ze sedmi testovaných subjektů algoritmus správně identifikuje a měří osm parametrů ušního boltce. V ostatních případech byla požadována ruční korekce.

Program je možné rozšířit o rekonstrukci 3D modelu ušního boltce. Ze 3D modelu ucha se dají zjistit všechny požadované parametry.

Zdroje

- [1] GITTOES, Marianne, Ian BEZODIS a Cassie WILSON. An Image-Based Approach to Obtaining Anthropometric Measurements for Inertia Modeling. *Journal of Applied Biomechanics*. 2009, **25**(3), 265-270.
- [2] NGUYEN, Long, Thu NGUYEN a Aleksei ZHUKOV. Studies of Anthropometrical Features using Machine Learning Approach. In: *Supplementary Proceedings of the 4th International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts(AIST'2015)*. 1452. Yekaterinburg, Russia, 2015, s. 96-105. ISSN 1613-0073.
- [3] DYUSSEKENOVA, Saniya. *Modelovani HRTF*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra radioelektroniky.
- [4] ALGAZI, V.R., R.O. DUDA, D.M. THOMPSON a C. AVENDANO. The CIPIC HRTF database. In: *Proceedings of the 2001 IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (Cat. No.01TH8575)*. IEEE, 2001, s. 99-102. DOI: 10.1109/ASPAA.2001.969552. ISBN 0-7803-7126-7. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/969552/>
- [5] HORÁK, K, I KÁLOVÁ, P PETYOVSÝ a M RICHTER. *Počítačové vidění* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: http://www.uamtoold.feec.vutbr.cz/vision/TEACHING/MPOV/Pocitacove_videni_S.pdf
- [6] HUNG, Patrick, Channa WITANA a Ravindra GOONETILLEKE. Anthropometric Measurements from Photographic Images. *Computing Systems*. 2004, **29**, 764-769.
- [7] SEO, H., K. WOHN a Y.I. YEO. 3D Body Reconstruction from Photos Based on Range Scan. In: PAN, Z., R. AYLETT, H. DIENER, X. JIN a L. LI. *Technologies for E-Learning and Digital Entertainment. Edutainment 2006. Lecture Notes in Computer Science*. 3942. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, s. 849-860.
- [8] JIANG, Lingyan, Jian YAO, Baopu LI, Fei FANG, Qi ZHANG a Max MENG. Automatic Body Feature Extraction from Front and Side Images. *A Journal of Software Engineering and Applications* [online]. 2012, **5**, 94-100 [cit. 2017-03-20]. ISSN 1945-3124. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/jsea.2012.512B019>
- [9] SIMMONS, Karla. *Body measurement techniques: a comparison of three-dimensional body scanning and physical anthropometric methods*. North Carolina, 2001. Disertační práce. North Carolina State University, Textile Technology and Management Faculty.
- [10] LI, Zhaoxin, Wenyan JIA, Zhi-Hong MAO, Jie LI, Hsin-Chen CHEN, Wangmeng ZUO, Kuanquan WANG a Mingui SUN. Anthropometric body measurements based on multi-view stereo image reconstruction. In: *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013 35th Annual International Conference of the IEEE*. Osaka, Japan: IEEE, 2013, s. 366-369. ISBN 978-1-4577-0215-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6609513/>

- [11] SZELISKI, Richard. *Computer Vision: Algorithms and Applications* [online]. London: Springer, 2010 [cit. 2017-04-12]. Texts in computer science. ISBN 978-1-84882-935-0. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.414.9846&rep=rep1&type=pdf>
- [12] HARRIS, C. a M. STEPHENS. A Combined Corner and Edge Detector. In: *Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988*. Alvey Vision Club, 1988, s. 147-151. DOI: 10.5244/C.2.23.
- [13] DUDA, Richard a Peter HART. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*. 1972, **15**(1), 11-15. ISSN 00010782.
- [14] BALLARD, D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition*. 1981, **13**(2), 111-122. ISSN 0031-3203.
- [15] SHANTAIYA, Sanjivani, Keshri VERMA a Kamal MEHTA. A Survey on Approaches of Object Detection. *International Journal of Computer Applications*. 2013, **65**(18), 14-20. ISSN 0975 – 8887.
- [16] VIOLA, Paul a Michael JONES. Robust Real-Time Face Detection. *International Journal of Computer Vision*. 2004, **57**(2), 137-154. DOI: 10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb. ISSN 0920-5691.
- [17] MALACH, T, P BAMBUCH a J MALACH. *Detekce obličej v obraze s využitím prostředí MATLAB*. In: . Proceedings of the 19th Annual Conference Technical Computing Prague 2011, 2011, s. 78. ISBN 978-80- 7080-794-1.
- [18] HEIKKILA, Janne a Sami BRANDT, Juho KANNALA, ed. Geometric Camera Calibration. WAH, Benjamin. *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering* [online]. New Jersey: John Wiley and Sons, 2009, s. 1-11 [cit. 2017-03-28]. ISBN 978-0-471-38393-2.
- [19] BOUGUET, Jean-Yves. *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. 2015. Dostupné také z: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html
- [20] FREJLICHOWSKI, Dariusz, ed. a Natalia TYSZKIEWICZ, ed. The West Pomeranian University of Technology Ear Database – A Tool for Testing Biometric Algorithms. CAMPILHO, A a M KAMEL. *Lecture Notes in Computer Science: Image Analysis and Recognition*. 6112. Berlin: Springer, 2010, **6112**, s. 227-234. ISSN 0302-9743. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-13775-4_23
- [21] b.r. Dostupné také z: https://drive.google.com/drive/folders/0B2gRDGMc_FudUzZmYTFMQnpjWFU
- [22] KOHLSCHÜTTER, Tomáš. *Human body modelling by development of the automatic landmarking algorithm* [online]. Technical report DCSE/TR-2012-11. University of West Bohemia in Pilsen, 2012 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/21557/1/Kohlschullter.pdf>
- [23] HILTON, Adrian, Daniel BERESFORD, Thomas GENTILS, Raymond SMITH, Wei SUN a John ILLINGWORTH. Whole-body modelling of people from multiview images to populate virtual worlds. *The Visual Computer*. 2000, **16**(7), 411-436. ISSN 0178-2789.

Příloha A

Výsledky testování algoritmu

Tabulka 1: Automaticky extrahované rozměry hlavy a torza

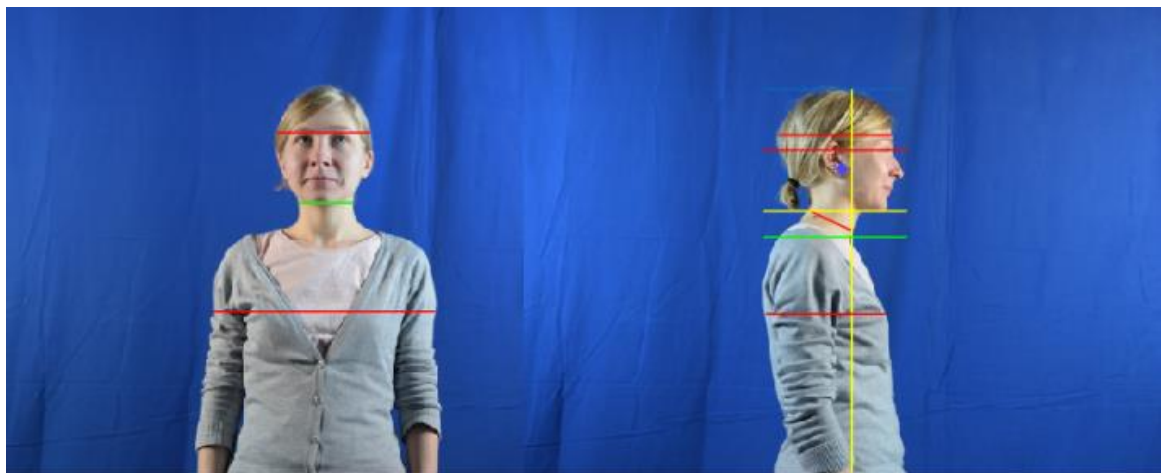
Rozměry	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4	Objekt 5
x1 (cm)	15,947	15,427	17,095	18,833	17,964
x2 (cm)	20,731	21,083	24,917	24,628	24,628
x3 (cm)	19,335	18,255	20,282	21,441	17,964
x4 (cm)	1,740	4,974	4,536	4,357	3,622
x5 (cm)	3,182	1,612	2,753	3,265	3,555
x6 (cm)	9,369	10,542	11,879	12,748	11,300
x7 (cm)	4,485	6,299	2,897	5,312	3,477
x8 (cm)	8,381	10,579	11,192	11,733	11,014
x10 (cm)	13,056	13,498	13,618	17,288	13,618
x11 (cm)	20,531	22,626	24,048	26,076	22,600
x12 (cm)	37,873	42,938	45,779	55,340	45,779
x16 (cm)	55,549	53,000	58,817	63,328	56,435
x17 (cm)	93,811	105,520	112,407	132,162	110,588
Obvod krku (cm)	29,433	33,235	37,320	40,050	35,499

Rozměry	Objekt 6	Objekt 7	Objekt 8	Objekt 9
x1 (cm)	16,467	18,388	14,271	17,016
x2 (cm)	21,681	25,249	24,151	24,700
x3 (cm)	19,760	21,407	17,564	20,858
x4 (cm)	3,494	2,649	1,446	2,333
x5 (cm)	4,739	3,346	2,185	3,578
x6 (cm)	12,627	12,350	10,717	11,801
x7 (cm)	4,666	4,940	1,098	5,901
x8 (cm)	12,934	12,642	10,801	11,676
x10 (cm)	18,937	12,350	16,192	11,389
x11 (cm)	26,623	28,542	26,074	25,799
x12 (cm)	49,126	52,693	40,070	44,186
x16 (cm)	57,023	62,599	50,141	59,645
x17 (cm)	121,672	130,489	105,074	111,864
Obvod krku (cm)	40,633	39,717	33,934	37,074

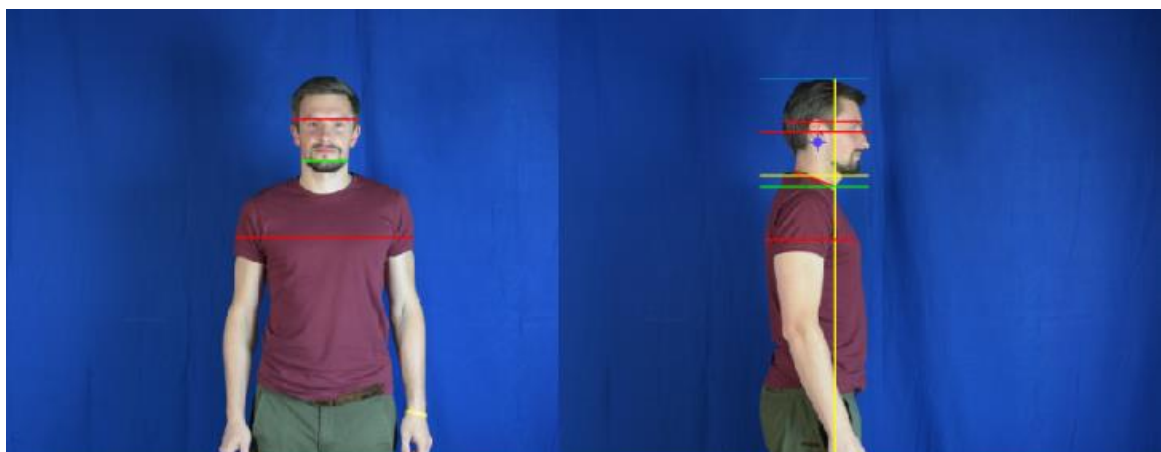
Tabulka 2: Rozměry ušního boltce

Rozměry	Objekt 1	Objekt 4	Objekt 6
d1 (cm)	1,19834	1,87823	1,44057
d2 (cm)	0,39520	0,65118	0,76187
d3 (cm)	1,02428	0,42796	1,38134
d4 (cm)	0,66140	1,39088	1,96128
d5 (cm)	3,87388	5,80525	5,81293
d6 (cm)	2,22223	3,43210	3,22684
d7 (cm)	0,29857	0,35817	0,45043
θ_1 (°)	24,63210	18,55891	31,29950

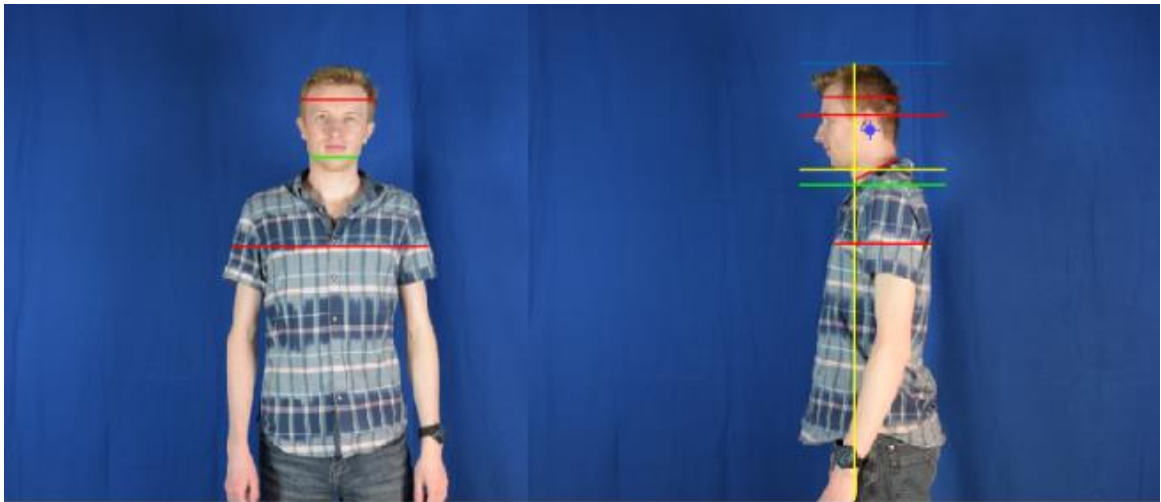
Objekt 1



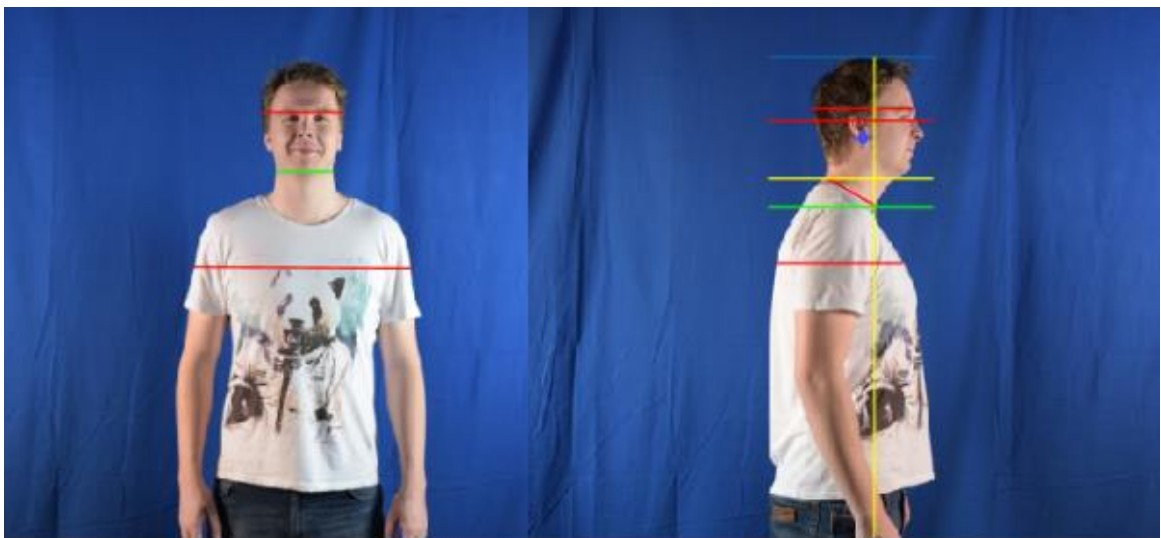
Objekt 3



Objekt 5



Objekt 9



Příloha B

Obsah přiloženého CD

- Zdrojové soubory programu
- Pořízené snímky pro testování
- Obrázky pro kalibraci kamery