



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION**  
**DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING**

# **SLEDOVÁNÍ POHYBU OČÍ POMOCÍ KAMERY**

CAMERA BASED EYE TRACKING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. MIROSLAV OTÁHAL**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. OTO JANOUŠEK, Ph.D.**

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Biomedicínské a ekologické inženýrství

**Student:** Bc. Miroslav Otáhal

**ID:** 125278

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

### Sledování pohybu očí pomocí kamery

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Nastudujte problematiku sledování pohybu očí snímaných kamerou a proveďte v této oblasti literární rešerši. 2) Navrhněte způsob hodnocení trajektorie pohybu očí po obrazovce. Preferujte výpočetní metodu umožňující sledování pohybu očí v reálném čase. 3) Vytvořte sadu vizuálních předloh, umožňujících vyhodnotit přesnost použitého přístupu. 4) V programovém prostředí Matlab vytvořte aplikaci pro hodnocení trajektorie pohybu očí. 5) Pomocí (web)kamery zaznamenejte pohyb očí několika dobrovolníků. 6) Vyhodnoťte přesnost sledování jednotlivých prvků nazírané předlohy včetně určení doby setrvání pohledu na těchto prvcích. 7) Proveďte diskusi získaných výsledků a na jejich základě vytvořte seznam doporučení pro tvorbu vizuálních předloh hodnotitelných tímto přístupem.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PFLANZER, Richard. Biopac Student Lab: Laboratory Manual. 1. vyd. Goleta: Biopac system inc., 2007.

[2] DUCHOWSKI, Andrew T, Keith S KARN a John W SENDERS. Proceedings: Eye Tracking Research. New York: Association for Computing Machinery, c2000, 147 p. ISBN 15-811-3280-8.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 22.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Oto Janoušek, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou sledování pohybu očí prostřednictvím webkamery. Jsou zde uvedeny základní přístupy ke sledování pohybu očí, pomocí kterých můžeme získat polohu zornice a na základě této polohy určit, kam se člověk právě dívá. Součástí práce je program v programovém prostředí Matlab, který s využitím metody detekce prostřednictvím infračerveného světla sleduje polohu zornice a převádí její pohyb na pohyb na monitoru. Pomocí tohoto programu bylo následně provedeno otestování několika dobrovolníků a výsledky detekce byly převedeny na vizuální formu. Vytvořena byla také šablona, jenž byla použita k hodnocení přesnosti použité metody. Na závěr byly prodiskutovány dosažené výsledky.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Sledování očí, webkamera, detekce obličeje, počítačové vidění.

## **ABSTRACT**

The aim of this master thesis is to understand problematic of eyes movement tracking using webcam. In individual chapters there are introduced basic approaches of eyes movement tracking, based on this method we can get the position of eye pupil and identify where a person looks. The part of this work is program in Matlab, which using the method of infrared detection follow the position of eye pupil and transfer this movements to the movements on the computer screen. Using this program it was tested several volunteers and the results of detection were transferred to the visual form. As part of this program it was created template for assessment of accuracy of used method. At the end of work are discussed achieved results.

## **KEYWORDS**

Eyes movement tracking, webcam, face detection, computer vision.

OTÁHAL, M. *Sledování pohybu očí pomocí kamery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 54 s., 3 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Oto Janoušek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Sledování pohybu očí pomocí kamery jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků plynoucích z porušení ustanovení § 11 a následujícího zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Otu Janouškovi, Ph.D. za vstřícný přístup, cenné rady a zapůjčení potřebného vybavení pro zpracování této diplomové práce. Taktéž bych chtěl poděkovat všem měřeným dobrovolníkům za poskytnutá data a trpělivost při samotném testování. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodičům, partnerce a celé rodině za podporu a pomoc po celou dobu mého studia.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>1 Úvod do problematiky</b>	<b>1</b>
<b>2 Současné přístupy k detekci pohybu očí</b>	<b>3</b>
2.1 Elektrookulografie .....	3
2.2 Brýle vybavené kamerou .....	3
2.3 Oční kamery s využitím IR světla.....	5
2.4 Detekce pohybu očí s využitím webkamery .....	6
2.5 Zhodnocení přístupů detekce pohybu očí .....	6
<b>3 Detekce pozice očí webkamerou</b>	<b>9</b>
3.1 Metoda detekce na základě těžiště zornice .....	10
3.2 Metoda detekce na základě Houghovy transformace .....	11
3.3 Detekce zornice na základě integrálních projekcí .....	13
3.4 Metoda detekce s využitím IR světla .....	14
3.5 Zhodnocení jednotlivých přístupů detekce pozice očí webkamerou .....	15
<b>4 Postup detekce pohybu očí</b>	<b>17</b>
4.1 Detekce obličeje.....	17
4.2 Detekce oblasti očí.....	18
4.3 Detekce oblasti zornice .....	23
4.4 Sledování pohybu očí.....	23
<b>5 Limity použité metody detekce očí</b>	<b>25</b>
5.1 Prostorové rozlišení .....	25
5.2 Časové rozlišení .....	25
5.3 Real-time.....	26
5.4 Zhodnocení limitních vlastností použité metody .....	26

<b>6</b>	<b>Návrh parametrů vizuálních předloh</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Algoritmus detekce pohybu oka</b>	<b>28</b>
7.1	Použitá kamera a její připevnění.....	28
7.2	Zpracování obrazu a detekce zornice.....	29
7.3	Transformace bodů na velikost displeje .....	32
7.4	Detekce pohledů na monitoru .....	33
7.5	Zájmová mapa.....	34
7.6	Přesnost použitého algoritmu.....	36
<b>8</b>	<b>Praktické testování</b>	<b>38</b>
8.1	Testovaná osoba č. 1 .....	38
8.2	Testovaná osoba č. 2 .....	40
8.3	Testovaná osoba č. 3 .....	41
8.4	Testovaná osoba č. 4 .....	43
8.5	Testovaná osoba č. 5 .....	44
8.6	Testovaná osoba č. 6 .....	46
8.7	Testovaná osoba č. 7 .....	47
8.8	Spojení všech „heat map“ .....	49
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>50</b>
	<b>Literatura</b>	<b>51</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>55</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Princip elektrookulogramu. [1] .....	3
Obrázek 2. Brýle s kamerou. [2].....	4
Obrázek 3. Google Glass. [3].....	4
Obrázek 4. Tobii Glasses 2. [4] .....	5
Obrázek 5. Oční kamera. [5].....	6
Obrázek 6. Lidské oko. [6] .....	9
Obrázek 7. Srovnání složek obrazu .....	10
Obrázek 8. Jednotlivé kroky detekce středu zornice. ....	11
Obrázek 9. Detekce oka pomocí Houghovy transformace. ....	12
Obrázek 10. Detekce oka pomocí projekcí pro snímání z dálky. ....	14
Obrázek 11. Detekce na základě geometrie obličeje .....	19
Obrázek 12. Detekce očí pomocí YCbCr prostoru. [12] .....	20
Obrázek 13. Základní příznaky pro detekci. [15] .....	21
Obrázek 14. Tvorba integrálního obrazu .....	22
Obrázek 15. Srovnání kvality obrazu v závislosti na vzdálenosti oka od kamery.....	23
Obrázek 16. Kalibrační obraz .....	24
Obrázek 17. Použitá webkamera. [16] .....	28
Obrázek 18. Připevnění kamery na helmu.....	28
Obrázek 19. Stojan pro fixaci hlavy .....	29
Obrázek 20. Určení středu zornice pomocí distanční metriky. [17].....	30
Obrázek 21. Postup zpracování obrazu z kamery.....	31
Obrázek 22. Transformace souřadnic .....	33
Obrázek 23. Body pohledu na testovaném obraze včetně interpolace .....	34
Obrázek 24. „Heat mapa“ .....	35
Obrázek 25. „Mapa propustnosti“ .....	35
Obrázek 26. Přesnost použitého algoritmu .....	37



Obrázek 27. Testovaná osoba č. 1 .....	38
Obrázek 28. "Heat map" osoba č. 1 .....	39
Obrázek 29. "Mapa propustnosti" osoba č. 1.....	39
Obrázek 30. Testovaná osoba č. 2 .....	40
Obrázek 31. "Heat map" osoba č. 2 .....	40
Obrázek 32. "Mapa propustnosti" osoba č. 2.....	41
Obrázek 33. Testovaná osoba č. 3 .....	41
Obrázek 34. "Heat map" osoba č. 3 .....	42
Obrázek 35. "Mapa propustnosti" osoba č. 3.....	42
Obrázek 36. Testovaná osoba č. 4 .....	43
Obrázek 37. "Heat map" osoba č. 4 .....	43
Obrázek 38. "Mapa propustnosti" osoba č. 4.....	44
Obrázek 39. Testovaná osoba č. 5 .....	44
Obrázek 40. "Heat map" osoba č. 5 .....	45
Obrázek 41. "Mapa propustnosti" osoba č. 5.....	45
Obrázek 42. Testovaná osoba č. 6 .....	46
Obrázek 43. "Heat map" osoba č. 6 .....	46
Obrázek 44. "Mapa propustnosti" osoba č. 6.....	47
Obrázek 45. Testovaná osoba č. 7 .....	47
Obrázek 46. "Heat map" osoba č. 7 .....	48
Obrázek 47. "Mapa propustnosti" osoba č. 7.....	48
Obrázek 48. "Heat map" všech testovaných osob .....	49

# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Cílem řešení problematiky této diplomové práce je sledování pohybu směru očí pomocí klasické webové kamery. Systémy pro sledování oka jsou nejčastěji používány pro studie lidského vnímání, kdy je snaha vyhodnotit, co dotyčná osoba nejvíce sleduje např. při pohledu na obrázek s reklamou. Své uplatnění nacházejí tyto systémy i jako zdravotní pomůcky pro lidi s určitým zdravotním postižením, kdy pacient, který není schopen ovládat rukou počítačovou myš, ji může ovládat pohybem očí. Následuje popis jednotlivých částí této práce.

V kapitole 2. jsou postupně popsány jednotlivé metody sledování očí od klasického elektrookulogramu, používaného v očním lékařství, až po moderní přístupy. Tyto přístupy dokáží nejen sledovat polohu zornice, ale i vyhodnocovat kam a na co se člověk právě dívá. V závěru kapitoly jsou prodiskutovány limitní vlastnosti (výhody/nevýhody, přesnost atd.) každé metody.

Hlavní důraz je kladen na metodu sledování pohybu očí pomocí běžně dostupné webkamery. V kapitole 3. jsou rozepsány jednotlivé přístupy detekce oka založené na klasické segmentaci až po složitější algoritmy využívající porovnávací masky. Na konci kapitoly jsou opět zhodnoceny výhody a nevýhody jednotlivých metod.

Dalším úkolem diplomové práce je vytvořit program ve vývojovém prostředí Matlab, který pomocí webkamery a s využitím vybrané metody detekce očí sleduje trajektorii pohybu očí a určuje, kam se člověk právě na monitoru dívá. V kapitole 4. jsou vysvětleny jednotlivé kroky od detekce obličeje až po samotné sledování očí.

V kapitole 5. je zhodnocena použitá metoda detekce zornice oka a to především z hlediska, jakého rozlišení v prostoru a čase je schopna dosáhnout a zda je možné ji použít na sledování v reálném čase, což je jedním z požadavků této diplomové práce.

Aby bylo možné hodnotit přesnost vytvořeného algoritmu, je v kapitole 6. vytvořena šablona, která bude sloužit ke zhodnocení, zda použitý algoritmus je dostatečně přesný pro korektní určení toho, kam se člověk právě dívá, a zda použitá webkamera je vhodná pro sledování oka vybranou metodou.

Kapitola 7. pojednává o použitém algoritmu detekce pohybu oka, jenž je schopen vyhodnotit, kam se testovaná osoba právě dívá na monitoru a výsledek patřičně vizualizovat. Určena je také přesnost použitého přístupu při sledování vizuální šablony s několika body.

V kapitole 8. je provedeno otestování použitého algoritmu na sérii dobrovolníků, kteří během testování sledovali statický obraz na monitoru. Z výsledných map všech testovaných osob byla následně vytvořena jediná mapa.

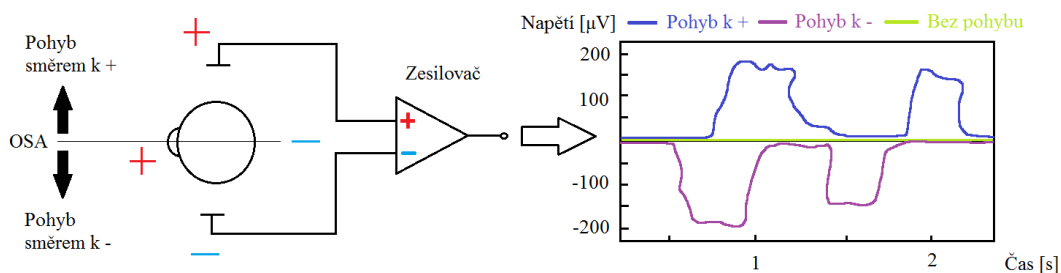
V závěru 9. kapitoly jsou shrnuty dosažené výsledky a odůvodněna zvolená metoda pro sledování pozice zornice. Taktéž je vyjádřen vlastní přínos a návrh na možné vylepšení do budoucna.

## 2 SOUČASNÉ PŘÍSTUPY K DETEKCI POHYBU OČÍ

Detekce pohybu lidského oka pomocí klasických metod či metod využívající kamery se stává stále více populární a to nejenom v oblasti očního lékařství, ale zejména v oblasti vědy a výzkumu a také v oblasti „Gadgets“ neboli tzv. technických hraček. Je možné se setkat s komerčně dostupnými přístroji, které na základě pohybu našeho oka dokáží ovládat nejrůznější přístroje, aniž by vyžadovaly interakci dotykem. V následujícím přehledu jsou uvedeny současné přístupy k detekci pohybu oka.

### 2.1 Elektrookulografie

Elektrookulografie (EOG) je metoda, která měří napětí vyvolané změnami polohy oka. Vychází ze skutečnosti, že se oko chová jako elektrický dipól se záporným pólem na sítnici a kladným pólem na rohovce. Při snímání EOG má pacient nalepeny elektrody vždy na protilehlých stranách oka (celkem čtyři elektrody pro vertikální a horizontální pohyb oka), jenž jsou připojeny na zesilovač. V klidovém stavu, tedy stavu, kdy se oko dívá dopředu, přístroj nedetekuje žádné napětí. Avšak v okamžiku, kdy se osa oka vytočí doprava, doleva, nahoru nebo dolů, změní se potenciál a přístroj detekuje napětí. Základní princip EOG zobrazuje Obrázek 1.

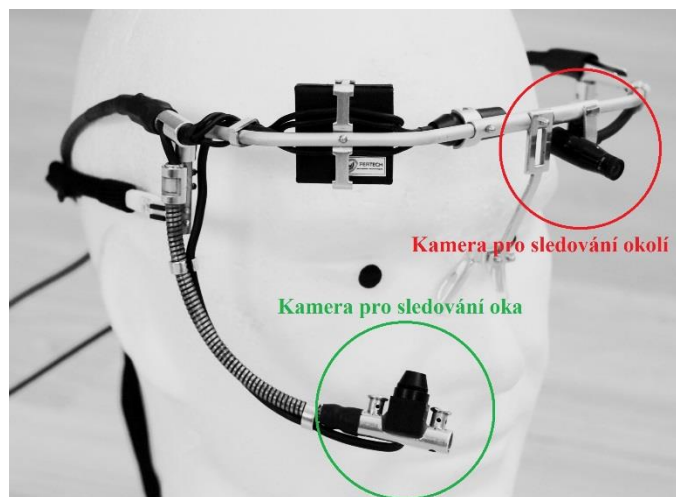


Obrázek 1. Princip elektrookulogramu. [1]

### 2.2 Brýle vybavené kamerou

Tato metoda detekce pohybu očí využívá dvojici kamer. Jedna sleduje pohyb oka v jeho bezprostřední blízkosti a druhá sleduje prostor před subjektem. Po úspěšné detekci zornice první kamerou, jenž bývá zpravidla vybavena infračervenou diodou a snímá oko nasvětlené infračerveným světlem, se na základě druhé kamery určí bod, kam se subjekt

právě dívá. Tento přístup je využíván například při sledování, jak pacienti reagují na určitý obrázek, který je jim promítán nebo kam se dívají, když provádějí určitou činnost. Příklad takových brýlí znázorňuje Obrázek 2.



Obrázek 2. Brýle s kamerou. [2]

Obrázek 2. ukazuje základní koncepci, která je určena zejména pro laboratorní podmínky a to z důvodu nepříliš praktického provedení.

Od doby před 30 lety, kdy byly vynalezeny první systémy pro sledování pohybu lidského oka, se tyto systémy neustále rozvíjejí a zdokonalují. V současnosti jsou na trhu přístroje, které jsou kompaktnější, lehčí a velice podobné klasickým brýlím. Jejich stavba je velice podobná brýlím od společnosti Google tzv. „Google Glass“, jenž znázorňuje Obrázek 3. Zásadní rozdíl je ale ve funkci, neboť Google Glass nedokáže sledovat pohyb lidského oka, ale pouze promítají svému nositeli, na miniaturní displej, nejrůznější informace z telefonu, tabletu či dokonce z internetu.



Obrázek 3. Google Glass. [3]

Vývojem brýlí, které jsou schopny detekovat pohyb oka tzv. „Invertované Google brýle“, se v současnosti zabývá mnoho společností. Jako příklad jsou uvedeny brýle od společnosti Tobii, jež zobrazuje Obrázek 4. Tyto brýle snímají pohyb našeho oka pomocí miniaturní kamery před okem a na základě druhé kamery vyhodnocují, co právě osoba pozoruje.



Obrázek 4. Tobii Glasses 2. [4]

### 2.3 Oční kamery s využitím IR světla

Jak bylo uvedeno v předchozí podkapitole, v laboratorních podmínkách i v komerčně dostupných přístrojích jsou použity speciální brýle využívající dvojici kamer. Jedna snímá oko nasvětlené infračerveným světlem a druhá snímá prostor před pacientem. Toto infračervené světlo je pro člověka neviditelné, neboť se nachází v oblasti 760 - cca 1400 nm, kdežto oblast viditelného světla je v oblasti od 350 - 760 nm. Infračervené světlo v této oblasti má malou energii a může být bez obav použito pro nasvícení oka bez následků poškození sítnice.

Oční kamery pracují na stejném principu jako brýle vybavené kamerami s tím rozdílem, že osoba nemá na hlavě žádné brýle, ale samotný sledovací přístroj je umístěn, například pod monitorem, odkud snímá pohyb oka z větší vzdálenosti. Jedná se tedy o přirozenější a volnější detekci. Opět se zde využívá infračerveného záření pro sledování oka, přičemž kamera má filtr, který vybírá pouze vlnové délky odpovídající infračervenému světlu. Obraz zachycený touto kamerou je tedy černobílý a jsou v něm více zvýrazněny světlejší složky, což způsobí snadnější rozlišení hranice buď mezi obličejem a okolním prostředím, nebo mezi světlou duhovkou a tmavou zornicí. Na Obrázku 5. je možné vidět příklad, jak může vypadat taková oční kamera.



Obrázek 5. Oční kamera. [5]

## 2.4 Detekce pohybu očí s využitím webkamery

Metody detekce pomocí klasické webkamery se řadí spíše mezi experimentální metody. Klasické webkamery, kterých je na trhu spousta, mohou být umístěny, například nad či pod monitorem, odkud se snímá pohyb oka z poměrně velké vzdálenosti, podobně jak je tomu u očních kamer. Druhou možností je umístění na pacientově hlavě (pomocí helmy), odkud se snímá pouze pohyb oka.

V prvním případě, v němž je snímán pohyb oka z dálky, se pořídí snímek celého obličeje, ze kterého je následně detekována pozice očí. Tato oblast je dále rozdělena na oblasti pravého a levého oka, které se dále zpracovávají. Protože se snímá celý obličej, hraje zde velkou roli světlo. Světlo vytváří stíny a odrazy, což vede obecně ke špatné detekci. Většina webkamer obsahuje i pomocný přísvit pomocí infračervených diod, které se aktivují při malém osvětlení a umožňují kameře vidět i v naprosté tmě.

V druhém případě je webkamera umístěna na hlavě pacienta, například na helmě, odkud se již přímo sleduje pohyb oka a není tedy potřeba sledovat obličej. Je použita zpravidla infračervená webkamera z důvodů potlačení vlivu osvětlení.

## 2.5 Zhodnocení přístupů detekce pohybu očí

Každá z výše popsaných metod má své výhody a nevýhody, což určuje možnosti jejich použití v různých oblastech s ohledem na použití např. v marketingu, bezpečnosti, psychologických studiích aj.

## **Elektrookulografie**

Jedná se o velice přesnou metodu detekce pohybu očí, která dokáže hodnotit i sakadické pohyby, což jsou velmi rychlé pohyby sloužící k fixaci oka na cíl a zajištění co nejostřejšího vidění. Tyto sakadické pohyby jsou nekontrolovatelné a člověk je v podstatě nevnímá.

Výhodou elektrookulografie je poměrně dobré prostorové rozlišení, které závisí zejména na správném umístění elektrod, nastavení přístroje a dobré vodivosti mezi elektrodou a kůží.

Mezi nevýhody EOG patří nepříliš příjemný způsob akvizice signálu. Pacient má větší část obličeje pokrytou elektrodami se spoustou kabeláže. I když existují i bezdrátové elektrody, jež signál přenáší telemetricky, tak je stále nutné mít tyto elektrody nalepeny na obličeji. Kontakt elektrody s pokožkou navíc uměle zvyšuje četnost mrkání.

## **Brýle s kamerou**

Oproti elektrookulografii se jedná o optickou metodu, při které pohyb zornice snímá kamera. Protože je kamera umístěna ve velmi těsné blízkosti oka, dosahuje tato metoda velmi vysokého časového a prostorového rozlišení a je možno sledovat i sakadické či různě rychlé pohyby oka.

K přesnému určení středu zornice postačují základní segmentační metody, jako jsou prahování, eroze, dilatace aj.

Další výhodou je velká mobilita. Laboratorní přístroje mají sice kabeláž, jež je přímo propojena s počítačem, a pokud se nejedná o notebook, tak je testovaná osoba fixována pouze na jedno místo. „Sledovací brýle“ od společnosti Tobii (viz. Obrázek 4.) mají taktéž kabeláž, pomocí které jsou brýle spojeny s nahrávacím a přenosovým modulem, ale na rozdíl od laboratorních brýlí je tento modul stále u nositele (zavěšený například za opaskem).

Asi jedinou nevýhodou je skutečnost, že po čas měření musí být brýle umístěny stále na hlavě, i když jsou velmi lehké (v případě přenosných „sledovacích brýlí“).

## **Oční kamery**

Takzvaně „stolní“ oční kamery mají tu výhodu/nevýhodu, oproti předchozím dvěma metodám, že testovaná osoba je naprosto osvobozena od kabelů, ale naopak fixována na jedno místo, ze kterého se měření provádí.



Přestože se využívá infračerveného světla ke zpřesnění detekce, kde samotná sledovací kamera je umístěna přibližně 1 metr před subjektem a výrazně níže, než je horizontální osa pohledu, může být měření ovlivněno osvětlením, které zhoršuje či zcela znemožňuje detekci. Vzhledem k této skutečnosti je třeba zajistit dostatečné světelné podmínky.

Proces samotné detekce již nezahrnuje pouze sledování pohybu oka, ale i sledování pohybu hlavy, ze které se pomocí algoritmů teprve detekuje oblast očí, jenž se dále zpracovává.

I přes tyto nevýhody se oční kamery používají v řadě výzkumů, marketingových, psychologických studiích a dosahují výborných výsledků uživatelsky přívětivou formou.

## **Webkamery**

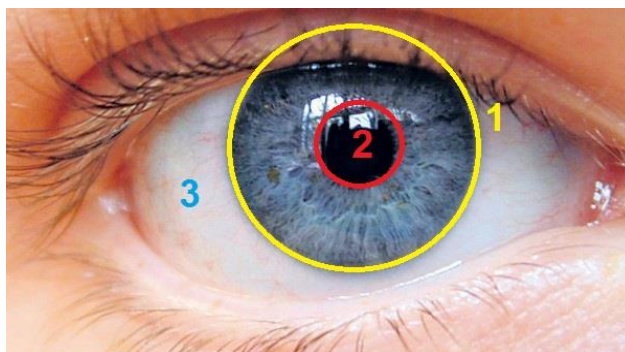
Při snímání z dálky hraje zásadní roli na kvalitu detekce vzdálenost kamery od testované osoby. Webkamery jsou navrženy výhradě pro videohovory na internetu a neobsahují tak kvalitní optický snímač jako u očních kamer. Přestože existují již webkamery, které mají vysoké rozlišení, je mnohdy problém toto rozlišení plně využít z důvodů značné náročnosti zpracování. Je třeba vyvinout takové algoritmy, jenž dokáží spolehlivě detekovat pohyb oka i při malém rozlišení webkamery. Mezi výhody tohoto přístupu lze řadit snímání z dálky, stejně jako u očních kamer. Nevýhodou je již zmíněné rozlišení, velká náchylnost na světlo a stejně jako u očních kamer nutnost zpracovávat pohyby hlavy.

Při umístění webkamery do těsné blízkosti oka odpadá, jak problém se vzdáleností, tak i problém s rozlišením kamery. Lze tedy zpracovávat obraz i při velmi malém rozlišení a dosáhnout tak výborných výsledků a velké rychlosti. Opět je využita výhradně infračervená kamera, aby byl potlačen vliv osvětlení. Výhodou je tedy velká rychlost zpracování a malá náchylnost na světlo. Protože se jedná o obdobný přístup jako v případě laboratorních brýlí s kamerou, je nevýhodou nepříliš komfortní detekce pohybu oka, kdy sledovaná osoba stále vidí před obličejem kameru, přes kterou se musí dívat na monitor.

Všechny kroky detekce očí pomocí webkamery pro oba přístupy jsou detailně rozebrány v kapitole 4.

### 3 DETEKCE POZICE OČÍ WEBKAMEROU

V této kapitole budou rozebrány možné přístupy získání pozice očí webkamerou. Spolehlivé metody detekce je dosaženo nejčastěji kombinací základních segmentačních metod, např. prahováním a složitějších metod využívající kupř. hledání kruhu daného poloměru ve snímané scéně. Kvůli snazšímu popisu principu jednotlivých metod detekce je kapitola uvozena popisem lidské oka a jeho jednotlivých částí při pohledu zepředu.



Obrázek 6. Lidské oko. [6]

Lidské oko při pohledu zepředu je možné rozlišit na 3 části (viz. Obrázek 6.). První částí, označenou číslem jedna, je **duhovka**. Duhovka odděluje přední a zadní oční část oka. U člověka má tvar dokonalého kruhu rozděleného na vnější a vnitřní kruh. Samotná duhovka se nachází mezi vnějším a vnitřním kruhem. Je silně pigmentovaná neboli různě zbarvená s různou strukturou. Barva lidského oka je zpravidla modrá, šedá, zelená nebo hnědá. Stejně jako u kůže, která chrání náš organismus před vlivy okolního prostředí, má i barva oka ochranný charakter. Chrání oko před nadměrným osvětlením, jenž by jinak způsobilo jeho poškození. [7]

Další částí, označenou číslem 2, je **zornice**. Nachází se ve středu duhovky a jejím hlavním úkolem je propouštět světlo přes oční komoru a čočku směrem na sítnici, kde se nacházejí světlo a barvocitlivé elementy (tyčinky a čípky). Šířka zornice nemá stále stejnou velikost, neboť reguluje množství dopadajícího světla tak, že se buď rozšíří, pokud potřebuje získat co nejvíce světla (zejména ve tmě), nebo se zúží, v případě nadbytku světla.

Poslední částí je tzv. **bělima**, jenž je označena číslem 3. Ta bývá zpravidla bílá (u starších lidí postupně žlutne) a její hlavní funkcí je udržovat tvar duhovky, spolu se zornicí, a chránit vnitřek oka. Na bělimu jsou navázány okohybné svaly, jež zajišťují pohyb oka.

### 3.1 Metoda detekce na základě těžiště zornice

Zornice se nachází uprostřed duhovky a je v podstatě nejtmaší částí oka. Nikdy není zakryta očním víčkem, jak je tomu v případě duhovky, kdy její část je schovaná za víčkem, na kterém se nacházejí řasy. Tyto řasy vrhají stíny a negativně ovlivňují detekci.

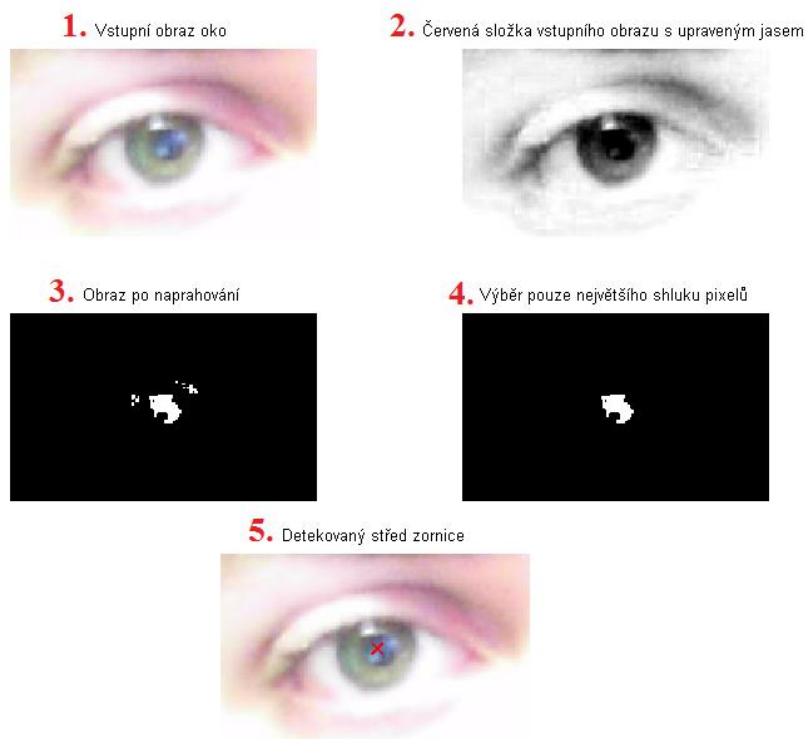
Polohu zornice je možné získat použitím prahovací metody. Postup je takový, že nejprve je vstupní obrázek upraven do takové podoby, aby byly co nejvíce potlačeny nežádoucí jevy, jako je částečné zakrytí oka řasami, odrazy světla od rohovky, nerovnoměrné osvětlení a jiné jevy, jež by znemožnily detekci oblasti zornice. Rohovka odráží světlo, které na ni dopadá pod určitým úhlem a odstranění této „vady“ bývá mnohdy velmi obtížné zpravidla u real-time aplikací. Taktéž stíny vrhané okolními strukturami komplikují samotné zpracování obrazu.



Obrázek 7. Srovnání složek obrazu

V případě použití barevné kamery bylo experimentem stanoveno, že pokud se vezme pouze červená složka vstupního obrazu, je obraz méně náchylný na odrazy světla od rohovky i méně náchylný na stíny a zornice je na první pohled dobře rozeznatelná (viz. Obrázek 7). Po této operaci je výsledkem černobílý obraz, jenž je následně upraven tak, aby byla zvýrazněna černá barva odpovídající naší zornici. Zvýrazněny jsou tedy pixely, které mají hodnotu odpovídající přibližně černé barvě zornice. Následně je do výsledného obrazu pomocí logické operace „menší než“ zahrnuta pouze tato oblast černé barvy. Provedeno bylo prahování s jedním prahem. Výsledkem této úpravy je binární obraz, kde pixely spadající do prahovací oblasti jsou reprezentovány logickou úrovní 1, a ostatní pixely, které nespádají do prahovací oblasti, jsou nastaveny na hodnotu 0. Dále stačí

nalézt pouze největší oblast hodnot s úrovní jedna, která je zjištěna za pomoci měřících operací, a vše mimo tuto oblast odstranit. Nakonec je nalezen střed této největší oblasti odpovídající zornici, jež je označen značkou křížku. Názorný postup detekce zornice v prostředí Matlab zobrazuje Obrázek 8.



Obrázek 8. Jednotlivé kroky detekce středu zornice.

### 3.2 Metoda detekce na základě Houghovy transformace

Metoda detekce na základě Houghovy transformace slouží k nalezení struktur v obraze, jejichž tvar je možné popsat matematickou rovnicí. Jedná se tedy nejčastěji o detekci přímek a kružnic, ale i pro detekci čtverců nebo elips. V našem případě bude zvolena detekce kružnic, neboť zornice i duhovka má tvar kruhu. Vstupem pro Houghovu transformaci je binární obraz reprezentující hrany.

Houghova transformace pro hledání kružnic pracuje tak, že na základě analytické rovnice kruhu a zvoleného poloměru, je každý pixel binárního obrazu o souřadnicích  $x$ ,  $y$  opsán kružnicí a tyto kružnice o souřadnicích  $(a, b)$  a poloměru  $r$ , pro každý pixel, jsou ukládány do trojrozměrného Houghova prostoru parametrů. Analytickou rovnicí pro kruh popisuje rovnice 3.1, [8]

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2, \quad (3.1)$$

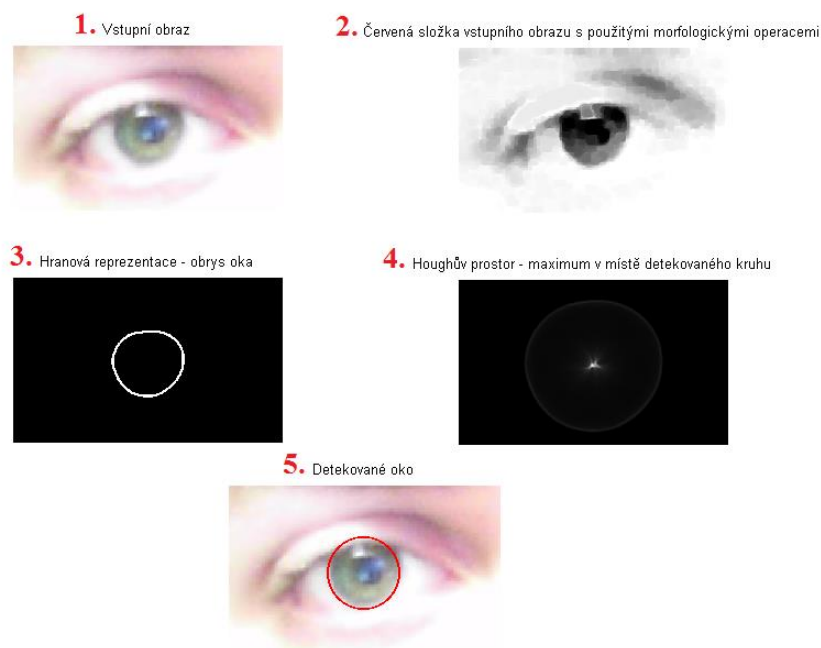
kde  $x, y$  jsou souřadnice pixelu v binárním obraze,  $(a, b)$  popisují souřadnice středu kružnice v Houghově prostoru a  $r$  popisuje poloměr kružnice.

A tedy každý bod na kružnici je popsán vztahy, [8]

$$x = a + r * \cos\varphi, \quad (3.2)$$

$$y = b + r * \sin\varphi, \quad (3.3)$$

kde  $x, y$  je x-ová a y-nová souřadnice pixelu v binárním obraze,  $r$  je poloměr kružnice,  $(a, b)$  jsou souřadnice středu kružnice v Houghově prostoru a  $\varphi$  reprezentuje úhel od středu kružnice v rozsahu  $0 - 2\pi$ , pod kterým se nachází daný bod.



Obrázek 9. Detekce oka pomocí Houghovy transformace.

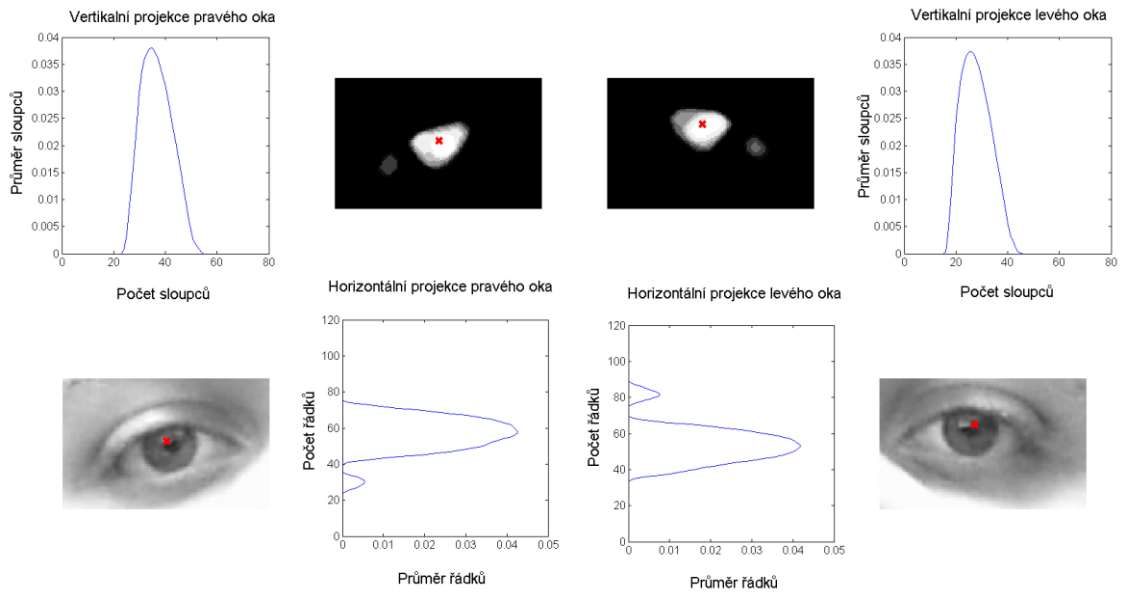
Pro hledání oka v obraze je postupováno následovně. Obraz je nejprve převeden do černobílé reprezentace, která slouží jako vstup pro hranovou detekci. Hrana v obraze je reprezentována strmou změnou intenzity. Jelikož samotná duhovka je umístěna na velmi světlé až bílé bělimě, jsou hrany této duhovky snadno rozeznatelné. Takto získaná binární hranová reprezentace obsahuje ve většině případů i hrany, jež jsou z hlediska dalšího

zpracování nevhodné a způsobovaly by chybné detekce. Z toho důvodu je obraz pomocí morfologických operací upraven tak, aby zobrazoval pouze obrys oka. Před použitím samotné Houghovy transformace je vhodné určit přibližnou hodnotu poloměru hledaného kruhu. Za použití měřících nástrojů může být poloměr zjištěn ručně nebo návrhem automatického měření. Jakmile je známa přibližná hodnota poloměru, přistoupí se k samotné Houghově transformaci. Na začátku je navoleno pole o stejné velikosti jako binární obraz, které je nazváno akumulátor a následně vynulováno. Tento akumulátor bude sloužit pro ukládání nalezených kružnic. Výpočtem souřadnic středů kružnic ( $a$ ,  $b$ ) pro jednotlivé  $\varphi = 1:360^\circ$  pomocí vzorců 3.2 resp. 3.3 a logického výrazu mělo být zjištěno, zda jsou tyto souřadnice nenulové a menší než velikost obrazu. Pokud ano, zvýšila by se hodnota akumulátoru o jedničku a pokračovalo by se znovu s novou hodnotou  $\varphi$ . Takto jsou vypočteny středy  $[a, b]$  pro všechny pixely obrazu a úhly natočení  $\varphi$ . Nyní jsou v akumulátoru obsaženy hodnoty, které určují nalezené kružnice se středem  $[x, y]$  v binárním obraze o poloměru  $r$ . Tam, kde dosahují tyto hodnoty svého maxima, se nachází střed hledané kružnice, jež je následně označen křížkem podle souřadnic v akumulátoru. Výsledek detekce oka pomocí Houghovy transformace reprezentuje Obrázek 9. [8]

### 3.3 Detekce zornice na základě integrálních projekcí

Tato metoda se dá využít buď pro detekci pohybu oka z dálky, nebo i pro detekci z těsné blízkosti oka. Pro detekci z dálky je cílem nalezení pozice duhovky, která se lépe detekuje než zornice, neboť má podstatně větší plochu, na které již nevádí občasné odrazy světla od rohovky. Při detekci zblízka lze díky lepšímu rozlišení obrazu detekovat přímo pohyb zornice.

Využívá se detekce na základě vertikální a horizontální integrální projekce. Pro představu je k dispozici binární či černobílý obraz. Uprostřed tohoto obrazu se nachází světlý vyplněný objekt snadno odlišitelný od tmavého pozadí. Pro získání integrální projekce se provede součet (může být i průměr nebo střední hodnota) sloupců v každém řádku obrazu a výsledek se uloží do prvního sloupce připravené matice. Stejným způsobem se provede součet všech řádků ve všech sloupcích obrazu a výsledek se taktéž uloží do připravené matice. Takto jsou v jedné matici uloženy hodnoty vertikální projekce a v druhé matici hodnoty horizontální projekce pro úhel natočení obrazu  $0^\circ$ . Při vykreslení těchto matic je výsledkem dvojice grafů, ve kterých maximální hodnota odpovídá  $x$ -ové nebo  $y$ -ové souřadnici středu nejvýraznějšího objektu v původním obraze. Výsledek detekce pozice očí pomocí této metody v programovém prostředí Matlab ukazuje Obrázek 10.



Obrázek 10. Detekce oka pomocí projekcí pro snímání z dálky.

### 3.4 Metoda detekce s využitím IR světla

Tato metoda je založena na podobném principu jako první metoda pro detekci těžiště, ale s tím rozdílem, že se využívá umělého přisvětlení oka infračerveným světlem, které kamera dokáže snímat.

Využívá se skutečnosti, že při nasvětlení oka infračerveným světlem jsou více zvýrazněny jednotlivé části oka, neboť IR světlo více zvýrazňuje světlé části. Jelikož zornice je nejtmavší částí oka a je obklopena poměrně světlými částmi (v závislosti na pigmentu duhovky), lze snadno pomocí základních metod určit její střed.

Jev, který může nastat při nasvícení oka infračerveným zářením, je bílá zářivá zornice. Tento efekt je způsoben tím, že lidské oko infračervené záření nevidí a nemůže ho tedy ani regulovat jako v případě viditelného světla, kdy se při nadměrném osvětlení zornice zúží a při malém osvětlení se naopak roztáhne. Zornice je tedy plně roztažená, v případě, kdy je měření prováděno v naprosté tmě a infračervené světlo prochází bez útlumu až na sítnici, od které se odrazí zpět ke snímači. Kamera tudíž snímá své vlastní infračervené záření. Při snímání z dálky tento jev nastává téměř vždy, pokud je zdroj IR světla ve stejné rovině s okem a odražené záření se šíří přímo ke kameře. V případě snímání z těsné blízkosti oka nemusí tento jev nastat. Záleží na umístění zdroje IR záření. Odražené záření se šíří buď přímo ke kameře a způsobí „zářivou zornici“, nebo mimo kameru, přičemž zornice zůstává černá.

V případě viditelného světla nastává podobný efekt tehdy, když na oko dopadne rychlý záblesk světla s velkou intenzitou. Při tak rychlém záblesku nestačí zareagovat autoregulační mechanismy oka a světlo se následně šíří přímo na sítnici odkud se odráží. Vlivem červeného zbarvení vnitřku oka snímá kamera odražené světlo zbarvené do červena. Na snímku je tento efekt zobrazen v podobě tzv. „červených očí“.

V této diplomové práci bude využita metoda detekce, která nepoužívá jev „zářivé zornice“. Její jednotlivé kroky budou podrobněji vysvětleny v kapitole 7.

### **3.5 Zhodnocení jednotlivých přístupů detekce pozice očí webkamerou**

#### **Metoda založená na těžišti zornice**

Tato metoda je založena na prahování. Z histogramu černobílého obrazu je vybrána oblast tmavých pixelů odpovídající zornici a z následného binárního obrazu určena pozice zornice.

Výhodou je velká rychlost zpracování jak u statického obrazu, tak i ve videu, neboť je použita velmi jednoduchá metoda segmentace. Ovšem ale její použití v real-time sledování není příliš vhodné, protože lidské oko má určitou reflektivitu. Jestliže tedy na oko dopadá světlo, dochází na rohovce k lomu a toto odražené světlo směřuje ke kameře, která jej vyhodnotí jako lokální přesvětlení například v oblasti zornice. Toto odražené světlo je schopno omezit nebo i úplně znemožnit další zpracování a úspěšnou detekci zornice. Čím je nižší rozlišení kamery, tím větší jsou jednotlivé pixely a tím více se projeví odraz světla od rohovky. Proto je nutno zvolit takové umístění zdroje světla, aby se světlo od rohovky minimálně odráželo, což může být velmi obtížné.

Z těchto důvodů se tato metoda používá výhradně v kombinaci s jinými metodami, neboť samotná neposkytuje dobré výsledky.

#### **Metoda založená na Houghově transformaci**

Houghova transformace slouží ke hledání objektů různých tvarů podle charakteristické rovnice a tedy v tomto případě kružnice.

Pomocí Houghovy transformace je možno nalézt kruh i z nepříliš kvalitní hranové reprezentace, kdy jsou jednotlivé linie mírně přerušeny. Jestliže například polovina kruhu



chybí, protože duhovka je zakryta očním víčkem, není možné pomocí této metody určit, zda se jedná právě o kruh a musí se přistoupit k doplňujícím metodám, které na základě okolí jsou schopny tento kruh dopočítat. Tím se zvyšuje i výpočetní náročnost už velmi náročné Houghovy transformace, neboť pro sestavení parametrického prostoru, jež je později procházen a v němž jsou hledány maxima, potřebujeme tři parametry ( $a$ ,  $b$ ,  $r$ ) pro každý pixel v hranovém obraze. Proto není tato metoda vhodná pro použití ve videu.

Existují i modifikace Houghovy transformace, které jsou již natolik rychlé, že mohou být použity jako real - time. Zrychlení spočívá například v tom, že místo všech hranových pixelů je opsána kružnicí jen určitá část, a po nalezení maxima je akumulátor zpravidla vynulován. Tímto je možné implementovat Houghovu transformaci pro použití ve videu. [9]

### **Metoda založená na integrálních projekcích**

Tato metoda spojuje prahování a základní morfologické operace a poskytuje možnost nalézt maximální výchylky horizontální a vertikální integrální projekce jak v obraze binárním, tak černobílém.

Jelikož je hledána maximální výchylka neboli shluk nejtmažších pixelů v obraze zachycující lidské oko, je možné poměrně přesně určit polohu zornice i za ne příliš dobrých světlených podmínek. Avšak opět zde vystupuje odraz světla od rohovky, který způsobuje narušení těchto tmavých pixelů, ale pouze v lokálních oblastech a nikoli v celém oku. Tyto odrazy je možno eliminovat morfologickými operacemi.

Stejně jako u všech metod detekce pozice očí webkamerou je i u této metody nutné umístit zdroj světla tak, aby nevznikaly odrazy. Místo klasické webkamery lze také použít webkameru s infračerveným přísvitem, jež poskytuje lepší výsledky (viz dále).

### **Metoda s použitím IR světla**

Ze všech výše zmíněných metod dosahuje tato metoda nejlepších výsledků jak z hlediska prostorového, tak i časového rozlišení. Rovněž je možné tuto metodu použít v real-time zpracování. Velkou výhodou metody je skutečnost, že dokáže pracovat i v naprosté tmě a je tedy možné zajistit pro každého testovaného jedince stejné podmínky měření. Pracuje i s velmi malým rozlišením, kdy se pomocí základních segmentačních metod určí přesný střed zornice.

## 4 POSTUP DETEKCE POHYBU OČÍ

Předmětem této kapitoly je popsat jednotlivé kroky pro sledování očí webkamerou s infračerveným přísvitem pro oba možné přístupy.

Při prvním přístupu, kdy je kamera umístěna v určité vzdálenosti před testovanou osobou a pod monitorem, samotné zpracování obrazu nezahrnuje pouze oblast očí, ale i detekci a sledování oblasti obličeje. V této oblasti obličeje je poté nalezena oblast očí, která se dále zpracovává. Při druhém přístupu se zpracovává pouze oblast jednoho oka.

V následujícím textu jsou nejdříve popsány jednotlivé části prvního přístupu od detekce obličeje až po oblast samotného oka, která je již shodná s druhým přístupem.

### 4.1 Detekce obličeje

Prvním krokem je nalezení obličeje v počátečním obraze, jenž byl pořízen před samotným započítáním videosekvence. Podstatou je, aby se obličej nemusel hledat v reálném čase, což by zvyšovalo výpočetní náročnost a obraz by nebyl plynulý. Pro nalezení obličeje existuje mnoho metod lišících se přesností detekce, náchylností na světlo nebo oblastí použití. Je možné je rozdělit do několika kategorií.

#### **Detekce podle neměnných částí obličeje**

Zde se využívá skutečnosti, že obličej každého člověka obsahuje oči, nos, ústa, uši atd., společně na určitém barevném podkladu. Tyto části jsou neměnné, lišící se u každého člověka pouze tvarem, polohou, velikostí či barvou a je možné je detekovat pro libovolné natočení obličeje. Výhodou je možnost detekce i při nízkých hodnotách osvětlení.

#### **Detekce podle porovnávání obličejů z databáze**

Dalším přístupem je komparace charakteristických rysů v obličejí (vzdálenost, velikost, barva aj.) s databází obličejů s cílem nalézt shodu. Výsledkem může být i více shod, neboť i když je každý člověk odlišný (vyjma dvojčat), může být nalezen člověk, se kterým má hledaná osoba společné rysy v obličejí. Při správném nastavení a zlepšení detekce charakteristických rysů poskytuje tato jednoduchá metoda velmi dobré výsledky.

## **Detekce podle porovnání s jedním obličejem**

Jedná se o podobnou metodu jako srovnávání rysů z databáze obličejů, ale s tím rozdílem, že nejsou porovnávány charakteristické rysy se všemi obličejí v databázi, ale pouze s jedním modelem obličeje, jež vznikl výpočtem ze všech obličejů v databázi. Jelikož není potřeba porovnávat obličej se všemi obličejí v databázi, dochází ke zrychlení této metody oproti předchozí s přibližně stejným výsledkem.

## **Detekce podle typického modelu obličeje**

Tato metoda detekce spočívá v návrhu modelu tzv. univerzálního obličeje s přesně definovanými pravidly. Podle tohoto modelu je možno nalézt jakýkoliv obličej. Z toho lze usoudit, že návrh takového modelu bude velice složitý, neboť model musí být schopen adaptace na různé velikosti obličejů a vzdáleností jednotlivých částí obličeje. [10]

## **4.2 Detekce oblasti očí**

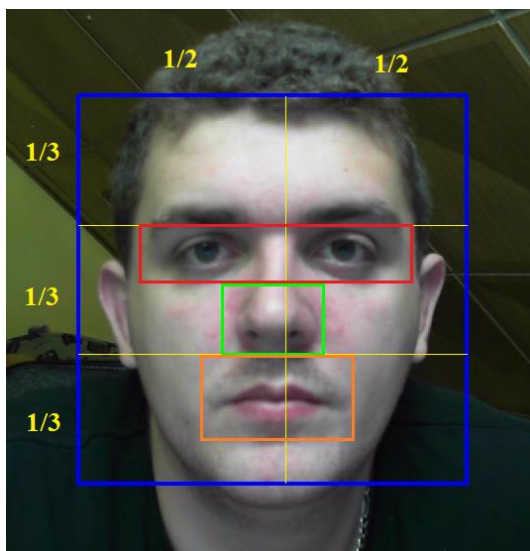
Jakmile je detekován obličej, přistoupí se k detekci očí. Jak již bylo uvedeno, oči patří do kategorie neměnných rysů obličeje a je možné je detekovat současně s obličejem. Pokud bude volen tento způsob detekce, mohou nastat falešné detekce, kdy jsou detekovány objekty v pozadí mimo obličej, které nemusejí oči vůbec připomínat. Z toho důvodu se oči detekují výhradně z nalezené oblasti obličeje. Opět je možné zvolit několik přístupů detekce.

## **Detekce podle rozměrů detekovaného obličeje**

Tato metoda je založena na výpočtu poloh částí obličeje (oči, ústa, nos) podle rozměrů detekovaného obličeje. Požadavkem pro tuto detekci je dobře detekovaný obličej vysoký od brady po začátek vlasů a široký od ucha k uchu, aby se nehodnotily části, jenž pro detekci nemají žádný význam. Tímto jsou zajištěny stejné podmínky pro každý obličej.

Každý člověk má zcela jiný obličej, a tudíž i různé polohy a velikosti jednotlivých charakteristických částí. Jestliže je obličej pomyslně rozdělen v polovině šířky, představuje tento řez osu celého obličeje, která je shodná s osou nosu, neboť nos se u každého člověka nachází vždy uprostřed obličeje. Po opětovném rozdělení obličeje, tentokrát výšky na tři části, je obličej ještě více rozložen na požadované oblasti potřebné k detekci. Jedna třetina obličeje obsahuje čelo, druhá oči a nos a třetí ústa včetně brady.

Z těchto oblastí je již možné snadno určit polohu úst, nosu, levého a pravého oka a to na základě velikostí jednotlivých oblastí a jejich hranic. Například prostřední oblast obsahuje oči a nos, přičemž oblast očí je ve vrchní části této oblasti a oblast nosu ve spodní. Příklad této detekce ilustruje Obrázek 11.



Obrázek 11. Detekce na základě geometrie obličeje

Nevýhodou této metody je skutečnost, že je schopna korektně hodnotit pouze obličeje bez natočení či sklonu. V těchto případech se mění poloha charakteristických rysů a oči mohou například zasahovat i do oblasti pro čelo. Tudiž tato metoda nedosahuje příliš vysoké přesnosti, neboť závisí na tvarech a kvalitě detekce obličeje.

### **Detekce v jiném barevném prostoru**

Dalším přístupem detekce očí je detekce v jiném barevném prostoru než originální snímek obličeje, a to z důvodu potlačení nežádoucích jevů, jako je osvětlení, stíny, pozadí atd.

Proto se používá transformace originálního RGB snímku obličeje do nejčastěji využívaného prostoru YCbCr. V tomto prostoru Y představuje složku jasu, Cb chrominanční složku modré barvy RGB a Cr chrominanční složku červené barvy RGB. Složky Cb a Cr je možné také získat odečtením složky Y od modré složky RGB pro Cb a červené složky RGB pro Cr. Převod z RGB prostoru do YCbCr je možné popsat následujícími rovnicemi, [11]

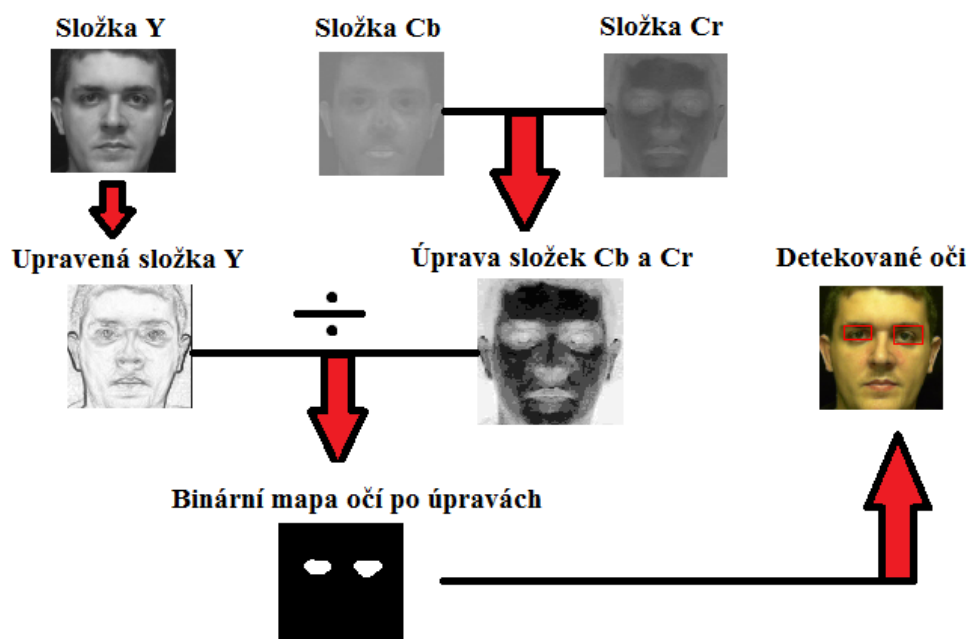
$$Cb = -0.168736 * R - 0.331264 * G + 0.5 * B, \quad (4.1)$$

$$Cr = 0.5 * R - 0.418688 * G - 0.081312 * B, \quad (4.2)$$

$$Y = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B, \quad (4.3)$$

kde R představuje červenou složku RGB obrazu, G zelenou složku, B modrou a Y složku jasu YCbCr obrazu.

Z YCbCr barevného prostoru je možné lépe určit pozici očí, neboť složka Y obsahuje informaci o jasu v obraze, kterou lze dále upravovat například pomocí prahování či morfologických operací. Výsledky lze následně kombinovat prostřednictvím aritmetických operací s výsledky ostatních dvou složek Cb a Cr. Konečným výsledkem je tzv. mapa očí, jenž tvoří binární obraz, ze kterého jsou měření určeny pozice obou očí. Jednotlivé kroky detekce pomocí YCbCr prostoru prezentuje Obrázek 12. [12]



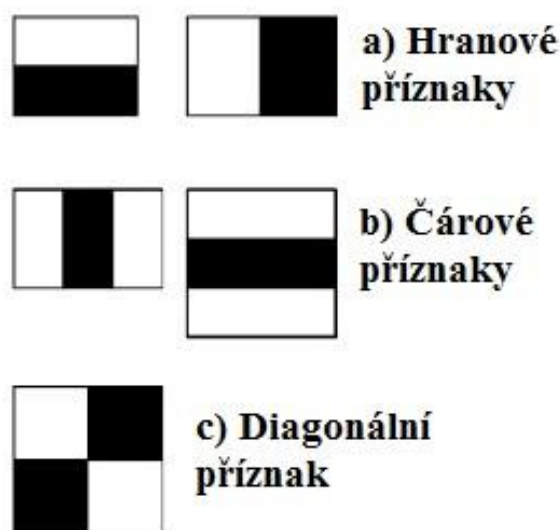
Obrázek 12. Detekce očí pomocí YCbCr prostoru. [12]

### Detekce pomocí objektového detektoru Viola-Jones

V současnosti je hojně využívaná metoda detekce zejména obličejů, ale lze ji použít i pro detekci očí či jiných objektů. Vychází z metody detekce obličeje na základě neměnných rysů, popsané v podkapitole 4.1. Velkou výhodou je rychlost a malá závislost na světlo.

Detekce probíhá v několika krocích. Prvním krokem pro spolehlivou detekci je sestavení tzv. klasifikačního algoritmu, jehož cílem je zlepšení přesnosti detekce vybraného objektu pomocí učícího se procesu. Algoritmus obsahuje sadu tzv. slabých klasifikátorů, jež mají menší přesnost a obsahují vstupní testovací příznaky, pomocí kterých je možné rozeznat obličej od pozadí s přesností větší než 50%. Tyto příznaky vznikly jako odezvy na příznaky podobné Haarovým vlnkám (viz dále) z vstupní databáze „trénovacích“ obrazů, obsahující několik tisíc správných a chybných detekcí hledaného objektu. Při použití více slabých klasifikátorů s přibližně stejnou přesností se zvyšuje klasifikační účinnost a je vytvořen tzv. silný klasifikátor. [13],[14]

Princip učícího procesu spočívá ve váhování množiny příznaků rovnoměrnými váhami. Podle toho je vybrán slabý klasifikátor obsahující nejmenší chybu klasifikace při daných vahách a kontroluje se, zda nepřekročil nastavenou klasifikační chybu, při které by nebyla zajištěna konvergence. Následně je vypočten koeficient slabého klasifikátoru při spojení více slabých klasifikátorů a dochází k aktualizaci vah u příslušné testovací množiny na základě správné klasifikace vybraným klasifikátorem. Při špatné klasifikaci se váha zvětší a při správné klasifikaci se naopak zmenší. Tímto je v dalším kroku hledán klasifikátor, jež bude schopen lépe detekovat chybné klasifikace než ten předchozí. Tento cyklus se opakuje až do dosažení požadovaného počtu slabých klasifikátorů. Pro vytvoření příznaků se používají základní příznaky, které zobrazuje Obrázek 13. [14]



Obrázek 13. Základní příznaky pro detekci. [15]

Při aplikaci vybraného typu příznaku z Obrázku 13. na vstupní obraz je výsledkem vyjádřena číselná hodnota příznaku, jež je dána součtem pixelů pod bílou oblastí, mínus součtem pixelů pod černou oblastí. Tyto příznaky jsou aplikovány na celý vstupní obraz

a při hodnocení dochází i ke změně velikosti z 1x1 až na velikost vstupního obrazu. Výsledkem je ohromné množství hodnot příznaků, které se následně použijí jako vstup učícího klasifikátoru. Ten jej na základě natrénovaných dat klasifikuje a vybere z této množiny jen určité množství příznaků a použije je k detekci.

Pro zrychlení výpočtu jednotlivých příznaků ve vstupním obrazu je obraz převeden na tzv. integrální obraz. Výpočet integrálního obrazu spočívá v tom, že jsou vypočteny součty všech obdélníkových oblastí ve vstupním obrazu. Začíná se v levém horním rohu a postupně se počítají součty jednotlivých obdélníkových oblastí, až se dosáhne pravého dolního rohu. V tomto rohu se nachází největší hodnota součtu. Příklad tvorby integrálního obrazu je možné vidět na Obrázku 14.

Detekce očí v obraze je založena na stejném principu, jen se místo trénovacích dat obličejů použijí obrázky správně detekovaných a špatně detekovaných očí a proběhne opětovná klasifikace.

1	2	3	4	5	$\Sigma$	1	3	6	10	15
6	7	8	9	10	$\Sigma$	7	16			
11	12	13	14	15	$\Sigma$	18	63			
16	17	18	19	20	$\Sigma$	34			160	
21	22	23	24	25	$\Sigma$	55	115			

$$\Sigma = 1$$

$$\Sigma = 1+2+6+7 \Rightarrow 16$$

$$\Sigma = 1+2+3+6+7+8+11+12+13 \Rightarrow 63$$

$$\Sigma = 1+2+3+4+6+7+8+9+11+12+13+14+16+17+18+19 \Rightarrow 160$$

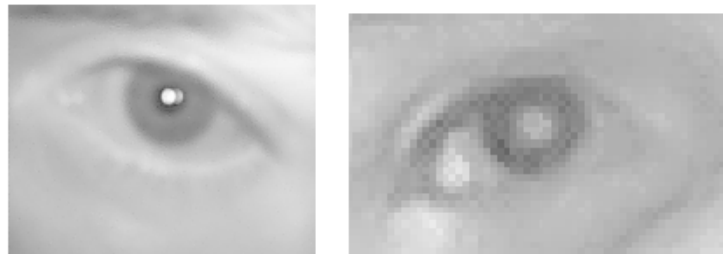
$$\Sigma = 1+2+6+7+11+12+16+17+21+22 \Rightarrow 115$$

Obrázek 14. Tvorba integrálního obrazu

### 4.3 Detekce oblasti zornice

Dalším krokem je již samotná detekce zornice, jež je společná pro oba dva přístupy. U prvního přístupu se ale nedosahuje takové přesnosti jako u druhého, kdy je kamera umístěna v těsné blízkosti oka. Je-li kamera umístěna pod monitorem je ze sejmutého obrazu přiblížena oblast oka, což má za následek zhoršení rozlišení. U druhého přístupu se přímo zpracovává oblast oka beze změny rozlišení. Metody detekce zornice byly detailně popsány v Kapitole 3.

Zvolena byla metoda detekce pomocí infračerveného světla pracující na druhém přístupu, při kterém je kamera připevněna na helmě, jež má testovaná osoba na hlavě, odkud se sleduje pohyb oka. Tato metoda dosahuje vysoké přesnosti a malé náchylnosti na okolní vlivy osvětlení. Srovnání kvality obrazu obou přístupů znázorňuje Obrázek 15.



**Kamera v blízkosti oka    Kamera pod monitorem**

Obrázek 15. Srovnání kvality obrazu v závislosti na vzdálenosti oka od kamery

### 4.4 Sledování pohybu očí

Po úspěšné detekci zornice je dalším cílem sledování pohybu očí a určení, co testovaná osoba právě na monitoru sleduje.

Pokud je kamera umístěna pod monitorem, jsou snímány pohyby obou očí. Ty se ale pohybují současně a nelze je samostatně natáčet do různých směrů. Je tedy změřena vzdálenost mezi zornicemi a ve středu této délky je stanoven nový bod, zobrazující místo pohledu, neboť směry pohledu obou očí se sbíhají přibližně uprostřed.

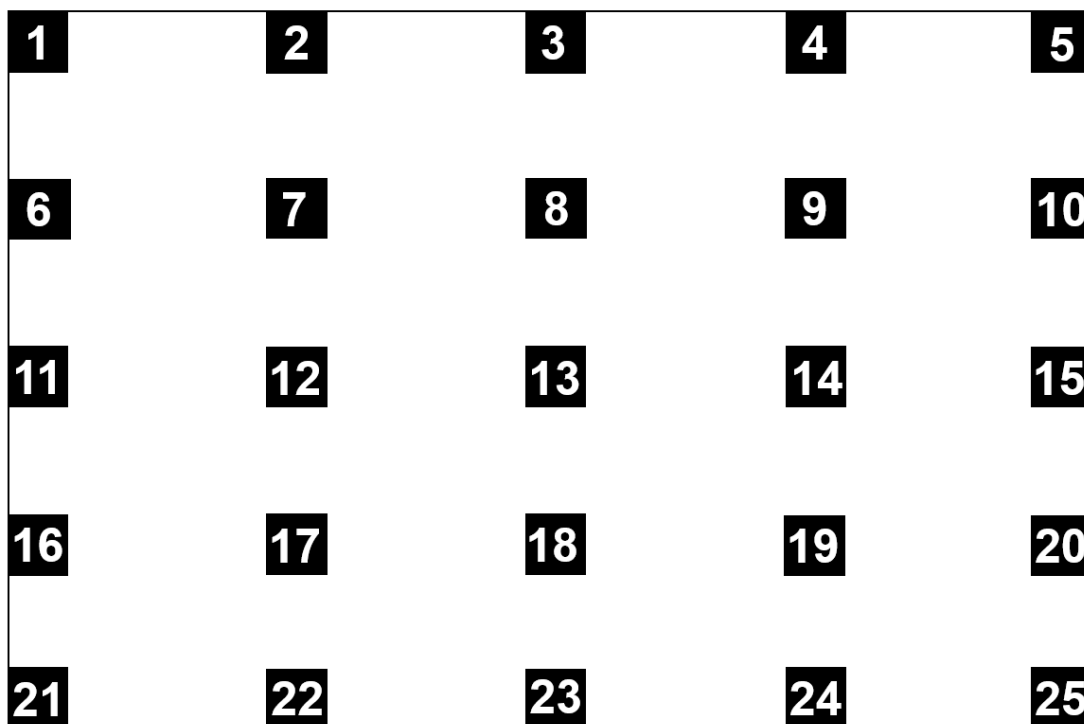
V případě umístění kamery na helmě je snímán pohyb pouze jednoho oka, ze kterého se určí střed zornice neboli místo pohledu jak v předchozím přístupu.

Takto určený „bod pohledu“ se ale pohybuje v poměrně malé oblasti obrazu a nelze tak přímo vzít jeho pozici a umístit ji do vytvořené matice odpovídající velikosti



monitoru. Je nutno vytvořit kalibrační proceduru, pomocí které se transformuje pozice tohoto „bodu pohledu“ do matice monitoru. V této matici již bude možné sledovat pohyb bodu po celé matici. Kalibrační procedura sestává z vytvoření kalibračního obrazu, který zobrazuje Obrázek 16.

Testovaná osoba se postupně dívá na jednotlivá čísla, kde se při každém pohledu uloží pozice bodu pohledu do připravené matice. Body v této matici jsou následně transformovány podle skutečných bodů na monitoru a je vytvořena transformační matice. Touto maticí jsou vynásobeny všechny pohledy, aby jejich souřadnice odpovídaly souřadnicím na monitoru a byly tedy na stejných pozicích. Tím je zajištěno, že bod pohledu se bude pohybovat po celé ploše monitoru a bude tak možné určit co testovaná osoba sleduje.



Obrázek 16. Kalibrační obraz

# 5 LIMITY POUŽITÉ METODY DETEKCE OČÍ

Tato kapitola je zaměřena na detailní rozbor limitních parametrů použité metody detekce pozice očí, při které je kamera v těsné blízkosti oka a pomocným osvětlením je infračervené světlo.

## 5.1 Prostorové rozlišení

Prostorové rozlišení vyjadřuje schopnost snímacího zařízení (v našem případě kamery) odlišit body umístěné ve velmi těsné blízkosti od sebe. U člověka je prostorové rozlišení dáno velikostí objektu, které je schopno lidské oko ještě rozeznat. Při snímání obrazu kamerou je ale prostorové rozlišení dáno velikostí pixelu a tedy rozlišením obrazu. Čím je rozlišení obrazu větší, tím jsou jednotlivé pixely v obraze menší. A čím je menší, tím jsou naopak pixely větší. Faktem je, že rozlišení lidského oka a rozlišení kamery není vždy stejné.

Prostorové rozlišení u zvolené metody detekce pomocí IR světla je dostatečné i při použitém nízkém rozlišení, neboť v infračerveném světle jsou více zvýrazněny světlé plochy, a tak je možné spolehlivě rozeznat hranice duhovky i požadovanou oblast zornice.

## 5.2 Časové rozlišení

Časové rozlišení se uplatňuje zejména u videozáznamu, u kterého určuje jeho plynulost. U videa je časové rozlišení dáno počtem snímků schopných pořídít za jednu sekundu. Pokud je počet snímků pod hodnotou 25, lidskému oku se zdá video nepřiliš plynulé až trhané. V případě zvětšení počtu snímků za sekundu na hodnotu větší než 25 je již pro lidské oko video zcela plynulé. Časové rozlišení tedy určuje krok, s jakým se pohybují objekty v zorném poli kamery.

Dostatečné časové rozlišení je podmínkou pro kvalitní detekci výrazných změn pohybu oka. U velmi přesných metod detekce pohybu oka, jako je elektrookulografie, je možné hodnotit i sakadické pohyby oka, již zmíněny v podkapitole 2.5 – elektrookulografie. V případě použitého přístupu detekce pomocí infračerveného světla je také možné tyto sakadické pohyby zachytit, a to přibližně se stejnou, mnohdy i lepší přesností oproti elektrookulografii.

### 5.3 Real-time

Pojem real-time znamená sledování změn, neboli aktualizaci, určitého druhu informace v právě probíhajícím čase.

Pro aplikaci real-time metody detekce je nutné vhodně zvolit snímací parametry s ohledem na prostorové a časové rozlišení a také s ohledem na výkonnost procesoru počítače, na kterém je prováděno veškeré zpracování dat. Právě procesor bývá ve většině případů limitujícím faktorem použití real-time aplikace. Procesor nemusí být přímo signálový, jenž je navržen pro složité matematické operace, ale musí být dostatečně výkonný a schopný bez problémů zpracovávat větší množství výpočtů. Například při zvolení vyššího prostorového rozlišení, tedy zvětšení rozlišení videa, dochází ke zvýšení počtu pixelů, a tudíž ke zvětšení výpočetní náročnosti. Stejně tak při zvolení vyššího časového rozlišení se zvýší počet zpracovávaných snímků a vzroste výpočetní náročnost. Dosažení výpočetní nenáročnosti real-time aplikací jsou voleny zejména parametry s ohledem na prostorové rozlišení, neboť je požadavkem naprostá plynulost videa.

Dalším limitujícím faktorem použití real-time aplikací je složitost a početní náročnost použitého algoritmu. Příkladem může být již popsaná Houghova transformace, jejíž výpočetní náročnost neumožňuje její použití pro real-time aplikace, protože se u ní provádí velké množství operací, které zaměstnají na určitý čas celý procesor. Proto je požadavkem real-time aplikací vyvinout takový algoritmus, který za pomoci základních operací nevezme příliš výpočetního času a zrealizuje požadovaný úkon.

Použitá metoda detekce pohybu očí pomocí infračerveného světla je navržena tak, aby byla schopna pracovat v reálném čase při malém rozlišení kamery. Testováním bylo zjištěno, že použité rozlišení plně dostačuje pro kvalitativní hodnocení pohybu oka.

### 5.4 Zhodnocení limitních vlastností použité metody

Metoda detekce pozice očí s využitím infračerveného světla, použitá v této práci dosahuje vysoké přesnosti a malé výpočetní náročnosti. V navrženém programu je možné měnit časové a prostorové rozlišení a zvolit tak jejich optimální hodnotu, aby obraz byl dostatečně plynulý a ostrý pro hodnocení rychlých změn pohybu oka.

Tuto metodu lze využít i jako real-time, neboť algoritmus detekce zpracovává pouze oblast oka a odpadá tak příliš složité předzpracování snímku, jak je tomu při detekci pohybu oka z dálky.

## 6 NÁVRH PARAMETRŮ VIZUÁLNÍCH PŘEDLOH

Aby bylo možné hodnotit, s jakou přesností je pohyb zornice a směr pohledu přenášen na monitor, je třeba navrhnout testovací šablony.

Pro vyhodnocení přesnosti sledovaného místa kamerou se nabízí dvě možnosti. První možností je položit testovanému subjektu otázku: „Na co se právě díváš?“. Odpověď je následně porovnána s pozicí bodu pohledu na obrazovce a je stanovena přesnost. Druhou možností je návrh šablony, obsahující několik bílých bodů umístěných na černém pozadí. Tím je zajištěno, že testovací osoba se bude dívat pouze na tyto body. Následně je vytvořen program analyzující odlišnosti bodů pohledu vůči sledovaným bodům na monitoru. Výsledkem je přesnost sledování a tedy i přesnost použitého algoritmu. Pro hodnocení přesnosti sledování v této diplomové práci je použita šablona v příloze A.

Pro hodnocení prostorového rozlišení je možné navrhnout sadu šablon, které budou mít obdélníkový nebo čtvercový tvar. Šablony budou obsahovat síť bodů, lišících se od sebe velikostí a vzdáleností těchto bodů. V každé šabloně budou body různě velké a vzdáleny od sebe o vzdálenost rovnou velikosti bodu. Postupně bude měněno rozlišení kamery od nejmenší po největší a bude pozorováno, při jakém rozlišení je možné v určité šabloně body od sebe rozeznat a zda rozlišení dostačuje pro detekci. Jelikož pro sledování oka používá algoritmus malé rozlišení kamery, jenž plně dostačuje jak z hlediska detekce, tak i z hlediska plynulosti obrazu, je návrh šablon pro hodnocení prostorového rozlišení nepodstatný.

Posledním parametrem je dostatečné časové rozlišení. Nejlepší způsob hodnocení časového rozlišení je subjektivní dojem, tedy jestli se obraz zdá dostatečně plynulý a zda je možné provádět detekci v reálném čase. Zpravidla je volena snímkovací frekvence kolem 30 snímkům za sekundu, aby byl zajištěn zcela plynulý obraz.

## 7 ALGORITMUS DETEKCE POHYBU OKA

Jak již bylo řečeno, byla použita metoda detekce kdy webkamera s infračerveným přísvitem je upevněna na helmě a snímá pohyb oka z velmi malé vzdálenosti. Algoritmus detekce pohybu oka byl napsán v programovém prostředí MATLAB a v následujících řádcích budou rozepsány jeho jednotlivé části, popis použité kamery a její připevnění na helmu.

### 7.1 Použitá kamera a její připevnění

Pro použitou metodu detekce byla zvolena webkamera s infračerveným přísvitem značky A4TECH dosahující maximálního rozlišení 640x480. Kamera je vybavena otočným kloubem, kterým lze nastavovat kameru do různých směrů a přizpůsobit ji tak pozici oka libovolné testované osoby. Použitou webkameru zobrazuje Obrázek 17.



Obrázek 17. Použitá webkamera. [16]



Obrázek 18. Připevnění kamery na helmu

Aby kamera snímala pouze oko, je třeba ji pomocí klipsu uchytit na helmě v obrácené poloze. Snímaný obraz je tedy obrácen o 180°. Kameru umístěnou na helmě zobrazuje Obrázek 18.

Pro potřeby testování byl sestrojen i stojan, jenž bude sloužit pro fixaci hlavy testované osoby a zamezení vzniku nežádoucího pohybu. Stojan zobrazuje Obrázek 19.



Obrázek 19. Stojan pro fixaci hlavy

## 7.2 Zpracování obrazu a detekce zornice

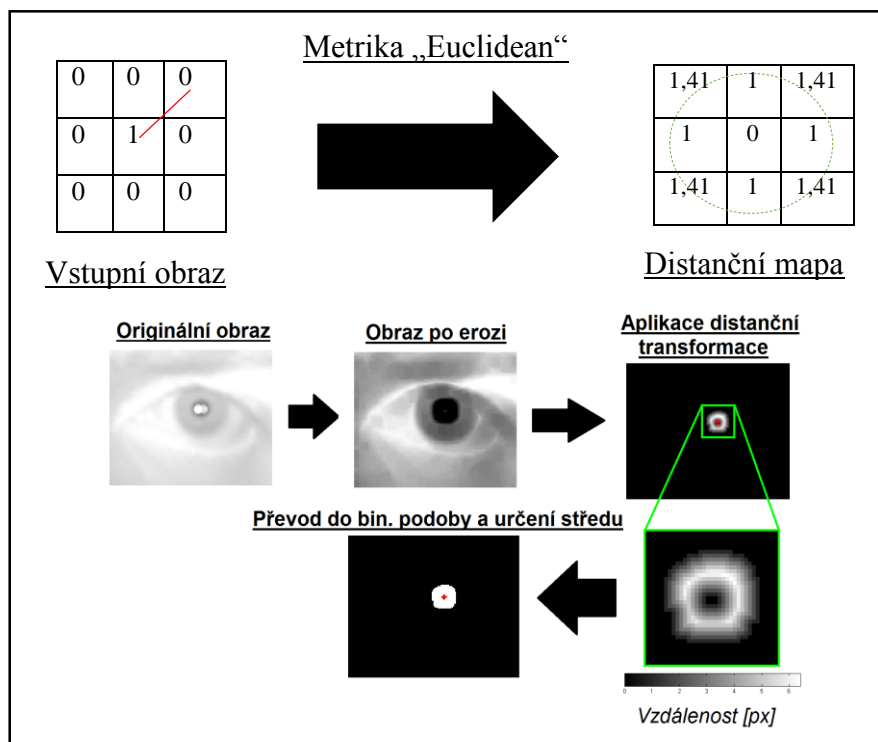
Celý algoritmus detekce pohybu oka a jeho převod na pohyb na monitoru lze rozdělit celkem do dvou částí.

První částí je samotná kalibrace, kdy osoba sleduje body na monitoru, které jsou uloženy a transformovány na body reálné. V programu je kalibrace umístěna do smyčky FOR s počtem opakování odpovídající počtu kalibračních bodů. Při použití 25 bodové kalibrace je počet opakování zvolen na 26, neboť první bod pohledu se do kalibrační matice neukládá. Tím má testovaná osoba dostatek času, aby se připravila, než začne postupně sledovat jednotlivé body. Na konci kalibrace je provedena geometrická transformace uložených bodů a je vytvořena transformační matice, kterou se násobí pozice zornice v další části.

Druhou částí je výsledný přenos pohybu oka na monitor a stanovení, co testovaná osoba sleduje. Jedná se taktéž o smyčku, ale tentokrát WHILE, která se neustále opakuje,

dokud platí podmínka, že počet sejmutých snímků je menší nebo roven nastavené hodnotě. Dokud tedy platí tato podmínka, kamera opakovaně pořizuje snímky, jenž jsou zpracovávány a řazeny za sebou jako souvislé video v reálném čase.

Zpracování pozice zornice v části kalibrace a detekce probíhá stejným způsobem. V prvním kroku je barevný obraz z kamery převeden na černobílý, protože zpracování černobílého obrazu je méně náročné než u barevného. Následně je obraz otočen o 180° a zrcadlově převrácen, aby obraz kamery byl shodný s monitorem a aby se pohyb oka, například vlevo, projevil do stejného směru i v obraze z kamery. V dalším kroku je použita morfologická operace eroze, neboť se v obraze vyskytuje nežádoucí jev odrazu infračervených diod od rohovky, který ovlivňuje detekci zornice. Eroze v černobílém obraze způsobí zvýraznění tmavých částí (primárně zornice), jenž se mírně zvětší a překryjí tak světlé části (odraz infračervených diod). Následuje operace, která upraví kontrast v celém rozsahu a způsobí tak větší zvýraznění zornice. Ta bude celá černá a bez nežádoucího odrazu. Dále je použita opět operace eroze s maskou jedniček 5x5 pro jemné dohlazení s cílem lepší detekce zornice následující operací.

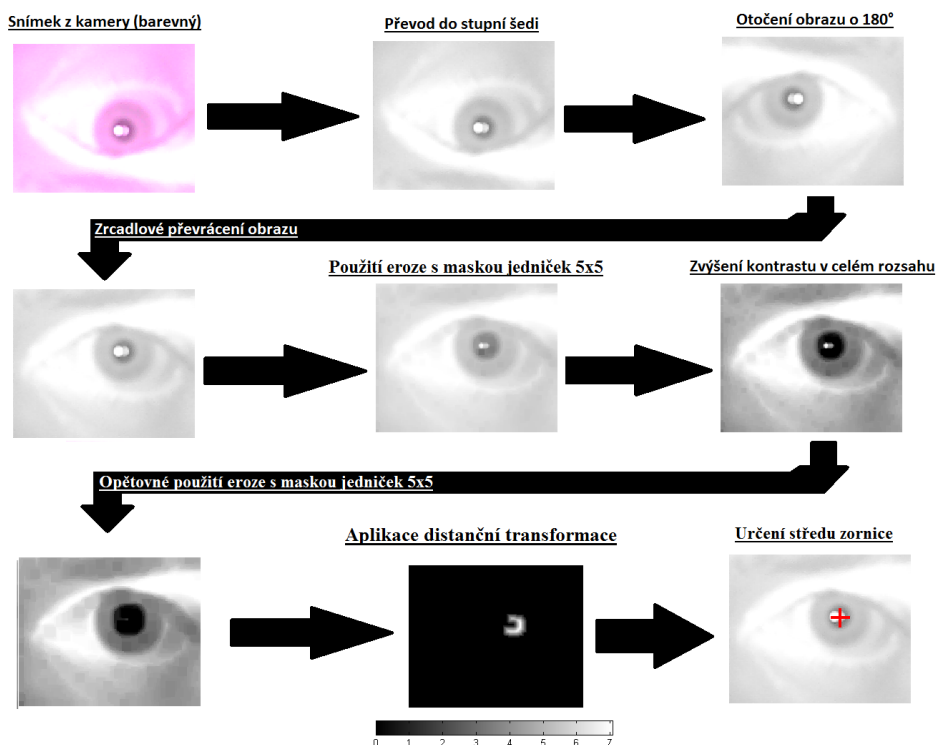


Obrázek 20. Určení středu zornice pomocí distanční metriky. [17]

Na takto upravený obraz je použita distanční transformace (viz. Obrázek 20), která pro každý pixel v obraze přiřadí hodnotu vzdálenosti od analyzovaného pixelu k nejbližšímu nenulovému pixelu. Při obyčejném převodu černobílého obrazu do binární

reprezentace, podle zvoleného prahu, může být kromě zornice převedena i spousta falešných oblastí, které jsou z hlediska detekce nežádoucí, jako například řasy. Tyto falešné oblasti jsou po převodu mnohdy větší než oblast zornice a tvoří jeden celek s logickou úrovní 1. Z toho důvodu byla zvolena distanční transformace. Ta, jak již bylo řečeno, přiřadí každému pixelu hodnotu vzdálenosti od nenulového pixelu v jeho okolí a tím zabrání vzniku velkých falešných detekcí. Jedná se o jemnější váhování jednotlivých pixelů než v případě klasického převodu černobílého obrazu na binární. Po převodu jsou v binárním obraze pouze malé chybně detekované oblasti, které jsou následně odstraněny, a v obraze se poté nachází pouze binární oblast zornice. Pro distanční transformaci byla zvolena distanční metrika „Euclidean“ hodnotící přímou vzdálenost mezi dvěma pixely. Z Obrázku 20. lze vypožorovat, že vzdálenost je měřena v okolí každého pixelu po kruhové dráze a výsledný binární obraz po převodu distanční mapy bude více odpovídat původnímu kruhovému tvaru zornice po operaci eroze. Obrázek 20. taktéž zobrazuje princip určení středu zornice prostřednictvím distanční transformace. [17]

Posledním krokem je odstranění malých shluků v obraze a ponechání pouze největšího shluku jedniček odpovídající zornici. Z této oblasti je určen střed, jež je zobrazen do původního neupraveného obrazu jako poloha zornice. Celý postup zpracování obrazu z kamery až po detekci středu zornice znázorňuje Obrázek 21.



Obrázek 21. Postup zpracování obrazu z kamery



### 7.3 Transformace bodů na velikost displeje

Po úspěšné detekci zornice přichází na řadu kalibrace s následnou transformací souřadnic na velikost monitoru.

Jak bylo vysvětleno v podkapitole 4.4, kalibrace se skládá z 25 bodů na monitoru, které testovaná osoba postupně podle čísel pozoruje. Souřadnice každého bodu jsou uloženy do kalibrační matice určenou pro výpočet geometrické transformace.

Geometrické transformace jsou nejčastěji používány v geografických informačních systémech, kdy je cílem umístit pořízený letecký snímek do souřadného systému na zemského povrchu. Dochází tedy k transformaci z jednoho souřadného systému na jiný. Mezi základní geometrické transformace patří:

- rotace kolem počátku,
- změna velikosti,
- posunutí,
- zkosení.

Složitější transformace kam patří například:

- afinní,
- polynomické,
- projekční,

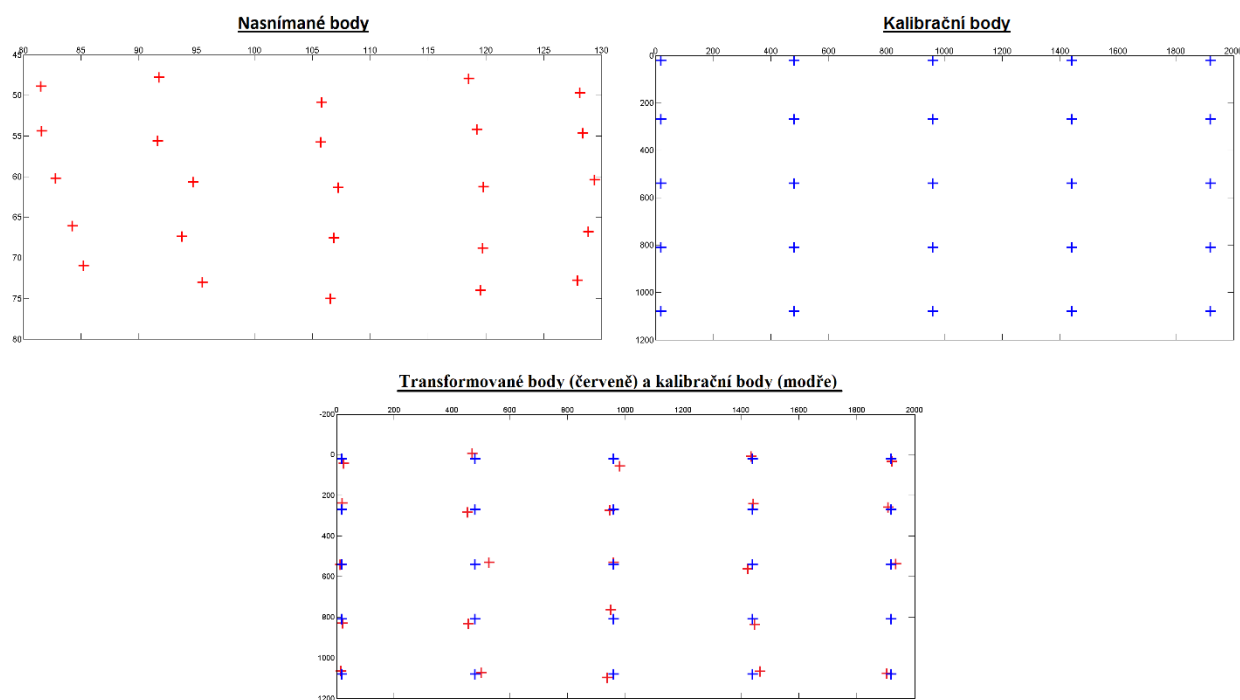
jsou složeny z těchto základních geometrických transformací a některé z nich počítají i s různou deformací obrazu.

Pro transformaci souřadnic nasnímaných kamerou byla použita polynomická transformace čtvrtého řádu. Tento typ transformace je vhodný zejména pro souřadnice, které jsou nejen natočeny nebo posunuty, ale vykazují i určitou deformaci vůči originálu (kalibračnímu poli). Polynomická transformace čtvrtého řádu je popsána rovnicí 7.1, [18]

$$[u, v] = \begin{bmatrix} 1, x, y, x * y, x^2, y^2, y * x^2, x * y^2, \\ x^3, y^3, x^3 * y, x^2 * y^2, x * y^3, x^4, y^4 \end{bmatrix} * T \quad (7.1)$$

kde (u, v) jsou transformované souřadnice, (x, y) jsou souřadnice nasnímané kamerou a T je transformační matice realizující geometrickou transformaci.

Rozložení nasnímaných bodů vůči kalibračním bodům na monitoru s jejich následnou transformací na souřadnice monitoru prezentuje Obrázek 22. Byla provedena tedy změna velikosti a natočení nasnímaných bodů tak, aby seděly do souřadného systému monitoru.

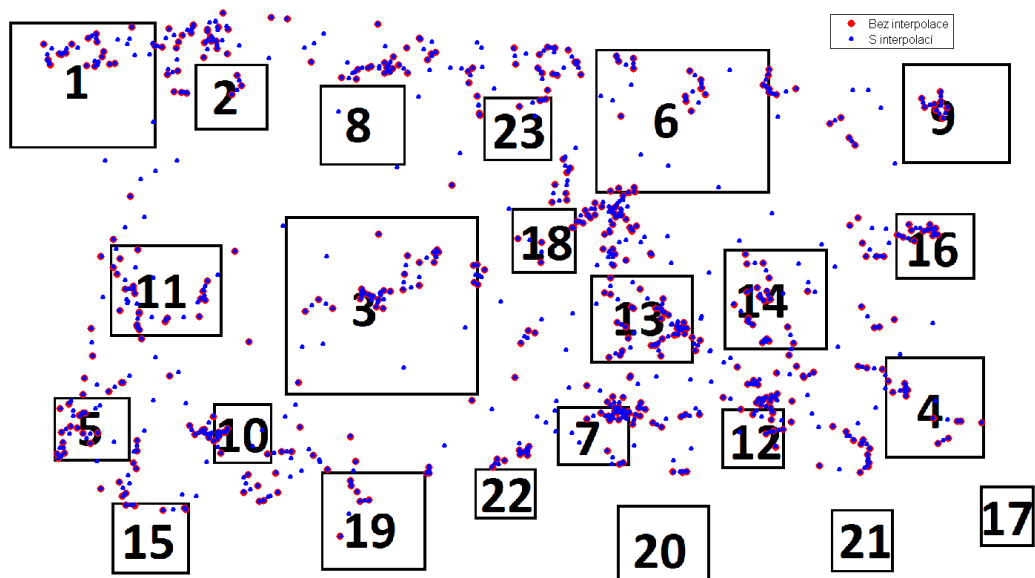


Obrázek 22. Transformace souřadnic

## 7.4 Detekce pohledů na monitoru

Po kalibraci je již k dispozici dostatek potřebných dat pro samotnou registraci pohledu oka testované osoby na monitoru.

Nejdříve je opět zpracován obraz z kamery pomocí algoritmu popsaného v podkapitole 7.2 s cílem nalézt polohu zornice. Z této polohy zornice je následně určen střed, jehož souřadnice  $x$ ,  $y$  jsou vloženy do rovnice 7.1 a vynásobeny transformační maticí získanou při kalibraci. Výstupem z rovnice 7.1 je již transformovaná pozice odpovídající místu na monitoru, kam se testovaná osoba dívá. Pro účely další analýzy jsou pozice každého bodu pohledu uloženy do matice, ze které je v dalším kroku vyhodnoceno místo s největší hustotou bodů pohledu, což odpovídá místu, kam se testovaná osoba nejvíce dívala. Body pohledu na podkladovém obraze ukazují Obrázek 23.



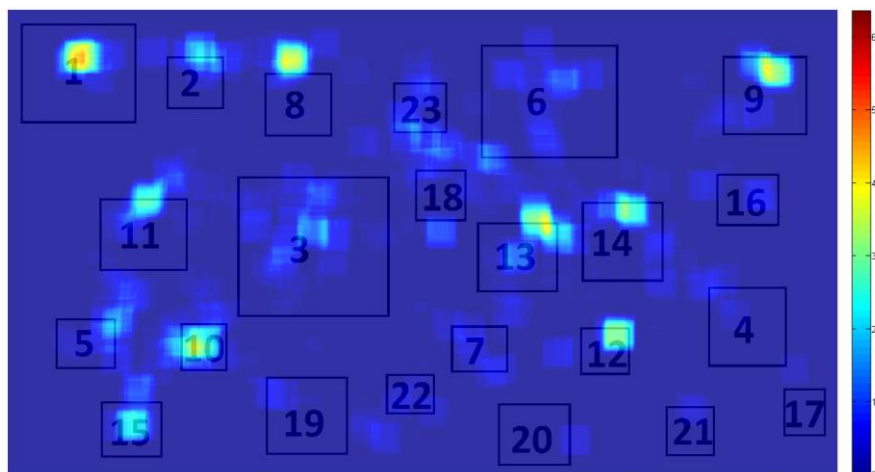
Obrázek 23. Body pohledu na testovaném obraze včetně interpolace

Pro lepší pozdější vizuální analýzu byla provedena interpolace bodů pohledu na Obrázku 23. (označeny modře) s cílem dosažení jemnějšího měřítka. Interpolací byly přidány body do okolí každého originálního bodu pohledu podle daného opakování. Zvoleno bylo 1x násobné opakování.

## 7.5 Zájmová mapa

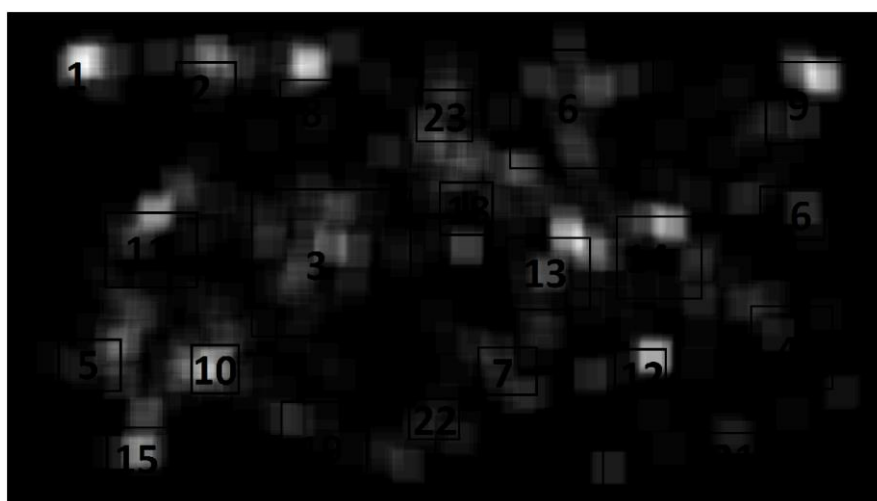
Pro vizuální hodnocení, co testovaná osoba sledovala, se nejčastěji používají dvě zájmové mapy.

První z nich je tzv. „Heat mapa“, která vizualizuje zaregistrované body pohledu podle jejich četnosti v okolí a přiřazuje jim tak příslušnou barvu. Pro vytvoření „Heat mapy“ je důležité body pohledu umístit do matice o rozměrech obrázku na pozice odpovídající pozicím v původní matici, kam se ukládaly, a přiřadit jim hodnotu 1. Tím je zajištěno, že místa, kam se testovaná osoba dívala, budou bílé a ostatní budou černé. Na tento obrázek, obsahující body pohledu v binární reprezentaci, je aplikována operace, která provede zvětšení každého jedničkového pixelu v matici do určeného okolí a provede operaci podle zvolené funkce, v tomto případě součet všech pixelů, jenž jsou umístěny pod zvětšenou oblastí. Výstupem je matice, jejíž rozměry jsou shodné s původní maticí pohledů, obsahující číselné hodnoty podle hustoty bodů v okolí každého pixelu. Následně je tato matice zobrazena pomocí operace, která převede tyto číselné hodnoty do barevné mapy, ze které lze podle nejvýraznějších oblastí poznat, kam se testovaná osoba nejvíce dívala. Testovaný obraz s překrytou „Heat mapou“ zobrazuje Obrázek 24. [19]



Obrázek 24. „Heat mapa“

Druhou metodou vizualizace nasnímaných pohledů je tzv. „mapa propustnosti“. Tato mapa je vytvořena na základě matice „Heat mapy“, kdy podle četnosti bodů pohledů je upravována průhlednost. Místa, kam se osoba nejvíce dívala, jsou tak zcela průhledná a je možné vidět podkladový obrázek, zatímco místa, kam se nedívala, zcela nepropustná (černá). Vytvoření „mapy propustnosti“ spočívá v tom, že číselnými hodnotami četnosti pohledů je váhován sledovaný obrázek. Nejdříve je vypočtena konstanta převodu hodnoty četnosti na stupeň průhlednosti, která je dána jako rozdíl maximální neprůhlednosti (neprůhlednost = 255) a maximální číselné hodnoty četnosti. Poté je procházena matice četností pohledů a jsou hledány její nenulové hodnoty, jež jsou následně vynásobeny vypočtenou konstantou. Tím je docíleno toho, že čísla s nejvyšší hodnotou četnosti budou po zobrazení zcela průhledné a naopak s nejnižší hodnotou neprůhledné. Výslednou „mapu propustnosti“ znázorňuje Obrázek 25.



Obrázek 25. „Mapa propustnosti“

## 7.6 Přesnost použitého algoritmu

Přesnost u navrhnutého algoritmu je chápána jako schopnost, s jakou mírou se místo pohledu zpracované kamerou přenáší na skutečné místo na monitoru. Je závislá zejména na přesnosti určení středu zorničky, umístění kamery a v neposlední řadě také na kalibrační proceduře.

Přesnost určení středu zorničky je dále závislá na způsobu jejího zpracování a na rozlišení kamery. Jelikož byla zvolena jednoduchá metoda pomocí distanční transformace s korekcí odrazu světla od rohovky, je dosaženo poměrně vysoké přesnosti lokalizace. Chyby mohou způsobovat nestejně vlastnosti oka libovolného člověka, kdy například korekce odrazu nemusí poskytovat požadované výsledky a je třeba upravit její hodnotu. Zvolené rozlišení kamery poskytuje optimální časové rozlišení, a tím i zcela plynulý obraz.

Umístění kamery bylo zvoleno z hlediska konstrukce kamery. Kamera je umístěna přímo naproti oku, které je velkou mírou nasvětleno pomocným infračerveným přísvitem kamery. Při tomto umístění kamery lze velmi dobře rozeznat umístění zornice, i pokud je část oka schovaná za očním víčkem. Jestliže je hlava testované osoby situovaná přibližně uprostřed monitoru, nečinní umístění kamery problém.

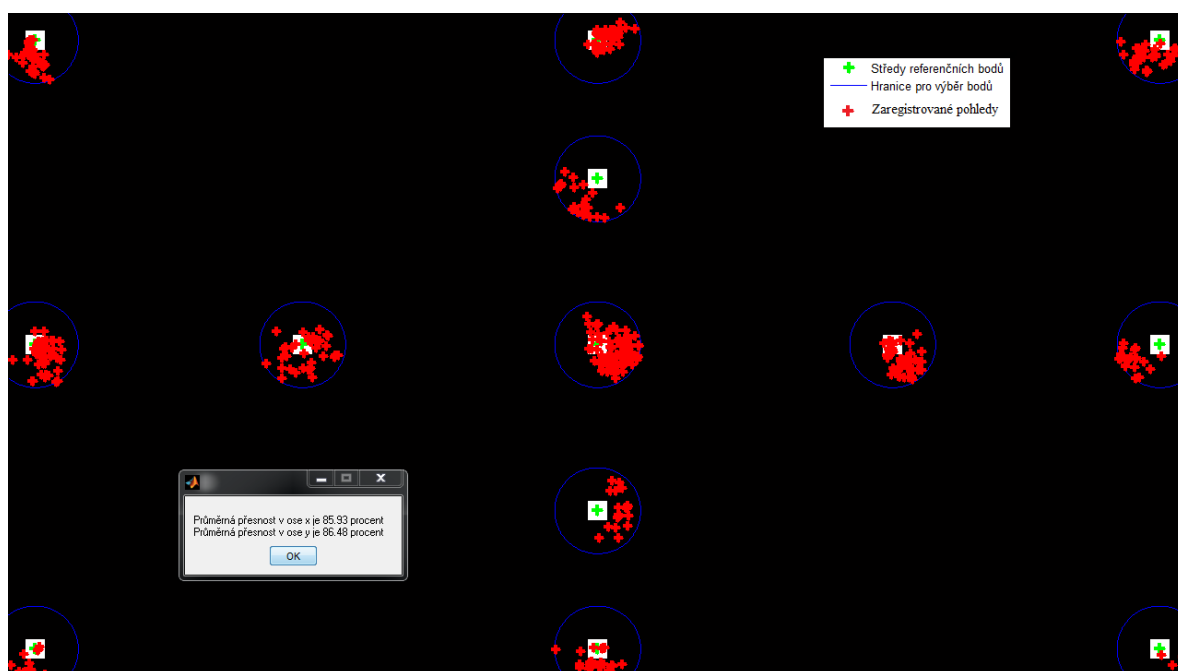
V podstatě největší dopad na přesnost má kalibrační procedura. Ta je závislá zejména na přesnosti transformace souřadnic na velikost monitoru a také na spolupráci testované osoby. Zásadní podmínkou je, aby testovaná osoba během kalibrace i při živé detekci nehýbala hlavou, neboť je již kalibrací vzájemně provázaný střed monitoru se středem kamery, který se při pohybu mění v důsledku odlišné polohy oka. Tím vzniká naprosto zkreslený bod pohledu neodpovídající skutečnému pohledu na monitoru.

Přesnost sledování lze vypočítat na Obrázku 26., kde červené křížky reprezentují body pohledu, modré linie hraniční kruhy a bílé čtverce sledované objekty na monitoru. Algoritmus je schopen vyhodnotit přesnost automaticky po skončení programu testování přesnosti, kdy testovaná osoba sleduje obrazec s několika body na obrazovce. Výpočet probíhá tak, že jsou nejdříve odstraněny body, jenž nespádají do kruhového okolí kolem každého sledovaného bodu. Z bodů ležících uvnitř sledovaného okolí je spočtena chyba sledování vůči sledovanému bodu na monitoru, která je odečtena od 100% pro dosažení přesnosti, s jakou byl bod na monitoru sledován. Takto jsou vypočteny přesnosti pro všechny body v jednotlivých kruhových okolích a ty jsou následně zprůměrovány pro dosažení celkové průměrné přesnosti použitého algoritmu, kterou zobrazuje dialogové okno v Obrázku 26. Přesnost byla určena zvlášť pro x-ový a y-nový směr. Pro výpočet přesnosti byly použity rovnice 7.2 a 7.3:

$$Chyba\ pohledu\ [\%] = \frac{|Nameřený\ pohled - Pevný\ bod\ v\ obraze|}{Pevný\ bod\ v\ obraze} * 100 \quad (7.2)$$

$$Přesnost\ pohledu\ [\%] = 100 - Chyba\ pohledu\ [\%] \quad (7.3)$$

Přesnost kalibrace byla vypočtena stejným způsobem jako v předchozím případě. U kalibrace je výpočet podstatně jednodušší, neboť přesnost je vypočtena ze stejného počtu pohledů, jako je počet bodů v kalibrační šabloně. Praktická průměrná hodnota přesnosti kalibrace vypočtená z pěti kalibračních měření pro všechny kalibrační body činila **88,54 %** v x-ové ose a **79.45 %** v y-nové ose.



Obrázek 26. Přesnost použitého algoritmu

## 8 PRAKTICKÉ TESTOVÁNÍ

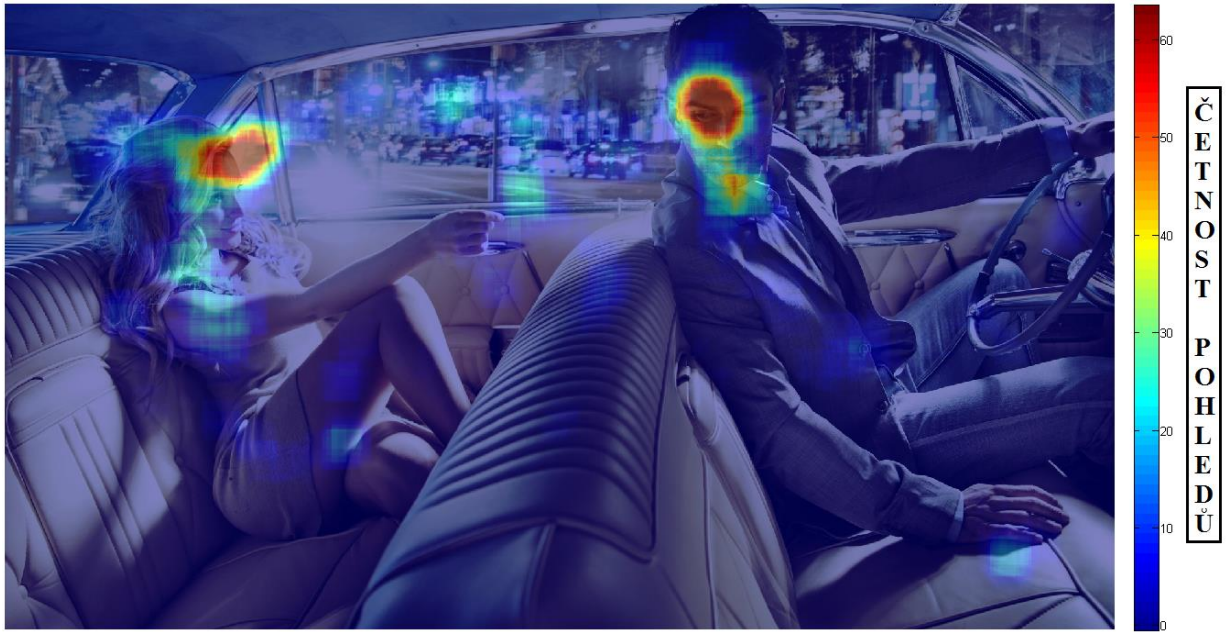
V této části diplomové práce bude provedeno praktické otestování použitého algoritmu detekce na několika dobrovolnících (muži a ženy) s následným vizuálním vyhodnocením dosažených výsledků pomocí „heat map“ a „map propustností“. Testování pro obě pohlaví bude probíhat na obrázku v příloze B. [20], roztaženého na maximální velikost monitoru. Body pohledu budou pro lepší vizuální podání aproximovány.

### 8.1 Testovaná osoba č. 1

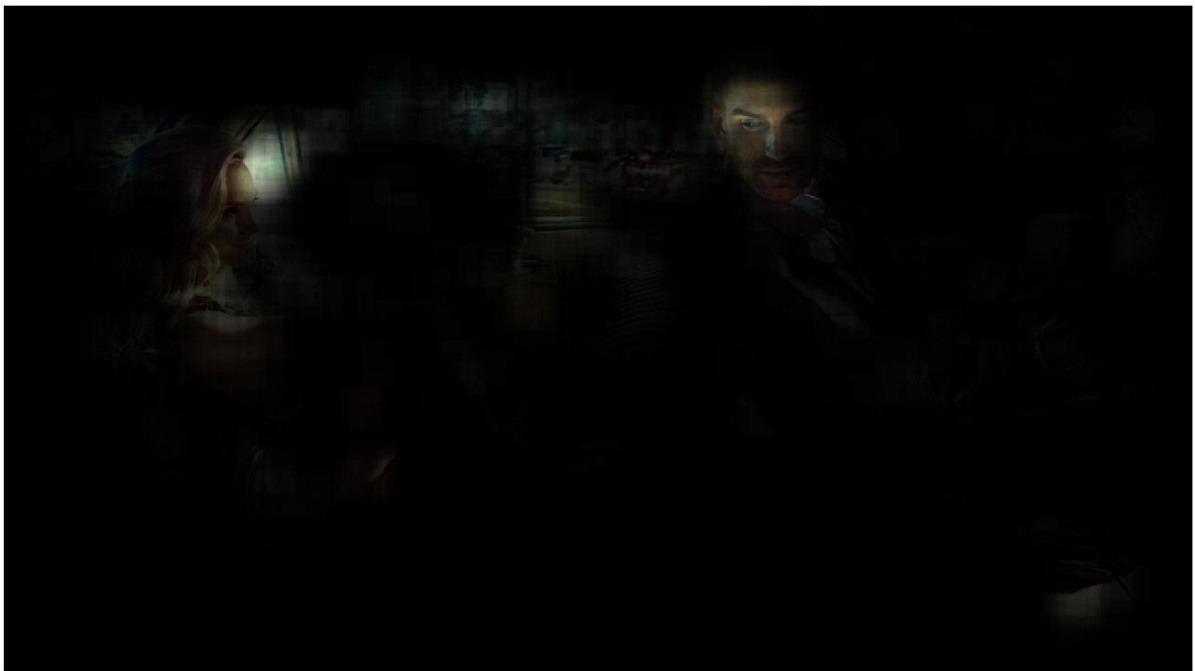
Jméno:	<b>Z. B</b>
Věk:	21
Pohlaví:	Žena



Obrázek 27. Testovaná osoba č. 1



Obrázek 28. "Heat map" osoba č. 1



Obrázek 29. "Mapa propustnosti" osoba č. 1



## 8.2 Testovaná osoba č. 2

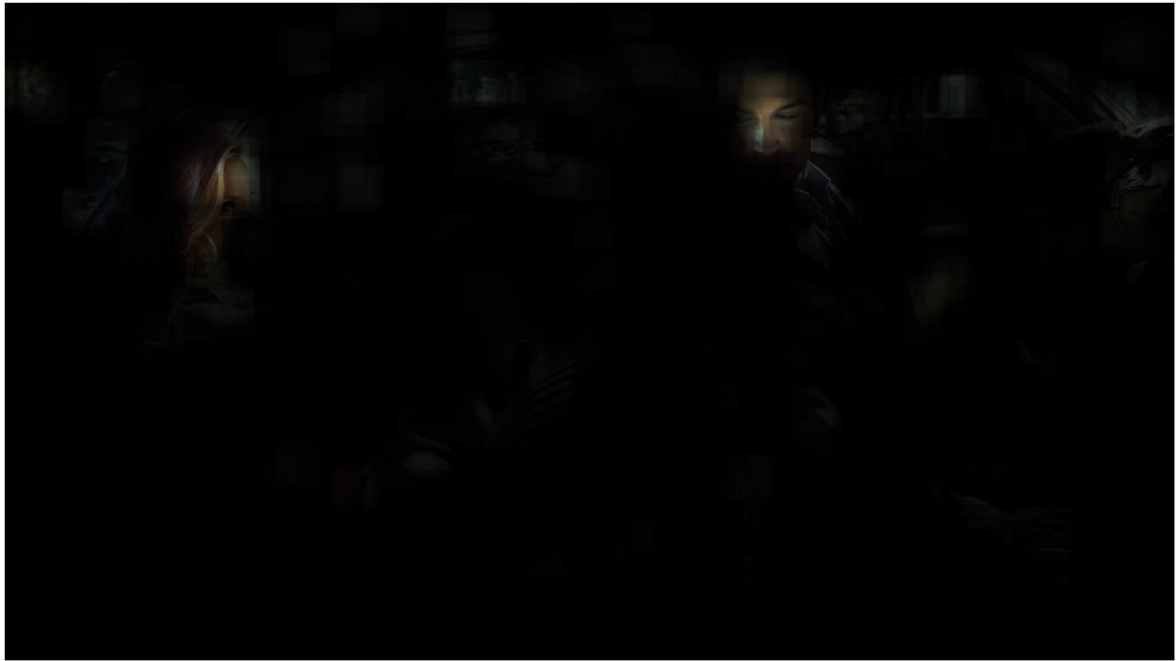
Jméno:	M. B
Věk:	53
Pohlaví:	Žena



Obrázek 30. Testovaná osoba č. 2



Obrázek 31. "Heat map" osoba č. 2



Obrázek 32. "Mapa propustnosti" osoba č. 2

### 8.3 Testovaná osoba č. 3

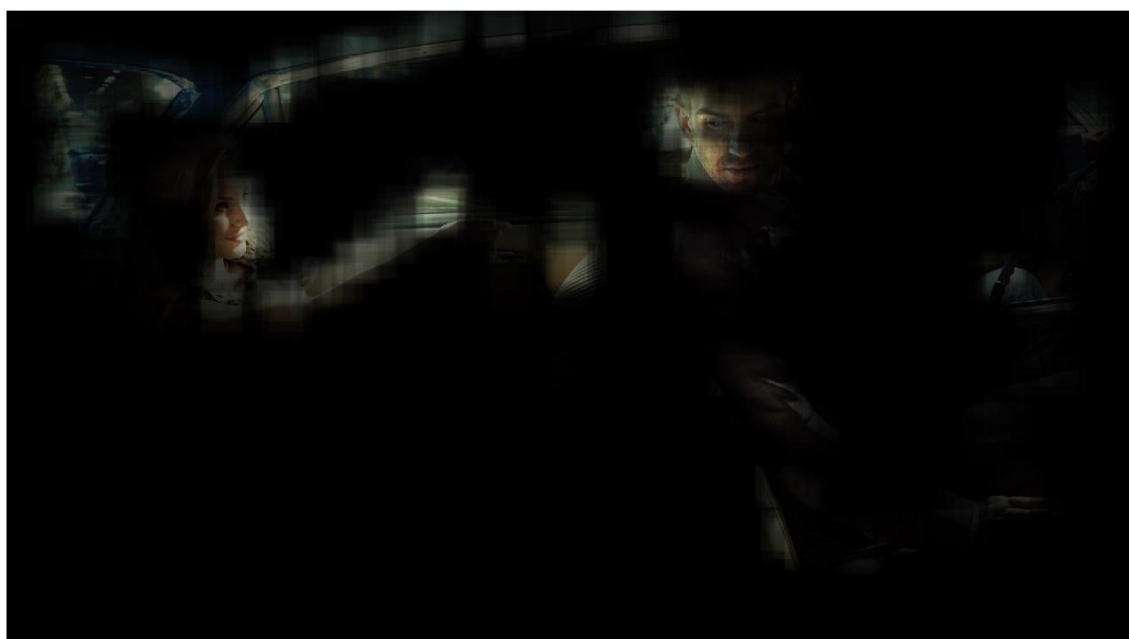
Jméno:	<b>Z. B</b>
Věk:	55
Pohlaví:	Muž



Obrázek 33. Testovaná osoba č. 3



Obrázek 34. "Heat map" osoba č. 3



Obrázek 35. "Mapa propustnosti" osoba č. 3

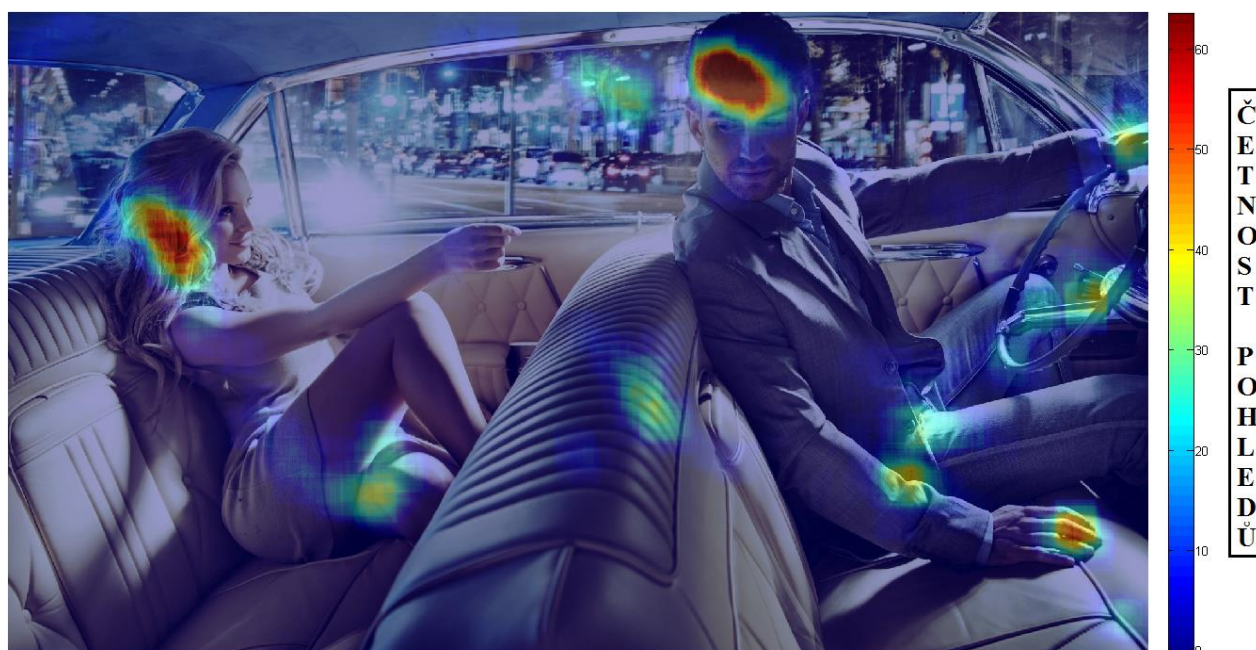


## 8.4 Testovaná osoba č. 4

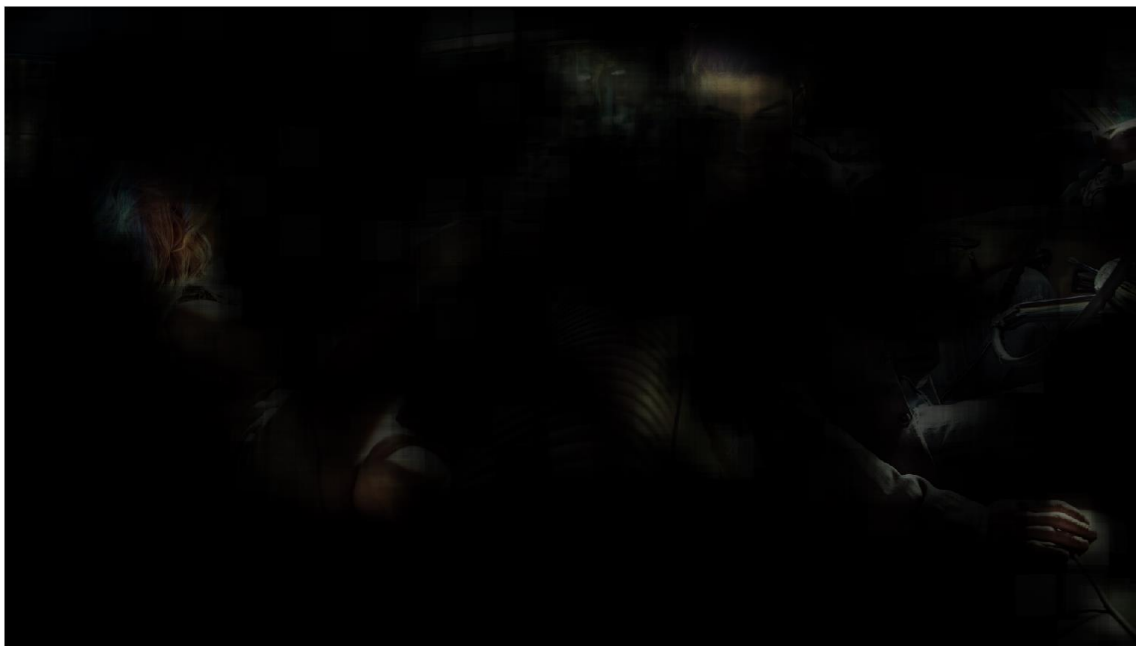
Jméno:	E. P
Věk:	28
Pohlaví:	Žena



Obrázek 36. Testovaná osoba č. 4



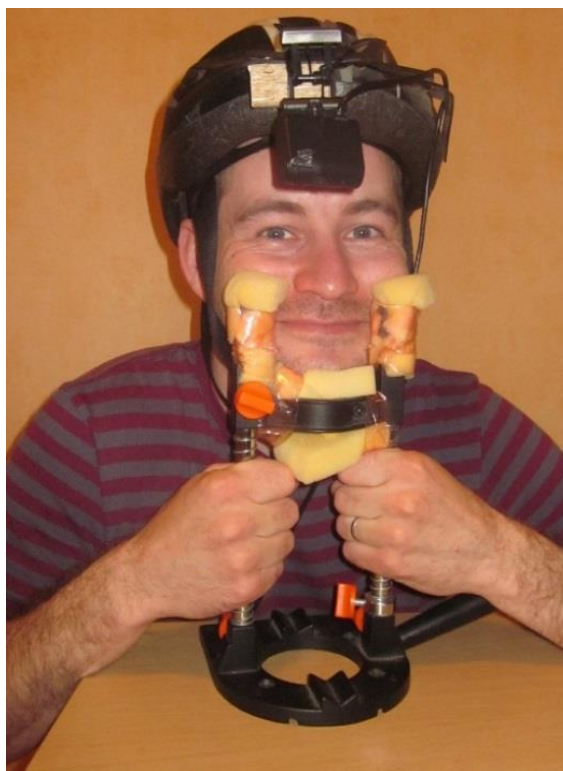
Obrázek 37. "Heat map" osoba č. 4



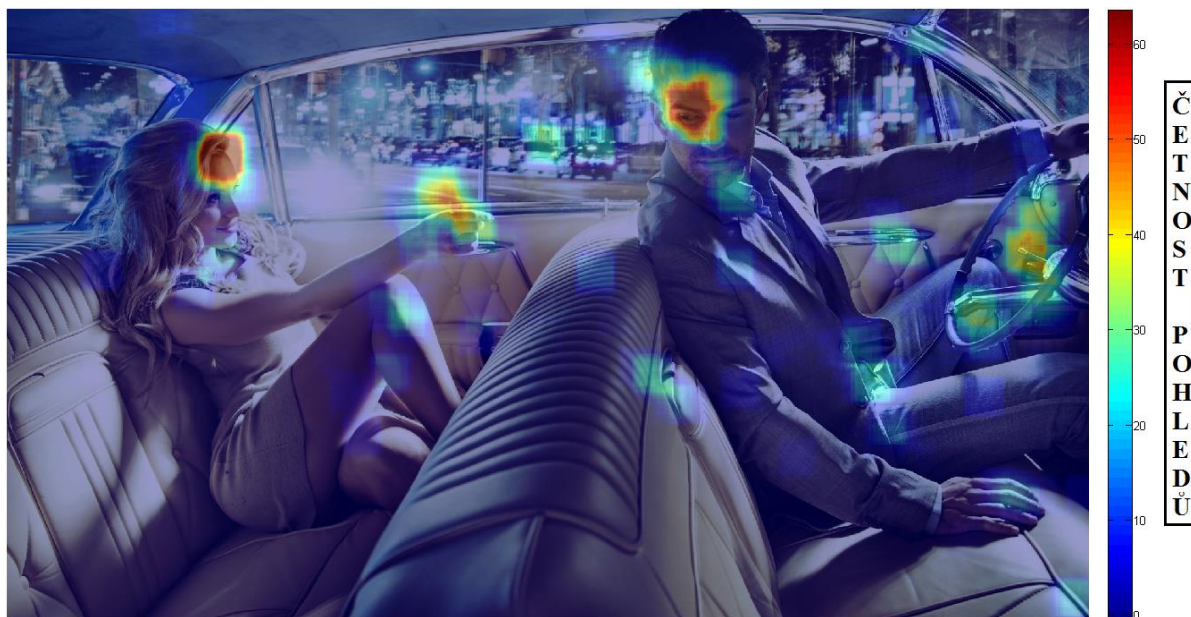
Obrázek 38. "Mapa propustnosti" osoba č. 4

## 8.5 Testovaná osoba č. 5

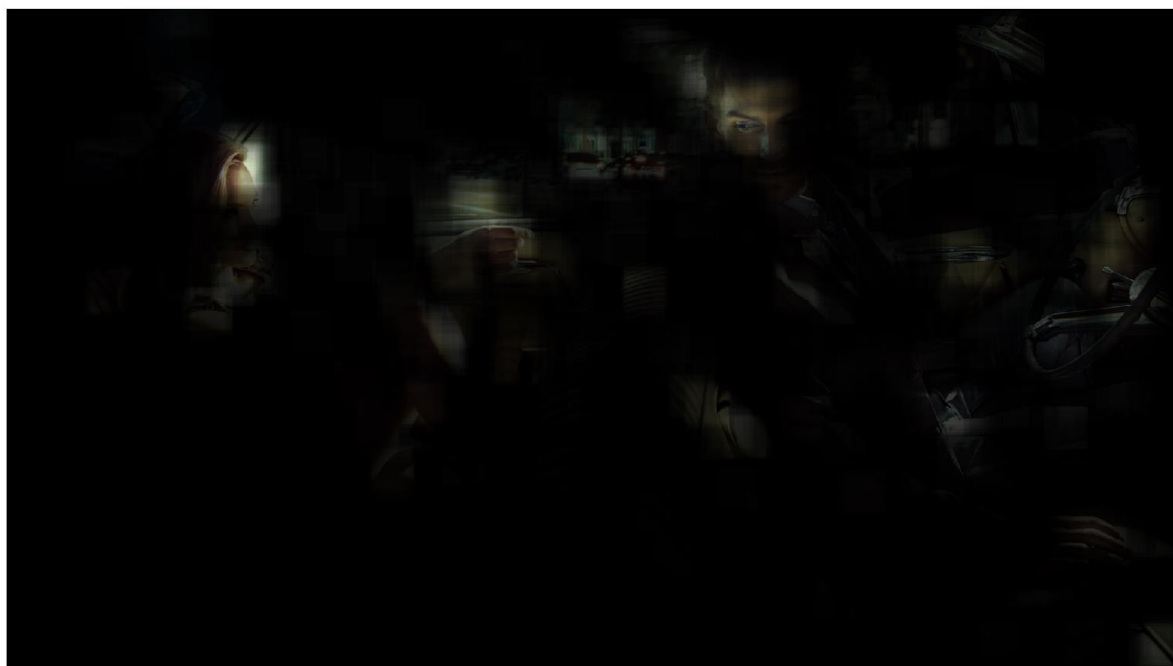
Jméno:	<b>Z. P</b>
Věk:	32
Pohlaví:	Muž



Obrázek 39. Testovaná osoba č. 5



Obrázek 40. "Heat map" osoba č. 5



Obrázek 41. "Mapa propustnosti" osoba č. 5

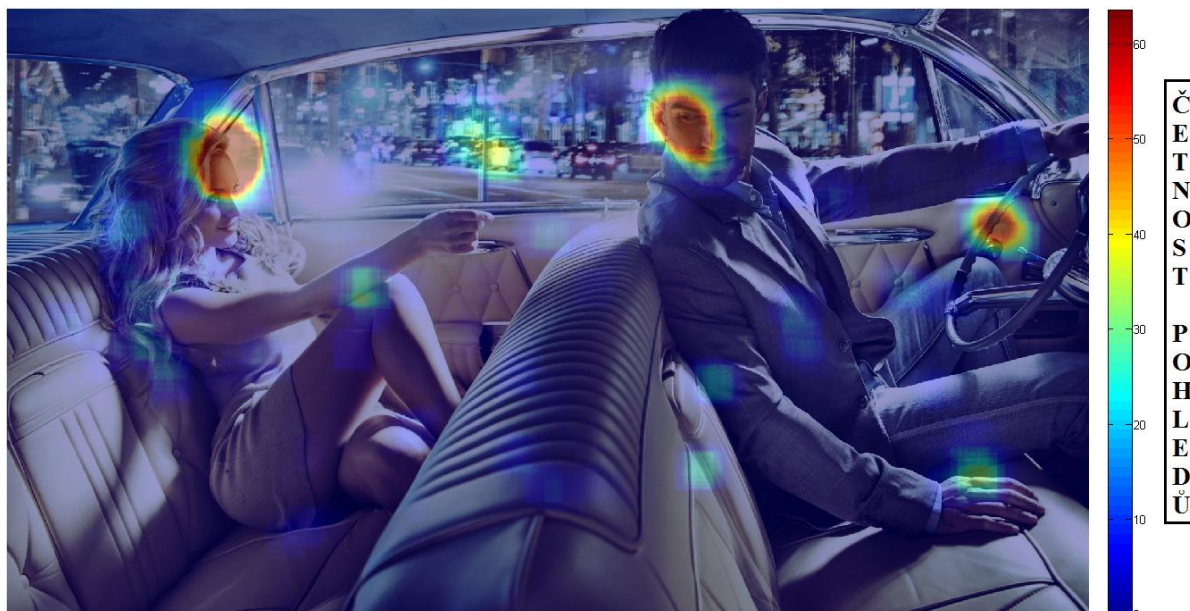


## 8.6 Testovaná osoba č. 6

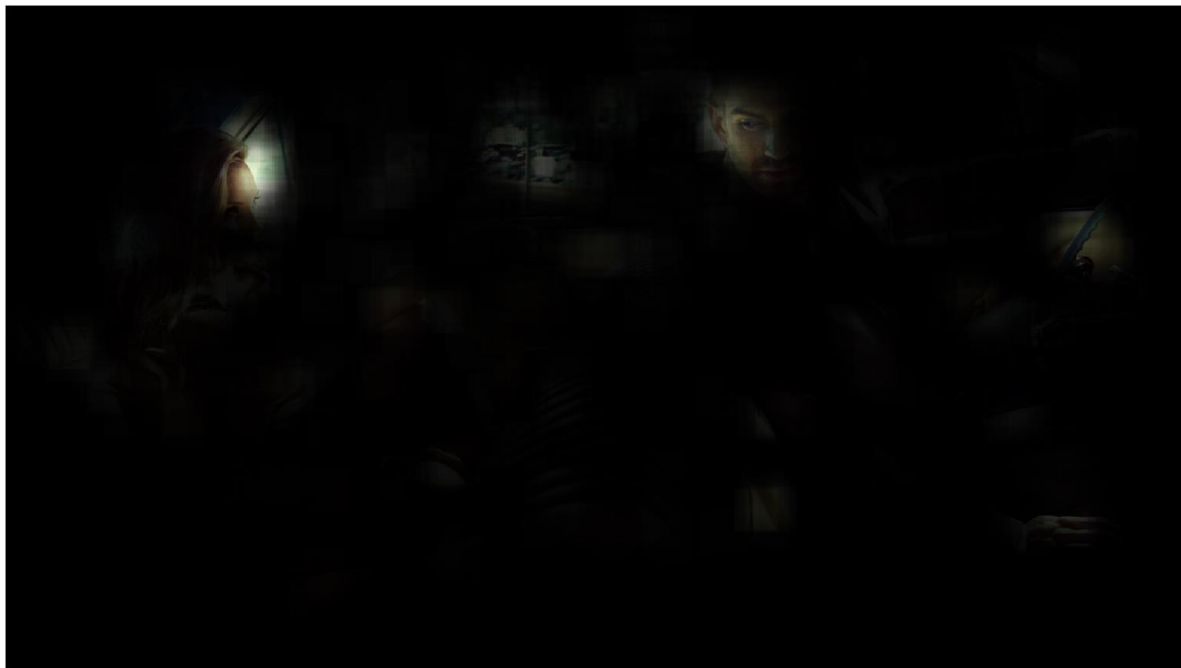
Jméno:	<b>J. B</b>
Věk:	30
Pohlaví:	Muž



Obrázek 42. Testovaná osoba č. 6



Obrázek 43. "Heat map" osoba č. 6



Obrázek 44. "Mapa propustnosti" osoba č. 6

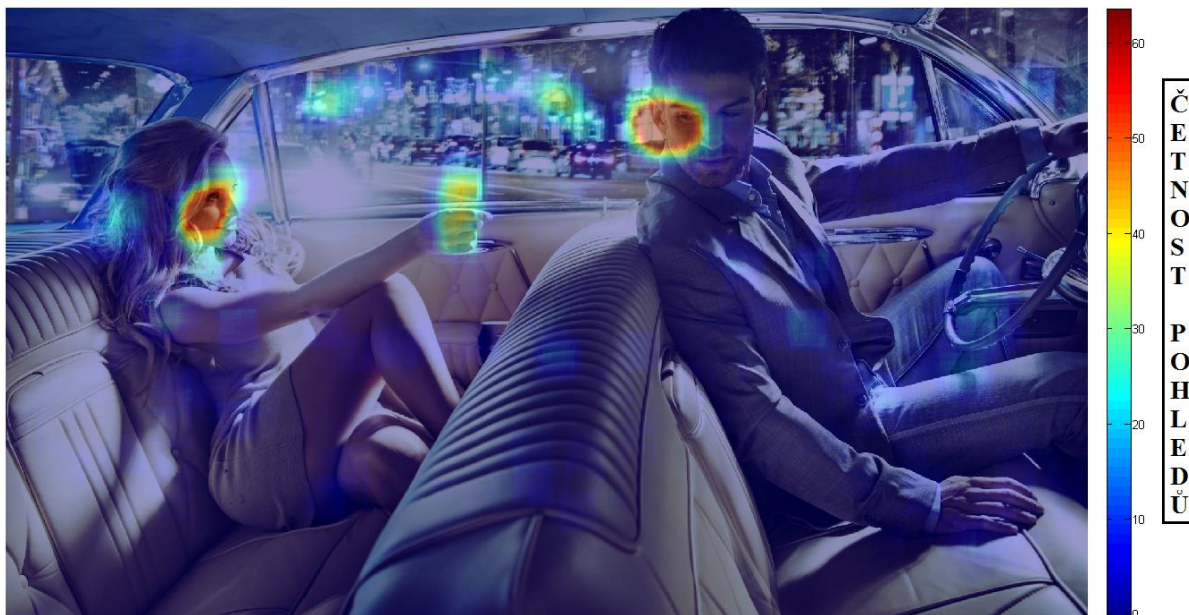
## 8.7 Testovaná osoba č. 7

Jméno:	I. L
Věk:	25
Pohlaví:	Žena

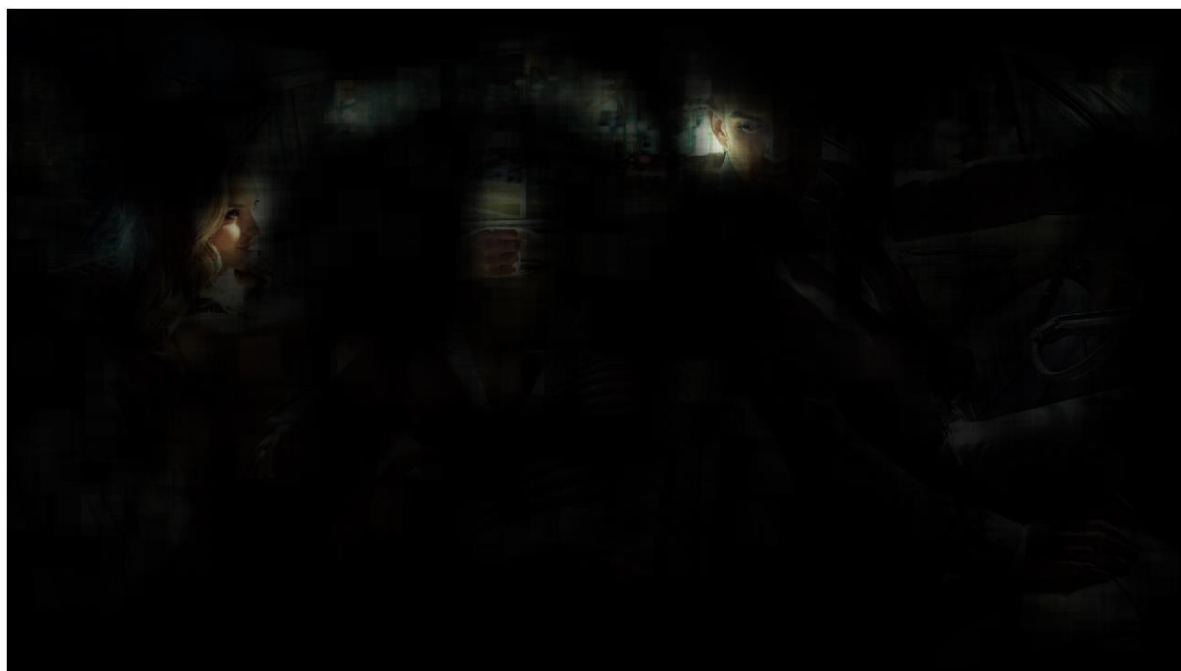


Obrázek 45. Testovaná osoba č. 7





Obrázek 46. "Heat map" osoba č. 7



Obrázek 47. "Mapa propustnosti" osoba č. 7

## 8.8 Spojení všech „heat map“



Obrázek 48. "Heat map" všech testovaných osob

Při pohledu na Obrázek 48. je možné vidět mapu vzniklou součtem „heat map“ od všech testovaných osob. Názorně tak zobrazuje místa, která byla měřeními osobami nejvíce sledována.

Z mapy je patrné, že nejsledovanějšími oblastmi jsou zcela jistě obličej. Obličej vzbuzuje u člověka největší zájem, a proto vždy sleduje nejdříve obličej (pokud se v obraze vyskytuje) a následně si všímá ostatních věcí.

Další sledovanou oblastí je volant. Jedná se o velmi členité místo, jenž člověk potřebuje nejdříve pochopit, a tudíž delší dobu setrvává na tomto místě. Taktéž je možné, že osoba sledující oblast volantu má zálibu v automobilech, kdy se snaží podle volantu určit například značku auta.

Kromě obličej je také jednou z více sledovaných oblastí ruka. Ruka ženy sedící na zadním sedadle zaujme na první pohled. Testovaná osoba si může vybavit například nějakou nabídku, kterou žena nabízí muži a domýšlí si, o jakou nabídku či nabízenou věc by se mohlo jednat. Taktéž ruka muže sedícího na předním sedadle může vzbuzovat pozornost a hlubší zamyšlení.

Takto by bylo možné ohodnotit všechny sledované oblasti v obraze a z mapy dokonce určit psychologický profil testované osoby.

## 9 ZÁVĚR

Cílem řešení této diplomové práce bylo prostudovat problematiku týkající se sledování trajektorie pohybu očí se zaměřením zejména na sledování pomocí webových kamery a na základě toho navrhnout algoritmus, v programovém prostředí Matlab, schopný sledovat trajektorii pohybu oka pomocí webkamery. Požadavkem byl také návrh parametrů šablon, které budou použity pro hodnocení přesnosti použité metody.

Po prostudování všech metod detekce oka a praktickém otestování byla zvolena metoda detekce pomocí infračerveného světla, která se oproti ostatním metodám vyznačuje výpočetní nenáročností, odolností vůči osvětlení a přesností sledování. Jako snímací zařízení při implementaci této metody byla použita webkamera s infračerveným přísvitem připevněná na helmě, odkud je snímán pohyb oka z velmi malé vzdálenosti. Pro detekci bylo zvoleno rozlišení 176x144, při kterém je možné spolehlivě detekovat oblast, kde se nachází zornice (viz Zpracování obrazu a detekce zornice). Následně byl v programovém prostředí Matlab vytvořen program umožňující hodnocení pozice oka v reálném čase a tuto pozici převádět na odpovídající pozici na monitoru.

Pomocí tohoto programu bylo provedeno otestování celkem sedmi dobrovolníků s příložením jejich fotografie, věku, pohlaví a iniciálů. Pro každého z nich byly výstupem dvě mapy – „heat map“ a „mapa propustnosti“, jež názorně zobrazují, co testovaná osoba v obraze sledovala. Taktéž bylo provedeno sloučení všech „heat map“ do jedné mapy na Obrázku 48. sloužící pro zhodnocení oblastí zájmu všech testovaných osob.

Přestože použitý program dosahuje poměrně velké přesnosti sledování, jak je uvedeno v podkapitole 7.6, pro některé testované osoby při měření dosahovala přesnost zcela odlišných hodnot. Tato nepřesnost se projevila ve výsledné „heat mapě“ a „mapě propustnosti“ jako odchylka nejvíce sledovaného místa vůči skutečnému místu v obraze. Možný vznik této chyby je způsoben odlišnými vlastnostmi lidského oka a metodou geometrické transformace použitou při kalibraci.

I přes tyto nedostatky vyniká navržené řešení svou jednoduchostí, snadnou dostupností a rychlostí registrace. Možné vylepšení, které by zlepšilo přesnost, spočívá ve změně webkamery za kameru obsahující automatické či manuální ostření. Tak by bylo možné kvalitněji detekovat plochu zornice. Další zvýšení přesnosti je možné dosáhnou umístěním zdrojů IR světla tak, aby nezpůsobovaly nežádoucí odraz IR světla od rohovky. Tím by došlo i ke zvýšení rychlosti použitého přístupu detekce, neboť by nebylo třeba tento odraz potlačovat. Posledním možným vylepšením je navržení přesnější geometrické transformace.

# LITERATURA

- [1] MALMIVUO, Jaakko a Robert PLONSEY. *Bioelectromagnetism: principles and applications of bioelectric and biomagnetic fields*. New York: Oxford University Press, 1995, s. 440. ISBN 0195058232-.
- [2] PERTECH SAS. *Eye tracker: Type L EyeTechSensor*. Mulhouse - France, 2004-2012. Dostupné z: <http://en.pertech.fr/eye-tracker/>
- [3] LENDINO, Jamie. Google Glass: Everything You Need to Know. In: *PC Magazine: Technology Product Reviews* [online]. 2014 [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2416488,00.asp>
- [4] MCNENNY, Jack. Tobii's glasses can track eyeball movement. In: *SmarterWatching: Android Wear, Apple Watch, and more!* [online]. 2014 [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: <http://www.smarterwatching.com/tobiis-glasses-can-track-eyeball-movement/>
- [5] STOMP. SensoMotoric Instruments Launches RED500 Binocular Eye Tracker. In: *Medgadget: Medical Technology News* [online]. 2010 [cit. 2014-12-27]. Dostupné z: [http://www.medgadget.com/2010/11/sensomotoric\\_instruments.html](http://www.medgadget.com/2010/11/sensomotoric_instruments.html)
- [6] Pouhým pohledem do očí lze zjistit IQ jedince a kondici mozku. In: *Novinky.cz: nejčtenější zprávy na českém internetu* [online]. 2013 [cit. 2014-12-27]. Dostupné z: <http://www.novinky.cz/zena/zdravi/307848-pouhym-pohledem-do-oci-lze-zjistit-iq-jedince-a-kondici-mozku.html>
- [7] Duhovka. JSG S.R.O. *Čočky.cz* [online]. [2010] [cit. 2014-12-27]. Dostupné z: <http://www.cocky.cz/duhovka.html>
- [8] VLACH. Hledání úseček a kružnic s využitím Houghovy transformace při zpracování obrazu v LabView. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2011, č. 2, s. 3. DOI: 1210-9592. Dostupné z: [http://automa.cz/index.php?id\\_document=42983](http://automa.cz/index.php?id_document=42983)

- [9] RICHTER, Miloslav. *Detekce geometrických tvarů, Houghova Transformace*. Brno, [2014]. Dostupné z:  
[http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/pov/POV\\_HT\\_objekty.pdf](http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/pov/POV_HT_objekty.pdf)
- [10] ZACHAR, Jiří. Základy detekce obličeje v obraze. In: *[Jiri Zachar] Zaachi.com: Personal blog* [online]. 17 OCTOBER 2008 [cit. 2014-12-27]. Dostupné z:  
<http://zaachi.com/2008/10/17/zaklady-detekce-obliceje-v-obraze.html>
- [11] YCbCr. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-31]. Dostupné z:  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/YCbCr>
- [12] NASIRI, Jalal Aldin, Sara KHANCHI a Hamid Reza POURREZA. Eye Detection Algorithm on Facial Color Images. In: *2008 Second Asia International Conference on Modelling* [online]. IEEE, 2008, s. 344-349 [cit. 2014-12-27]. ISBN 978-0-7695-3136-6. DOI: 10.1109/AMS.2008.55. Dostupné z:  
<http://profdoc.um.ac.ir/articles/a/359.pdf>
- [13] MALACH, Tobiáš, Petr BAMBUCH a MALACH. Detekce obličeje v obraze s využitím prostředí MATLAB®. In: *Mezinárodní konference Technical Computing Prague: Sborník příspěvků* [online]. 2011 [cit. 2014-12-27]. Dostupné z: [http://dsp.vscht.cz/konference\\_matlab/MATLAB11/prispevky/078\\_malach.pdf](http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB11/prispevky/078_malach.pdf)
- [14] PŘINOSIL, Jiří a Martin KROLIKOWSKI. Využití detektoru Viola-Jones pro lokalizaci obličeje a očí v barevných obrazech. *Elektrorevue: Časopis pro elektrotechniku* [online]. 2008, č. 31 [cit. 2014-12-27]. Dostupné z:  
<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/zpracovani-signalu/0/vyuziti-detektoru-viola-jones-pro-lokalizaci-obliceje-a-oci-v-barevných-obrazech/>
- [15] Face Detection using Haar Cascades. *OpenCV documentation* [online]. © Copyright 2011-2014, Dec 26, 2014 [cit. 2014-12-27]. Dostupné z:  
[http://docs.opencv.org/trunk/doc/py\\_tutorials/py\\_objdetect/py\\_face\\_detection/py\\_face\\_detection.html](http://docs.opencv.org/trunk/doc/py_tutorials/py_objdetect/py_face_detection/py_face_detection.html)
- [16] A4tech PK-333E Lighting LED WebCam. © 1994-2015. In: *Alza.cz a.s.* [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/a4tech-pk-333e-d379427.htm#popis>

- [17] THE MATHWORKS, Inc. *Distance Transform*. United States, © 1994-2015. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/images/distance-transform.html>
- [18] THE MATHWORKS, Inc. *Cp2tform: Infer spatial transformation from control point pairs*. United States, © 1994-2015. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/cp2tform.html?searchHighlight=cp2tform>
- [19] PROCHÁZKA, Jan. *Využití časových řad v analýze dat z eye tracking systému*. Olomouc, 2013. Dostupné z: <http://theses.cz/id/9qs7ae/00179027-427567718.pdf>. Magisterská práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Doc. Mgr. Jiří Dvorský, Ph.D.
- [20] Lady. 2011/2014 ©. *Sexy\_girls\_males\_females\_men\_romance\_people\_car\_love\_women.jpg*. *WallpaperUP.com* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: [http://www.wallpaperup.com/493500/sexy\\_girls\\_males\\_females\\_men\\_romance\\_people\\_car\\_love\\_women.html](http://www.wallpaperup.com/493500/sexy_girls_males_females_men_romance_people_car_love_women.html)

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

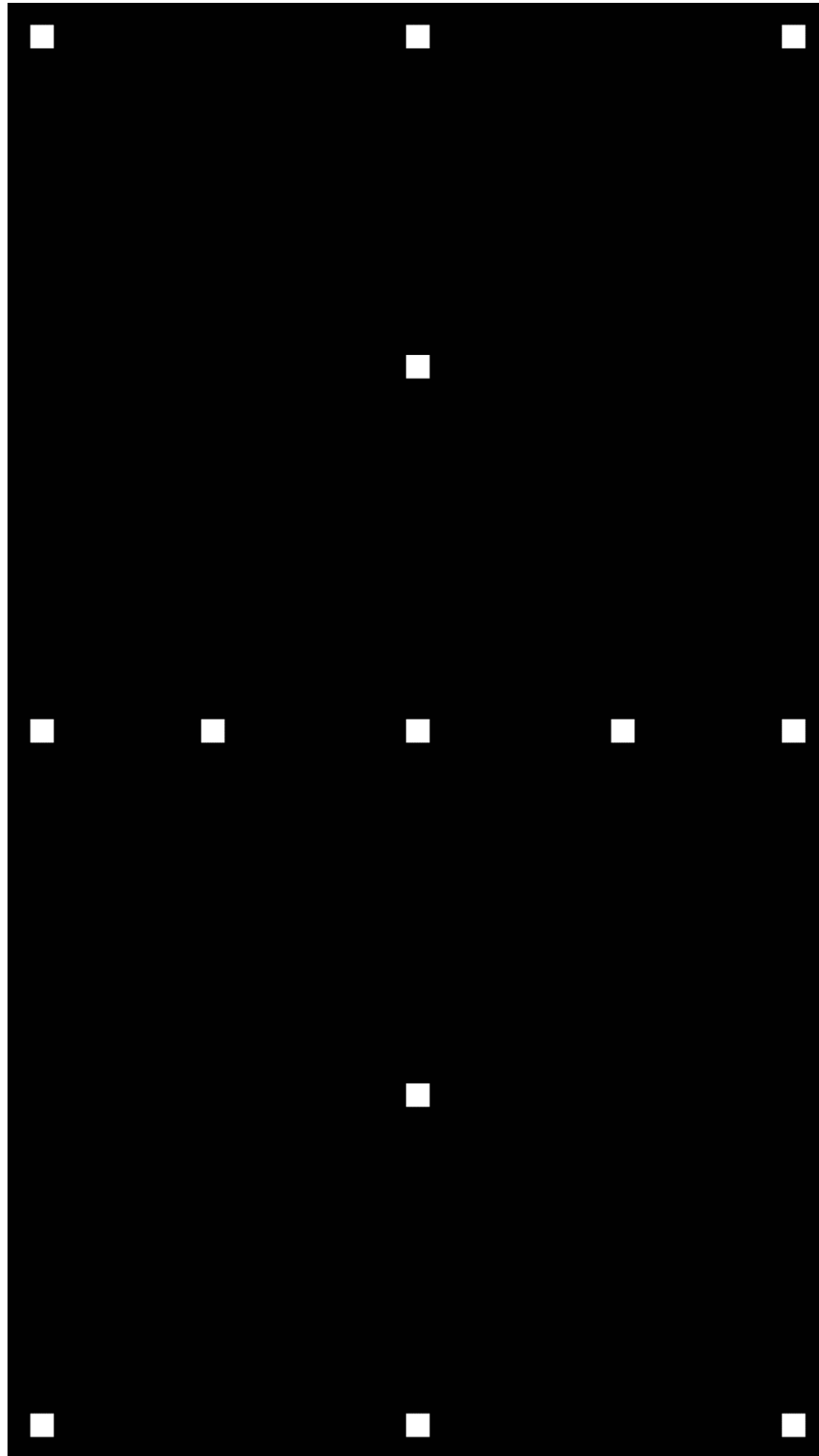
EOG	Electrooculography, Elektrookulografie
IR	Infrared, Infračervené

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Šablona pro hodnocení přesnosti sledování</b>	<b>56</b>
<b>B</b>	<b>Testovací obraz</b>	<b>57</b>



# A ŠABLONA PRO HODNOCENÍ PŘESNOSTI SLEDOVÁNÍ



## B TESTOVACÍ OBRAZ

