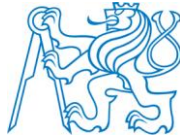


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014

Bc. Michal Prštický



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra kybernetiky

Kalibrační metody pro videookulografii

Calibration methods in videooculography

Diplomová práce

Studijní program: Biomedicínské inženýrství a informatika

Studijní obor: Biomedicínské inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Vratislav Fabián, Ph.D.

Bc. Michal Prštický

Praha, květen 2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Bc. Michal Prštický
Studijní program: Biomedicínské inženýrství a informatika (magisterský)
Obor: Biomedicínské inženýrství
Název tématu: Kalibrační metody pro videookulografii

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte podrobnou rešerši patentové a odborné literatury v oblasti videookulografie a eyetrackingu.
2. Navrhněte vhodné transformace pro kalibrační matice (5, 7 a 9 či vícebodové) k systému I4Tracking.
3. Provedte měření a statistické vyhodnocení naměřených dat a vyhodnoťte přesnost transformací pro použité kalibrační matice.
4. Na základě získaných výsledků vyberte metodiku pro kalibraci systému I4Tracking v různých aplikacích.

Seznam odborné literatury:

- [1] John L. Andreassi: Psychophysiology. Psychology Press, New York, 2007.
[2] Andrew T. Duchowski: Eye Tracking Methodology - Theory and Practice. Springer-Verlag, 2007.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vratislav Fabián, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

L.S.

doc. Dr. Ing. Jan Kybic
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

Anotace

Dle hlavních cílů diplomové práce byla provedena rešerše Eye-trackingu a videookulografie, ve které jsou představeny základní principy snímání očních pohybů spolu s uvedenými produkty největších výrobců této technologie. Je popsán měřicí systém videookulografie I4Tracking, vyvíjený na katedře Fyziky ČVUT, který slouží ke generování dat pro mnou vytvořenou funkci v Matlabu. Funkce má za úkol zpracovat záznam z kalibračního měření, nalézt v něm pomocí shlukové analýzy kalibrační body sledované na monitoru počítače měřenou osobou a rozhodnout o kvalitě kalibrace. V první fázi funkce nalezne a opraví co nejvíce použitelných kalibračních záznamů v již naměřených souborech dat, které povedou k výraznému zlepšení specifických experimentů. Ve druhé fázi je statisticky vyhodnocena účinnost funkce a na základě výsledků je vybrána vhodná metodika určení kvality kalibrace v budoucí implementaci funkce do software I4Tracking.

Klíčová slova

Videookulografie, eye-tracking, kalibrace, Matlab.

Annotation

According to the main aims of this diploma thesis, the review of literature in the field of the Eye-tracking and videooculography was made. Basic principles of eye movements scanning are described and the products of the biggest manufacturers of this technology are mentioned. The measure system of videooculography I4Tracking, developed in the department of Physic CTU, is described. The system generates the data for my function created in the Matlab environment. The tasks of the function are: to process the record from the calibration measurement, to find the calibration points watched by the subject in the screen and to assess the quality of the calibration. Firstly, the function finds and repair as many usable calibration records as possible in the data measured earlier. This process leads to the significant improvement of the specific experiments. Secondly, the efficiency of the function is statistically evaluated and based on the results the appropriate methodology is chosen. The assessment methodology of the calibration quality will be used in the future implementation of the function to the I4Tracikng software.

Key words

Videooculography, eye-tracking, calibration, Matlab.

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé práce panu Ing. Vratislavu Fabiánovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a čas, který mi věnoval. Děkuji všem, kteří se podíleli na projektu videookulografie na Katedře fyziky. Děkuji také Fakultě elektrotechnické, zejména oboru Biomedicínský inženýr, díky kterému jsem se naučil dovednosti vedoucí k vypracování mé diplomové práce.

Děkuji své přítelkyni a rodině za podporu po celou dobu mého studia.

Prohlášení autora práce

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

V Praze dne 12. 5. 2014

.....

Podpis autora práce

Obsah

1	Úvod	1
1.1.	Cíle práce.....	1
1.2.	Struktura práce	2
2	Rešerše	3
2.1.	Úvod	3
2.2.	Využití.....	3
2.3.	Základní principy Eye-trackingu	6
2.4.	Dostupné zařízení Eye-tracking (brýle)	10
2.5.	Závěr	15
3	Metody	17
3.1.	Úvod	17
3.2.	Popis měřicího zařízení	18
3.3.	Popis algoritmu	20
3.3.1.	Podrobný popis funkce	20
3.4.	Metody výsledků.....	28
4	Výsledky a Diskuze	30
4.1.	Úvod	30
4.2.	Průběžné výsledky funkce.....	30
4.3.	Analýza výsledných dat.....	37
4.4.	Závěr a řešení do budoucna.....	45
5	Závěr.....	47
	Bibliografie	48
	Přiložené CD.....	51

Seznam obrázků

Obr. 1: Heatmaps regálu pomocí Eye-trackingu [3].	4
Obr. 2: ActiveTrack 3-D EyeTracking [4].	5
Obr. 3: Kosmonaut v ISS se zařízením Eye-tracking [5].	5
Obr. 4: Metoda se zrcátkem v oku, dopadající odraz IR paprsku na citlivý papír [9].	6
Obr. 5: Purkyňeho obrázky [6].	7
Obr. 6: Snímání EOG – oko jako dipól [8].	8
Obr. 7: Světlá zornice vlevo a tmavá zornice vpravo [11].	9
Obr. 8: Eye-tracking brýle od firmy SMI [13].	10
Obr. 9: Eye-tracking brýle s nahrávacím zařízením od firmy Tobii [14].	11
Obr. 10: ASL Mobilní Eye-XG brýle od firmy ASL [15].	12
Obr. 11: UltraFlex headgear Eye-tracking a METL od firmy Positive Science [16].	12
Obr. 12: EyeTechBox a EyeTechMobile od firmy Pertech [17].	13
Obr. 13: VT2 mini eye tracker od firmy EyeTech Digital Systems [18].	14
Obr. 14: EyeFollower od firmy Interactive minds [19].	14
Obr. 15: S2 Eye Tracker od firmy Mirametrix [20].	15
Obr. 16: Pozice kalibračních bodů na monitoru.	17
Obr. 17: Měřicí brýle I4Tracking.	18
Obr. 18: Jak vidí kamera oko v odrazovém sklíčku a detekce zornice.	19
Obr. 19: Ukázka software I4Tracking.	19
Obr. 20: Maximální rychlost konstrikce a dilatace oka [21].	21
Obr. 21: Rozložení 9 kalibračních bodů v mřížce pro posouzení kalibrace.	23
Obr. 22: Schéma dopočítání 5 bodů ze 4 správných bodů v 1 malém čtverci.	24
Obr. 23: Diagram funkce clusters.	26
Obr. 24: Ukázka ROC křivky a histogramů z kterých se tvoří [26].	28
Obr. 25: Vstupní data do funkce clusters – souřadnice středy zornic.	30
Obr. 26: Počáteční podmínky pro k-means.	31
Obr. 27: Středů dle k-means.	32
Obr. 28: Určení počátečních podmínek pomocí čtverců.	32
Obr. 29: Přepočítání středů na základě nejbližších bodů.	33
Obr. 30: Nahrazení nejhoršího bodu transformací.	34

Obr. 31: Síť kalibračních bodů pro posouzení úspěšnosti kalibrace.	34
Obr. 32: Rozdílné pořadí kalibračních bodů.	35
Obr. 33: Výsledný obrázek funkce clusters.	36
Obr. 34: Histogram vzdáleností kalibračních bodů z clusteru a z I4Trackingu.....	38
Obr. 35: Vzdálenosti jednotlivých kalibračních bodů dle prvního pořadí.	39
Obr. 36: Histogram transformace a počítání úhlů.....	39
Obr. 37: Histogram transformace podle dělení kalibrace počítáním uhlů.....	40
Obr. 38: ROC křivka pro určení prahu dobré kalibrace pomocí transformace.	41
Obr. 39: Histogram počítání uhlů podle dělení kalibrace transformací.....	42
Obr. 40: ROC křivka pro určení prahu dobré kalibrace pomocí počítání uhlů.	43
Obr. 41: Počty dobrých a špatných kalibrací podle 3 metod.	43
Obr. 42: Experiment s původní kalibrací (vlevo) a kalibrací pomocí clusters (vpravo).	44
Obr. 43: Kalibrační záznam pro Obr. 42.	45

1 ÚVOD

Diplomová práce je řešena v rámci projektu I4Tracking na katedře Fyziky ČVUT. I4Tracking je videookulografický měřicí systém používaný k analýze očních pohybů, tvořený měřicími brýlemi s kamerou a ovládajícím softwarem. Hlavním cílem projektu je rozpoznat u dětí dyslexii ještě před vstupem do základní školy. Výhodou je, že se může dítě na svůj problém zaměřit, respektive jeho rodiče, či učitelka se mohou podílet na zlepšení problematiky čtení. Sběrání záznamů probíhá ve vybraných školách a školkách v České republice a trvá již několik let. K nynějšímu stavu je k dispozici okolo 500 naměřených subjektů, přičemž na každém subjektu se jednotlivá měření opakují alespoň čtyřikrát. V mé diplomové práci řeším část ohledně kalibračního měření, celkové měření se stává z mnoha různých specifických úloh. Účelem diplomové práce v projektu I4Tracking je vyhodnotit již naměřené záznamy, pomocí nové kalibrace, která by měla výrazně zlepšit výsledky úloh. Kalibračním měřením se rozumí krátké měření umístěné před samotné měření různých úkolů, obsahující pozorování devíti kalibračních bodů na monitoru.

Software I4Tracking vyhodnocuje obraz z kamery, detekuje střed zornice a výstupem je množina bodů (středů zornice), kam se subjekt v průběhu měření díval. Mým úkolem je vytvořit v Matlabu funkci, která výsledná data z kalibrace zpracuje a pomocí shlukové analýzy vyhodnotí devět kalibračních bodů. Poté nalézt nejlepší metodiku pro určení, zdali je kalibrace v pořádku, tedy jestli je výsledných devět kalibračních bodů použitelných pro samotnou kalibraci před dalším měřením. V nynější fázi projektu I4Tracking se snažím nalézt co nejvíce použitelných záznamů, které byli doposud pořízeny. Do budoucna je třeba uvažovat o téměř real-time rozhodování v otázce kvality kalibrace, které by pomohlo obsluze systému I4Tracking rozhodovat, zdali kalibrace proběhla v pořádku, či by se měla opakovat. V tomto případě se bude muset funkce z Matlabu přepsat do jiného programovacího jazyku (C++, Octave, ...) a případně optimalizovat.

1.1. Cíle práce

Ze zadání uvedeného výše jsou patrné čtyři hlavní cíle mé diplomové práce. V první řadě provést rešerši v oblasti videookulografie a eye-trackingu. Tomuto úkolu je věnována celá následující kapitola s příznačným názvem rešerše. Nalezneme zde základní principy využívané v Eye-trackingu a úplný výčet velkých výrobců zabývajících se touto technologií.

Druhý úkol ohledně transformací u kalibračních matic byl v průběhu projektu I4Trackingu pozměněn, jelikož se požadovala přesná matematická transformace aproximující zakulacení oka na rovinnou plochu monitoru, byl úkol navržení transformace svěřen kolegovi z katedry matematiky, který si na tom vytvořil diplomovou práci. Nyní se v I4Trackingu využívá lineární transformace mezi body na monitoru a body na kameře snímací oko. Ve funkci *clusters* se využívá transformace pro určení kvality kalibrace, kde byla zvolena afinní transformace implementovaná v prostředí Matlab.

Třetí úkol ze zadání lze nalézt v kapitole výsledky a diskuze. Nalezneme zde statistické vyhodnocení naměřených dat, kolik kalibrací bylo opraveno a jak se zlepšila původní kalibrace. Pomocí histogramů a dalších grafů jsou výsledky přehledně vizualizovány. Je uvedeno porovnání nových kalibračních bodů dle funkce *clusters* a původních kalibračních bodů ze software I4Tracking, čímž se řeší otázka přesnosti transformace.

Poslední úkol vychází z kapitoly metody a kapitoly výsledky a diskuze. V kapitole metody je uvedena celá metodika úprav a hodnocení záznamů kalibrace, reprezentující popisem funkce *clusters*. Ve výsledcích a diskuzi je ověřena zvolená metodika, jsou zde navrženy postupy určující kvalitu kalibrace, která je nedílnou součástí celého postupu kalibrace. Zhodnocení všech cílů diplomové práce lze nalézt v závěru práce.

1.2. Struktura práce

Celá diplomová práce je rozdělena na pět kapitol. První kapitola je úvodní, je zde ve stručnosti nastíněna problematika diplomové práce. Jsou zde uvedeny hlavní cíle práce a to, kde je najdeme. Druhá kapitola představuje teoretické základy pro čtení dalších kapitol. Jsou zde uvedeny principy eye-trackingu a jednotlivé produkty firem zabývajících se touto technologií. Ve třetí kapitole je popsána metodika celého postupu kalibrace. Nejprve technika měření a konkrétní měřicí systém videokulografie I4Tracking, dále popis funkce zpracovávající kalibrační záznam. Čtvrtá kapitola ověřuje, jak dopadla zvolená metodika zpracování kalibračního záznamu a ukazuje konkrétní výsledky. Na základě výsledků jsou navrženy kritéria kalibrací a další postup práce. Pátá kapitola je závěrečná, shrnuje experimentální část diplomové práce a upřesňuje splněné hlavní cíle.

2 REŠERŠE

2.1. Úvod

Eye-tracking je jednou z moderních technologií, které se z armádního užívání dostaly do civilní sféry. Toto nákladné zařízení sleduje pohyby lidského oka a dokáže zjistit, kam se oko právě dívá a do jaké vzdálenosti má zaostřeno. Lidé si sami často nejsou vědomi, na která všechna místa se dívají. Mysl pracuje velmi rychle a oči se pohybují po okolí s velmi krátkými zastaveními na určitých prvcích a slovech. Eye tracking tyto pohyby zaznamenává a vyhodnocuje.

2.2. Využití

Vylepšené verze snímačů očních pohybů můžeme najít v helmách vojenských pilotů. Díky nim palubní počítač neustále ví, kam se pilot dívá a do těchto míst mu na čelní sklo promítá důležité informace. Toho se s úspěchem využívá i při zaměřování nepřátelských cílů.

Nynější využití systému se používá především při zkouškách designu a navigace webových stránek, či v jiných marketingových strategiích. Testované osobě je nasazen snímač, poté je osoba usazena k počítači s webovými stránkami a od první vteřiny jsou přesně zaznamenávány pohyby oka po stránce. Na zpomaleném záběru je pak možné zjistit, kolik desítek pohybů oko po stránce udělalo jen během prvních dvou, tří vteřin. Jak oko neomylně zamířilo do levého horního rohu, jak potom "omrklo" stránku jako celek a jak se zastavovalo na bannerech, ikonkách, fotografiích a dalších záchytných bodech.

Testovaná osoba je poté postupně vyzývána k různým aktivitám na stránce (tištění ikon, vyplňování formulářů, hledání určitých informací atp.). Je podrobně měřeno chování očí po každé výzvě, zda osoba neomylně zamířila tam, kam měla, nebo zda těkala a hledala. Měří se i čas, jak dlouho trvá, než osoba mezi spoustou jiných prvků najde ten kýžený.

Výstupem je tzv. heatmaps, které lze vidět na Obr. 1. Jedná se o obrázky, na nichž je hodnocená stránka překryta barevnou "tepelnou" mapou, která určuje, na která místa se uživatelé dívali nejčastěji. Výsledkem těchto testů je ucelená studie o kvalitě či nekvalitě designu, zjištění slabých míst v navigaci nebo výskyt rušivých prvků, které odvádí pozornost od důležitějšího obsahu [1].

Pomocí očních kamer je možné zaznamenat pohyb a pohledy nakupujících po prodejně a ty propojit například s měřením reakcí mozku, odporu kůže, srdečního tepu a dalších. Díky očním kamerám je možné zjistit, na co přesně testované osoby reagují, jaké části prodejny nejčastěji navštěvují, jaká in-store média při svém pohybu potkávají, jak se na ně dívají, jak dlouho se na ně dívají, které vizuální prvky je zaujmou a které ne atp. Díky očním kamerám se dá změřit, jak jsou dané POS materiály schopny získávat pozornost zákazníků, podněcovat interakci zákazníků s produktem a nakonec je přivést až ke koupi. Z britské studie MARI mimo jiné vyplývá, že ženy si více všímají a více reagují na POP komunikační prvky než muži a až o 7,2 % častěji podporovaný produkt koupí. Výsledky očních kamer mohou být také užitečné k optimálnímu rozložení výrobků do regálů za účelem přilákání pozornosti a podněcení interakce co největšího počtu zákazníků.

Sledování pohledů zákazníků bývá nejnověji kombinováno s mnoha biometrickými měřeními. Z těch tradičnějších se nejčastěji využívá elektroencefalografie (EEG) zaměřená na reakce mozku, měření kožního odporu, či reakce srdce (EKG). K analýze mozkové aktivity se používá krom metody EEG také funkční magnetická rezonance, magnetická encefalografie či pozitronová emisní tomografie. Nejmodernější jsou techniky zaměřené na měření mimiky obličeje, tzv. FMA – Facial Movement Analysis (Analýza pohybu obličeje) nebo FA – Facial Coding (Kódování obličeje). Na základě výsledků analýzy lze pak doporučit, jak reklamní komunikaci optimalizovat, které klíčové elementy zvýraznit či naopak eliminovat a jak vylepšit emoční spojení se značkou a stimulovat k akci [2].



Obr. 1: Heatmaps regálu pomocí Eye-trackingu [3].

Eye-tracking je používán také v medicínských oborech. Například Ústřední vojenská nemocnice v Praze jej využívá při laserové refrakční chirurgii, kdy pomocí dvou infračervených videokamer registruje 99,4% všech pohybů oka v ose X, Y a Z (Obr. 2). Dále umožňuje sledování středu zorničky v průběhu zákroku a její automatickou centraci na střed optické osy laserového systému, pracuje s přesností 50 μm . Systém je vyobrazen na obrázku níže [4].



Obr. 2: ActiveTrack 3-D EyeTracking [4].

Zajímavým využitím Eye-trackingu je v mezinárodních vesmírných stanicích (ISS). Němečtí inženýři navrhli systém Eye-tracking, který zkoumá pohyby očí ve stavu bez tíže (Obr. 3). Cílem tohoto výzkumu bylo zjistit vliv změny gravitačních podmínek na vestibulární systém člověka. Jelikož ve stavu bez gravitace nedostává mozek informace od vestibulárního systému o poloze těla, musí se člověk na tento stav určitým způsobem adaptovat a kompenzovat jej jiným mechanismem. Po návratu na Zem, kde jsou gravitační podmínky rozdílné, mají astronauti problémy. Systém Eye-tracking by měl pomoci pochopit, jak se změní vestibulární systém člověka pohybujícího se až půl roku ve stavu bez tíže [5].



Obr. 3: Kosmonaut v ISS se zařízením Eye-tracking [5].

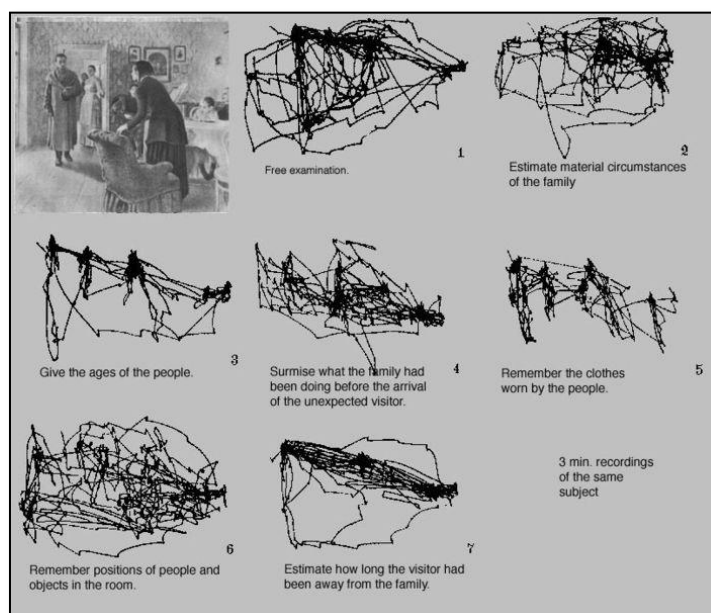
Další medicínské využití oční kamery je pro diagnostiku různých nemocí jako například schizofrenie či dyslexie. Schizofrenie je závažné duševní onemocnění, které se

v čase mění a vyvíjí, diagnostikovány jsou rozdílné vzorce očních pohybů a hodnocení velikosti zornice (pupilometrie). Dyslexie je vývojová porucha čtení, diagnostikují se zde změněné oční pohyby [6].

2.3. Základní principy Eye-trackingu

Na trhu se v současné době nachází asi 8 výrobců Eye-trackingu, které v následující kapitole představím. Každý z nich má svůj originální výrobek, ovšem principiálně tyto výrobky můžeme rozdělit na 4 základní typy.

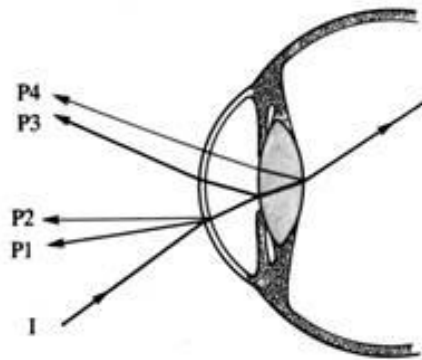
První typ používá speciální kontaktní čočku se zabudovaným zrcadlem, či senzorem magnetického pole, které se snímá při pohybu oka. Musí být zajištěna dobrá fixace čočky v oku, aby nedocházelo k prokluzování a tím k znehodnocení měření. Zejména snímací magnetické cívkys jsou dobré pro studování dynamiky a základní fyziologie pohybu oka. Odraz infračerveného světla od malého zrcátka v oku dopadá na fotografický materiál, kde podle doby setrvání exponuje více či méně širokou stopu, která odpovídá pohybu zraku po sledovaném materiálu (Obr. 4). Výhodou je relativně velká přesnost. Mezi nevýhody patří zejména využití kontaktních čoček, což je nepříjemné pro testovanou osobu, a problematické zaznamenávání souřadnic a času.



Obr. 4: Metoda se zrcátkem v oku, dopadající odraz IR paprsku na citlivý papír [9].

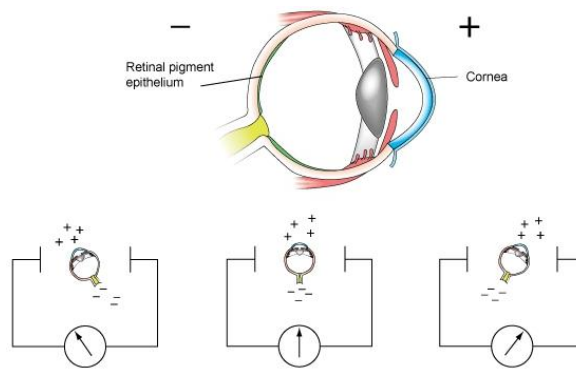
Druhý typ využívá optickou metodu odrazu světla od oka. Na rozdíl od předchozího typu je bezkontaktní. Ve většině případů se používá světlo o vlnové délce spadající do

infračervené oblasti a je snímáno video kamerou, či jiným speciálním optickým senzorem. Odrazy světla jsou závislé na otáčení a pohybu oka, poté se tato refrakce analyzuje a zpracovává. Odrazy jsou definovány pomocí Purkyněho obrazů („four Purkinje images“), viz Obr. 5, jejichž princip využívá světelných paprsků odrážejících se od oka pod různými úhly, které jsou závislé na části oka, od které se odráží. Nejprve se využívalo prvních Purkyněho obrazů, odrazu infračerveného paprsku od přední strany rohovky, a centra zornice. Citlivější způsob využil dual - Purkyňovy obrazy, odraz světla od přední části rohovky (první Purkyňův obraz) a zadní části čočky (čtvrtý Purkyňův obraz). Nejpresnější způsob sledování obrazu je ve vnitřní části oka, respektive v prokrvených cévách sítnice, jejichž prokrvení se liší na základě pohybu oka. Všechny tyto optické metody se snímací kamerou jsou velice oblíbené, neboť jsou neinvazivní, relativně přesné a finančně málo náročné.



Obr. 5: Purkyňeho obrazy [6].

Třetí typ používá elektrické potenciály měřené elektrodami umístěnými kolem očí. Oči se chovají jako dipóly s kladným pólem na rohovce a záporným pólem na sítnici, jsou zdrojem elektrického potenciálu. Elektrický signál naměřený z dvou párů elektrod umístěných na kůži kolem očí se nazývá elektrookulogram (EOG). Oči se pohybují od středové polohy směrem k periferiím sítnice, čímž mění svůj elektrický potenciál, který je následně snímán elektrodami (Obr. 6). Pro zpřesnění detekce pohybu očí se někdy využívají další dva páry elektrod umístěné nad a pod očima. Tím je docíleno přesného vyhodnocení pohybu oka v horizontálním i vertikálním směru. Jako reference se používá tzv. třetí radiální EOG kanál, který průměruje předešlé svody. Radiální kanál je velice citlivý na sakády, rychlé oční pohyby generované očními svaly. Nevýhodou EOG je menší přesnost, ale výhodou je, že můžeme měřit i při zavřených očích.



Obr. 6: Snímání EOG – oko jako dipól [8].

Posledním čtvrtým typem Eye-trackingu je videookulografie, která je současně nejvyužívanější. Poloha oka se určuje z polohy středu zornice zaznamenané speciálními kamerovými systémy a výpočetními algoritmy zpracování a hodnocení obrazu. U analýzy očních pohybů je tedy cílem, pro získání polohy oka, určit střed zornice nebo duhovky. Metody videookulografie jsou založeny všechny na obdobných principech, tj. snímané obrázky jsou porovnávány mezi sebou nebo jsou vztaženy ke kalibrované scéně. Zvýšené požadavky jsou kladeny na schopnost rychle a kvalitně snímat požadovanou scénu. Běžné systémy zachycují obraz s frekvencí 50 až 60 Hz. V lékařské praxi bylo prokázáno, že některé pohyby oka lze podrobně zachytit při snímkové frekvenci až 200 Hz, což představuje úhlovou změnu přibližně 400 °/s. Je tedy vhodnější použití nových digitálních snímačů založených na technologii CCD/CMOS.

Při aplikaci videookulografie je nejdůležitější částí algoritmus pro vyhodnocování polohy oka na základě identifikace středu zornice nebo duhovky. Jedná se například o algoritmus detekce a určení bodů na okraji zornice, a proložení těchto bodů vhodnou matematickou funkcí, například funkcí popisující kruh či elipsu. Vhodnou metodou může být například algoritmus RANSAC (Random Sample Consensus), kdy se na základě nalezených hraničních bodů provede vepsání elipsy (do snímku zornice či duhovky) a nalezení středu této elipsy. Metoda je vhodná nejen při použití IR spektra k hledání okrajů zornice, ale i pro viditelné spektrum při hledání okrajů duhovky. Výhodou je, že se pro sestavení elipsy nepotřebuje provádět vstupní kalibrace, metoda není ovlivněna změnou velikostí zornice a v neposlední řadě není potřeba znát celý rozměr zornice nebo duhovky. Dále se hojně používá algoritmus Starbust, který využívá metodu nalezení přechodových bodů na hraně rozhraní. Základním požadavkem při vyhodnocování informačního obsahu obrazu je detekce

objektů. Aby byly objekty detekované, musí se výrazně lišit od pozadí obrazu, například jasovou úrovní. V místě, kde nastává změna jasové úrovně, se dá předpokládat hrana objektu. Detekce takovýchto jasových změn je úkolem hranových detektorů a prvním krokem v segmentaci obrazového obsahu a interpretaci objektů. Algoritmus tedy hledá pomocí histogramu, který koresponduje s hodnotami intenzity pixelů obrazu, nejpravděpodobnější body přechodu mezi zornicí a duhovkou nebo duhovkou a bělimou. Po získání přechodových (hraničních) bodů se opět používá například funkce RANSAC, kdy je na základě nalezených bodů sestavena elipsa a z ní nalezen přesný střed [10].



Obr. 7: Světlá zornice vlevo a tmavá zornice vpravo [11].

Aktuálně nepoužívanější systémy Eye-trackingu využívají střed zornice a rovnoběžné paprsky světla v infračervené oblasti k vytvoření odrazů od rohovky, které jsou snímány kamerou. Kamera se připevňuje většinou na hlavu (na brýle) a v některých případech musí být celá hlava fixována tak, aby se pohybovaly pouze oči. Vektor mezi středem zornice a odrazem od rohovky se používá pro výpočet směru, kam se oko dívá. K dispozici jsou dvě základní techniky sledování očí, světlá zornice a tmavá zornice (viz Obr. 7). Rozdíl mezi nimi je v umístění zdroje světla vůči optice oka. V případě, že je osvětlení v ose shodné s optickou cestou, se oko chová jako retroreflektor, světlo se odráží od sítnice, čímž vytváří světlou zornici (podobný efekt jako u „červených očí“). Je-li zdroj světla posunut mimo optickou cestu, pak se zornice jeví tmavě, jelikož retrorefrakce ze sítnice směřuje do kamery. Metoda světlé zornice vytváří velký kontrast mezi duhovkou a zornicí, je více robustní vůči pigmentaci duhovky a jiným okolním vlivům. Ovšem není vhodná pro měření ve venkovních prostorech, kde mohou být přítomny jiné přírodní zdroje infračerveného světla, které mohou zásadně ovlivnit měření [9].

2.4. Dostupné zařízení Eye-tracking (brýle)

Na trhu se nachází 8 výrobců systému Eye-tracking, které budou v následujících odstavcích představeny. Přičemž 5 firem vyrábí Eye-tracking glasses (brýle), kterými se budu ve své diplomové práci zabývat. V České republice nemá žádný z výše uvedených výrobců dodavatele. Nicméně je zde firma GfK, která vlastní několik výrobků Eye-tracking a provádí s nimi marketingový servis (neuromarketing a Eye-tracking). Jedná se o jedinou větší firmu v ČR poskytující tyto služby, vlastní výrobky Tobii X60, Tobii Glasses, ASL mobile Eye a EmBandTM. V následujících několika odstavcích budou představeny některé produkty vybraných výrobců.



Obr. 8: Eye-tracking brýle od firmy SMI [13].

První ze dvou největších výrobců systémů Eye-tracking a podobných zařízení je firma SMI. Jejich brýle pro sledování očí jsou podobné běžným slunečním brýlím (s váhou 75 gramů) a jsou ihned po nasazení připraveny fungovat (Obr. 8). Jediným krokem před samotným měřením je nutnost testované osoby se skrz brýle po danou krátkou dobu zadívat na jeden bod v prostoru pro inicializaci. Na nožičkách brýlí jsou umístěny dvě HD kamery, poskytující rozlišení 1280 x 960 pixelů se vzorkovací frekvencí 30 Hz, snímající oční pohyby testované osoby, čímž vytvářejí mapy míst, kam oči směřovaly nejčastěji. Binokulární systém dokáže přesně určit také vzdálenost, kam daná osoba hleděla, a to od vzdálenosti 40 cm do "nekonečna" s rozlišením 0,1°. Sledovací rozsah je 70° horizontálně a 55° vertikálně. Díky možnosti výměny skel v brýlích je systém vhodný i do venkovních prostor. Celý měřicí systém je vybaven mobilním nahrávacím zařízením přepnutelným na pásek, které vydrží bez výměny baterie nahrávat až 2 hodiny záznamu. Systém umožňuje nahrávat audio poznámky. Záznam analyzuje speciálním software v PC. Při potřebě snímání očních pohybů v real-time módu je nutné mít speciální SMI-ETG notebook. Oční brýle ke svému měření nepotřebují žádné

aktivní IR markery, mohou se použít v jakémkoliv prostředí. Jsou kompatibilní s magnetickou rezonancí a lehce integrované s ostatními mobilními technologiemi a senzory [13].



Obr. 9: Eye-tracking brýle s nahrávacím zařízením od firmy Tobii [14].

Druhý velký výrobce systému Eye-tracking je firma Tobii. Jejich Eye-tracking brýle jsou také podobné slunečním brýlím (Obr. 9). Díky své lehké váze (75 gramů) s decentním vzhledem dovolují testované osobě přirozené chování v reálném prostředí. Při použití není třeba upravovat hardware, kameru či zrcátko. Kalibrace systému trvá pod 1 minutu a může se provést před nebo po měření. Robustní technologie IR-based AOA-Track dokáže přesně určit objekty, na které se oko právě dívá. Plná kompatibilita systému s Tobii Studio Eye-tracking umožňuje zobrazovat a statisticky zpracovávat data rychle, často současně se snímáním. Samozřejmostí vizualizačního softwaru je možnost vytvářet grafické výstupy, které lze kopírovat do výsledné výzkumné zprávy. Technologie Parallax kompenzace udržuje přesnost na různých vzdálenostech, jestliže testovaná osoba sleduje pohyblivý předmět. Součástí celého systému je malé mobilní nahrávací zařízení (200 gramů), které také ukazuje stav baterie a kvalitu sledovanosti očí. Baterie zařízení vydrží při nahrávání kolem 110 minut. Nahrávací zařízení zaznamenává, kam se oko dívá, zvuky (v případě poznámek), video prostředí a polohu infračervených markerů. Všechno je ukládáno na SD paměťovou kartu. Použití Tobii Eye-tracking vyžaduje komunikaci s infračervenými markery, které definují oblast výzkumu. Komunikují s brýlemi pomocí infračerveného portu, který dokáže sledovat více markerů. Tato technologie umožňuje přesné mapování dat i statistickou analýzu. Další zajímavé technické specifikace brýlí Tobii: vzorkovací frekvence kamery je 30 Hz, rozlišení kamery je 640x480 pixelů, využívá se metody tmavé zornice, vzdálenost od IR markerů by měla být 60-250 cm [14].



Obr. 10: ASL Mobilní Eye-XG brýle od firmy ASL [15].

Dalším výrobcem, kterého lze na trhu nalézt je firma ASL. Nabízí opět kompletní využívání Eye-tracking brýlí se softwarovým programem na zpracování dat. Brýle jsou lehké (76 gramů), podobné slunečním sportovním brýlím, proto se testovaná osoba při jejich použití cítí přirozeně (Obr. 10). Na brýlích jsou umístěny dvě digitální kamery s vysokým rozlišením, kde první snímá okolní prostředí a druhá snímá oko testované osoby. Výsledný videozáznam se skládá z jediné scény okolního prostředí, ve které se pohybuje kurzor představující bod, kam se dívá oko testované osoby. ASL Mobilní Eye-XG brýle dokážou také nahrávat poznámky řečené testovanou osobou během nošení. Data se mohou ukládat na SDHC paměťovou kartu, nebo mohou být posílána pomocí bezdrátové sítě do pracovní stanice (PC), kde je lze real-time zpracovávat. Nastavení a kalibrace je snadná a rychlá. Flexibilní obroučky brýlí dovolují požití u široké škály účastníků (dětí i dospělých) [15].



Obr. 11: UltraFlex headgear Eye-tracking a METL od firmy Positive Science [16].

Firma Positive Science se rozhodla jít odlišným směrem, namísto brýlí použila jako opěrný systém kamer specifickou čepičku (Obr. 11). Výhoda této čepičky je bezpečné nošení i velmi malými dětmi. Nepoužívá žádné sklíčko pro odraz IR paprsku, nýbrž infračervené LED a kameru snímající oko na flexibilním rameni. Rameno se nastaví před obličej tak, aby kamera snímala oko pod určitým úhlem a IR paprsky dopadaly na správné místo v oku.

System eye-tracking od této firmy využívá techniku tmavé zornice. Nedílnou součástí systému je PSLiveCapture software pro záznam a synchronizaci dat (směr pohledu oka, scéna prostředí a audio poznámky). Ke zpracování záznamu je dodáván software Yarbus, který je široce využitelný a lehce komunikuje s většinou programovacích jazyků. Nahrávací zařízení je řešeno pomocí notebooku a to buď drátově, kdy notebook plní účel pouze paměťový, či bezdrátově v real-time módu, kdy notebook přímá a zpracovává data [16].



Obr. 12: EyeTechBox a EyeTechMobile od firmy Pertech [17].

Další výrobce Eye-trackingu je firma Pertech. Jejich EyeTechMobile brýle jsou lehké, univerzální a lehce přizpůsobitelné každé osobě (Obr. 12). Dají se použít v každých podmínkách stejně dobře jako na simulátoru. Nepoužívají žádné zrcátko ani sklo v brýlích, kamera snímající oko je připevněna na flexibilní rameno před obličej. Monokulární flexibilní rameno s kamerou se dá nastavit na snímání pravého, či levého oka. Použitelné na snímání obrazů vzdálených až 90 metrů. Možnost sledování pohybu oka v real-time na vzdáleném počítači. Výdrž baterie při bezdrátovém vysílání je na jedno nabití lehce přes hodinu. K tomu se využívá EyeTechBox umožňující kalibraci systému, pořízení videa a funguje jako vysílací anténa. Video je pořízeno pomocí akvizitní karty a lze jej přehrávat ve specializovaném EyeTechPlayeru. EyeTechBox také umožňuje přes bezdrátové spojení Ethernet ovládání Eye-tracking brýlí. Celý systém je plně synchronní s dalšími senzory doplňující testování jako například RTMaps nebo DSpace. Software EyeTechPilot zaručuje zpracování videa přes akvizitní kartu, kalibraci celého systému, ale také export dat do Matlabu pro další analýzy. Nebo je možné využít program EyeTechLab, který z naměřených dat analyzuje tepelné mapy a zaručí další grafické vyhodnocení. Další software EyeTechMotion umožňuje sledování a kompenzaci pohybů hlavy pomocí aktivních, či pasivních markerů [17].



Obr. 13: VT2 mini eye tracker od firmy EyeTech Digital Systems [18].

Eye-tracking remote (dálkové) se liší oproti brýlím zejména využitím, tento systém se nedá použít v jiných než laboratorních podmínkách a dají se s ním testovat pouze předměty viděné na obrazovce počítače. Systémy se skládají z několika kamer (1 až 4) snímající pohyby očí a hlavy umístěnými většinou pod monitorem určitého PC. První velká firma je EyeTech Digital Systems. K dispozici má 6 výrobků odpovídající technologii Eye-tracking remote. Jedním z nich je typ VT2 mini eye tracker, který je přes rozhraní USB 2.0 a díky magnetickému držáku připojitelný téměř k jakémukoliv počítači (Obr. 13). Při instalaci na PC je k dispozici ovládající a vyhodnocovací software QuickCAPTURE. Rozměry zařízení jsou 29 x 2 x 2.5 cm, váží 200 gramů. Přesnost snímání oka je 0,5°. Vzorkovací frekvence použité kamery je 80 Hz. Jako doporučená operační vzdálenost od kamery se udává 65 cm. Využívá se zde metody tmavé zornice u jednoho či obou očí [18].



Obr. 14: EyeFollower od firmy Interactive minds [19].

Druhý větší výrobce technologie Eye-tracking remote je firma Interactive minds nabízející 3 výrobky, které se liší se počtem kamer (4,2 a 1). Verze se 4 kamerami (EyeFollower) je z nabízených výrobků nejlepší (Obr. 14). Díky svým 4 kamerám se vypořádá s jakýmkoliv přirozeným pohybem hlavy, uživatel se může hrbít, pohybovat hlavou ze strany na stranu, zkoumat display zblízka atp. Přesnost určení pozice, kam se uživatel dívá, je kolem 0,4°, přičemž 2 kamery se vzorkovací frekvencí 120 Hz sledují obě oči. Automatická kalibrace

používá 5, 9 nebo 13 bodů. Využívá se technologie světlé zornice. Možnost pozorování měření v real-time módu. Systém se většinou používá s 32" obrazovkou, ovšem je tu možnost rozšíření na promítací plátno [19].



Obr. 15: S2 Eye Tracker od firmy Mirametrix [20].

Posledním zmíněným výrobcem je firma Mirametrix mající pouze jeden S2 Eye Tracker (Obr. 15). Výrobek se pyšní zejména svojí nízkou cenou, která není porovnatelná, jelikož žádný výrobce doposud nevedl cenu na svých webových stránkách. S2 Eye Tracker se zvládne vyrovnat s pohybem hlavy. S vzorkovací frekvencí 60 Hz dosahuje přesnosti 0,5°. Pomocí USB je kompatibilní s téměř každým počítačem a během jedné minuty je zařízení připraveno k měření i s přístupem k různým API. Kalibrace pomocí 9 bodů trvá 15 sekund. Je zde využívána technologie světlé zornice. Zařízení má rozměry 35 x 4 x 3 cm a váží 0,3 kg [20].

2.5. Závěr

Na začátku této části práce je uvedeno použití systému Eye-tracking. Je patrné, že hlavní využití je v oblasti marketingu, designu webových stránek a reklamy. Další, pro nás důležitější využití, je v medicíně pro detekci specifických chorob. Je zde popsán také hlavní princip fungování Eye-tracking. Výrobci mezi sebou mají rozdílná zařízení, ovšem jsou 4 základní techniky, jak se dozvědět kam oko hledí – pomocí speciálních čoček s cívkami, odraz IR světla od oka, měření elektrického potenciálu oka elektrodami a snímání oka kamerou s následným zpracováním obrazu. V poslední části teoretického úvodu jsou představeny výrobky jednotlivých firem, které se v současné době nacházejí na trhu ve světě. Eye-tracking brýle jsou vyráběny pěti různými výrobci, plus další výrobci věnující se technologii Eye-tracking remote.

Hlavním cílem rešerše bylo nastínit nynější problematiku Eye-tracking brýlí. Na trhu je pět výrobců, jejichž brýle se liší různými specifikacemi, ale základ zůstává většinou stejný.

Princip brýlí je založen na snímání odrazu světla v infračervené oblasti od oka pomocí kamer. Odrazy jsou vyhodnocovány většinou real-time a pomocí specifických softwarů, jsou analyzována místa, kam se oko dívalo nejčastěji, takzvané tepelné mapy. Nejlepší zařízení se skládají z lehkých, decentních brýlí a malého nahrávacího zařízení schopného bezdrátově vysílat data.

3 METODY

3.1. Úvod

Ve své diplomové práci využívám systém I4Tracking (vyvíjený na katedře Fyziky ČVUT), respektive data generovaná tímto zařízením. Mým úkolem je zpřesnit kalibraci před začátkem samotného měření. Celý systém I4Tracking se skládá z kontrolního softwaru a měřících brýlí. Měřící brýle jsou nasazeny pacientovi, snímají pohyby jeho oka a tím rozpoznávají, kam se měřená osoba dívá. Nejdůležitější část týkající se této práce je kalibrace, čímž se rozumí krátké měření umístěné před samotné měření různých úkolů, obsahující pozorování 9 kalibračních bodů na monitoru. Definice kalibrace, dle mezinárodního metrologického slovníku, říká - kalibrace je činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace [25]. Kalibrační body jsou promítány jednotlivě bod po bodu s nastavitelným časovým rozestupem a nastavitelným pořadím. Všechny kalibrační body jsou na Obr. 16 spolu s pozicemi na monitoru, na kterém jsou promítány. Měřená osoba sedí asi 60 cm od monitoru, který by měl být ve výši očí pacienta. Celý systém nemá vyřešenou kompenzaci pohybů hlavy (nyní se vyvíjí), měřená osobě je tedy fixovaná hlava nebo je kladen důraz na stálost pozice hlavy při měření.



Obr. 16: Pozice kalibračních bodů na monitoru.

Kalibrační měření je vyhodnoceno softwarem I4Tracking, stejně jako další specifické měření a výsledná data jsou uložena ve formátu XML. Software detekuje zornici v každém

snímku videa, určí její střed spolu s dalšími informacemi, které jsou následně používány jako vstupující data do mnou implementované funkce. Ve funkci se následně kalibrační záznam zpracuje. Hlavním cílem funkce je rozřadit data (středů zornic) do shluků a nalézt v nich devět kalibračních bodů. Kalibraci poté ohodnotit a určit, zdali je v pořádku či naopak. V první fázi se snažit nalézt co nejvíce dobrých kalibrací v naměřeném souboru záznamů kalibrací. Na základě výsledků navrhnout metody a kritéria pro kvalitu kalibrace, které by následně sloužili budoucímu zakomponování funkce do software I4Tracking.

3.2. Popis měřicího zařízení

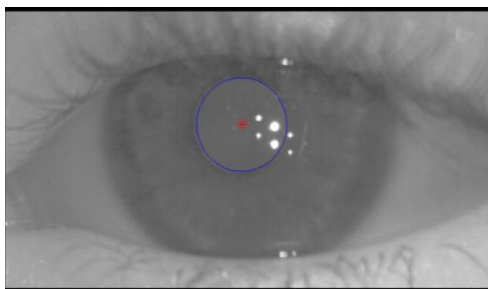
Pro sbírání dat se používá systémem I4Tracking tvořený softwarem a měřicími brýlemi. Brýle (viz Obr. 17) jsou tvořeny umělou skořepinou podobnou jako v ochranných helmách, která upevňuje celý systém na hlavu pacienta. Systém je tvořen infračervenou kamerou a soustavou odrazových sklíček v IR oblasti. Kamera komunikuje s počítačem pomocí USB 2.0, obraz je snímán CMOS senzorem s rozlišením 0,36 Mpx [24]. Působení kamery v IR oblasti je docíleno krycím sklem propouštějícím pouze vlnové délky typické pro IR oblast. Výhodou je snížení vlivu světelných podmínek a dalších rušivých signálů ve viditelné oblasti (odrazy světla atd.). Odrazové sklíčko systému funguje jako zrcadlo v IR oblasti, odráží IR vlnové délky, ale propouští viditelné světlo. Proto může být upevněno před zorným polem oka pacienta, kde neovlivní jeho výhled.



Obr. 17: Měřicí brýle I4Tracking.

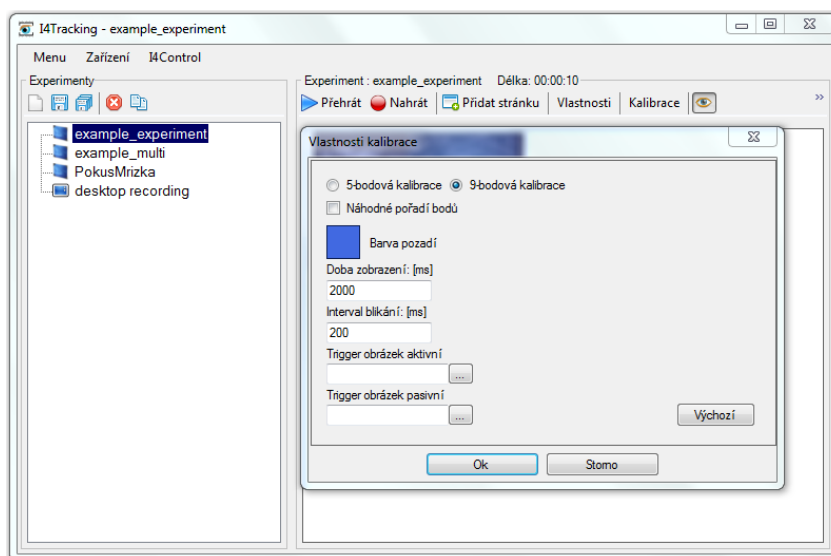
Celá sestava funguje tak, že kamera umístěná u ucha pacienta je namířena na odrazové sklíčko, čímž snímá oko pacienta. Před každým měřením se musí kamera, která má několik stupňů volnosti, nastavit tak, aby v odrazovém sklíčku bylo vidět celé oko. Tímto

uspořádáním je docílena minimální rušivá složka pro pacienta, který se může co nejvíce soustředit na měření, aniž by ho v jeho zorném poli rozptylovala kamera.



Obr. 18: Jak vidí kamera oko v odrazovém sklíčku a detekce zornice.

Obr. 18 dává představu, jak je oko viděno kamerou z odrazového sklíčka v IR oblasti. Tyto snímky, jejichž frekvence ve videu je nastavitelná, jsou zpracovávány softwarem I4Tracking, kde je nejprve detekována zornice a následovně její vlastnosti jako jsou střed zornice, výška a šířka osy elipsy aproximující zornici. V uživatelském rozhraní softwaru (Obr. 19) lze nastavovat různé parametry, vyhodnocovat měření či ukládat naměřená data v různých formátech. Nastavuje se zde a spouští celý proces měření, nejprve kalibrace a poté specifické úlohy. Software by také měl při kalibraci rozdělit snímky patřící každému kalibračnímu bodu do daného souboru a určit kalibrační body na monitoru odpovídající kalibračním bodům z kamery pomocí transformace, nicméně se toto neděje a proto je software stále ve vývoji. Proces zpřesnění kalibrace a nemožnost využití rozdělených dat do souborů dle kalibračních bodů, tedy následná shluková analýza je cílem mé diplomové práce.



Obr. 19: Ukázka software I4Tracking.

3.3. Popis algoritmu

V rámci diplomové práce jsem vytvořil funkci „clusters“ v programovacím jazyce Matlab. Vstupujících parametrů do funkce je 6. Souřadnice [x, y] všech bodů snímaných kamerkou na brýlích, frekvence snímání kamery, kalibrační body generované softwarem I4Tracking, jméno adresáře, kde se zdrojový soubor nachází, poslední 2 vstupy jsou cesty adresářů pro uložení výsledků a načtení vstupů. Výstupem funkce je 9 kalibračních bodů, euklidovské vzdálenosti mezi kalibračními body generovanými touto funkcí a kalibračními body vstupujícími ze softwaru I4Tracking, slovní vyjádření, zdali je kalibrace v pořádku, míra kvality kalibrace vyjádřena vzdálenostmi jednotlivých bodů od ideálního uspořádání pomocí transformace a vyfiltrovaná data (středů zornic). Výsledná informace z funkce je navýšena o textový soubor s doplňujícími informacemi a několik obrázků pro jednoduchou a rychlou názornost kalibrace.

Hlavním cílem funkce je uspořádat vstupující body (středů zornice oka snímané osoby) do 9 shluků a najít v každém z nich jeho střed, tedy jeden kalibrační bod reprezentující shluk. Poté, na základě pozice každého bodu, rozhodnout, jestli kalibrace proběhla v pořádku nebo naopak.

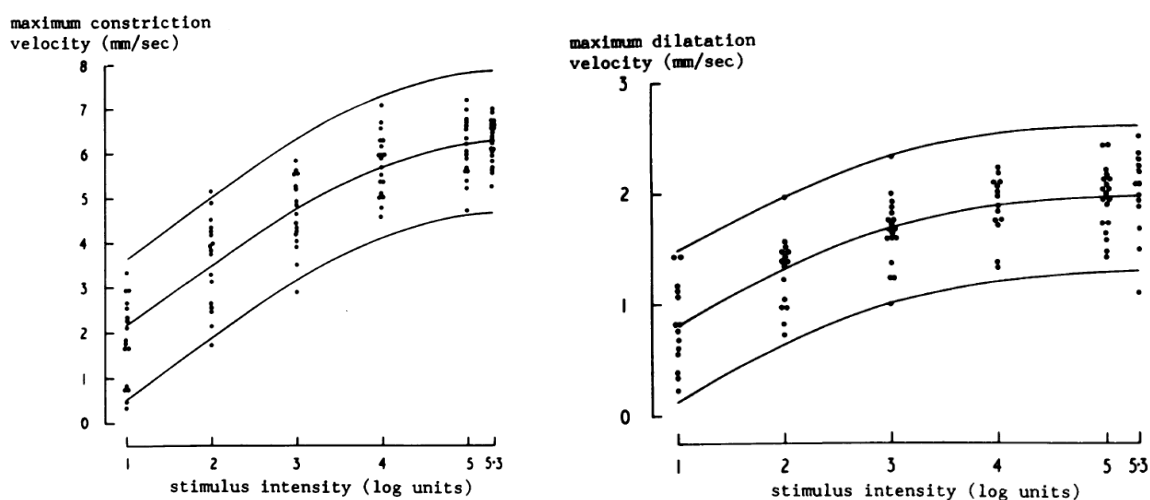
3.3.1. Podrobný popis funkce

Nejdůležitějším vstupujícím parametrem jsou souřadnice bodů snímané kamerou, jedná se o středů zornice oka, které jsou vyhodnoceny algoritmem ze software I4Tracking. Body mají tvar [x, y] a mohou nabývat hodnot od [0, 0] do [752, 480] pixelů. Délka kalibrace a vzorkovací frekvence určuje, jak bude množina bodů velká, nejčastěji se setkávám s množinou okolo 2400 řádků. Další vstupující proměnné se nepoužívají tak hojně a slouží především k zobecnění některých výpočtů a standardizaci výstupů.

První řádky funkce nastaví adresář, kam se mají výsledné obrázky ukládat. Je zde kontrola délky dat, jelikož se může stát, že se data špatně vyhodnotí detekčním algoritmem, nebo může mít měřená osoba v průběhu kalibrace často zavřené oči. V těchto případech je výsledek kalibrace nulový nebo je aspoň generována varovná hláška pro kontrolu délky dat.

Většina datových souborů je v pořádku, čímž se dostávám k následující části, kterou je fyziologický filtr. Ten má za úkol odstranit některé špatné body (souřadnice bodů), které vznikly v detekčním algoritmu software I4Tracking. Body jsou špatné vzhledem k faktu, že

není možné lidským okem vykonat takto rychlé pohyby při daném snímání kamerou. První kontrola je na maximální rychlost konstriktce a dilatace oka, tedy smrštění a roztažení zornice. Datový soubor generovaný softwarem I4Tracking obsahuje informaci o velikosti (obvodu) zornice, což nám umožňuje právě tuto kontrolu. Z praxe jsem zjistil, že detektor zornice není dokonalý, proto je k fyziologicky maximální možné rychlosti konstriktce a dilatace oka přičtena určitá tolerance, aby nebylo odstraněno velké množství dat, což je nežádoucí. Tento problém je také podchycen adaptivním posouváním prahové hranice maximální rychlosti změny. Práh maximální možné změny dilatace a konstriktce oka po sobě jdoucích snímcích byl zjištěn dle *Obr. 20*, vzorkovací frekvence a dle přepočtu délky na pixely kamery.



Obr. 20: Maximální rychlost konstriktce a dilatace oka [21].

Maximální možná rychlost konstriktce oka je 8 mm/s. Maximální možná rychlost dilatace oka je 2,5 mm/s. Délka 1 mm odpovídá 27 pixelům na kameře. Kamera vzorkuje obraz frekvencí 150 Hz. Z těchto informací je dán vztah pro práh

$$K = (8/150) * 27 + t, \quad (1)$$

$$D = (2,5/150) * 27 + t, \quad (2)$$

kde K je konstriktce, D je dilatace a t je tolerance (určité připočtené procento).

Druhá kontrola, a část fyziologického filtru, je na maximální možnou změnu středu zornice po sobě jdoucích snímcích, tedy maximální možnou rotaci oka kolem své osy. Tato hodnota je 500°/s, dle [22]. Pro použití tohoto číselného údaje jej musím přepočítat na

rovinnou plochu, kterou snímá kamera. Ze znalosti průměrné velikosti lidského oka - 24 mm v průměru, lze pomocí goniometrických funkcí (sinus) vypočítat, že 500°/s odpovídá přibližně 105 mm/s v rovině. Opět ve funkci je připočtena tolerance a je využit cyklus *while* pro zachování co možná nejvíce použitelných bodů. Práh pro změnu souřadnice středu zornice po sobě jdoucím snímku je

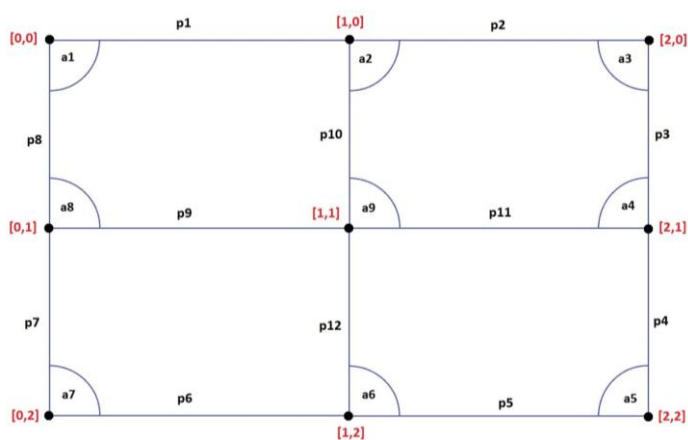
$$R = (105/150) * 27 + t, \quad (3)$$

kde R je Rotace a t je tolerance.

Nyní jsou data vyfiltrována a připravena k rozdělení do shluků pomocí algoritmu k-means. Nejprve musí být určeny počáteční podmínky pro k-means, aby se vyhodnocení dalo reprodukovat několikrát po sobě se stejnými výsledky. Algoritmus pracuje tak, že přiřadí každý bod do shluku, jemuž středu (daná počáteční podmínka) je nejbližší, poté se středy shluků při každém běhu algoritmu znovu spočítají jako aritmetické průměry všech bodů shluku a cílem je dosáhnout co nejmenších rozdílů uvnitř shluků. Kdyby počáteční podmínky do shlukové analýzy k-means nebyly dosazeny, při každém spuštění by byly shluky určeny rozdílně (uvíznutí v lokálním minimu). Počátečních podmínek je 9, stejně jako výsledných bodů (center shluků), a jejich určení je klíčové pro správnou klasifikaci dat. Ve funkci *clusters* určuji v první fázi počáteční podmínky ze znalosti rozmístění bodů na monitoru počítače (Obr. 16), které měřená osoba pozoruje. V množině souřadnic všech bodů jsou nalezeny krajní body, bod středový a zbylé body jsou dopočítány z krajních (lineární aproximací jednotlivých souřadnic). Jelikož má souřadnice X větší rozsah než Y, je souřadnice Y vynásobena hodnotou 1,5 pro stejnou váhu obou souřadnic. Systém pro nalezení krajních bodů a středového bodu:

Levý horní bod -	minimální rozdíl mezi souřadnicemi X a Y.
Pravý horní bod -	maximální součet souřadnic X a Y.
Levý dolní bod -	minimální součet souřadnic X a Y.
Pravý dolní bod -	maximální rozdíl mezi souřadnicemi X a Y.
Středový bod -	medián celé množiny souřadnic bodů.

V případě ponechání určení počátečních podmínek pouze takto mohl by nastat případ, že v souboru dat bude pár odlehlých bodů, které by iniciovaly k-means k nalezení špatných shluků. Proto je pomocí cyklu *while* nalezeno 50 nejbližších bodů k těmto počátečním podmínkám, ze kterých je mediánem vybrán prostřední bod definující finální počáteční podmínku pro k-means. Touto metodou je docíleno robustnějšího určení počátečních podmínek pro k-means, tedy předem pomohu k-means nalézt shluky, které mají odpovídat pozicím kalibračních bodů. V případě ideální kalibrace by tento způsob měl postačit k rozdělení množiny bodů do 9 shluků reprezentovaných výslednými 9 kalibračními body.



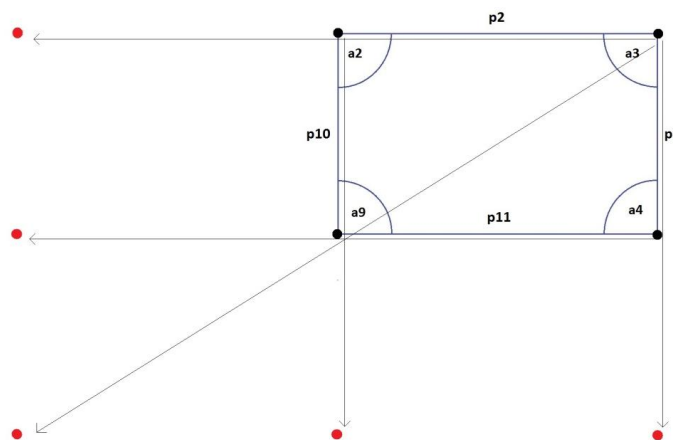
Obr. 21: Rozložení 9 kalibračních bodů v mřížce pro posouzení kalibrace.

Z výše uvedeného procesu je k dispozici 9 kalibračních bodů, které musí být posouzeny, zdali jsou správně umístěny, tedy jestli je kalibrace v pořádku, nebo naopak. Na Obr. 21 je schéma posuzování kalibrace. Posuzuje se 12 úseček tvořících mřížku, kde záleží na jejich velikosti, která nesmí překročit dvojnásobek mediánu nebo být kratší než poloviční hodnota mediánu všech úseček. Dále je posuzováno 9 úhlů (u každého bodu), které musí splňovat podmínku 90°, respektive toleranční rozhraní 40° až 140°, což je empiricky zjištěné rozhraní, kde se vyskytují stále poměrně dobré kalibrace. Úhly jsou počítány pomocí vztahu využívající skalární součin vektoru ($u \cdot v$), velikost vektorů ($\|u\|$) a funkce cosinus, kde α je úhel mezi vektory u a v [23]:

$$\cos \alpha = \frac{u \cdot v}{\|u\| \cdot \|v\|} \quad (4)$$

Pokud 9 kalibračních bodů splní výše uvedená kritéria, následující krok se přeskakuje (ukázáno na Obr. 23). V případě, že jsou kalibrační body posouzeny jako nevyhovující, překročí se k určení nových počátečních podmínek pro k-means. Jak jsem již uvedl dříve,

počáteční podmínky jsou pro algoritmus k-means klíčové, tedy může se stát, že v souboru dat bude výraznějších shluků více, či méně (měřená osoba se chvíli dívala jinak). V tomto případě se některý bod z počátečních podmínek může chytout na odlehlém shluku, což následně posune sousední body v počátečních podmínkách a k-means může určit 2 shluky jako jeden, nebo naopak 1 shluk jako dva (empiricky zjištěno). Pro předcházení těchto případů je zařazeno toto druhé kolo určování počátečních podmínek. Celá mřížka může být rozdělena na 4 malé čtverce a jeden velký čtverec tvořený pouze rohovými body. Ve 4 malých čtvercích a 1 velkém jsou zkontrolovány body, jestli leží ve správném uspořádání pomocí výše uvedených podmínek a kritérií. Pokud kontrolou body projdou, je dopočítána celá mřížka 9 bodů z těchto čtyř pomocí lineární aproximace dle Obr. 22. Nové body použijeme pro nastavení počátečních podmínek k-means. Tímto postupem je procházeno všech 5 čtverců a je vybrána možnost, kde dopadlo shlukování nejlépe. Kritérium vybrání nejlepšího shlukování je stanoveno pomocí průměrné velikosti úhlu každého bodu odečteného od ideálních 90° , tedy zjednodušeně, čím se pozice všech 9 bodů blíží k ideální pravouhlé mřížce, tím lepší kalibrace je.

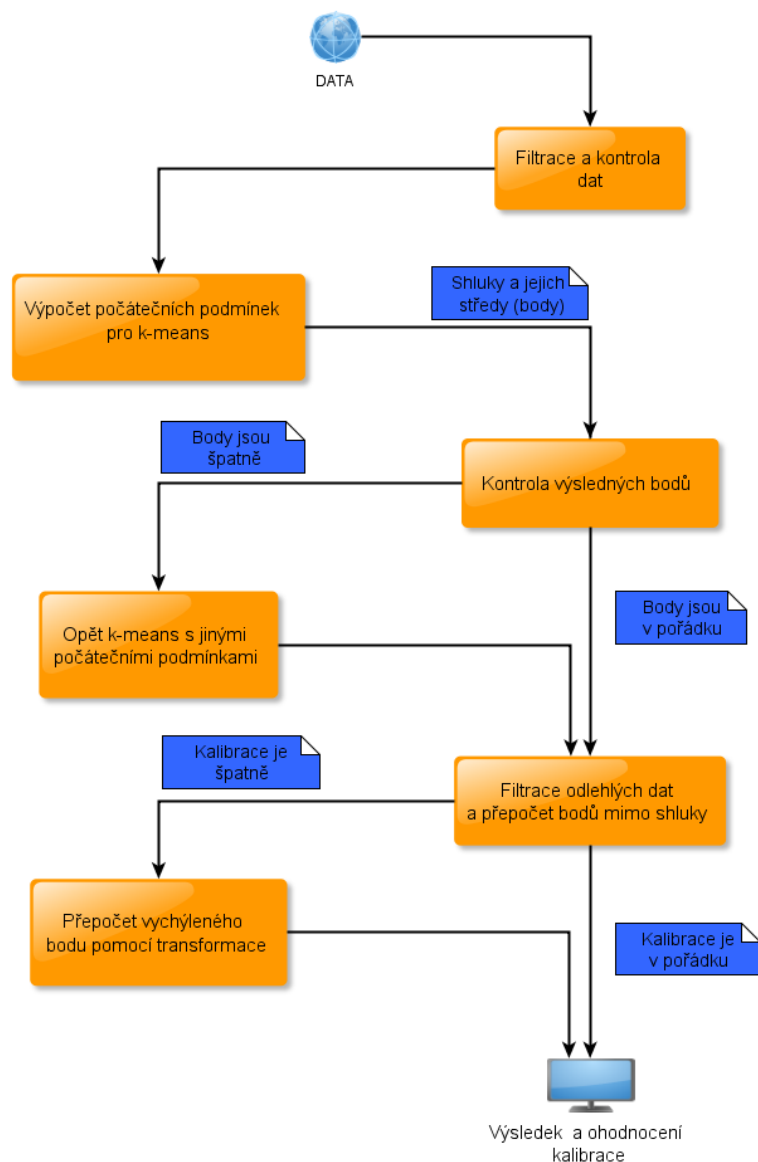


Obr. 22: Schéma dopočítání 5 bodů ze 4 správných bodů v 1 malém čtverci.

Množina dat je již rozdělena do 9 shluků, přičemž jejich středy jsou určeny 9 kalibračními body. Následující část zpřesňuje souřadnice kalibračních bodů tím, že odstraní ve shlucích odlehlé body. Tato část algoritmu vezme postupně 9 kalibračních bodů spolu s odpovídajícím shlukem a nalezne pouze nejbližší umístěné body v daném shluku, ty odlehlé odstraní. V tomto úzkém okolí kalibračního bodu ve shluku se přepočítá střed a vyjde nový kalibrační bod, který je méně ovlivněn odlehlými body. Nový střed se vypočítá jako průměr z daného shluku, stejným způsobem, jakým určuje k-means výsledný střed.

Dle empirického zjištění může nastat případ, že kalibrační bod bude uprostřed 2 shluků, které ovšem k-means určí jako 1 shluk (v nemálo případech se v datech objevuje více než 9 shluků). Nemělo by se stát, že kalibrační bod bude mimo data, tedy že v jeho těsném okolí nebude žádný jiný bod. Pro tento případ je ve funkci *clusters* zařazena část, která nalezne kalibrační body nemající okolo sebe žádný další bod. Při tomto zjištění se vezme shluk patřící danému kalibračnímu bodu a je zde použit opět k-means pro rozdělení na 2 shluky. Vzniknou 2 body reprezentující středy 2 shluků, které se porovnají pomocí toho, jak sedí v celkové mřížce kalibračních bodů, respektive jaký mají součet úhlů v mřížce (již používané kritérium výše). Jaký z bodů bude více vyhovovat (menší součet úhlů), ten použijí jako výsledný pro daný shluk.

K poslední úpravě kalibračních bodů je využita transformace pro zjištění nejhoršího bodu a případně jeho nahrazení. Ve funkci *clusters* je použita Matlabem definovaná afinní transformaci, která nalezne vztah mezi dvěma sadami bodů. První sada obsahuje body na monitoru (Obr. 21) a druhá sada se skládá z kalibračních bodů, které jsou hledány ve své funkci. Je třeba podotknout, že je zde důležité stejné pořadí obou sad bodů, které si mají navzájem odpovídat. Pro nalezení nejhoršího bodu v mřížce vstupuje do transformace první sada bodů kompletní, ale ve druhé sadě bodů jeden bod chybí. Tento proces využívá *for* cyklus, kdy v každé iteraci je jeden bod z kalibračních bodů (druhé sady) odstraněn a dopočítán danou transformací. Tento dopočítaný bod je pomocí euklidovské vzdálenosti porovnáván s bodem, který nahradil. O každém bodu v mřížce kalibračních bodů víme, jak moc dobře sedí do ideální mřížky, respektive známe rozdíl souřadnic určeného kalibračního bodu a dopočítaného kalibračního bodu transformací. Pokud sečteme všechny tyto vzdálenosti (rozdíl daného bodu a dopočítaného), můžeme hodnotu součtu považovat za kritérium kvality kalibrace, jak moc je mřížka kalibračních bodů podobná s mřížkou bodů na monitoru počítače. Hodnota součtu je také jedním z výstupních parametrů funkce. Tímto způsobem lze nalézt nejhorší bod (nejvychýlenější od ostatních) a nahradit jej. Nahrazení nejhoršího bodu se děje pouze v případě, že vstupující sada kalibračních bodů je označena jako špatná, v případě, že jsou kalibrační body v pořádku, bod se nenahrazuje, aby neovlivnil kalibrační data. V případě nahrazeného bodu se nemusíme bát značného zkreslení dat, jelikož 8 relevantních kalibračních bodů je dostatečných a hlavně se tímto způsobem zachrání jinak poměrně dobrá kalibrace, ve které se například vychýlil jeden shluk.



Obr. 23: Diagram funkce clusters.

Obr. 23 představuje diagram celého procesu popsaného v předchozích odstavcích. Další řádky algoritmu ve funkci *clusters* již neovlivňují výsledné kalibrační body, pouze určují další proměnné vystupující z funkce. Jedním z výstupních proměnných je euklidovská vzdálenost mezi kalibračními body vypočítaná mojí funkcí a kalibračními body vystupující ze software I4Tracking. Je zde opět důležité pořadí bodů, jelikož je postupně každý bod srovnáván s odpovídajícím bodem a počítá se jejich vzájemná vzdálenost v pixelech. Tento parametr dokáže ohodnotit, jak je původní kalibrace vylepšena, jelikož původní kalibrační body z I4Trackingu jsou počítány běžným průměrem a v mnoha případech jsou nepřesné. Euklidovskou vzdáleností dvou bodů je myšlena geometrická vzdálenost dle vztahu

$$D((x_1, x_2), (y_1, y_2)) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}, \quad (5)$$

kde D je euklidovská vzdálenost dvou bodů $[x_1, y_1]$ a $[x_2, y_2]$.

Software I4Tracking generuje data v devíti složkách, která by měla odpovídat devíti kalibračním bodům. Ve skutečnosti časová synchronizace nefunguje a v devíti složkách vycházejících z I4trackingu je chaos, v každé složce jsou data minimálně o dvou kalibračních bodech. Díky tomu jsou všechna data sloučena a hledají se shluky v celkové množině dat. Informace o rozdělení složek je ovšem zachována a proto stojí za pozornost vědět, kolik kalibračních bodů (kolik shluků) obsahovala daná složka. Tato informace je ukládána do výsledného textového souboru spolu s ostatními doplňujícími detaily o kalibraci.

Při zmínce o výsledném textovém souboru s informacemi o kalibraci se dostáváme na konec funkce *clusters*, kde jsou zapisovány doplňující detaily kalibrace do vytvářejícího se textového souboru. Součástí je slovní vyjádření ohledně umístění hlavy při kalibraci. Ze znalosti ideální kalibrace, která by měla být uprostřed rozsahu rozlišení snímací kamery, je možné zjistit, jak je kalibrace posunuta. V případě, kdy je mřížka kalibračních bodů posunuta vůči ideálnímu středu doleva, je hlava pootočena také doleva. Lze si to představit tak, že při pohledu na určitý bod před námi je oko uprostřed, když pootočíme hlavu doleva, ale stále budeme pozorovat bod před námi, tak při pohledu na oko se nám bude zdát, že se dívá také doleva, což je způsobené obráceným směrem pohledu na oko či hlavu.

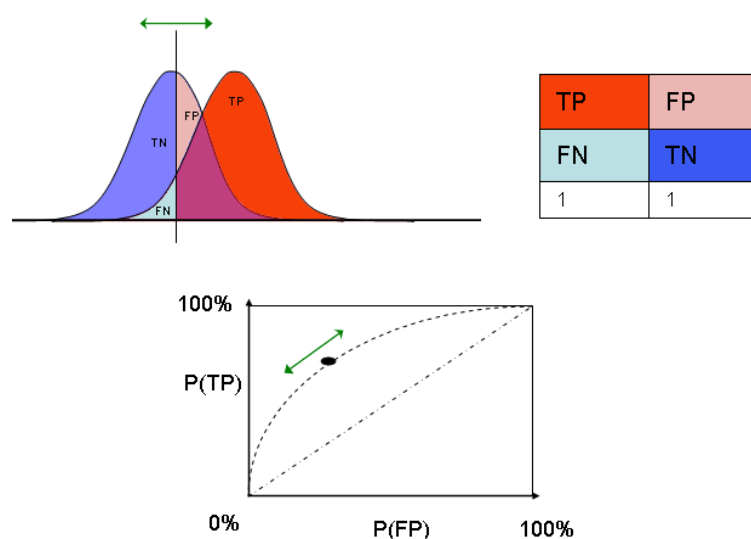
Poslední řádky funkce *clusters* určují výsledný vzhled textového souboru. Na začátku jsou slovní vyjádření ke kalibraci, poté jsou uvedena číselná fakta o množině dat z kalibrace, následuje zastoupení kalibračních bodů v adresářích z I4Tracking, jak byla původně měřena a nakonec je míra kvality kalibrace reprezentovaná vzdálenostmi výsledných kalibračních bodů a ideálních kalibračních bodů dle transformace.

V neposlední řadě figuruje neméně důležitá věc a účel funkce *cluster*, tedy uložení výsledných kalibračních bodů do samostatného souboru. Pro automatizaci a přepisování kalibračních bodů v software I4Tracking z mojí funkce (která je v Matlabu), jsou výsledné kalibrační body ukládány ve formátu XML, pro kompatibilitu s I4Trackingem.

3.4. Metody výsledků

Vytvořená funkce *clusters* rozdělí vstupní data do shluků a určí z nich 9 kalibračních bodů. Z popisu měření je patrné, že bylo provedeno přes 2000 záznamů měření, z nichž jsou data kompletována do adresářů. Doplnující informací je, že byl vytvořen skript, který prochází všechna naměřená data (kalibrace) a analyzuje je pomocí funkce *clusters*, výsledky jsou ukládány do velké finální matice, kde nalezneme všechny výstupy z funkce ke každému naměřenému záznamu. Tato finální strukturovaná matice bude objekt analýzy výsledků.

Ve výsledcích bude uveden celý postup funkce *clusters* postupným vykreslováním, jak jsou data upravována. Dále analýza výsledné matice ze všech naměřených dat. Na této matici jsou otestovány metody pro hodnocení kvality kalibrace, jakými je metoda počítání úhlů, která nyní ve funkci *clusters* určuje výsledek kalibrace, a metoda transformace, která ve funkci *clusters* vyhodnocuje míru kvality kalibrace. Metody budou hodnoceny pomocí histogramů a ROC křivek, přičemž tímto způsobem bude zlepšena i jejich přesnost. Pro pochopení metod vyhodnocení výsledků v následující kapitole je popsána ROC křivka a histogramy nezbytné pro její vytvoření.



Obr. 24: Ukázka ROC křivky a histogramů z kterých se tvoří [26].

Použití ROC křivky je představeno na příkladu z Obr. 24. K dispozici je kalibrace špatná a kalibrace v pořádku, pomocí jedné z výše uvedených metod může být výsledek dokázán. Levá křivka v levém horním rohu obrázku výše představuje distribuci dobrých kalibrací, pravá

křivka distribuci špatných kalibrací. Dá se předpokládat, že určení kalibrace vybranou metodou nebude absolutně přesné, a tudíž se distribuce špatné a dobré kalibrace budou překrývat. Separační kritérium (svislá černá linka představující prahovou hodnotu určující dobrou, či špatnou kalibraci dané metody) bude vždy část distribuce klasifikovat špatně. Část kalibrací bude falešně v pořádku (FP, růžová oblast), část falešně nevyhovující (FN, světle modrá oblast). Jejich podíl se bude měnit v závislosti na volbě hodnoty separačního kritéria. Je-li separační kritérium posunuto vlevo jak naznačuje zelená šipka, počet FN se zmenší a počet FP se zvětší [26].

Tabulka v pravém horním rohu Obr. 24 ukazuje, že podíl skutečné dobrých kalibrací (TP = správně klasifikováno jako kalibrace v pořádku) a falešně nevyhovujících (FN = chybně klasifikováno jako špatná kalibrace) dá dohromady 1 nebo též 100 %, což je plocha pod pravou zvonovou křivkou [26].

Na Obr. 24 ve spodní části je ROC křivka, tedy dvourozměrný graf, kde na vodorovné ose je relativní četnost falešně určených špatných kalibrací FP, pravděpodobnost, že jako špatná kalibrace bude určena kalibrace v pořádku (specificita). Na svislé ose grafu je relativní četnost skutečně dobrých kalibrací TP, pravděpodobnost, že jako kalibrace v pořádku bude určena kalibrace v pořádku (senzitivita) [26].

Senzitivita je poměr určených kalibrací jako v pořádku dle dané metody ku všem skutečně dobrým kalibracím. Specificita je poměr určených špatných kalibrací dle dané metody ku všem skutečně špatným kalibracím. Vyjádřeno vztahem z tabulky z horního levého rohu Obr. 24:

$$Senzitivita = \frac{TP}{TP+FN} \quad (6)$$

$$Specificita = \frac{TN}{FP+TN} \quad (7)$$

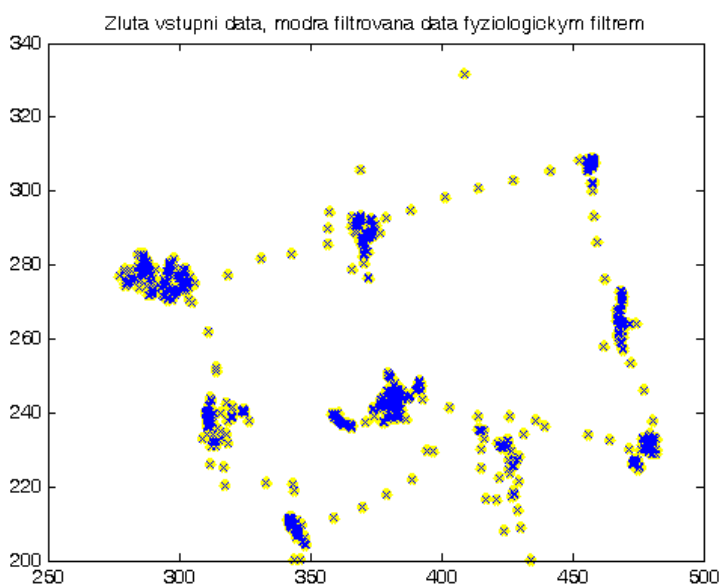
4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1. Úvod

V této kapitole budou představeny průběžné výsledky funkce *clusters*, které se vyhodnotily na náhodně zvoleném záznamu dobré kalibrace. Budou zde představeny celkové výsledky funkce *clusters*, naměřeny na celém souboru dat. Souborem dat se myslí, pořízené kalibrační záznamy během několika let v základních školách a školkách, kterých je doposud přes 2000. Analyzováním celkových výsledků jsou navrženy optimální kritéria hodnocení kalibrace. Je zde využita ROC analýza pomáhající stanovení prahů jednotlivých metod. Grafy a histogramy ukazují úspěšnost a důležitost funkce *clusters*. V závěru této kapitoly jsou navrženy doporučení pro budoucí vývoj. Je důležité si uvědomit dva hlavní důvody výsledků, jednak opravit naměřené záznamy kalibrací a poté navrhnout metody pro hodnocení kalibrace v dalším vývoji, kde by funkce rozhodovala online o kvalitě kalibračního záznamu.

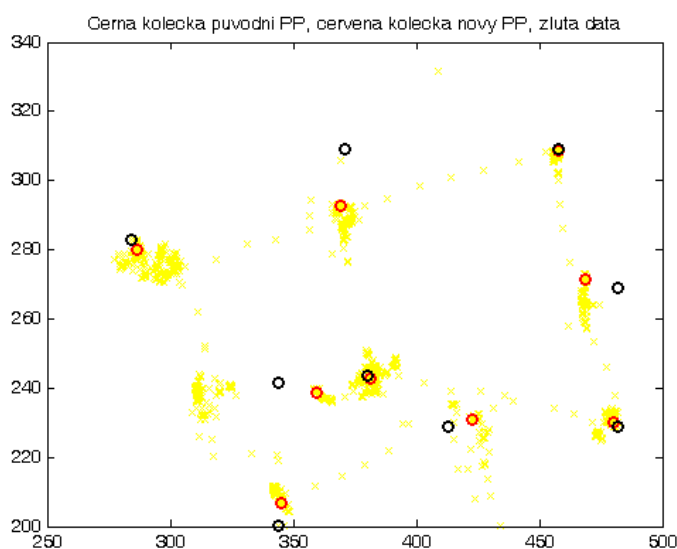
4.2. Průběžné výsledky funkce

V předchozí kapitole Metody v podrobném popisu funkce byla popsána vytvořená funkce *clusters*. Byly nastíněny hlavní myšlenky a základní implementace kódu pro pochopení fungování funkce. Nyní je uvedeno, jak celý postup funkce *clusters* funguje prakticky na reálných datech. Náhodně byl vybrán naměřený záznam dobré kalibrace, kde jsou ukázány všechny procesy snažící se záznam opravit.



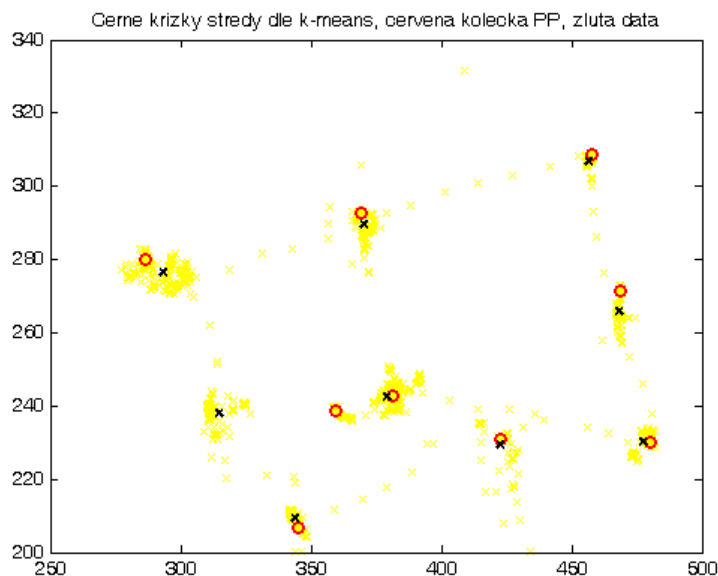
Obr. 25: Vstupní data do funkce *clusters* – souřadnice středy zornic.

Prvním zásadním krokem funkce *clusters* je filtrace dat. Na Obr. 25 jsou vstupující data, tedy jeden záznam kalibrace. Data se perfektně překrývají, což znamená, že se žádná data nevyfiltrovala. Ve skutečnosti se vyfiltrovaly 2 body, ale to na obrázku není rozpoznatelné. Nevyfiltrování žádných dat naznačuje dobré měření a perfektní detekci zornice algoritmem v I4Trackingu. Při pohledu na obrázek je zřejmé, že je kalibrace dobrá, jelikož lze snadno nalézt 9 shluků, tím pádem i 9 kalibračních bodů. Ovšem co je hned patrné pro oko, nemusí být tak jasné pro algoritmus.



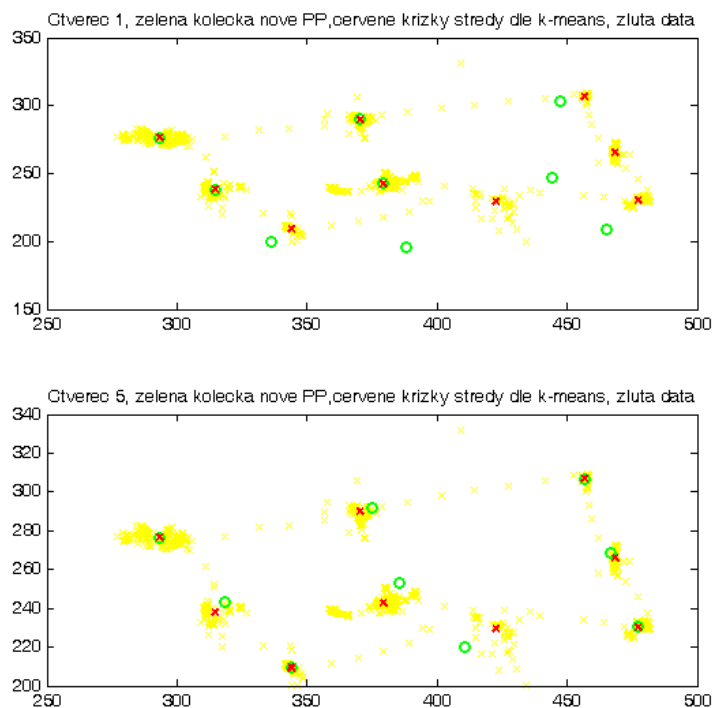
Obr. 26: Počáteční podmínky pro k-means.

Dalším krokem ve funkci *clusters* je určování počátečních podmínek pomocí rohových bodů, jsou hledány body s největší souřadnicí X a Y (pravý horní roh), nejmenší souřadnicí X a Y (levý dolní bod), největší souřadnicí X a nejmenší Y (pravý dolní bod), nejmenší souřadnicí X a největší Y (levý horní bod) a prostřední bod jako medián všech bodů. Z těchto pěti bodů jsou lineární aproximací dopočítány ostatní čtyři a je k dispozici všech 9 počátečních podmínek pro k-means. Tyto body jsou na Obr. 26 vyznačeny černými kolečky a lze vidět, že nejsou moc přesné, zejména body dopočítané. Také se stává, že je v datech několik odlehlých bodů, které počáteční podmínky pokazí. Proto je ve funkci postup, který zaručuje, že každá takto určená počáteční podmínka okolo sebe musí najít dalších 40 bodů. Je to z důvodu, aby počáteční podmínky lépe odpovídaly velkým shlukům v datech a tím zjednodušily práci k-means. Může se stát, tak jako na Obr. 26 u prostředního shluku, že se bod chytne do špatného shluku, ale vzhledem k počáteční fázi procesu je velká šance na opravu.



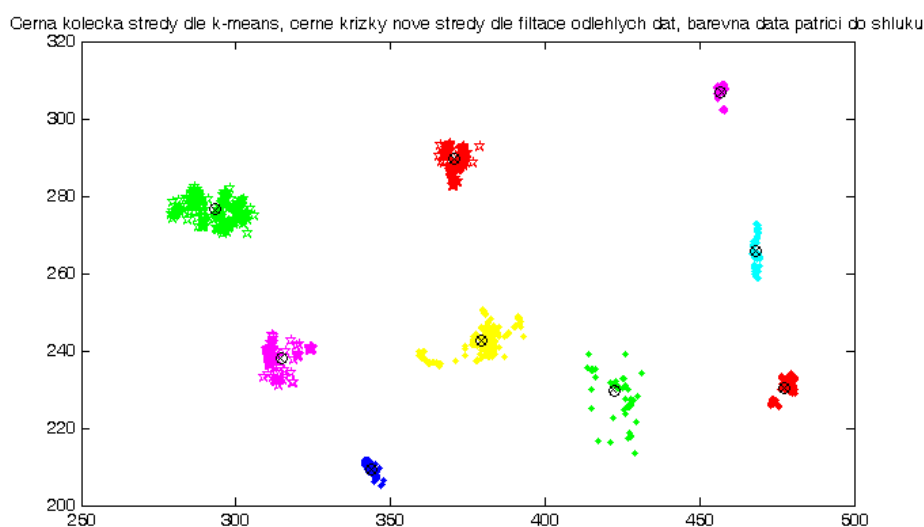
Obr. 27: Středý dle k-means.

Nyní je na řadě algoritmus k-means. Z počátečních podmínek jsou nalezeny shluky a jejich středy, jako průměr daného shluku. Jak bylo již uvedeno, počáteční podmínky jsou klíčové pro algoritmus k-means, proto je výše uvedený postup tak důležitý. V Obr. 27 jsou černě středy shluků, jak je určil k-means. Je patrné, že počáteční podmínky byly určeny relativně dobře a pomohly shlukové analýze k dobrému výsledku.



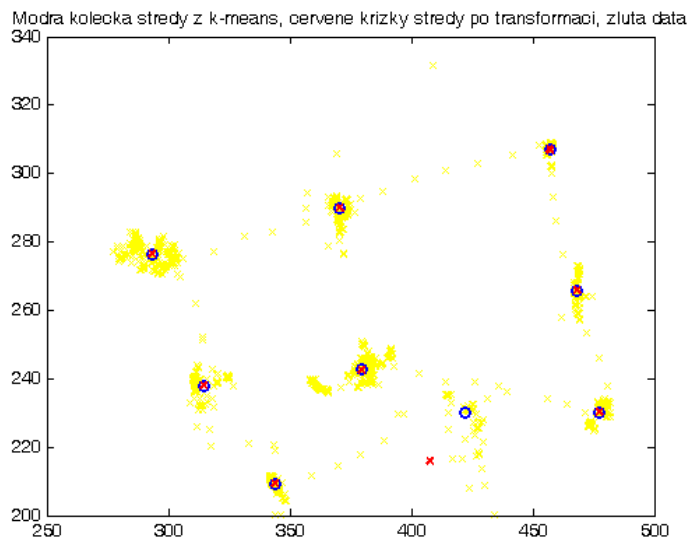
Obr. 28: Určení počátečních podmínek pomocí čtverců.

V této fázi funkce *clusters* proběhne kontrola výsledných středů, které určil k-means. V tomto případě je dolní prostřední bod poměrně vychýlen od ideální mřížky a kalibrace je nyní špatně. Proto následuje postup snažící se kalibraci opravit. Zjednodušený princip je nalézt několik dobrých bodů, pomocí nich dopočítat nové počáteční podmínky pro k-means (Obr. 28). Celá mřížka je rozdělena na 5 čtverců (4 malé a 1 velký sestavený z rohových bodů mřížky), v každém z nich je zkontrolováno, zdali jsou body ve správném pořadí a ostatní body jsou dopočítány (zelená kolečka na Obr. 28). Z výsledků červených křížků (středů shluků dle k-means) lze usoudit, že shlukování dopadlo stejně jako před tímto procesem a kalibrace je stále špatně.



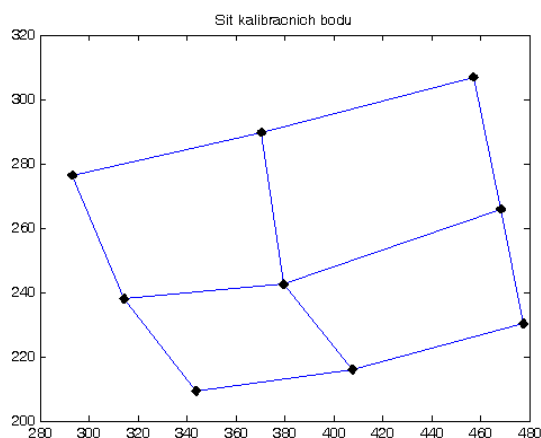
Obr. 29: Přepočítání středů na základě nejbližších bodů.

Ve žlutých datech je mnoho bodů ležících mezi jednotlivými shluky, tvořící jakési cestičky, které byly vytvořeny snímáním oka při pohybu mezi jednotlivými body na monitoru. Tyto body mohou vnášet chybu do výpočtu středů shluků, je třeba je odstranit, aby ve výsledku zbyly pouze body ležící ve shluku. K tomu účelu je ve funkci *clusters* filtr odstraňující odlehlé body ve shlucích. Filtr vezme všech 9 určených shluků, spolu se středů shluků (výsledné kalibrační body) a hledá vždy nejbližších 98% bodů k výslednému kalibračnímu bodu ve shluku, ostatní vyhodí. Dle Obr. 29 (oproti žlutým datům na Obr. 28) jsou zanechány pouze body nejbližší kalibračním bodům. Černá kolečka jsou středů shluků určená algoritmem k-means a černé křížky jsou nově přepočítané středů pomocí nejbližších bodů. Z výsledků je zřejmé, že změna není velká, jelikož zde se jedná opravdu o kvalitní kalibraci, nicméně v určitých situacích tento postup zpřesní výsledný kalibrační bod.



Obr. 30: Nahrazení nejhoršího bodu transformací.

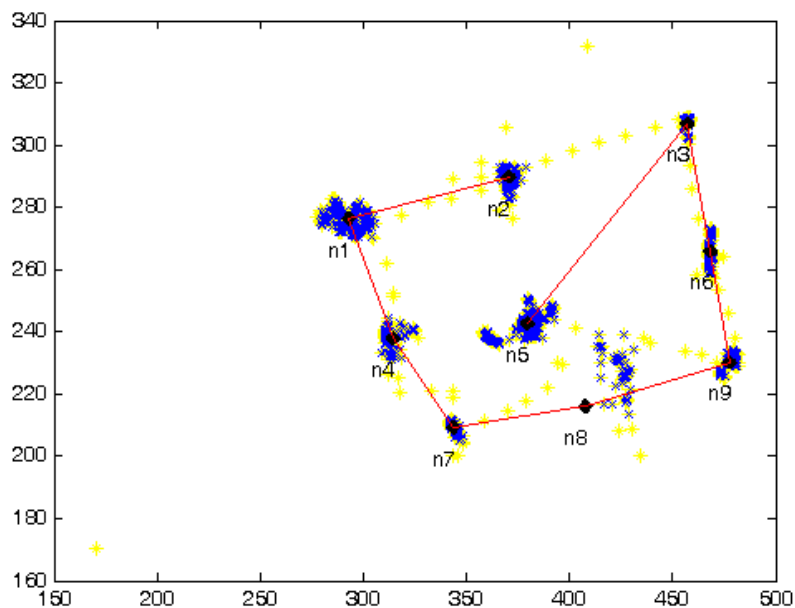
Dostáváme se k poslednímu bodu úpravy dat, kterou je nalezení nejhoršího bodu pomocí transformace a nahrazení jej. Zde je využita afinní transformace, která vytvoří převodní vztah mezi body na monitoru a výslednými kalibračními body. Je vybráno 8 z původních 9 kalibračních bodů a jeden dopočítán pomocí převodního vztahu z transformace. Tento proces je zopakován pro všech 9 kombinací, pokaždé je vynechán jiný bod. Každý nově nalezený bod pomocí transformace je porovnán s bodem původním (ten který byl vynechán) tak, že je určena jejich vzájemná euklidovská vzdálenost. Bod, který má tuto vzdálenost největší, je ten nevyčleněnější, jelikož je nejvíce vzdálen od bodu ideálního dle transformace a proto, když je před tímto procesem kalibrace špatně, je nahrazen bodem dle transformace. Na Obr. 30 je nahrazení znázorněno, modrá kolečka jsou původní kalibrační body a červené křížky jsou nové body, které mají nahrazený dolní prostřední bod.



Obr. 31: Síť kalibračních bodů pro posouzení úspěšnosti kalibrace.

Po nahrazení bodu transformací jsou zkontrolovány pozice všech bodů, jak sedí do mřížky a je rozhodnuto o úspěšnosti kalibrace. Na Obr. 31 lze vidět, jak kalibrační body posuzuje funkce *clusters*. Porovnává délku všech 12 úseček mezi body a každý úhel u všech bodů. Pokud je délka všech úseček v rozmezí poloviny až dvojnásobku mediánu všech úseček a pokud jsou všechny úhly v rozsahu od 40° do 140°, je kalibrace v pořádku. V tomto konkrétním případě je po všech procesech snažících se kalibraci opravit kalibrace v pořádku.

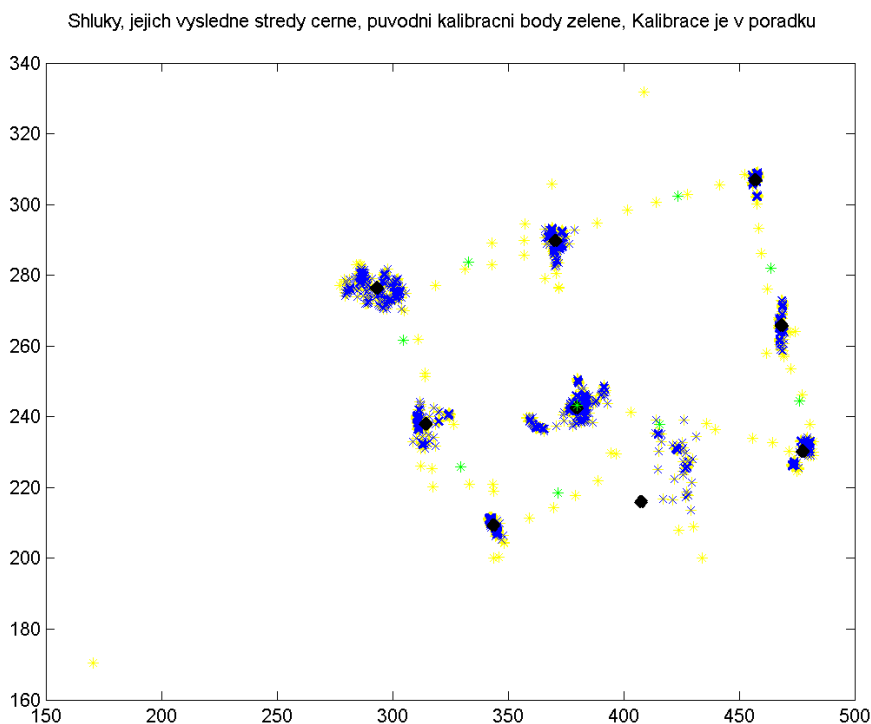
Vysledne stredy cerne, modra vyfiltrovana data, zluta vstupujici data, Kalibrace je v poradku



Obr. 32: Rozdílné pořadí kalibračních bodů.

Zatím nebyla uvedena zmínka o pořadí kalibračních bodů uložené v proměnné, které je velice důležité zejména pro kontrolu kalibrace počítáním úhlů, ale také pro určení nejhoršího bodu transformací, kde musí každý bod ve funkci odpovídat bodu na monitoru. Kontrolovat a určit pořadí bodů není snadné a kvůli těmto problémům jsou některé kalibrace určeny jako špatné, přitom ve skutečnosti se jedná o dobrou kalibraci. Pro další používání pojmů je zavedeno dvoje pořadí. První pořadí je to, které je téměř po celou dobu využíváno ve funkci *clusters* a je totožné s pořadím promítání bodů na monitoru, tedy pořadí bodů, které postupně sleduje měřená osoba. Na Obr. 32 je znázorněno červenou křivkou a vůči druhému pořadí má posloupnost – 5,3,6,9,8,7,4,1,2. Druhé pořadí je zavedeno kvůli kompatibilitě se softwarem I4Tracking a je využíváno na úplném konci funkce *clusters*, kde je přepočteno z prvního pořadí a uloženo do souboru XML pro načítání kalibračních bodů

softwarem I4Tracking. Toto druhé pořadí je na Obr. 32, kde jím jsou očíslovány jednotlivé shluky.



Obr. 33: Výsledný obrázek funkce clusters.

Výše popsáný proces je nejdelší možný způsob, jakým celá funkce *clusters* prochází data a jak se postupně upravují. Výše uvedené obrázky v této kapitole nejsou běžně zobrazovány, výsledkem funkce je informační textový soubor, XML soubor s výslednými kalibračními body a jeden obrázek (Obr. 33). Na tomto obrázku jsou všechny hlavní části znázorněny, černé tečky jsou výsledné kalibrační body, zelené hvězdičky jsou původní kalibrační body generující software I4Tracking a modrá data jsou původní žlutá data po veškeré filtraci.

Pro úplnost informací zde uvedu informační textový soubor generovaný funkcí *clusters*. V něm se nalézají doplňující informace o záznamu kalibrace, vše je popsáno:

Rady a upozornění

Kalibrace je v poradku
Hlava je ok

Info

Pocet surovych dat: 2421
Pocet zavrenych oci: 71

Pocet vyrazenych oci kvuli nefyziologicke rychlosti dilatace a kontrakce oka: 71
Pocet vyrazenych oci kvuli nefyziologicke rychlosti otaceni oka okolo sve osy: 73

Zastoupeni jednotlivych sad ve shlukach

Sada 1 ma:
117 obrazku ve shluku 6
136 obrazku ve shluku 7
Sada 2 ma:
102 obrazku ve shluku 5
143 obrazku ve shluku 6
Sada 3 ma:
153 obrazku ve shluku 1
102 obrazku ve shluku 4
2 obrazku ve shluku 5
Sada 4 ma:
109 obrazku ve shluku 7
141 obrazku ve shluku 8
Sada 5 ma:
254 obrazku ve shluku 1
Sada 6 ma:
95 obrazku ve shluku 3
140 obrazku ve shluku 4
Sada 7 ma:
119 obrazku ve shluku 8
116 obrazku ve shluku 9
Sada 8 ma:
143 obrazku ve shluku 2
118 obrazku ve shluku 9
Sada 9 ma:
122 obrazku ve shluku 2
138 obrazku ve shluku 3

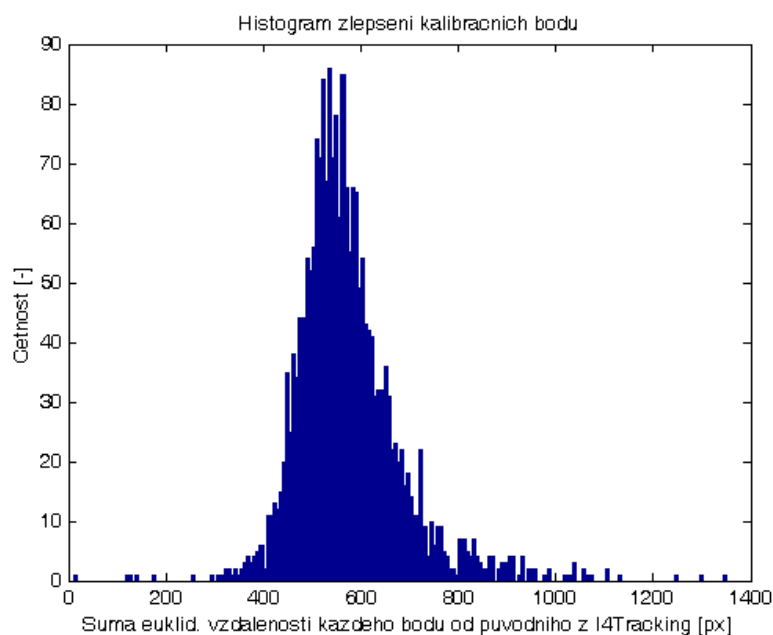
vzdalenosti vyslednych bodu od idealnich - kvalita kalibrace

19.133218
16.698673
3.841050
19.091863
20.331437
17.694510
3.108218
5.470277
2.907950
Prumer: 12.030800

4.3. *Analýza výsledných dat*

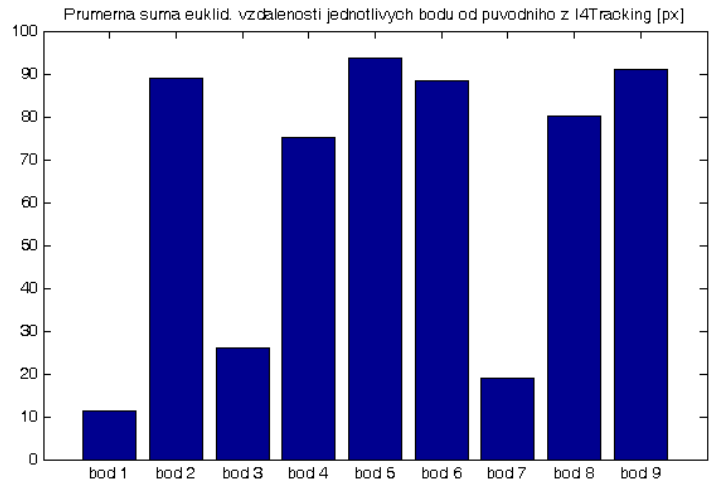
Konečné výsledky byly vyhodnoceny v celém souboru již naměřených záznamů kalibrací, kterých je okolo 2000. Výsledkem funkce jsou textové soubory a obrázky jednotlivých kalibrací (viz výše). Celkovým výsledkem spouštěcího algoritmu je strukturální matice (*.mat) obsahující všechny výstupní informace funkce *clusters* ke každému kalibračnímu záznamu. Z této matice jsou analyzovány následující výsledky.

Jedním z parametrů určujícím kvalitu funkce *clusters* je porovnání, jak se změnila kalibrační body oproti původním kalibračním bodům z I4Tracking. Histogram na Obr. 34 ukazuje nejčastější vzdálenosti všech bodů, respektive sumu euklidovských vzdáleností mezi každým bodem z funkce *clusters* a z I4Trackingu. Kalibrační body byly zlepšeny o tyto vzdálenosti, jelikož při procházení mnoha výsledných snímků původní kalibrační body z I4Trackingu jen zřídka odpovídají shlukům v naměřených datech. Tento krok je zásadní pro další měření, kde funkce nadále bude vylepšovat a zpřesňovat body na monitoru.



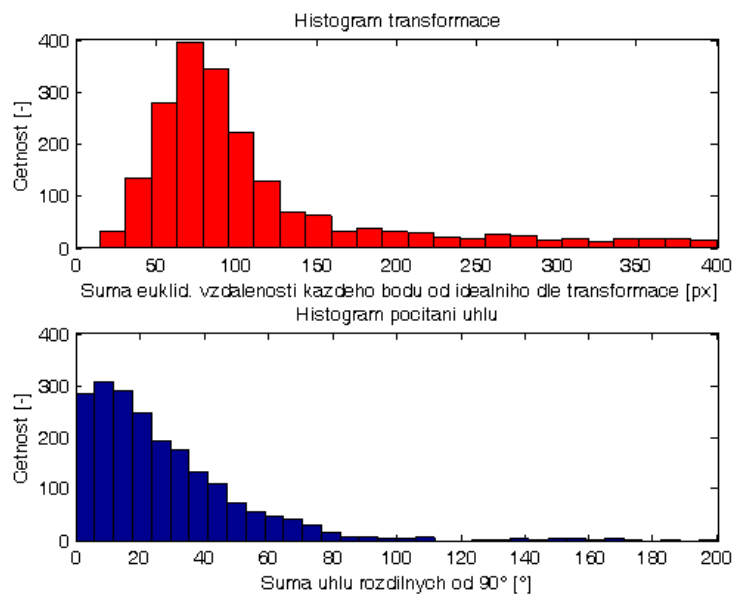
Obr. 34: Histogram vzdáleností kalibračních bodů z clusteru a z I4Trackingu.

Na Obr. 35 je upřesnění odstavce i histogramu výše. Průměrná suma euklidovských vzdáleností mezi každým bodem z funkce *clusters* a bodem z I4Trackingu je vizualizována. Popisek vodorovné osy odpovídá prvnímu řazení kalibračních bodů, tedy původní sledované na monitoru. Je zajímavé, že body 1,3 a 7 mají výrazně menší sumu vzdálenosti, respektive software I4Tracking tyto body určuje s nejmenší chybou. Body 1,3 a 7 leží v prostřední vodorovné lajně mřížky kalibračních bodů, v těchto případech by mělo být oko ideálně uprostřed snímaného zorného pole kamery, což jsou pravděpodobně nejideálnější podmínky detekce softwaru I4Tracking. Z uvedených výsledků je zřejmé, že používání lineární transformace v softwaru I4Tracking je dostatečné, jelikož nynější kalibrační body jsou natolik špatné a nepřesné, že odchylky v použité transformaci (lineární či afinní) jsou zanedbatelné.



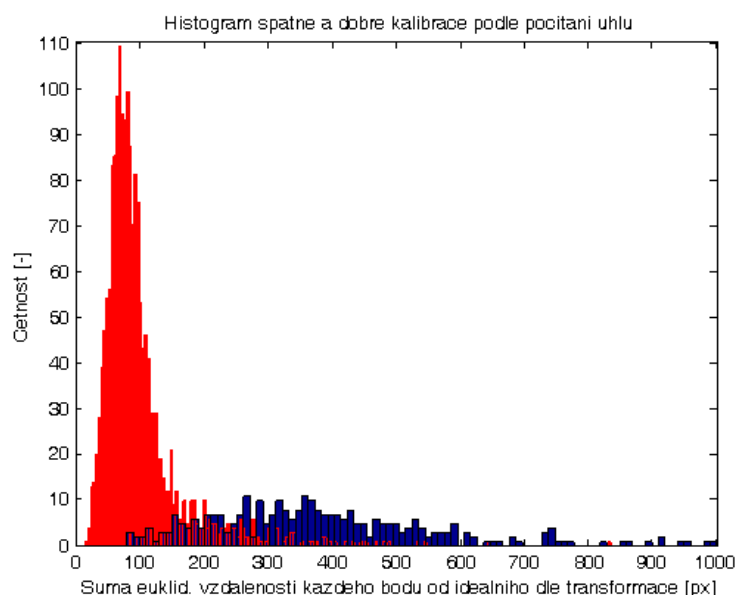
Obr. 35: Vzdálenosti jednotlivých kalibračních bodů dle prvního pořadí.

V následujících odstavcích je hlavní část analyzování výsledků a tedy samotné ověření zvolené metodiky. Primární metoda pro určení správnosti kalibrace je výpočet úhlů a délka jednotlivých úseček v mřížce devíti kalibračních bodů, která je popsána v kapitole o popisu funkce. Druhá možná metoda se skrývá v použití transformace, tedy dopočítání každého bodu dle transformace s předlohou 9 bodů na monitoru, které sleduje měřená osoba a součet euklidovských vzdáleností každého tohoto bodu od bodu získaného (podrobněji popsáno opět v kapitole o popisu funkce). Druhá metoda transformace má aktuálně pomoci ohodnotit míru kvality kalibrace spíš, než aby rozhodovala, jestli je kalibrace v pořádku, či naopak. Nicméně následující výsledky dokazují, že obě metody jsou použitelné při hodnocení kalibrace.



Obr. 36: Histogram transformace a počítání úhlů.

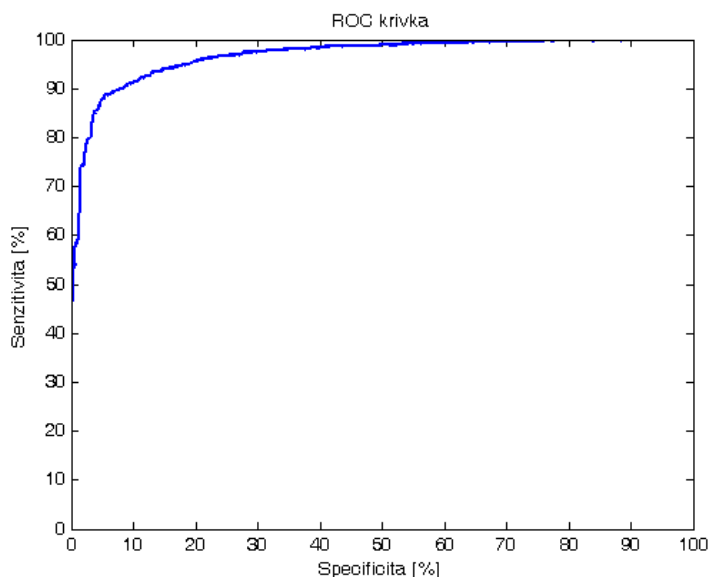
Histogramy na Obr. 36 ukazují četnosti výskytu jednotlivých hodnot pro obě metody. První červený histogram znázorňuje nečastější výskyt sumy euklidovské vzdálenosti každého bodu zjištěného funkcí *clusters* od ideálního bodu zjištěného transformací. Z hodnot na vodorovné ose je patrné, že nejčastější vzdálenost je v rozmezí od 50 do 150 px, což může být vzhledem k četnosti správných kalibrací považováno za kritérium dobré kalibrace. Spodní modrý histogram ukazuje četnost výskytu sumy úhlů vzdálených od 90°, kde se nejčastěji vyskytují hodnoty pod 40°, což opět představuje práh pro kvalitní kalibraci. Vodítko ukazující podobnost obou histogramů je v podobném sestupném trendu z maxima odpovídající rozložení četností obou metod. Zde uvedené prahy je třeba dále ověřit histogramy vedoucími k vytvoření ROC křivek.



Obr. 37: Histogram transformace podle dělení kalibrace počítáním úhlů.

Z histogramu na Obr. 37 je vytvořena ROC křivka na Obr. 38. Červená oblast histogramu znamená sumu euklidovských vzdáleností každého bodu od ideálního pomocí transformace, která splňuje podmínky dobré kalibrace podle kritéria počítání úhlů. Modrá oblast je opět suma euklidovských vzdáleností každého bodu od ideálního pomocí transformace, která se vyskytuje u špatných kalibrací podle kritéria počítání úhlů. Je třeba podotknout, že obě oblasti histogramu nemají stejné vzorkování kvůli názornosti v jednom obrázku. Histogram ukazuje, jak na sobě závisí obě kritéria pro hodnocení kalibrace. Záznamy kalibrací v pořádku (dle počítání úhlů - červeně) mají hodnotu kritéria transformace cca do 200 a jejich četnost je, oproti kalibracím špatně, mnohem větší, což je správně. Jinak řečeno,

správné kalibrace mají převážně sumu euklidovských vzdáleností každého bodu od ideálního pomocí transformace do hodnoty 200, která by mohla odpovídat teoretickým předpokladům.

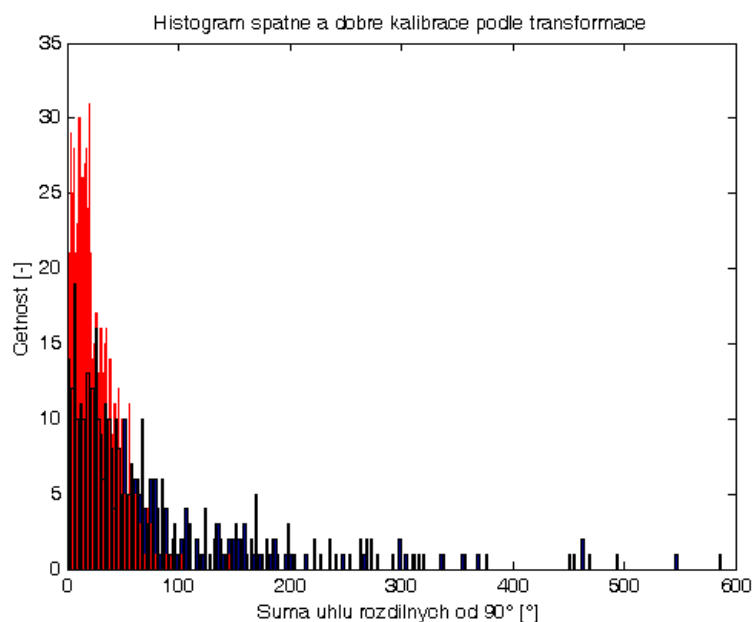


Obr. 38: ROC křivka pro určení prahu dobré kalibrace pomocí transformace.

Pro stanovení přesného prahu dobré kalibrace je třeba si vykreslit ROC křivku, kde na jednotlivých osách je specifická a senzitivita v procentech. ROC křivka reprezentuje kompromis mezi dobře určenými a špatně určenými dobrými kalibracemi a dobře určenými a špatně určenými špatnými kalibracemi. V tomto případě byl hledán práh použitelný pro hodnocení dobré kalibrace. Hodnota prahu byla navržena na 174, je to maximální suma euklidovských vzdáleností každého bodu od ideálního pomocí transformace, která je stanovena pro dobrou kalibraci. Číslo 174 není v ROC křivce viditelné, stanovuje se z indexu hodnoty, která je nalezena na křivce. Lépe řečeno, hledá se procento dobře určených dobrých kalibrací (senzitivita) a poté je zjištěno, kolika dobře určených špatných kalibrací je dosaženo (specifická), podle toho je zvolena hodnota křivky. Pro hodnotu prahu 174 je dosaženo pouze dobrých kalibrací, kde ovšem bude 90% skutečně dobrých kalibrací a 9% skutečně špatných kalibrací, což jsou poměrně slušná čísla.

Předchozí dva odstavce využívaly apriorní informaci rozdělení kalibrací na dobrou a špatnou podle kritéria počítání úhlů, čímž byly nalezeny ideální prahy pro kritérium druhé, tedy využití transformace. Nyní bude postup obrácen, jako apriorní rozdělení pro dobrou, či špatnou kalibraci bude bráno kritérium transformace a nalezen ideální práh kritéria počítání

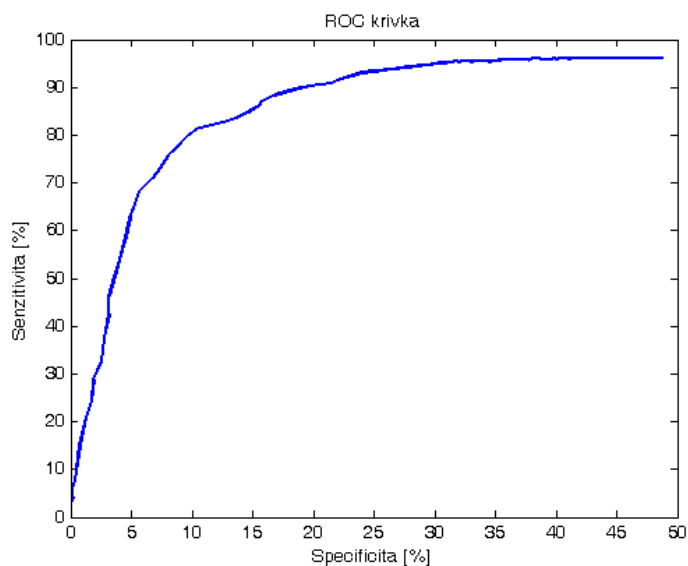
úhlů. Tento postup by měl potvrdit podobnost obou kritérií a dokázat, že obě metody se dají ve výsledku použít pro hodnocení kalibrace. Také je tímto postupem zpřesněno prahování metody počítání úhlů.



Obr. 39: Histogram počítání úhlů podle dělení kalibrace transformací.

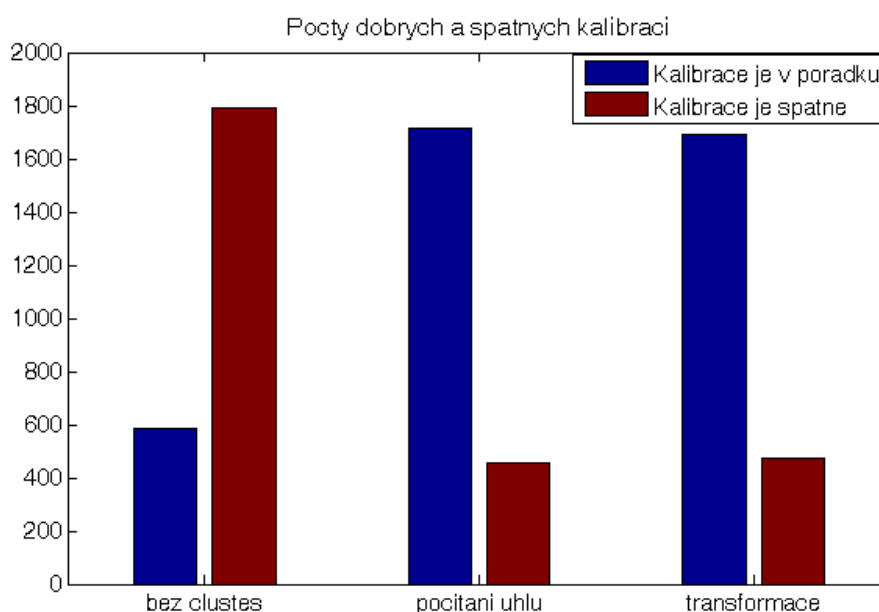
Podle histogramu na Obr. 39 se následně vytvářela ROC křivka na Obr. 40. Červená oblast histogramu je suma úhlů rozdílných od 90° , která splňuje podmínky pro dobrou kalibraci podle kritéria transformace. Modrá oblast znamená sumu úhlů rozdílných od 90° , která se vyskytuje u špatných kalibrací pomocí kritéria transformace. Nyní mají obě oblasti histogramu stejné vzorkování. V principu histogram představuje stejnou informaci, jako předchozí histogram (Obr. 37). Hodnota, která se zde zdá být ideální pro dobrou kalibraci, má velikost kolem 50° . Je třeba mít na paměti, že na počátečních hodnotách vodorovné osy se sice obě oblasti histogramu dost překrývají, nicméně červená oblast má trojnásobnou četnost.

Vykreslení ROC křivky pomůže určit přesný práh (Obr. 40). Křivka má stejný význam jako na Obr. 38, tedy nebudu zde opět popisovat, co přesně znázorňuje. Hodnota prahu pro kritérium počítání úhlů je navržena na 50° . Je to rozdíl od 90° , pro upřesnění metodiky počítání úhlů se jedná o rozmezí 40° až 140° , kde by se měly vyskytovat dobré kalibrace. Na ROC křivce výsledku určení dobrých kalibrací odpovídá 90% skutečně dobrých kalibrací a 18% skutečně špatných kalibrací.



Obr. 40: ROC křivka pro určení prahu dobré kalibrace pomocí počítání úhlů.

Z výsledků uvedených v předchozích odstavcích je patrné, že obě metody určení kvality kalibrací jsou si podobné. Jak histogramy, tak ROC křivky mají podobné trendy a hodnoty se příliš neliší. Doplňující informace o tom, jak jsou metody podobné, dokazuje fakt, že při hledání dobrých kalibrací pomocí počítání úhlů bylo nalezeno 1712 záznamů, pomocí kritéria transformace bylo nalezeno 1690 záznamů a z těchto hodnot, společně nalezených stejných záznamů, je 1587. K tomu byly použity výše zjištěné prahy pro dobré kalibrace. Obě metody se shodly na cca 93 % datech ze všech naměřených, že se jedná o dobrou kalibraci.



Obr. 41: Počty dobrých a špatných kalibrací podle 3 metod.

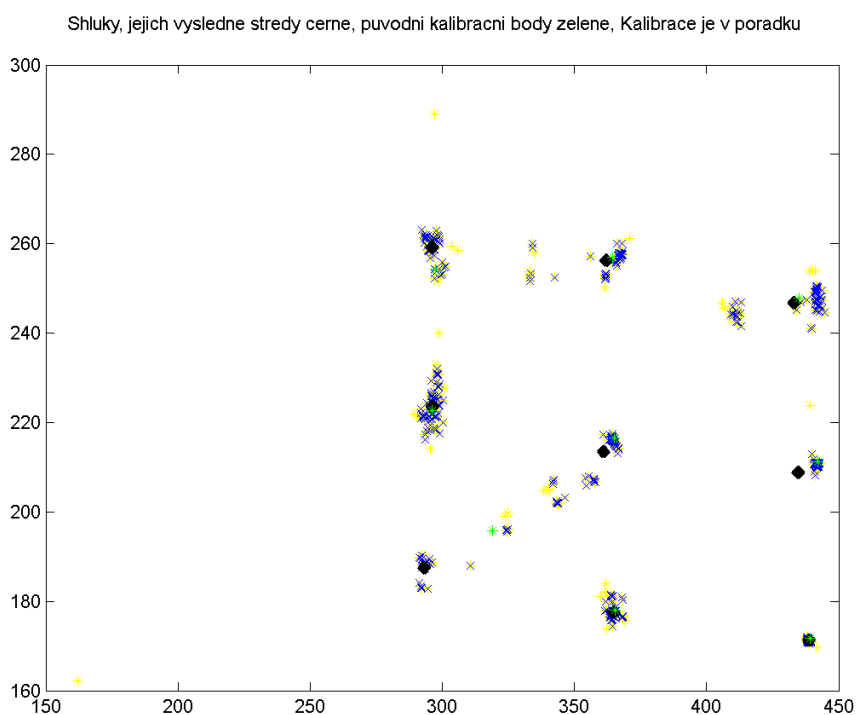
Pro důkaz účinnosti celého procesu ve funkci *clusters* byly vyhodnoceny výsledky pouze pomocí k-means. Ze vstupních dat byly určeny počáteční podmínky pouze z rohových bodů, tedy bod s největší souřadnicí X a Y (pravý horní roh), nejmenší souřadnicí X a Y (levý dolní bod), největší souřadnicí X a nejmenší Y (pravý dolní bod), nejmenší souřadnicí X a největší Y (levý horní bod) a prostřední bod jako medián všech bodů. Z těchto 5 bodů byly lineární aproximací dopočítány ostatní 4 a dosaženy všechny 9 počáteční podmínky. Po spuštění algoritmu k-means byly výsledné středy shluků použity jako finální kalibrační body, které byly následně ohodnoceny metodou počítání úhlů. Takto byly projity opět všechny záznamy kalibrací a analyzovány výsledky. Kalibrace v pořádku se našla u 584 záznamů a kalibrace špatně byla u zbylých 1791 záznamů. Tento výsledek potvrdil efektivnost procesů ve funkci *clusters* (filtrace dat, několikanásobné výpočty počátečních podmínek pro k-means, nebo dopočítání nehoršího bodů transformací). Výsledky výše uvedených odstavců vystihuje graf na Obr. 41, kde dobrá či špatná kalibrace byla hodnocena pomocí kritéria počítání úhlů, transformace a samotným k-means.



Obr. 42: Experiment s původní kalibrací (vlevo) a kalibrací pomocí clusters (vpravo).

Názorná ukázka důležitosti správné kalibrace lze vidět na Obr. 42. Je zde vyobrazen experiment tepelné mapy (viz teoretická část), kde na obrázku jsou červeně vytyčeny místa, kam se měřená osoba dívala. Podle levého obrázku měřená osoba hleděla do levého horního rohu, což je ovšem nepravděpodobné, a tedy lze usuzovat, že byla špatná kalibrace. Pravý obrázek již ukazuje správná místa, kam měřená osoba hleděla (dle mnoha výsledků je stojící osoba v plášti nejčastěji sledovaným objektem). Obr. 43 ukazuje kalibrační záznam pro tento případ zlepšení kalibrace. Vidíme, že kalibrační body byly detekovány přesně dle shluků

v datech, které jsou také ukázkové. Při bližším zkoumání obrázku si lze všimnout původních zelených kalibračních bodů, které zde nebyli až tak špatně určeny. Největší a hlavní rozdíl je v levém horním kalibračním bodu (v Obr. 43 je umístěn vlevo dole, jelikož Matlab vykresluje nulovou souřadnici vlevo dole, ale na monitoru, který sleduje měřená osoba, je nulová souřadnice vlevo nahoře), který je funkcí *clusters* určen správně dle shluku, oproti původnímu bodu z I4trackingu. Je zajímavé, že i takto malá změna kalibračních bodů dokáže výrazně zlepšit přesnost následujících experimentů.



Obr. 43: Kalibrační záznam pro Obr. 42.

4.4. Závěr a řešení do budoucna

V kapitole byla představena mnou vytvořená funkce *clusters*, respektive její průběžné výsledky. Průběžné výsledky vizualizovány obrázky by měli pomoci lépe pochopit procesy ve funkci *clusters*, která je jinak podrobně popsána v předchozí kapitole. Dále zde jsou analýzy výsledků, které se prováděly menšími skripty v matlabu. Výsledky, na nichž se prováděla analýza, jsou souborem dříve naměřených kalibračních záznamů. Výsledná analýza otestovala dvě metodiky použitelné pro hodnocení kvality kalibrace, obě metody jsou srovnatelně použitelné.

Analýza výsledků má dvojí funkci, v první části určit počet opravených (použitelných) kalibračních záznamů funkcí *clusters*, v části druhé ověřit metodiku určování

kvality kalibrace k budoucímu využití. Díky první části jsem byl schopen navrhnout správné postupy určení dobré či špatné kalibrace (ukázky v příloženém CD) a navržení prahových hodnot pro toto rozlišení. Pomocí ROC křivek jsem uvedl hodnoty pro posouzení kalibrace, jestli je v pořádku či naopak. Tyto hodnoty by se měli využít pro budoucí předělání funkce *clusters* a její implementování do softwaru I4Tracking, kde by měla v reálném čase rozhodovat o kvalitě kalibrace. V případě, že by byla kalibrace špatná, systém by navrhl opakování kalibrace, v tomto je rozdíl oproti předchozímu úkolu, kde byla potřeba kalibrační záznamy opravit. Než se funkce bude implementovat do I4Trackingu, je třeba ji přepsat do jiného programovacího jazyka (C++, Octave,...), případně optimalizovat. Také bych navrhl zkombinování obou metod určení kvality kalibrace pro zpřesnění výsledků. Váhy obou metod by bylo možné proměnlivě nastavovat.

Při opravě naměřených kalibračních záznamů a procházení výsledků se našlo několik záznamů, které jsou vizuálně v pořádku, ale byly detekovány jako špatné. Tato možnost je uvedena i v analýze dle ROC, není možné nastavit naprosto ideální práh, že by účinnost funkce *clusters* byla 100%. Pro nejefektivnější využití všech naměřených záznamů, byl vytvořen program, kde se budou vybrané kalibrace ručně ověřovat a měnit kalibrační body. Program má formu „klikátka“, tedy v obrázku záznamu kalibrace (například Obr. 43) se budou hledat vizuálně shluky a určovat jejich středy.

5 ZÁVĚR

Druhá kapitola rešerše pojednává o použití systému Eye-tracking, je patrné, že hlavní využití je v oblasti marketingu, designu webových stránek a reklamy. Jsou zde popsány 4 hlavní principy fungování Eye-trackingu, nicméně v současnosti nejvíce používaný způsob snímání očních pohybů je videookulografie, tedy snímání oka kamerou s následným zpracováním obrazu. V poslední části rešerše jsou představeny produkty pěti největších výrobců Eye-trackingu, které se v současné době nacházejí ve světě na trhu. Touto kapitolou byl splněn první cíl diplomové práce ze zadání.

Třetí kapitola metody popisuje konkrétní typ videookulografie (I4Tracking) používaný ke generování dat pro mnou vytvořenou funkci a podrobně tuto funkci rozebírá. I4Tracking se skládá z měřících brýlí s kamerou a kontrolního softwaru, který generuje středy zornice při kalibračním měření. Tato výsledná data jsou použita jako vstup do funkce *clusters*, kde jsou zpracována. *Clusters* nalezne v datech pomocí shlukové analýzy 9 kalibračních bodů, které subjekt sledoval na monitoru počítače při kalibračním měření a určí kvalitu kalibrace. Prvním úkolem je nalézt, v již naměřených datech, co nejvíce použitelných kalibračních záznamů, čímž lze následně analyzovat specifické úkoly prováděné po kalibračním měření. V této kapitole byla splněna část čtvrtého cíle práce.

Ve čtvrté kapitole výsledky a diskuze lze nalézt průběžné výsledky funkce *clusters*, pro lepší pochopení principů celého procesu zpracování dat. Dále je uvedena analýza výsledků, která se vyhodnocovala na celém souboru naměřených kalibračních záznamů. Histogramy a jinými grafy je statisticky dokázána účinnost funkce *clusters*. Druhým úkolem bylo, pomocí výsledků, navrhnout metodiku určení kvality kalibrace. Kritéria metod byla vyhodnocena ROC analýzou a měla by sloužit pro budoucí implementaci funkce do softwaru I4Tracking, kde by pomohla rozhodovat obsluze, zdali je kalibrace v pořádku, či by se měla opakovat. Tímto byly splněny ostatní cíle práce.

BIBLIOGRAFIE

- [1] M. Hlavička, *Co je eye-tracking*, [online]. Sova v síti, 21. 11. 2001 [cit. 2013-04-20].
<<http://www.sovavsiti.cz/c01312.html>>
- [2] D. Jesenský, K. Chobotová, *Neuromarketingové výzkumné metody v místě prodeje*, [online]. Mediaguru , 13. 6. 2012 [cit. 2013-04-20].
<<http://www.mediaguru.cz/2012/06/neuromarketingove-vyzkumne-metody-v-miste-prodeje/#.UXJI-T68YcW>>
- [3] Gfk Czech, s.r.o., *GfK Eye Tracking Full Service*, [online]. [cit. 2013-04-20].
< http://www.gfk.cz/imperia/md/content/gfkpraha/offers/eye_tracking_cz.pdf>
- [4] ÚVN, *Laser VISX STAR S4 IR*, [online]. 10. 11. 2011 [cit. 2013-04-20].
<http://www.uvn.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1815&Itemid=1099&lang=cs>
- [5] RSC Energia, *ETD (EYE TRACKING DEVICE) EXPERIMENT*, [online]. [cit. 2013-04-27].
< <http://www.energia.ru/eng/iss/researches/works-11.html> >
- [6] V. Fabián, *Oční pohyby a jejich interpretace*, [online]. Asociace UX (Prague ACM SIGCHI), 12. 11. 2012 [cit. 2013-04-20].
<<http://www.slideshare.net/sigchi/on-pohyby-a-jejich-interpretace-vratislav-fabin>>
- [7] KU Leuven, *Dual Purkinje Eyetrackers*, [online]. [cit. 2013-04-20].
<<http://ppw.kuleuven.be/english/lep/resources/purkinje>>
- [8] ADInstruments, *EOG*, [online]. [cit. 2013-04-20].
<<https://www.adinstruments.com/solutions/research/applications/eog#method>>
- [9] A.L.Yarbus, *Eye Movements and Vision*, New York: Plenum,[online]. [cit. 2013-04-20].
<[http://wexler.free.fr/library/files/yarbus%20\(1967\)%20eye%20movements%20and%20vision.pdf](http://wexler.free.fr/library/files/yarbus%20(1967)%20eye%20movements%20and%20vision.pdf) >
- [10] P. Kutílek, A. Žižka, *Vybrané kapitoly z experimentální biomechaniky*, ČVUT FBMI, [online]. [cit. 2013-04-23].
<http://esf.fbmi.cvut.cz/sites/default/files/Kutilek_Zizka_Vybrane_kapitoly_z_experimentalni_biomechaniky.pdf>

- [11] F. Meunier, *On the Automatic Implementation of the Eye Involuntary Reflexes Measurements Involved in the Detection of Human Liveness and Impaired Faculties*, DOI: 10.5772/7054, [online]. [cit. 2013-04-23].
<<http://www.intechopen.com/books/image-processing/on-the-automatic-implementation-of-the-eye-involuntary-reflexes-measurements-involved-in-the-detecti>>
- [12] GfK, *Stopování lidského zraku*, [online]. [cit. 2013-04-21].
<<http://www.ocnikamera.cz/index.php/metoda-eye-tracking-3/stopovani-lidskeho-zraku>>
- [13] SensoMotoric Instruments, *Technology SMI Eye Tracking Glasses*, [online]. [cit. 2013-04-21].
<<http://www.eyetracking-glasses.com/products/eye-tracking-glasses/technology/>>
- [14] Tobii, *Mobile eye tracking - Tobii Glasses*, [online]. [cit. 2013-04-21].
<<http://www.tobii.com/en/eye-tracking-research/global/products/hardware/tobii-glasses-eye-tracker/>>
- [15] Applied Science Laboratories, *Mobile Eye-XG*, [online]. [cit. 2013-04-25].
<<http://www.asleyetracking.com/site/Products/MobileEye/tabid/70/Default.aspx>>
- [16] Positive Science, *Our Hardware. Built for your needs.*, [online]. [cit. 2013-04-25].
<<http://www.positivescience.com/hardware/>>
- [17] Perception Technologies, *Eye tracker - EyeTechSensor*, [online]. [cit. 2013-04-26].
<<http://en.pertech.fr/eye-tracker/>>
- [18] EyeTech Digital Systems, *Products*, [online]. [cit. 2013-04-26].
<<https://www.eyetechds.com/products.shtml>>
- [19] Interactive minds, *Eye tracker*, [online]. [cit. 2013-04-27].
<<http://www.interactive-minds.com/en/eye-tracker>>
- [20] Mirametrix, *S2 Eye Tracker*, [online]. [cit. 2013-04-27].
<<http://mirametrix.com/products/eye-tracker/>>

- [21] C. J. Ellis, *The pupillary light reflex in normal subjects*, British Journal of Ophthalmology, [online]. [cit. 2014-04-08].
<<http://bj.o.bmj.com/cgi/doi/10.1136/bjo.65.11.754>>
- [22] Y. B. Bang, J. K. Paik, B. H. Shin, C. Lee, *The Anthropomorphic Oculomotor with Three-Degree-of-Freedom Spherical Parallel Link*, [online]. [cit. 2014-04-08].
<http://jamiempaik.com/downloadables/ISR_fullpaper1paik.pdf>
- [23] Nová média, s. r. o., *Skalární součin*, [online]. [cit. 2014-04-09].
<<http://www.matematika.cz/skalarni-soucin>>
- [24] IDS, *UI-1221LE*, [online]. [cit. 2013-04-20].
<http://en.ids-imaging.com/store/produkte/kameras/usb-2-0-kameras/ueye-le/ui-1221le.html?SID=gbm10r2glvpq2u00r34hh00km0&__store=sv_gmbh_en&__from_store=default>
- [25] TNI 01 0115:2009 Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM) – český překlad vydání VIM z roku 2007-8.
- [26] Wikipedia, *Receiver operating characteristic*, [online]. [cit. 2014-04-18].
<http://en.wikipedia.org/wiki/ROC_curve>
- [27] J. L. Andreassi, *Psychophysiology*, Psychology Press, New York, 2007.
- [28] A. T. Duchowski, *Eye Tracking Methodology – Theory and Practice*, Springer – Verlag, 2007

PŘILOŽENÉ CD

Elektronická verze diplomové práce se souvisejícími soubory jsou uloženy na CD a přiloženy k práci. Struktura uložených údajů na CD:

Složka: Diplomová práce

- Elektronická verze diplomové práce – Kalibracni_metody_ve_videookulografii.pdf

Složka: Přílohy

- Funkce v Matlabu – clusters.m

- Složka obsahující ukázkou dobrých kalibračních záznamů – dobre_kalibrace

- Složka obsahující ukázkou špatných kalibračních záznamů – spatne_kalibrace