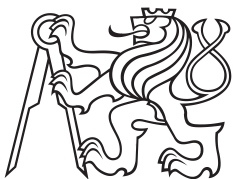


Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra počítačů

Dynamická pupilometrie a její využití pro detekci relapsu afektivních poruch

Jan Lukeš
Otevření informatika

Květen 2016
Vedoucí práce: Novák Daniel Ing., Ph.D.

Poděkování / Prohlášení

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce za jeho trpělivost a cenné nápady při řešení problémů s vývojem a hlavně za možnost ujmout se práce na zajímavém tématu, které nemá za účel jen splnit předmět DP. Děkuji Fakultě elektrotechnické, že poskytla znalosti a možnosti tuto práci realizovat. A nakonec děkuji mé rodině za jejich podporu.

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 27.5. 2016



Abstrakt / Abstract

Tato práce popisuje vývoj dynamického pupilometru, který mohou pacienti samostatně používat k měření zornicového reflexu. Cílem takového zařízení je zjistit závislost mezi změnou nálady u afektivních poruch a změnou dynamiky zornicového reflexu. Pupilometr vyvinutý v rámci této práce stojí zlomek částky, za kterou se prodávají komerčně dostupné pupilometry a sám provede pacienta měřením, případně ho hlasově upozorní na špatné přiložení.

Klíčová slova: dynamická pupillometrie, raspberr pi, snímání oka pod ir světlem, hlasová navigace, měření svépomocí

This masters thesis describes development of dynamic pupillometer that can patients use to test themselves. The goal of such device is to find if there is correlation between mood change of affective disorders and dynamics of pupillary reflex. Pupillometer developed in this thesis costs fraction of commercially available pupillometers and guides user toward successful measurement. If needed, it warns user against improper attachment to head by voice.

Keywords: dynamic pupillometry, raspberr pi, ir eye capture, voice command, self measurement

Title translation: Dynamic pupillometry and its usage to detect relapse of affective disorders

Obsah /

1 Úvod	1
2 Afektivní poruchy	2
2.1 Příčiny	2
2.2 Deprese	2
2.2.1 Prevalence deprese	2
2.3 Mánie	2
2.3.1 Prevalence mánie	3
2.4 Smíšený stav	3
2.5 Bipolární porucha	3
2.5.1 Prevalence bipolární poruchy	3
2.6 Sebevražda	3
2.7 Léčba	4
2.8 Rozhovor s pacienty trpící bipolární poruchou	5
3 Anatomie zornicového reflexu	6
3.1 Myadriáza	6
3.1.1 Farmaka (a drogy)	6
3.2 Míóza	6
3.2.1 Akomodace	6
3.2.2 Přímá fotoreakce	7
3.2.3 Nepřímá fotoreakce	7
3.2.4 Farmaka (a drogy)	8
4 Vývoj vhodného HW	9
4.1 Požadavky	9
4.2 Platforma	9
4.2.1 Raspberry Pi	10
4.3 Nástroje pro vývoj HW	10
4.3.1 Fritzing	11
4.3.2 Eagle	12
4.3.3 OpenSCAD	12
4.3.4 3D tisk	13
4.3.5 Craftware	14
4.3.6 Leptání plošných spojů ..	15
4.4 Tvorba 3D modelů tubusu a boxu	15
4.5 Prototyp 1	17
4.5.1 Výsledek testování pro- totypu 1	17
4.6 Prototyp 2	17
4.6.1 Výsledek testování pro- totypu 2	19
4.7 Prototyp 3	21
4.7.1 Výsledek testování pro- totypu 3	21
4.8 Prototyp 4	22
4.8.1 Výsledek testování pro- totypu 4	22
4.9 Zdravotní normy pro osvit oka	23
5 Vývoj software	25
5.1 Technologie	25
5.1.1 Raspbian	25
5.1.2 Python	25
5.1.3 OpenCV	25
5.1.4 PiCamera	25
5.2 Software pro záznam měření ..	25
5.2.1 Detekce tmy	26
5.2.2 Detekce přítomnosti oka .	26
5.2.3 Nahrávka měření	27
5.3 Software pro analýzu měření ..	28
6 Testování	29
6.1 Metodika testování	29
6.2 Referenční měření	29
6.3 Participant 1	29
6.4 Participant 2	29
6.5 Participant 3	30
6.6 Participant 4	31
6.7 Participant 5	31
6.8 Participant 6	32
6.9 Participant 7	32
6.10 Participant 8	33
6.11 Participant 9	33
6.12 Participant 10	34
6.13 Vyhodnocení testu	34
7 Závěr	36
A Zadání práce	37
B Obsah CD	39
Literatura	42

/ Obrázky

2.1.	Farmakologie deprese	4
3.1.	Vztah velikosti zornice a akomodace	7
3.2.	Řez oka	7
4.1.	Kamerový modul telefonu Nexus 4	10
4.2.	Raspberry Pi 2 a pinout	11
4.3.	Návrh plošného spoje třetího prototypu v programu Fritzing	11
4.4.	Návrh plošného spoje čtvrtého prototypu v programu Eagle	12
4.5.	Princip FDM a demonstrace volby výšky vrstvy	13
4.6.	3D tiskárna Wanhao Duplicator i3	14
4.7.	Obrazovka programu Craftware	15
4.8.	Obrazovka programu OpenSCAD s modelem čtvrtého prototypu	16
4.9.	Kamera Raspberry Pi NoIR a objektiv	18
4.10.	První prototyp dynamického pupilometru	18
4.11.	Srovnání očních	19
4.12.	Záběry z prvního prototypu ...	19
4.13.	Kamera Waveshare Night Vision	19
4.14.	Druhý prototyp dynamického pupilometru	20
4.15.	Záběry z druhého prototypu ...	20
4.16.	Třetí prototyp dynamického pupilometru	21
4.17.	Záběry z druhého prototypu ...	21
4.18.	Čtvrtý prototyp dynamického pupilometru	22
4.19.	Záběry z čtvrtého prototypu ..	22
5.1.	Diagram procesu měření	27
5.2.	Ukázka práce canny hrnového filtru	28
5.3.	Detekovaná zornice	28
6.1.	Referenční průběh pupilárního reflexu	30

6.2.	Průběh zornicového reflexu	
	1. participanta.....	30
6.3.	Průběh zornicového reflexu	
	2. participanta.....	31
6.4.	Průběh zornicového reflexu	
	3. participanta.....	31
6.5.	Průběh zornicového reflexu	
	4. participanta.....	32
6.6.	Průběh zornicového reflexu	
	5. participanta.....	32
6.7.	Průběh zornicového reflexu	
	6. participanta.....	33
6.8.	Průběh zornicového reflexu	
	7. participanta.....	33
6.9.	Průběh zornicového reflexu	
	8. participanta.....	34
6.10.	Průběh zornicového reflexu	
	9. participanta.....	34
6.11.	Průběh zornicového reflexu	
	10. participanta	35

Kapitola 1

Úvod

Slovo psychiatrie je pro většinu lidí medicinsky spjato především s léky, elektrošoky a hospitalizací. Málokdo však ví, že za poslední roky v oblasti vývoje nových léků pro léčbu psychických nemocí, již nejsou činěny velké pokroky. Jsme schopni se zaměřovat na různé neurotransmitery a inhibovat jejich funkci, ale nejsme schopni nemoci vyléčit, pacienti musejí do konce života užívat léky, aby se příznaky nerozvinuly za hranici, kdy jim už není pomoci. V případě afektivních poruch jako je například bipolární nemoc je nutné léky brát i s ohledem na fázi onemocnění, ve které se zrovna pacient nachází. Tyto fáze se opakují periodicky a s pomocí správné detekce fáze, lze amplitudu výkyvů v chování pacienta tlumit a ve výsledku bude moci žít zcela normální život. Zde přichází do hry následující myšlenka: „Lze předčasně detekovat relaps afektivní poruchy pomocí hodnocení změn v dynamice pupilárního reflexu?“ Na tuto otázku zatím neznáme odpověď, ale abychom ji mohli získat, potřebujeme přístroj pro sledování tohoto indikátoru u větší skupiny lidí. Takový přístroj musí splňovat i další kritéria - být levný a měření musí probíhat bez pomoci další osoby. Komerčně dostupné dynamické pupilometry jsou totiž cenově v řádu stovek tisíc a ty přenosné vyžadují 3. osobu, která je správně namíří, nebo jsou tak velké, že jsou nepřenositelné.

Kapitola 2

Afektivní poruchy

Již nejstarší známé historické prameny se zmiňují o lidech s příznaky nemocí, kterým dnes říkáme souhrnně afektivní poruchy. Římské lékaři údajně posílali takto nemocné do lázní v Itálii, jejichž vody se dnes ukázaly jako bohaté na lithium. Jinak řečeno se jedná o poruchy nálad, kdy nálada jedince neodpovídá skutečnému prostředí a stavu, ve kterém se nachází. Pro zjednodušení afektivní poruchy dělíme základní diagnózy: deprese, mánie, smíšený stav a bipolární porucha. [1] [2]

2.1 Příčiny

Afektivní poruchy mají více faktorů vzniku. Patří mezi ně genetika u depresí a bipolární poruchy, biologická zátěž (porod, viry, snížená funkce štítné žlázy), psychologická zátěž (ztráta milovaného v dospělosti) a vývoj osobnosti (tragédie v dětství).

2.2 Deprese

Deprese je charakterizována beznadějnými náladami, pocitem viny, ztráta chuti k jídlu (vedoucí až k anorexii), myšlenkami na smrt a někdy dokonce pokusem o sebevraždu. Dále trpí poruchami spánku a to jak poruchou usínání, tak časté buzení v noci a neschopnost ráno dospat. Nemocní si stěžují na poruchy paměti a mohou trpět i příznaky imitující infarkt myokardu. Straní se přátel a rodiny, zanedbávají činnosti, které jim za normálních okolností dělají radost. Myšlenky na smrt mohou mít nekonkrétní podobu (bylo by lepší nežít), ale i přesné plány na sebevraždy a přímo pokusy o ni. Může se vyskytovat i psychóza v podobě bludů, že depresivní utrpení pacienta je trestem za jeho činy, mohou se vyskytovat i hypochondrické bludy (o osobní zkáze, přesvědčení o postihu rakovinou). Dle mezinárodní klasifikace nemocí se deprese dělí na čtyři úrovně závažnosti a nespecifikované depresivní fáze: mírná depresivní fáze, středně těžká depresivní fáze, těžká depresivní fáze, těžká depresivní fáze s psychotickými příznaky, jiné depresivní fáze a depresivní fáze nespecifikovaná. Do těchto kategorií je pacient zařazen je první depresivní epizodě, poté by měl být zařazen do jedné z kategorií periodické depresivní poruchy, kam patří lidé s opakovanými epizodami deprese, ale bez fází povznesené nálady, která by splňovala kritéria pro máni. [1]

2.2.1 Prevalence deprese

V celkové populaci je prevalence u mužů 2–3% a u žen 5–10%. Poměr muži versus ženy je tedy $\frac{1}{2}$. Průměrný věk výskytu je 40 let.

2.3 Mánie

Typickým příznakem pacienta trpícího mánií je období života, kdy panuje velmi nadnesená nálada, myšlenková hyperaktivita, zrychlená mluva, roztržitá pozornost a snížená

potřeba spánku. Dobrá nálada pacienta může být pro ostatní nakažlivá, ale také může být špatná zejména pokud odporují požadavkům nemocného. Nálada bývá doplňována zahajováním a plánováním rozmanitých činností, které jsou jak povahy pracovní, tak i sexuální či náboženské. V návalech energie klidně rozdávají kolemjdoucím peníze, zadluží se, aby mohli zahájit náročný projekt. Sebejistota a sebevědomí mohou nabýt až do sféry bludů o realizaci megalomanských plánů. Mají pocit, že rozumí jim normálně vzdáleným oblastem. Píší literární díla, skládají hudbu, řeší problémy typu světového míru a své řešení předkládají známým osobnostem, které přímo kontaktují. Dle mezinárodní klasifikace nemocí rozdělujeme mánie na tři úrovně závažnosti a dvě nespecifikované: hypomanie, mánie bez psychotických příznaků a mánie s psychotickými příznaky. Hypomanie je charakterizována mírnými výše uvedenými příznaky, které nejsou natolik závažné, aby pacientovy zabraňovaly v normálním životě a práci. Jedná se o několik dnů zvýšené nálady, pocity výkonnosti, snížená potřeba spánku. Mánie bez psychotických příznaků je těžší forma hypomanie. Je narušena schopnost vykonávat běžnou práci, stav musí trvat nejméně jeden týden. Mánie s psychotickými příznaky je těžká forma hypomanie doplněná o bludy, které plynou ze překypujícího sebevědomí. Touha co nejrychleji a nejvíce mluvit může vyústit v nesrozumitelnost komunikace. Nadměrná fyzická aktivita může vyústit v agresivitu. Pacient zanedbává péči o sebe – nejí a nepije. Pokud je pacient diagnostikován až v tomto stádiu, může být obtížné nemoc odlišit od schizofrenie. [1]

■ 2.3.1 Prevalence mánie

V celkové populaci je prevalence onemocnění 1% a postihuje se stejnou pravděpodobností muže i ženy. Průměr výskytu je 30 let. Rizkové faktory jsou bipolární deprese v rodinné anamnéze. Prvotní příznaky jsou kratší hypomanické epizody, které se rozvíjí v manickou poruchu.

■ 2.4 Smíšený stav

Někdy, zejména při přerodu mánie v depresi, se může vyskytnout stav, který má znaky mánie i deprese, případně se mánie střídá s depresí v řádu několika dnů. Objeví-li se psychotické bludy, obvykle jsou tématicky v souladu s danou náladou. [1]

■ 2.5 Bipolární porucha

Pod bipolární poruchu zahrnujeme pacienty, kteří v minulosti prožili alespoň jednou epizodou mánie, deprese, nebo smíšeného stavu a zároveň v současné době trpí některou z úrovní mánie, deprese, nebo smíšeného stavu. Vyjímkou jsou pacienti, kteří opakovaně trpí výlučně depresí. Ti mají diagnostikovanou periodickou depresivní poruchu, jak bylo již zmíněno v sekci 2.2.

■ 2.5.1 Prevalence bipolární poruchy

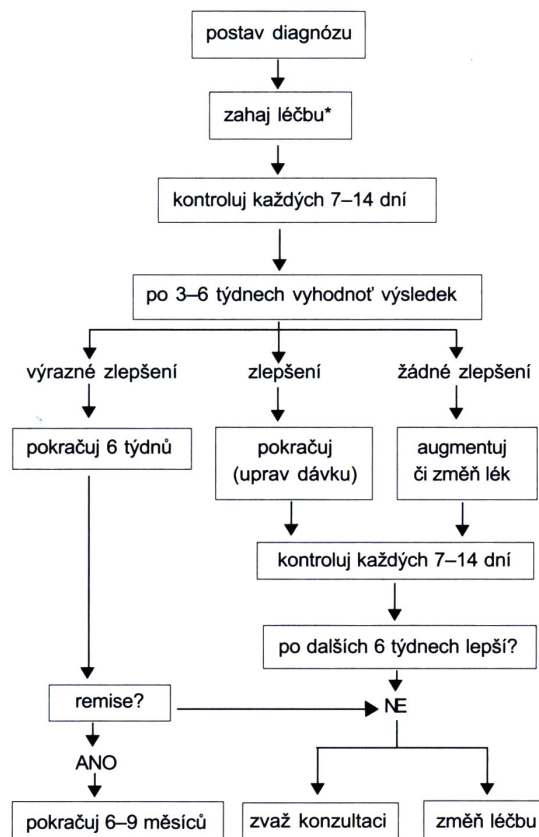
Je stejná jako u mánie popsané v sekci 2.3.1.

■ 2.6 Sebevražda

Odhaduje se, že 10–15% sebevražd v ČR je důsledkem afektivní poruchy. Dle retrospektivních psychiatrických autopsií se lékaři domnívají, že afektivní porucha může stát za 70–80% sebevražd.

2.7 Léčba

Léčba afektivních poruch probíhá za pomoci tří základních metod: psychofarmaka, psychoterapie a elektrokonvulze. Kvůli periodicitě onemocnění probíhá léčba ve třech režimech: akutní, udržovací a profylaktická. Léčba psychofarmaky je nejúčinnější, ale má nežádoucí účinky. Psychofarmaka vyžadují zvýšenou pozornost lékaře z hlediska úpravy dávek, jak je vidět na obrázku 2.1, disciplínu pacienta, mohou vyvolávat interakce s jinými léky. Elektrokonvulze nebo-li léčba elektrošoky je další účinná léčba, které má také svá negativa. Nejdůležitější je riziko amnézie, dále jsou tu rizika spojená s anestezií pacienta. Psychofarmaka a elektrokonvulzi je proto dobré používat zejména pro těžší případy deprese a mánie s psychózou. Pouhá léčba elektrokonvulzí není dostatečná a je třeba ji kombinovat s psychofarmaky. Základní medikament pro léčbu afektivních poruch je lithium a dále je kombinováno s dalšími přípravky, např. anti-depresivy. Psychoterapie je léčba pomocí rozhovoru a zkoumání příčin, které vedou k afektivním náladám pacienta. Měla by se užívat jako léčba lehkých depresí a jako doplňková léčba mánie a těžších depresí, aby se vyřešila příčina a ne jen důsledek. U depresí zejména pokud je jejich příčinou rodinná tragédie a ztráta milované osoby, aby se včas zabránilo skluzu k alkoholismu. Bohužel asi 33% psychoterapeutickou léčbu nedokončí.



Obrázek 2.1. Farmakologie deprese podle WPA. Zdroj [1]

Jak je vidět na obrázku 2.1, může dynamický pupilometr pomoci ušetřit čas lékaři v iterativní fázi hledání správné kombinace psychofarmak a zajistit jeden z ukazatelů objektivního sledování stavu pacienta.

2.8 Rozhovor s pacienty trpící bipolární poruchou

Měl jsem možnost se zúčastnit testování mobilní aplikace pro pacienty trpící bipolární poruchou a tuto příležitost jsem využil k nestrukturovanému rozhovoru za účelem se seznámit s běžným životem pacientů, jak u nich probíhají fáze mánie a deprese a nakonec jak probíhá léčba. Skupina byla různorodá z hlediska pohlaví, věku, délkou onemocnění a dokonce i fází ve které se zrovna nacházeli. Všichni pacienti trpěli bipolární chorobou alespoň 3 roky. Z délky onemocnění se odvíjejí jejich zkušenosti s léčbou. Ti, kteří se léčí krátce, dodržovali dávkování stanovené lékařem. V základu všichni užívali stabilizátor nálady – lithium. K tomu navíc brali další léky jako jsou antidepressiva a antipsychotika. Antidepressiva nesmějí užívat samostatně bez stabilizátor nálady, jinak by hrozilo rozvinutí mánie. Někteří pacienti, kteří se léčili s bipolární poruchou již mnoho let (10 a více), si sami korigovali medikaci, dle svých zkušeností, tak aby nebyli příliš omezeni v běžném životě. Například pacientka, která očividně a jak i sama přiznala, zrovna prožívala mánií, si medikaci upravila tak, aby ji neutlumila natolik, že by se nemohla na testování dostavit. Další zajímavost co se týče medikace je, že na léky vzniká závislost a pokud je pacient vysadil příliš prudce, dostavili se abstinční příznaky. Zkušené pacienti znají své takzvané časné varovné signály, tedy změny v chování, které u daného pacienta předchází depresi či mánií. Pacienti mají i své stupnice závažnosti, které se mírně liší od mezinárodní klasifikace nemocí. Například stupně deprese pacientka rozlišila následovně:

1. špatná nálada, nechuť k životu
2. nekonkrétní myšlenky na smrt
3. konkrétní myšlenky na smrt, ale kvůli dětem bych to neudělala
4. konkrétní myšlenky na smrt, bez ohledu na cokoliv

Co se týče čtvrté, nejhorší úrovně, je zásadní, aby pacientovi někdo další zařídil hospitalizaci v nemocnici. Je to velmi důležité i v případě mánie, kdy se naopak pacient cítí velmi dobře a nemá pocit, že by s ním bylo něco v nepořádku a potřebuje pomoc. Tím se dostáváme k tomu nejpodstatnějšímu. Je jasné, že pokud pacient už bude ve těžší fázi deprese či mánie, dynamický pupilometr je nebude zajímat a měření vynechají. Cílem je tedy používat přístroj pro diagnostiku, když zabrala léčba a pacient má dostatečnou vůli spolupracovat. Tuto domněnku mi potvrdili i sami pacienti.

Kapitola 3

Anatomie zornicového reflexu

V této kapitole je popsán fyziologický průběh zornicového, neboli pupilárního reflexu od jeho počátku, kdy světlo vnikne do oka až po konec, tedy reakci vegetativních nervů na podnět. Tento reflex patří mezi nepodmíněné, tedy vegetativní a proto jeho průběh může sloužit jako odraz stavu podvědomí. Jeho průběh a čím může být ovlivněn je důležité brát v potaz jak při návrhu HW měřicího přístroje, tak při tvorbě instrukcí pro pacienta. Zornice je u lidí kruhový otvor, kudy duhovka, která v oku slouží ke stejnému účelu clona jako v objektivu fotoaparátu, tedy reguluje množství světla vstupujícího do oka a také tím mění hloubku ostrosti. Studium anatomie zornicového reflexu nám umožní dosáhnout co nejsilnějšího reflexu, to je také důležité, abychom mohli reflex kvalitně rozpoznat na kameře. Nejprve tedy potřebujeme dosáhnout, aby zornice co nejvíce rozšířila a poté zase co nejvíce zúžila.

3.1 Myadriáza

Je lékařský termín pro rozšíření zornice. Zornice se rozšiřuje primárně za účelem vpuštění více světla na sítnici, ale také jako reakce na strach, úlek a bolest.

3.1.1 Farmaka (a drogy)

Nejběžněji se můžeme setkat s rozšířením zornice po rozkapání atropinem, poté v ČR oblíbená marihuana a možná ještě LSD. O kontradikci používání tohoto přístroj se zmíněnými látkami je nutné informovat v manuálu.

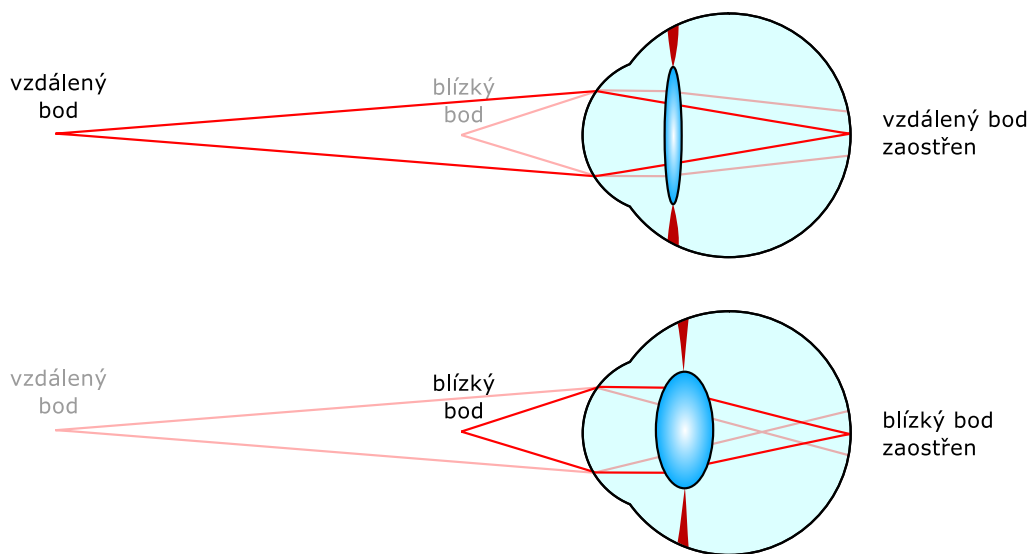
3.2 Mióza

V lékařské terminologii se zúžení zornice nazývá mióza. V rámci měření zornicového reflexu chceme mít miózu pod naší kontrolou a vyhnou se tak, aby se zornice zúžila ještě před tím, než sami vyvoláme miózu v měřený okamžik. Nervy, které se starají o miózu vycházejí z hypothalamu a procházejí přes parasymptikus. [3] Mióza oka, které měříme, může proběhnout z těchto čtyř příčin:

1. akomodace
2. přímá fotoreakce
3. nepřímá fotoreakce
4. farmaka (a drogy)

3.2.1 Akomodace

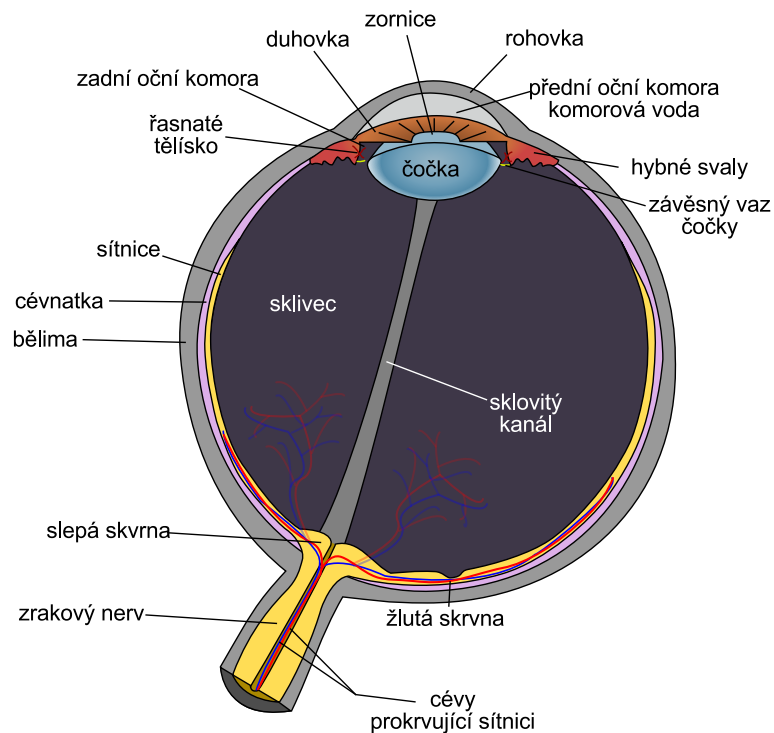
Akomodace, neboli změna optické mohutnosti čočky oka. V tomto případě probíhá mióza v rámci jevu, kterému se říká reflex pohledu do blízka. Z toho vyplývá požadavek na pacienta při měření. Je nutné, aby při každém měření zaostřil na určitou, stejnou, vzdálenost nejlépe do nekonečna. Proč do nekonečna ilustruje obrázek 3.1



Obrázek 3.1. Ilustrace velikosti zornice v závislosti na akomodaci oka zdroj [4]

■ 3.2.2 Přímá fotoreakce

Přímá fotoreakce neboli osvětlení měřeného oka je příčina míózy, na kterou se zaměříme při tvorbě pupilometru. Můžeme ovlivnit a probíhá s největším konstrikcí. Nejcitlivější část sítnice na světelný podnět je tzv. makula, tedy žlutá skvrna. Jak je vidět na obrázku 3.2 žlutá skvrna se nachází přímo v optické ose oka, proto vidíme nejlépe přímo před sebou.



Obrázek 3.2. Řez oka. Zdroj [5]

■ 3.2.3 Nepřímá fotoreakce

Nepřímá fotoreakce, tedy osvětlení druhého oka také způsobuje miózu u měřeného oka. Zrakový nerv osvětleného totiž posílá podnět do obou Edinger-Westphalových parasympatických jader (každé oko má své) a mióza proto proběhne u obou očí [3]. Je tedy nutné pacienta poučit, aby si druhé oko zakryl.

■ 3.2.4 Farmaka (a drogy)

Okrajově lze zmínit, že předávkování morfinem také způsobuje miózu. Nepředpokládá se, že by přístrojem byli měřeni pacienti se silnými bolestmi a smrtelnou nemocí, kterým se často dávají velmi silné dávky morfia.

Kapitola 4

Vývoj vhodného HW

V předchozí kapitole 3 jsem nadefinoval průběh měření pupilárního reflexu a také jevy, které mohou zkreslovat měření. Z toho vyplývají požadavky na hardware a průběh měření. Každý prototyp byl vytvořen z cílem požadavky splnit a postupně se všechny požadavky podařilo splnit. Zejména požadavek na samoobslužné měření bylo obtížnější splnit, a proto muselo vzniknout několik prototypů, než se povedlo tento problém vyřešit.

4.1 Požadavky

Dle informací zjištěných v analýze problematiky afektivních poruch (3) a anatomie pupilárního reflexu (3), se podařilo zjistit část požadavků na dynamický pupilometr pro dané použití. Dále jsem čerpal také z metodiky, jakou pro měření dynamickým pupilometrem používali ve své studii Giselle L Ferrari a Jefferson LB Marques [6].

Fáze tmy vyplývá z mechaniky zornicového reflexu. Je jasné, že pro maximální rozšíření potřebuje zornice dostatek času v úplné tmě, potřebujeme tedy jednak světlo těsný tubus, ale také dostatek času, aby mohla myadriáza proběhnout (3.1). Čas tmy jsem určil na 30 s.

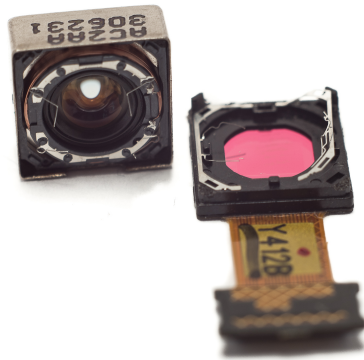
Kamera pro bez infračerveného filtru, která je schopna snímat oko i ve fázi tmy, abychom mohli detekovat správné přiložení a průměr zornice před a po záblesku.

Délku impulzu záblesku bílé diody jsem nastavil dle [6] na 10 ms

Cena je důležitá pro možnost realizace pilotní studie na dostatečném množství pacientů.

4.2 Platforma

V otázce volby platformy, na které vyvíjet dynamický pupilometr, jsem jako první instinktivně zvolil mobilní telefon Nexus 4 s Androidem. Z hlediska výbavy má téměř vše potřebné – kameru, reproduktor a sluchátkový výstup, diodu pro přisvětlování, která případně slouží i jako blesk. Chybí mu jen infračervené diody a bohužel kamera má také jednu věc navíc – infračervený filtr, který k senzoru propouští jen většinu viditelného světla a infračervené spektrum tlumí natolik, že v obraze lze zpozorovat jen pokud svítí infračervená dioda přímo do objektivu, odraz z pokožky není dostatečně silný. Na internetu lze dohledat návody jak odstranit infračervený filtr z mnoha různých telefonů a foťáků, ale Nexus 4 mezi nimi chybí. Důvod je nejspíše právě ten, že se to nikomu úspěšně nepodařilo. Z telefonu jsem vyjmul kamerový modul, jak je vidět na obrázku 4.1, a rozebral ho na dvě části – objektiv a snímač. Na obrázku je vpravo snímač, který kryje infračervený filtr, ale háček je v tom, že filtr se nachází pod plastem a je zalisován do celého těla snímače. Další problémem je ostřicí mechanismus objektivu, který byl elektricky propojen se modulem senzoru, a jeho kontakty byly při rozebírání přerušeny. Kamerka tedy už nikdy nefungovala.



Obrázek 4.1. Kamerový modul telefonu Nexus – 4 poškozený při rozmontování

Do doby, než bude na trhu modulární telefon Project ARA ¹, který umožňuje za běhu vyměňovat periferie a obsahuje otevřený standard pro komunikaci mezi moduly, není vhodné stavět zařízení typu dynamický pupilometr na mobilním telefonu. Druhou možností byla platforma britské nadace Raspberry Pi Foundation- Raspberry Pi 2B. Raspberry Pi je velmi rozšířená výuková vývojová deska, která obsahuje výstup na monitor, zvukový výstup, 28 GPIO pinů s dalšími volitelnými speciálními funkcemi [7] a hlavně mezi oficiální příslušenství patří kamerka NoIR, tedy bez infračerveného filtru. Hlavní nevýhoda oproti mobilnímu telefonu je nutnost vytvořit vlastní krabici, napájení a zapojení reproduktoru. Je potřeba vyrobit plošný spoj, který se napojí na 40 pinový konektor Raspberry Pi a bude na sobě mít infračervenou diodu pro osvětlení oka ve fázi tmy a také bílou diodu vyvolávající zúžení zornice.

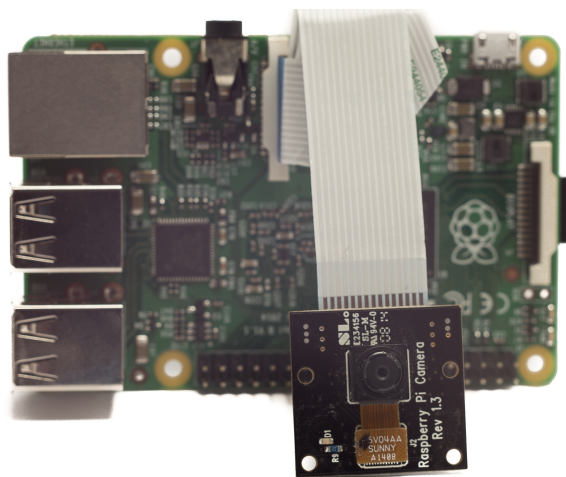
■ 4.2.1 Raspberry Pi

Raspberry Pi je vývojová deska o velikosti kreditní karty postavená na platformě ARM. Použil jsem verzi 2B, kterou pohání čtyřjádrový procesor BCM2836 ARMv7 od firmy Broadcom, doplňuje ho 1GB vestavěné SDRAM, kterou sdílí s grafickým jádrem. Operační systém a binární blob firmware GPU je uložen na microSD kartě. Raspberry Pi zvládá používat karty splňující standard SDHC. SD karta je v základu rozdělena na dva oddíly. První oddíl naformátovaný FAT souborovým systémem je určen ke konfiguraci, uložení firmware a jádra. Pomocí souboru config.txt je možné změnit takt procesoru, odemknout licencované kodeky, nastavit grafický výstup a předávat parametry jádru.

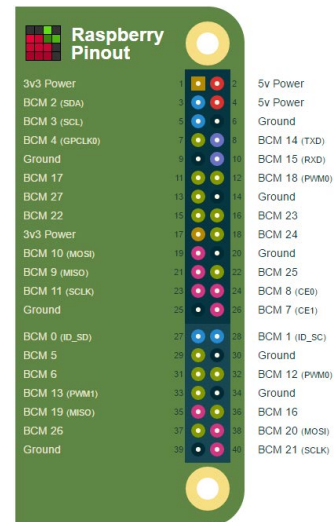
■ 4.3 Nástroje pro vývoj HW

V sekci 4.2 jsem došel k závěru, že nejvhodnější způsob, jak vyrobit dynamický pupilometr, je vytvořit vlastní HW, postavený na platformě Raspberry Pi. K tomu jsou potřeba nástroje na tvorbu schemat zapojení a plošných spojů, ale také fyzickou výrobu plošných spojů. Dále je potřeba 3D modelovací software pro tvorbu tubusu s přesnými parametry a 3D tisk, abychom z modelu dostaly fyzický předmět. U pokročilejších prototypů je dobré se již také zabývat vlastní krabičkou, která je také vytištěna na 3D tiskárně.

¹ <http://www.projectara.com>



a) Raspberry Pi 2B

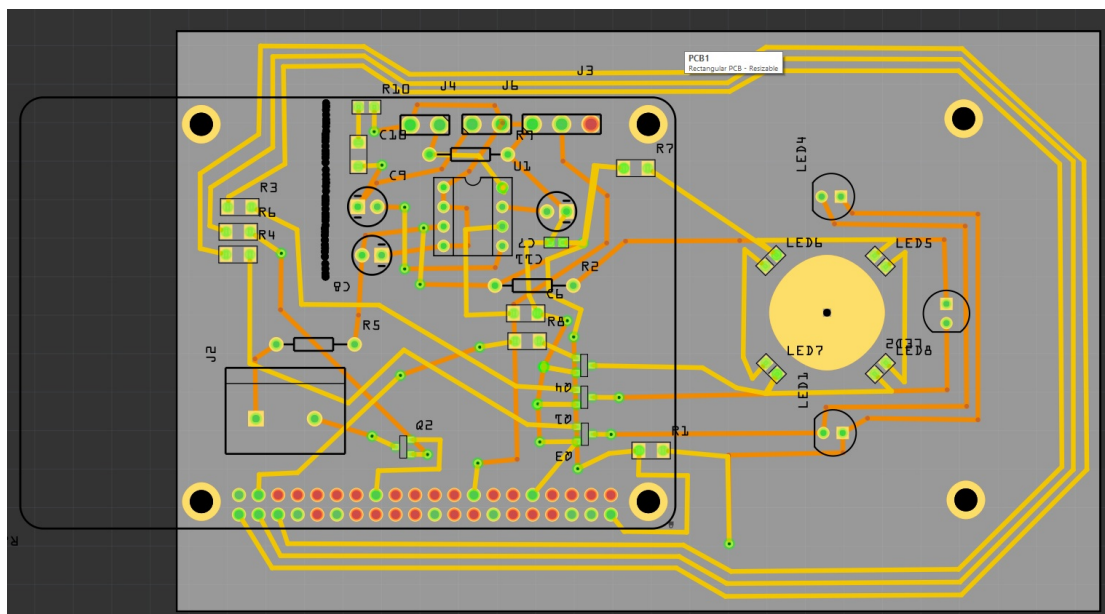


b) pinout

Obrázek 4.2. Raspberry Pi 2 a pinout 40 pinového konektoru

4.3.1 Fritzing

Fritzing¹ je opensource software vyvinutý na univerzitě v německém Potsdamu. Slouží ke tvorbě schemat zapojení a plošných spojů a jeho hlavní výhody jsou jednoduchost, velká knihovna součástek a je také multiplatformní. Bohužel však vzhledem k jeho určení je jednoduché narazit na jeho limity, neobsahuje příliš sofistikovaný algoritmus na automatické routování fyzických spojů a hlavně obsahuje vykreslovací bug, který se projevuje i v exportovaných podkladech pro tvorbu plošných spojů, které znemožňují výrobu. Proto jsem pro další prototypy použil SW Eagle. Poslední plošný spoj (třetího prototypu) navržený v programu Fritzing lze vidět na obrázku 4.3.

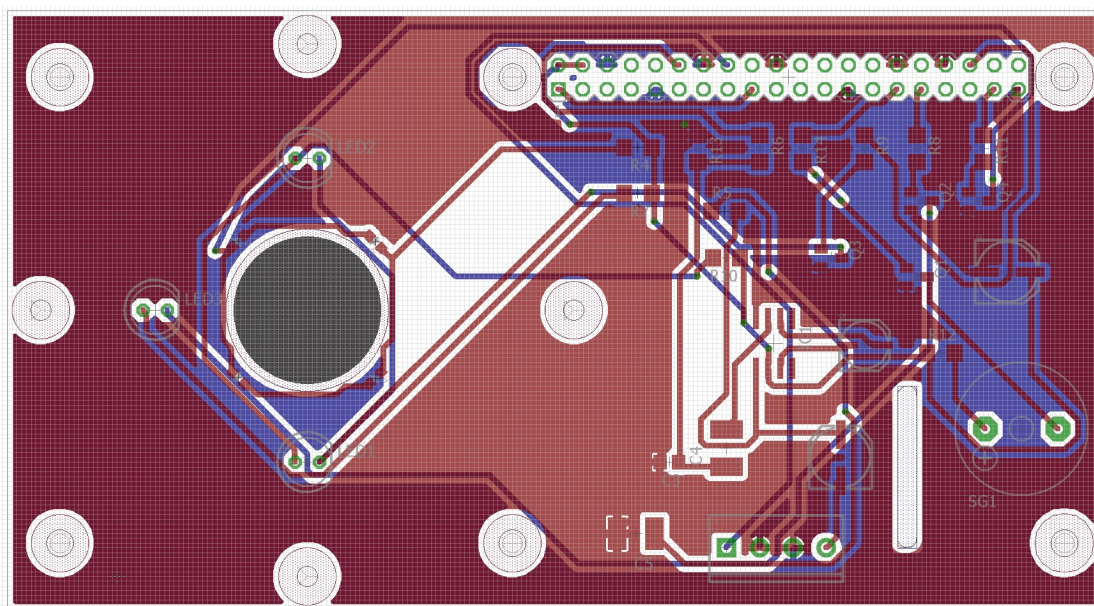


Obrázek 4.3. Návrh plošného spoje třetího prototypu v programu Fritzing

¹ <http://fritzing.org>

4.3.2 Eagle

Eagle¹ je profesionální komerční software na tvorbu schemat zapojení a plošných spojů. Prodává se v několika verzích, přičemž existuje verze zdarma, která má několik omezení. To nejdůležitější pro návrh dynamického pupilometru je maximální použitelná deska $100 \times 80\text{mm}$, dále je možné mít jen dvě vrstvy plošného spojení - horní a dolní, a nakonec je možné ho v tomto režimu používat jen pro nekomerční účely případně za účelem vyzkoušení. Co se týče omezení velikosti desky, mylně jsem při úvodním hledání vhodného nástroje zaměnil z maximální možno velikostí desky. Ve skutečnosti toto omezení jen určuje na jaké ploše plošného spoje se mohou vyskytovat součástky, díry a propojení se mohou vyskytovat i mimo tuto oblast. Jediné negativum, které toto omezení přináší, jsou komplikace s kótováním souřadnic, na kterých se součástky nacházejí. Toto je rozvedeno více v sekci 4.4 níže.



Obrázek 4.4. Návrh plošného spoje čtvrtého prototypu v programu Eagle

4.3.3 OpenSCAD

OpenSCAD² je open source 3D CAD modelář pro programátory. Veškerá práce s 3D modelem probíhá textově pomocí malé množiny základních funkcí, které jednak pro generování základních 2D a 3D tvarů (kvádr, koule, kružnice), načítání knihoven a vzájemné operace mezi základními tvary. Pro moje použití má OpenSCAD mnoho výhod. Nejdůležitější je možnost parametrizace, například velikost plošného spoje se bude nejspíše často měnit a v OpenSCAD stačí změnit jednu proměnnou a pokud je model dobře navržen, všechny závislé útvary se podle toho upraví. Mezi nevýhody patří hlavně nesprávné vykreslování v OpenGL módu, kdy v přídě, že se od sebe odečítají dva stejné povrchy, nemusí operace skončit vizuálně například dírou ve stěně, ale zůstane tam zvláště vykresleny oba povrchy. Pro přesné vykreslení bez těchto artefaktů je nutné nechat model vyrenderovat přesně pomocí CGAL³ knihovny, která je ovšem pouze jednovláknová a výpočet proto trvá i na výkonném PC až několik minut.

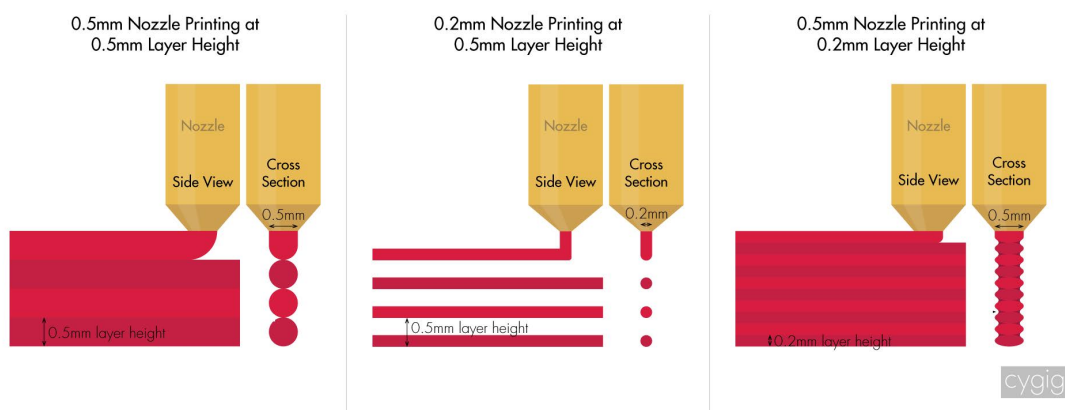
¹ <http://www.cadsoftusa.com/>

² <http://www.openscad.org/>

³ <http://www.cgal.org/>

4.3.4 3D tisk

3D tisk v posledních 11 letech zažívá velkou popularizaci, zejména díky komunitnímu projektu tiskárny RepRap¹. Vzhledem k tomu, že se jedná o open source hardware, bylo vytvořeno mnoho modifikací s různými vylepšeními. Princip ale pořád zůstává stejný, tiskárna plní trysku, zahřátou na relativně konstantní teplotu, tiskovou strunou - filamentem. V trysce se struna ohřeje nad teplotu tání a je protlačena dírou o ve velikosti 0,2–0,6mm. Takto vytlačená a zahřátá struna je poté roztírána po povrchu podložky. V mém případě se jedná o vyhřívanou, skleněnou podložku. Další vrstvy jsou kladeny na předchozí. Této technologii 3D tisku se říká fused deposition modeling. Jedná se o aditivní proces, postupné přidávání materiálu, které je v kontrastu s klasickými technologiemi jako je například frézování. Tímto se dostávám k základním pravidlům, které je potřeba dodržet při 3D tisku. Na obrázku 4.5 je vidět jak jsou jednotlivé vrstvy kladeny na sebe ve vztahu k průměru trysky. Je potřeba vytlačovat dostatek materiálu, aby byly jednotlivé vrstvy k sobě přitlačeny a to je možné jen pokud výška vrstvy nepřesáhne 80%. To se týče nastavení teplot, je třeba dodržovat rozmezí, které stanovil výrobce materiálu a případně v daném rozmezí doladit, tak aby extruder nebyl zbytečně namáhán při nízké teplotě, anebo nevznikaly malé nitky mezi jednotlivými předměty při příliš vysoké teplotě.



Obrázek 4.5. Princip technologie FDM a demonstrace důležitosti správné volby výšky vrstvy u 3D tisku. Zdroj [8]

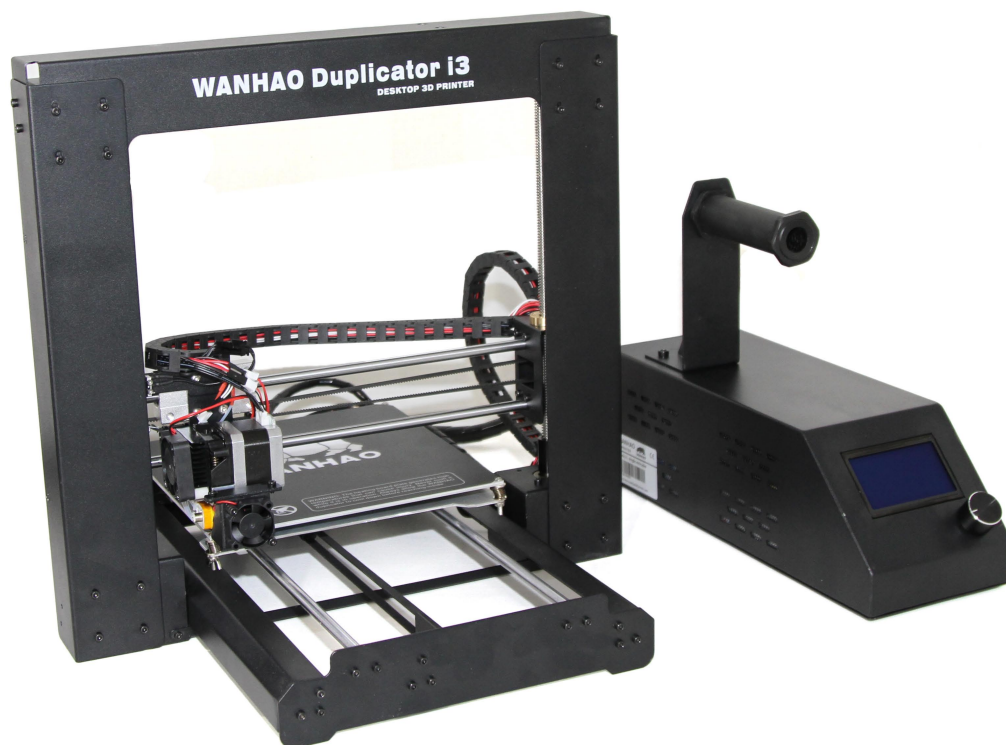
Zvolit přiměřenou rychlost tisku, nejlepších výsledků jsem dosahoval okolo rychlosti 40mm/s a výtisky byly vytvořeny na tiskárně Wanhao Duplicator i3 (obrázek 4.6). Nakonec je velmi důležité zvolit správný tiskový materiál pro daný účel. Plast ABS² sice je jak teplotně, tak fyzicky velmi odolný, ale nehodí se pro větších předmětů, protože má pro 3D tisk již nezanedbatelnou míru tepelné roztažnosti. Čím větší tisknutý model v Z ose je, tím větší jsou teplotní rozdíly uvnitř tisknutého předmětu. Spodní vrstvy leží na vyhřívané podložce, proto se relativně málo smršťují, ale vrchní vrstvy, které rychle se rychle ochlazují, postupně vytvářejí stále větší tlak uvnitř předmětu. Je to velmi podobné jako působí tětíva na luk. Nakonec se mohou vrstvy v některých místech od sebe oddělit, nebo se celý předmět zvedne z podložky. Z tohoto důvodu je vhodné tisknout větší předměty jsou jsou krabice prostřednictvím plastu PLA³, který má téměř zanedbatelnou tepelnou roztažnost, nízkou teplotu tání a velmi dobrou přilnavost mezi vrstvami. Nakonec je také vhodné zmínit, že je biologicky odbouratelný např.

¹ <http://reprap.org>

² Akrylonitrilbutadienstyren

³ kyselina polymléčná

bakteriemi rodu *amycolatopsis* [9] a také se vyrábí z obnovitelných zdrojů. V přírodě je četnost organismů, které dokáží tento materiál poměrně malá, takže se nerozkládá neřízeně. Tento plast má jedinou nevýhodu a tou je poměrně nízká teplota zeskení[10], která je v rozmezí 60–60°C. Při dosažení této teploty ztrácí předmět svou pevnost a začne se ohýbat a deformovat, po ochlazení zůstává v nově nabytém tvaru. V případě ABS je teplota zeskení až 105°C. Pro tisk prototypů dynamického pupilometru jsem vybral plast PLA černé barvy, protože prototyp nebude vystavován vysokým teplotám a zároveň je krabička pupilometru již poměrně velký předmět a tisk z ABS, by přinesl více komplikací než výhod. Je také výhodné, že prototyp lze po skončení používání ekologicky zlikvidovat.

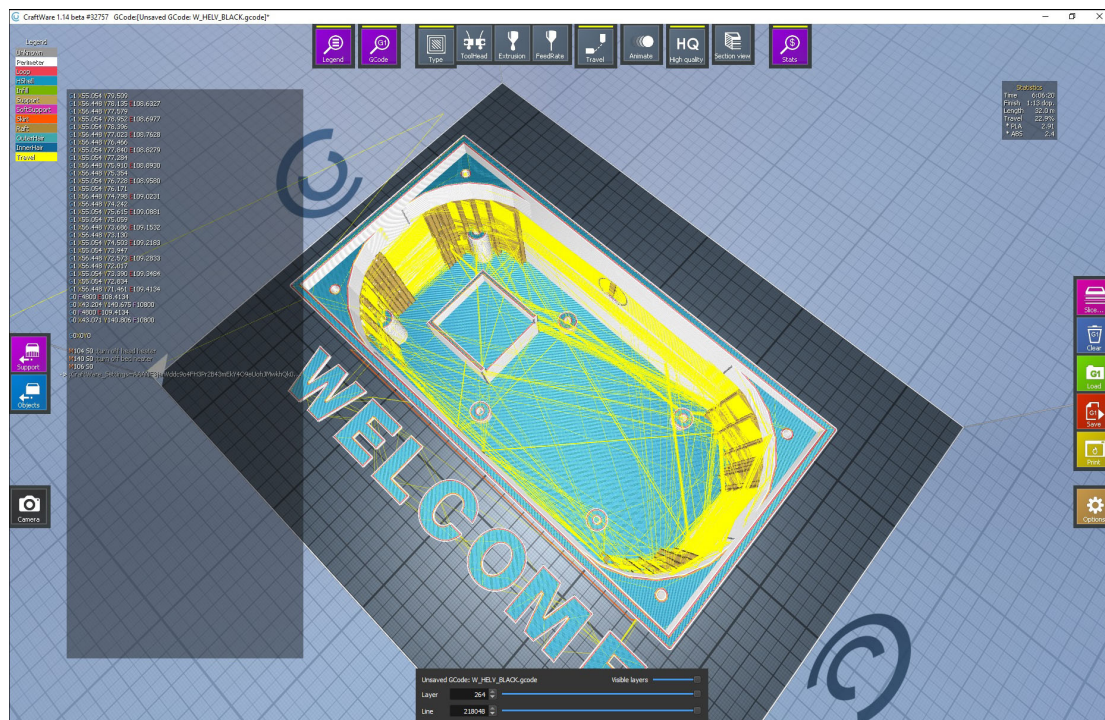


Obrázek 4.6. 3D tiskárna Wanhao Duplicator i3

■ 4.3.5 Craftware

Možná téměř důležitější než kvalita samotné 3D tiskárny je skupina software, který se ve strojírenství nazývá CAM a ve světě 3D tiskáren se tomuto software říká slicer. Slicer slouží k převodu modelu objektu z 3D CAD modeláře na sadu příkazů v jazyce GCODE, kde je přesně definováno jak má tiskárna postupovat. Je potřeba přesně zkoordinovat posuv os a dávkování filamentu z extruderu, společně se správnou teplotou heatbeadu a hotendu. Většina tiskáren používá také chladič, který slouží k ochlazení vytlačeného filamentu na místě, kde byl vytlačen tak, aby šlo vytvářet převisy do určitého úhlu. Pro tento účel jsem na základě porovnávacího testu [11] vybral software, který skončil na druhém místě a jako první bezplatný z výběru, Craftware¹. Jak je vidět na obrázku 4.7, model čtvrtého prototypu je poměrně velký, a proto se tiskne dlouho. Je potřeba tisk kvalitně rozvrhnout, aby se povedl.

¹ <https://craftunique.com/craftware>



Obrázek 4.7. Obrazovka programu Craftware s naslicovaným modelem boxu čtvrtého prototypu

4.3.6 Leptání plošných spojů

Profesionální výroba plošných spojů, je poměrně nákladná, obzvláště v případě dynamického pupilometru, protože se platí za plochu [12]. Plošný spoj pupilometru je jednak nosný prvek pro kameru a tubus, ale také musí přesahovat půdorys Raspberry Pi, aby mohla být vložena kamera. Další problém, je čekací doba na výrobu. Nejlevnější a nejrychlejší cesta výroby plošných spojů pro první prototypy, je vytisknout motiv plošného spoje na voskový papír, který se používá jako nelepivý podklad samolepek a poté motiv přezehlít pomocí obyčejné žehličky na čistou desku cuprexitu. Poté stačí vložit do roztoku chloridu železitého a počkat až se odleptá odhalená plocha. Nakonec stačí zbývající toner obrousit smirkových papírem a vyvrtat průchody pro součástky.

4.4 Tvorba 3D modelů tubusu a boxu

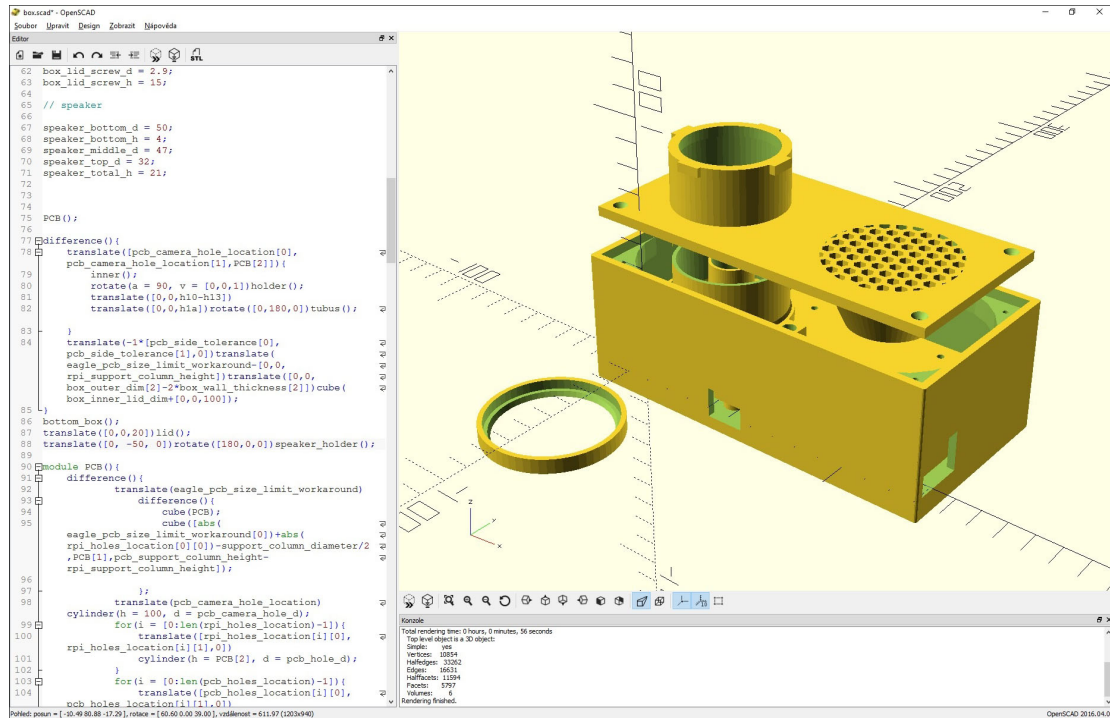
Předtím než je možné vytisknout na 3D tiskárně tubus nebo box na dynamický pupilometr, je potřeba jej nejdříve navrhnout. Já jsem použil opensource program OpenSCAD, který je blíže popsán v sekci 4.3.3. Model dynamického pupilometru se skládá ze čtyř tiskových částí a je uložen v několika souborech. Hlavní soubor se nazývá *box.scad* a je v něm generován kompletní model pupilometru, který lze vidět na obrázku 4.8.

Všechny proměnné popisující důležité fyzické rozměry plošného spoje, lokace děr a podobně, jsou definovány na začátku souboru takto:

```
PCB = [103.5+11.5+21.42, 59.5+3.5,15];
pcb_side_tolerance = [3,3,30];

eagle_pcb_size_limit_workaround = [-11.5, -3.5, 0];
rpi_support_column_height = 5;
```

4. Vývoj vhodného HW



Obrázek 4.8. Obrazovka programu OpenSCAD s modelem čtvrtého prototypu

```

pcb_support_column_height = rpi_support_column_height+12.8;
support_column_diameter = 8;

support_column_screw_hole = 2;

pcb_camera_hole_location = [20, 28];
pcb_camera_hole_d = 15;
camera_pcb_dim = [25.2+5,24.2+5,4.54];
camera_support_column_diameter = 14.5;
camera_support_column_height = pcb_support_column_height
- camera_pcb_dim[2];

pcb_hole_d = 2.8;
pcb_holes_location = [[-6,3.5],
                     [-6,52.5]];
rpi_holes_location = [[41.5, 52.5],
                     [41.5,3.5],
                     [99.5, 52.5],
                     [99.5, 3.5]];
tubus_holder_holes_coordinates = [
                                [20,0],
                                [48,28],
                                [-8,28],
                                [20,56]];

tubus_holder_holes_d = 2.2;

```

(zkráceno)

Proměnná `eagle_pcb_size_limit_workaround` je v sekci 4.3.2 zmíněné řešení problému s maximální velikostí plošného spoje. Jelikož se na plošném spoji nacházejí díry na záporných souřadnicích, je nutné posunou celý box a odpovídající modely tak, aby naopak nebylo nutné přepočítávat souřadnice děr v plošném spoji.

Dále je zde několik hlavních modulů, které slouží pro generování různých částí modelu:

PCB je modul pro vygenerování modelu PCB, který slouží pro kontrolu, že všechny mají správné rozměry, sedí na sebe a díry jsou na správných místech. PCB rovnou v sobě obsahuje Raspberry Pi, které je k němu již pomyslně připojeno.

PCB_Support je modul, kde jsou generovány sloupky ke kterým se zesponu přimontovává Raspberry Pi a plošný spoj, ale také slouží jako slot pro kamerku, kterou stačí takto podepřít v ose Z a v osách X/Y je již aretována pomocí díry v plošném spoji, kudy prochází.

bottom_box je modul, kde se generuje zbytek krabice, včetně zaoblených rohů, kam se přišroubovává víko, tento modul používá knihovnu `roundCornersCuberoundCornersCube`

lid je modul, kde je generováno víko společně s tubusem, pro vygenerování mřížky reproduktoru používá knihovnu `honeycomb`

speaker_holder je modul, který generuje držák reproduktoru, vytváří objímku reproduktoru, která se společně s reproduktorem přilepí tavným lepidlem zesponu víka

4.5 Prototyp 1

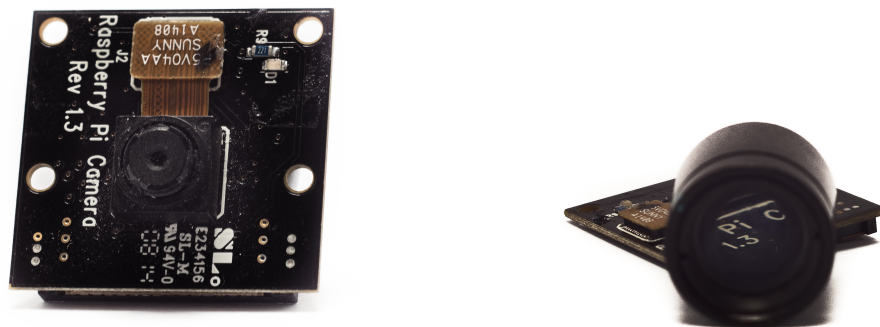
První prototyp byl vytvořen zcela bez použití 3D tiskárny za účelem odzkoušení myšlenky dynamického pupilometru. Kamera byla zvolena oficiální kamera NoIR, která ale není schopna zaostřit na potřebnou vzdálenost 4 cm. Proto jsem před ni přidal zvětšovací čočku ze starého skeneru (obrázek 4.9). Pro osvětlení ve fázi tmy byla použita jedna infračervená dioda, pro záblesk jedna bílá a nakonec navigační dioda byla vyvedena pomocí světelného vlákna z indikační diody, kterou má na sobě NoIR kamera. Tubus byl vyroben z plastové nádoby na léky. Vše bylo vloženo do černého boxu, stejně jako u druhého prototypu (obrázek 4.14). Plošný spoj byl, který vytvořen pomocí programu Fritzing a vyleptán chloridem železitým. Byla použita očníce Kamerar, kterou lze vidět ve srovnání na obrázku 4.11. Tento prototyp zatím ještě neobsahoval hlasový výstup, pouze piezo bzučák.

4.5.1 Výsledek testování prototypu 1

Při testování první prototypu na ostatních lidech, se rychle ukázalo, že navigační systém pomocí jedné červené LED je nedostatečný. Dokud jsem prototyp testoval na sobě, nebyl s měřením problém, protože jsem měl podvědomě naučeno vystředění očníce z předchozího používání pro její původní účel. Nebylo jisté jestli problém je jen v navigačním systému nebo i ve velikosti očníce, která umožňuje příliš mnoho volnosti. U dalšího prototypu je potřeba otestovat nový navigační systém a zkusit i vliv jiné očníce.

4.6 Prototyp 2

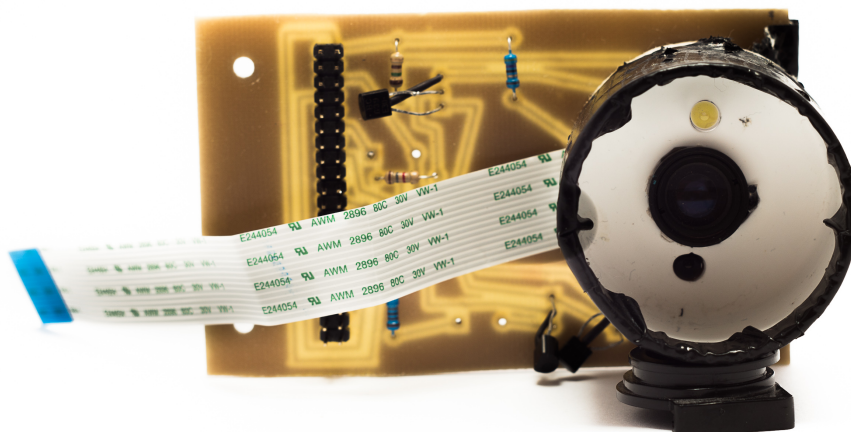
První prototyp byl určen hlavně na vyzkoušení myšlenky a pořízení prvního záznamu pro testování algoritmu na analýzu obrazu. Při výrobě více kusů pupilometru by byl problém sehnat správný objektiv a také upravovat jeho pozici vzhledem k délce tubus, aby byl obraz kamery zaostřený. První změna se týkala nasazení nové kamery, kterou lze



a) NoIR kamera

b) zvětšovací objektiv

Obrázek 4.9. Oficiální kamera Raspberry Foundation NoIR



Obrázek 4.10. První prototyp dynamického pupilometru

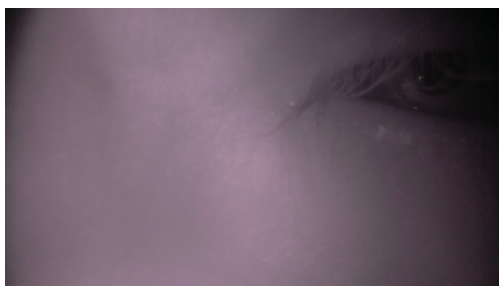
vidět na obrázku 4.13. Tato kamera má objektiv se závitem M12, který je standardem ve světě sledovacích kamer. Pro zaostření kamery stačí objektivem mírně pootočit. Byl kompletně přepracován navigační systém. Nový navigační systém se skládá z dvou soustředných kruhů vytvořených vytištěných z červeného polopropustného PLA. V dolní části tubusu, na úrovni infračervených diod se nachází kruh s větším poloměrem a u hrany objektivu kameru se nachází menší svítící kruh. Každý z kruhů je podsvětlen 4 červenými SMD LED diodami s maximálně stlumeným jasem. Na obrázku 4.14 úroveň jasu kruhů neodpovídá skutečnosti, jsou vyfoceny tak aby poměr okolního osvětlení a kruhů byl vyrovnaný. V případě, že je pupilometr správně přiložen k hlavě, jsou tyto kružnice soustředné. Jakmile pacient pupilometr na hlavě nakloní, začnou se kružnice



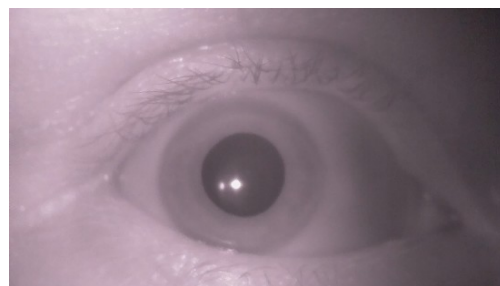
a) očnice malá pro fotoaparát Canon 600D



b) očnice Kamerar

Obrázek 4.11. Srovnání dvou typu testovaných očnic

a) nepovedený



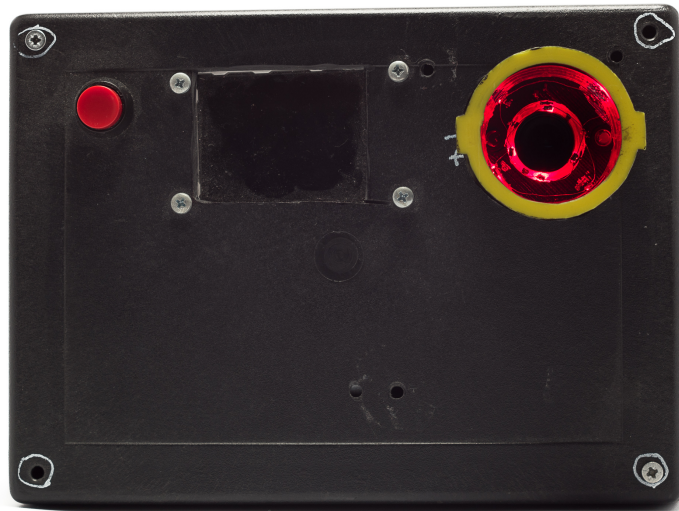
b) povedený

Obrázek 4.12. Záběry z prvního prototypu dynamického pupilometru

protínat. Dále byla pořízena nová, menší, očnice, kterou lze vidět na obrázku 4.11. Zároveň byl pro ni vytisknut na 3D tiskárně vyměnitelný tubus, který umožňuje otestovat kruhový navigační systém velkou i malou očnici. Postup tvorby 3D modelu tubusu je blíže popsán v sekci 4.4.

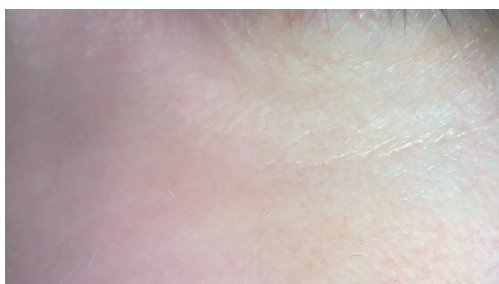
**Obrázek 4.13.** Kamera Waveshare Night Vision

■ 4.6.1 Výsledek testování prototypu 2



Obrázek 4.14. Druhý prototyp dynamického pupilometru s navigací pomocí soustředných kružnice

Druhý prototyp dynamického pupilometru byl testován na 5 lidech z toho dva trpěli dalekozrakostí. Každý participant testování provedl dvě měření, jedno s malou očníci a druhé s velkou. Z výsledků byly jasně vidět následující závěry. Malá očníce je náročnější na přesnost navigace a u obou skupin participantů bylo prokazatelně vidět, že velká očníce je jednodušší na navigaci. Druhý závěr je, že navigační systém nefungoval, tak dobře u pacientů s vadou zraku jako u pacientů bez vady a menší kruh je natolik velký, že zastiňoval infračervenou diodu. Nová kamera umožnila přesněji zaostřit obraz a zároveň je hloubka ostroty u použitého objektivu dostatečně velká, aby nezáležela ostrost snímků na síle jakou si pacienti přitlačují očníci. Do dalšího prototypu je tedy potřeba vyvinout nový navigační systém, možná přidat další infračervenou diodu, nová kamera a velká očníce se osvědčili.



a) nepovedený

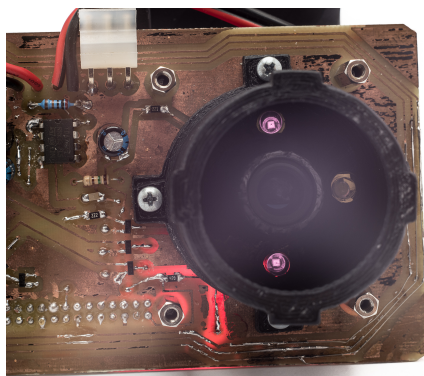


b) povedený

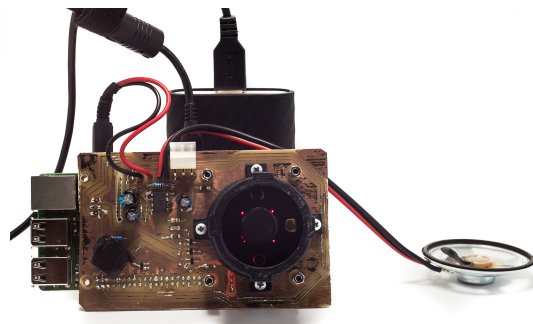
Obrázek 4.15. Záběry z druhého prototypu dynamického pupilometru

4.7 Prototyp 3

Třetí prototyp dynamického pupilometru, který můžete vidět na obrázku 4.16 obsahuje dva nové prvky proti druhému prototypu pupilometru – nový navigační systém a zvukový výstup. Navigační systém je řešen pomocí čtyř navigačních diod umístěných přímo na plošném spoji pupilometru, které svítí malými dírkami skrze dno tubusu. V případě, že je pupilometr správně přiložen k hlavě, sloupek kamery je všechny zakrývá. Byla přidána i další infračervená dioda pro kvalitnější osvětlení z obou stran. Dále byl přidán hlasový výstup, který měřenému pacientovi předává instrukce k měření, informuje ho o správnosti přiložení očníce a fázi měření, která právě probíhá. Plošný spoj třetího prototypu byl opět navrhnout pomocí programu Fritzing a lze ho vidět na obrázku 4.3.



a) zapnuté infračervené diody

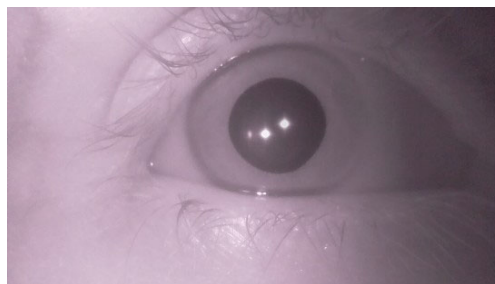


b) zapnuté navigační diody

Obrázek 4.16. Plošný spoj třetího prototypu se čtyřmi navigačními diodami a hlasovou navigací

4.7.1 Výsledek testování prototypu 3

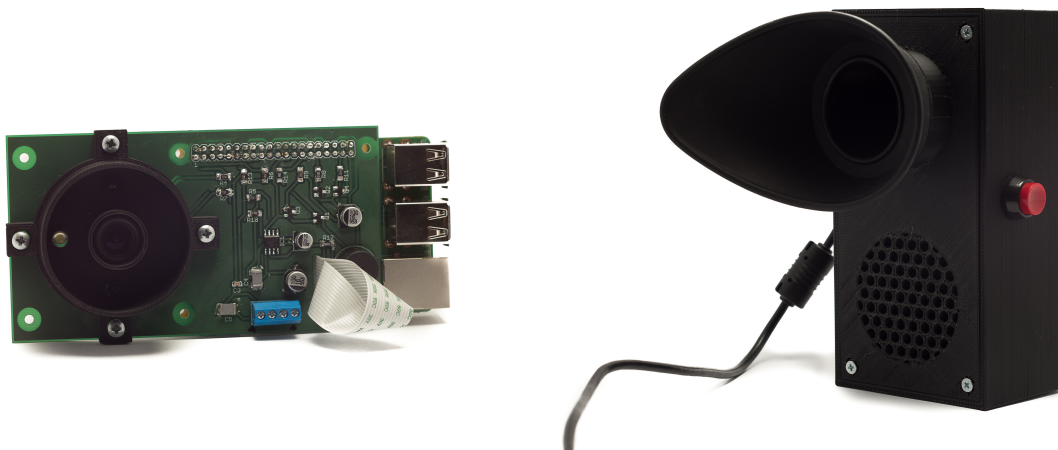
Testování třetího prototypu dynamického pupilometru probíhalo na stejné skupině 5 lidí jako v případě testování v sekci 4.6.1. Nový navigační systém se ukázal jako dobře pochopitelný a fungující pro participanty bez i s vadou zraku. Všechna provedená měření byla použitelná pro algoritmus analýzy videa (sekce 5.3). Problém ale byl s hlasitostí a srozumitelností hlasového výstupu. Použitý zesilovač TDA7233 nedokázal dostatečně hlasitě a přitom čistě zesílit instrukce a nebylo mu při měření příliš rozumět. U dalšího prototypu je potřeba se zaměřit na hlasový výstup.



Obrázek 4.17. Záběry z druhého prototypu dynamického pupilometru

4.8 Prototyp 4

Čtvrtý prototyp dynamického pupilometru se měl dle testování třetího pupilometru (sekce 4.7.1) zaměřit na vylepšení hlasového výstupu. V rámci vylepšení hlasového výstupu jsem vyměnil zesilovač TDA7233 za TI386, který by společně se $4\ \Omega$ reproduktorem, měl generovat dostatečně hlasitý a čistý zvuk. Co se týče přivedení zvuku k zesilovači jsem přeměroval zvukový výstup Raspberry Pi ze 3.5 mm JACKu, který je vidět na obrázku 4.16 třetího prototypu zapojený v pozadí směrem dolů, na 40 pinovou GPIO lištu, čímž se dále zmenšili rozměry pupilometru. Vzhledem k tomu, že již byla vyřešena otázka očnice, LED navigačního systému a zbýval pouze zesilovač, rozhodl jsem se plošný spoj pro čtvrtý prototyp nechat vyrobit profesionálně. To vyžadovalo plošný spoj znovu nakreslit v programu Eagle, protože v programu Fritzing se objevil bug, který znemožňoval korektně vyexportovat plošný spoj do podkladů pro výrobce. Výsledný plošný spoj z programu Eagle je vidět na obrázku 4.4.



a) profesionálně vyrobené PCB

b) 3D vytisknutý box

Obrázek 4.18. Čtvrtý prototyp dynamického pupilometru vytištěným boxem a profi plošným spojem

4.8.1 Výsledek testování prototypu 4

Poslední prototyp byl opět otestován na skupině lidí, kteří testovali třetí a druhý prototyp (sekce 4.7.1 a 4.6.1). Testování dopadlo dobře, hlasový výstup nového zesilovače byl srozumitelný a dostatečně hlasitý pro všechny participanty.



Obrázek 4.19. Záběry z čtvrtého prototypu dynamického pupilometru

4.9 Zdravotní normy pro osvit oka

Pokaždé, když jsem někomu vysvětloval myšlenku pupilometru, vyvstala velmi brzo otázka na bezpečnost pro zrak, proto jsem dohledal a provedl ověření výpočtem dle specifikací použitých infračervených diod. Pro výpočet maximální expozice oka pro časy menší než 1000 vteřin je výpočet závislý pouze na času expozice jak je uvedeno v dokumentu [13] a také dle české legislativy v [14]. Celková délka měření je maximálně 60 vteřin a vyzařovaná vlnová délka je v rozmezí 890 – 990nm.

$$(1) E_{IR} = 18000 \cdot t^{-0,75}, \text{ kde } t = 60 \text{ s a tedy}$$

$$\begin{aligned} E_{IR} &= 18000 \cdot 60^{-0,75} \\ &= 835 \text{ W m}^{-2} \end{aligned}$$

Tedy maximální energie osvitu je 835 W m^{-2} a je potřeba vypočítat jakou energii vyzařují dvě infračervené diody. Je potřeba převést zářivost mW sr^{-1} , která je uvedena ve specifikaci infračervené diody [15], na energii W m^{-2} jak je uvedeno v [16]. Pro to je potřeba znát vzdálenost infračervené diody v tubusu od oka, která je rovna $r = 0,04 \text{ m}$. Ze vzorce

$$(2) \begin{aligned} sr &= \frac{A}{r^2} \\ A &= sr \cdot r^2 \end{aligned}$$

dosadím

$$A = 1 \cdot 0,04^2 = 0,0016 \text{ m}^2$$

a nakonec výsledek i s převodem mW na W

$$E_{IR} = \frac{100}{0,0016} = 62,5 \text{ W m}^{-2}$$

Protože jsou infra červené diody dvě, je celková vyzařovaná energie rovna $E_{IR} = 125 \text{ W m}^{-2}$, což je necelá $\frac{1}{6}$ nejvyšší přípustné normy.

Dále je potřeba provést podobný výpočet výpočet pro bílou, zábleskovou diodu. Tato dioda svítí pouhou 0,1 vteřinu v rozsahu vlnové délky 400–700 a proto výpočet nejvyšší povolené hodnoty vypadá následovně.

$$(3) E_B = \frac{100}{t}, \text{ kde } t = 0,1 \text{ s a tedy}$$

$$E_B = 1000 \text{ W m}^{-2}$$

Zářivost bílých diod se obvykle udává v mcd a v případě diody L-53SWC-L*G je dle datasheetu [17] rovna až $I_v = 56000 \text{ mcd}$. Potřebujeme ji převést na mW sr^{-1} . K tomu je potřeba znát světelnou účinnost $K = \frac{I_v}{I_e}$, která dle specifikace [17] je rovna $K = 93 \text{ lm W}^{-1} = 93 \text{ mlmmW}^{-1}$.

$$(4) \begin{aligned} K &= \frac{I_v}{I_e} \\ I_e &= \frac{I_v}{K} \end{aligned}$$

$$I_e = \frac{56000}{93} = 602,15 \text{ mW sr}^{-1}$$

Bílá dioda je ve stejné vzdálenosti od oka, takže už stačí jen dosadit do vzorce.

$$E_B = \frac{602,15}{0,0016} = 438,84 \text{ W m}^{-2}$$

Opět vyšlo, že bílá dioda L-53SWC-L*G neporušuje nařízení vlády České republiky [14]. Výpočty pro obě diody je také nutné brát jako nejhorší možný případ. Energie s jakou diody svítí na oko se snižuje přímo úměrně s mírou vyosení diod vůči oku. V ose s okem se totiž vždy nachází kamera a jsou tak méně efektivní jak je vidět i na vyzářovacím diagramu v jejich specifikacích.

Kapitola 5

Vývoj software

Společně s vývojem HW bylo potřeba vyvinout i SW, který se stará o správný sled akcí měření a kontroluje správné přiložení očníce. Podle volby platformy Raspberry Pi, bylo poté zvolen i software, který se stará o práci s HW a analýzou obrazu.

5.1 Technologie

5.1.1 Raspbian

Raspbian je otevřený operační systém odvozený od Linuxové distribuce Debian. Obsahuje optimalizace na míru platformě Raspberry Pi a hlavně jejímu procesoru. Součástí je i repozitář předkompilovaných balíčků, mezi které patří i software a knihovny zmíněné níže.

5.1.2 Python

Python je programovací jazyk, který v roce koncem 80. let naprogramoval holandský programátor Guido van Rossum. Poslední dobou bývá doporučován jako první jazyk pro začínající programátory a to je i důvod proč se objevil jako hlavní jazyk na edukační platformě Raspberry Pi. Python umožňuje kombinovat různá paradigmatata programování včetně imperativního, přes objektové až po funkcionální. [18] Tato vlastnost se samozřejmě hodí i při výuce. Pro použití v dynamickém pupilometru používám starší, ale stále aktivně podporovanou verzi 2, pro kterou existuje velké množství knihoven, které jednoduše řeší množství problémů.

5.1.3 OpenCV

OpenCV je knihovna, která je zaměřena na počítačové vidění, obsahuje tisíce algoritmů pro zpracování obrazu. [19] Je napsána v jazyce C a C++, ale obsahuje wrapper pro řadu jiných jazyků včetně Pythonu. Používá se na velkém množství platform, včetně mobilních a Linuxu, který běží na Raspberry Pi.

5.1.4 PiCamera

PiCamera je knihovna v jazyce Python (viz 5.1.2), která umožňuje jednoduše pořizovat snímky a videa z připojené Raspberry Pi kamery. Pro práci s kamerou stačí inicializovat objekt kamery, čímž se kamera fyzicky zapne, a přes jeho metody je možné měnit nastavení expozice, spustit a ukončit záznam videa do souboru či proměnné. [20]

5.2 Software pro záznam měření

Software pro záznam měření je napsán v jazyce Python a je pomocí skriptu `rc.local` spuštěn při startu operačního systému. Je uložen pod názvem `record_pup.py`.

První částí je nekonečná smyčka, která kontroluje zda a jak dlouho bylo stisknuto červené tlačítko na boku pupilometru. Zároveň vytváří také debounce filtr spínače. Implementace je v této blokující metodě:

```
def switch_on_duration():
    switchState = GPIO.input(SWITCH_PIN)
    switchOnCount = 0
    stateCheckingInterval = 0.1

    while(switchState == False):
        switchOnCount = switchOnCount + 1
        time.sleep(stateCheckingInterval)
        switchState = GPIO.input(SWITCH_PIN)

    return stateCheckingInterval*switchOnCount
```

Po krátkém stisku tlačítka je spuštěn proces měření, který je popsán na diagramu obrázku 5.1.

■ 5.2.1 Detekce tmy

Správně přiložená očníce by měla propouštět minimum světla, proto detekce tmy probíhá v následujících dvou krocích:

1. zesílení expozice na maximum
2. počet pixelů s jasnem vyšším než zadaný práh

Zesílení expozice na maximum použité kamerky Waveshare (obrázek 4.13) docílíme následujícím kódem.

```
camera.iso = 800
camera.shutter_speed = 100000 # in microseconds, 1/10s
```

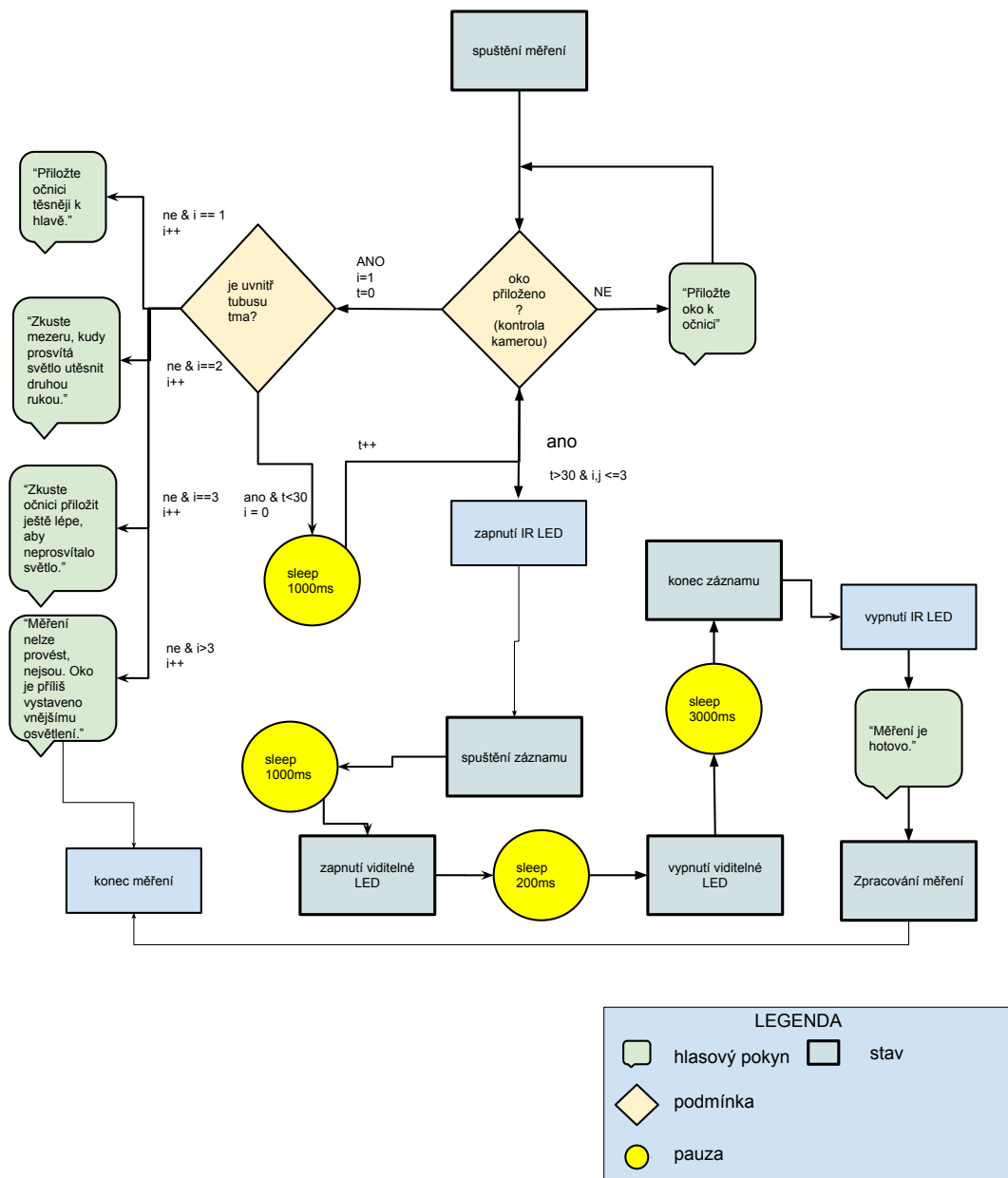
a poté převedeme obraz na černobílý a spočteme počet pixelů jasnějších než daný práh.

```
gray_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
hist_img = cv2.calcHist([gray_image], [0], None, [256], [0, 255])
numberOfLightPixels = np.sum(
    hist_img[DARK_CHECK_BRIGHT_PIXEL_COUNT_THRESHOLD:255])
```

Podle výsledku je poté spuštěna hlasová navigace, která žádá pacienta, aby si očníci lépe přiložil.

■ 5.2.2 Detekce přítomnosti oka

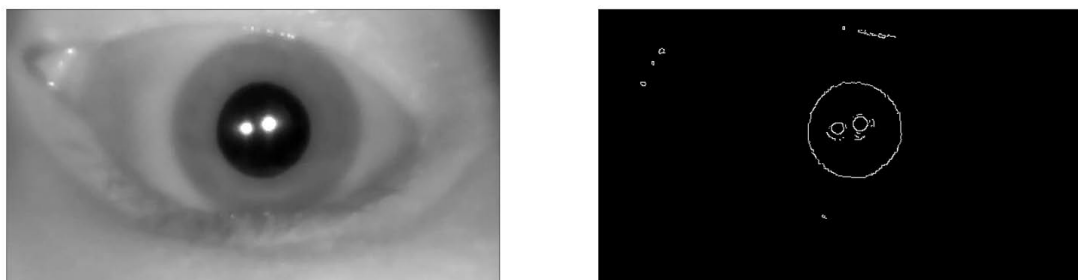
Jak je vidět na obrázku 4.19 povedeného měření ze čtvrtého prototypu, a na obrázku měření z prvního prototypu 4.12, pokud je správně přiloženo oko, vždy je vidět odlesk dle počtu infračervených diod. Tento odlesk je má většinou nejvyšší jasovou hodnotu na obrázku a díky tomu, že jsou dva, můžeme zkoumat i vzdálenost mezi nimi. Hledám segmenty, které mají jasovou složku větší než práh, který je blízko maximum. Poté spočtu vzdálenost mezi dvěma segmenty, která nesmí být větší než maximální naměřený průměr oka, který je 35 *px*.



Obrázek 5.1. Diagram procesu měření

5.2.3 Nahrávka měření

Po uplynutí stanovené doby fáze tmy a pokud během ní byl detekována přítomnost oka, je dle diagramu na obrázku 5.1, zahájen záznam měření. Jak je vidět z diagramu a z výsledné analýzy videa 6.8. Nahrávání má fázi před zábleskem, kdy je zaznamenán největší průměr zornice, záblesk a fázi po záblesku, kdy se zornice pomalu vrací na původní průměr. Měření je pořizováno ve formátu H264, ve kterém je umožněno pořizovat 42 snímků za vteřinu v rozlišení 1296×972 px. Video je ukládáno do RAM disku, aby nebyla opotřebována microSD karta, odkud se po analýze měření smaže.



a) originál

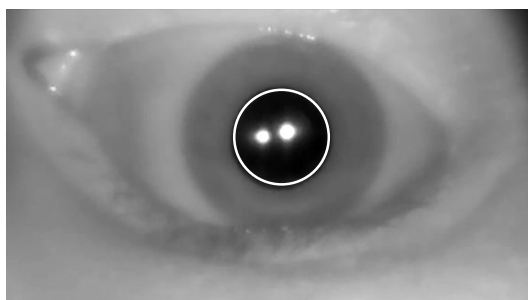
b) po aplikaci Canny detektoru

Obrázek 5.2. Ukázka práce canny hranového detektoru

5.3 Software pro analýzu měření

Jak bylo řečeno v kapitole 3, zornice lidí má kruhový tvar. Je potřeba tedy najít algoritmus na detekci kruhu. Knihovna OpenCV prozatím obsahuje jednu funkci na hledání kružnice, které je realizována pomocí Houghovy transformace.

Nejprve zavolám funkci `blur`, abych snížil počet falešných hranových bodů, které jsou způsobeny šumem ve videu. Poté se zavolá funkce `HoughCircle`, která prvně použije Canny hranový detektor k extrahování hran. Výhoda tohoto detektoru spočívá v tom, že dostaneme pouze jedno pixelové hrany, což se hodí pro obrázky s vysokým rozlišením, kde hrany nejsou tak ostré a jsou rozprostřeny přes gradient. Původní a výsledný obrázek lze vidět na obrázku 5.2. [19] Poté je aplikována Houghova transformace, kde hledáme v trojrozměrném prostoru (x_c, y_c, r) kde x_c a y_c jsou souřadnice středu kružnice a r je její poloměr. Pro snížení počtu řešení takové rovnice jsou zadány omezení, která taková kružnice musí splňovat. Lze omezen minimální a maximální poloměr a vzdálenost od jiné kružnice. Maximální poloměr zornice pro detekci je $17 px$ a minimální $8 px$. Funkce `HoughCircle` poté vrací seznam kružnic, které se protínají s detekovanými hranovými body v počtu případů, který je větší než vnitřně stanovená hranice. Po experimentování s prahy nastavení cannyho hranového filtru se mi povedlo ve většině případů najít pouze kružnici reprezentující zornici.

Obrázek 5.3. Detekovaná zornice pomocí funkce `HoughCircle`

Nakonec je seznam průměrů kružnic nalezených na všech snímcích uložen do textového souboru. Textové soubory se pak stahují z microSD karty do počítače.

Kapitola 6

Testování

Ihned po vytvoření prvního prototypu jsem zjistil, že bude potřeba prototypy iterativně testovat z hlediska funkčnosti navigačního systému a kvality pořízených záznamů již ve fázi tvorby hardware. Výsledky tohoto testování jsou uvedeny v kapitole 4. V této kapitole se zabývám testováním dynamického pupilometru jako funkčního celku. Jedná se tedy o opětovné testování kvality pořízených záznamů, logika pořizování měření, srozumitelnost hlasové navigace, schopnost rozpoznat přítomnost či nepřítomnost oka před záznamem měření a nakonec jsou porovnávány verifikovány i výsledky rozpoznávacího algoritmu vůči referenční křivce.

6.1 Metodika testování

Pro testování čtvrtého prototypu HW a SW jsem zvolil následující metodiku. Dle zadání diplomové práce (příloha A) jsem provedl test na 10, z hlediska afektivních poruch zdravých lidí, ale z hlediska očních chorob byli zahrnuti tři lidé, kteří trpěli krátkozrakostí, dva trpěli dalekozrakostí. Prvně byli participanti seznámeni s myšlenkou dynamického pupilometru, aby věděli co mají čekat. Bylo jim tedy řečeno, že měření má 3 fáze - tma, záblesk a opět tma. Dále byli seznámeni s principem navigačního systému, tedy že nesmějí vidět ani jednu ze čtyř navigačních diod a případně pohybovat pupilometrem na hlavě tak, aby byli všechny zakryty. Dále se dozvěděli, že mají následovat pokyny hlasového navigace a nakonec, že měření se spouští červeným tlačítkem na boku.

6.2 Referenční měření

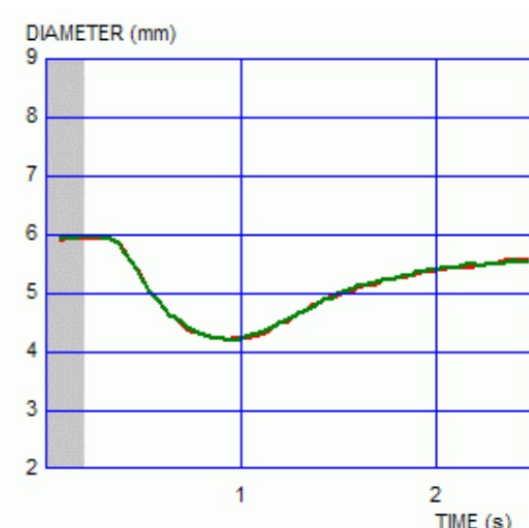
Pro verifikaci správné funkčnosti software pro analýzu měření 5.3 jsem si vypůjčil, graf průběhu pupilárního reflexu od renomovaného francouzského výrobce dynamického pupilometru Metrovision (na obrázku 6.1).

6.3 Participant 1

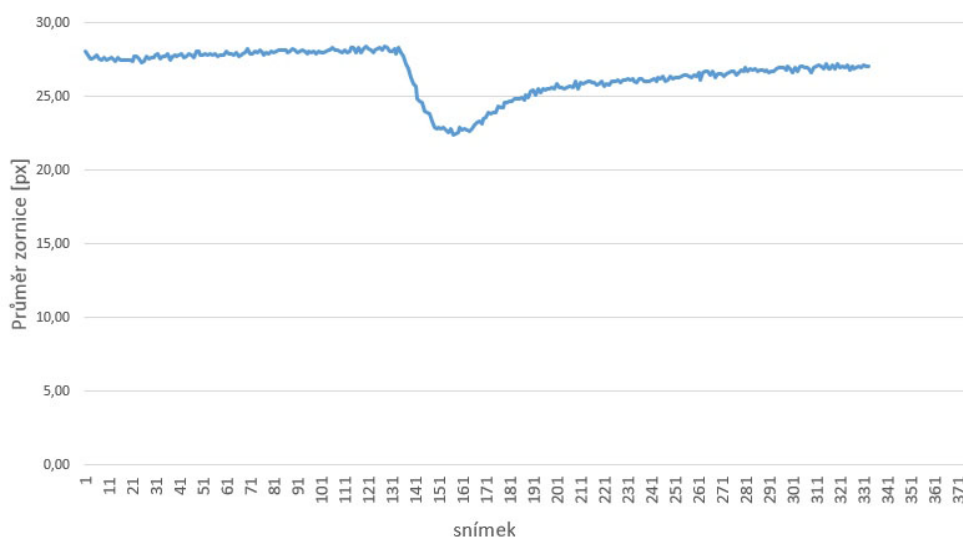
Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant neměl vadu zraku. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.2 se podobá referenční křivce 6.1. Je vidět mírné zašumění, které lze odstranit mediánovým filtrem s oknem o velikosti několika snímků.

6.4 Participant 2

Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant neměl vadu zraku. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.3 se podobá referenční křivce 6.1. Na začátku je vidět, že chvíli trvalo než se algoritmus



Obrázek 6.1. Referenční průběh pupilárního reflexu, který byl naměřen pupilometrem Metrovision. Zdroj [21]

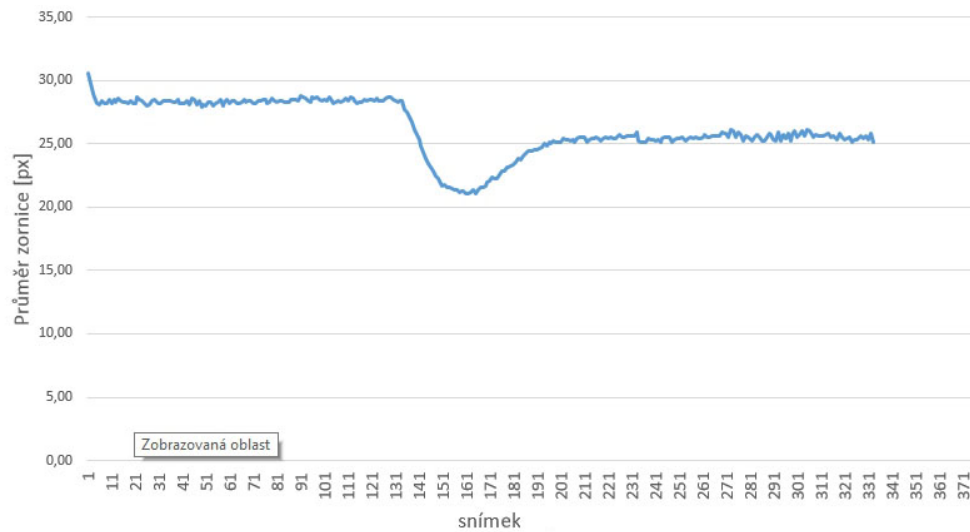


Obrázek 6.2. Průběh zornicového reflexu 1. participanta

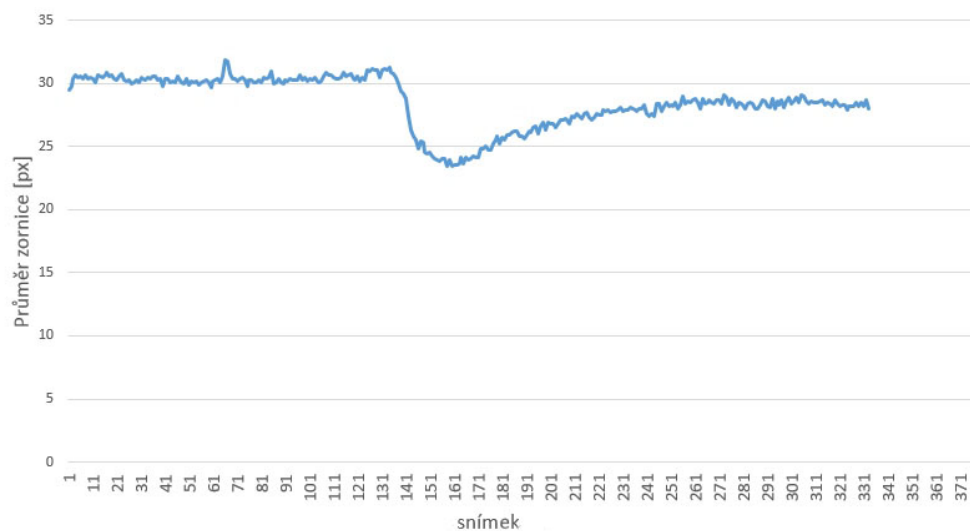
správně chytil zornice, případně je možné, že pacient zrovna dokončil mrknutí. Výsledná analýza je o trochu více zašuměná než v případě prvního participanta, ale stále se jedná o použitelnou analýzu.

6.5 Participant 3

Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant neměl vadu zraku. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.4 se podobá referenční křivce 6.1. Na začátku je vidět, že chvíli trvalo než se algoritmus správně chytil zornice, případně je možné, že pacient zrovna dokončil mrknutí. Výsledná analýza je o trochu více zašuměná než v případě prvního participanta, ale stále se jedná o použitelnou analýzu.



Obrázek 6.3. Průběh zornicového reflexu 2. participanta



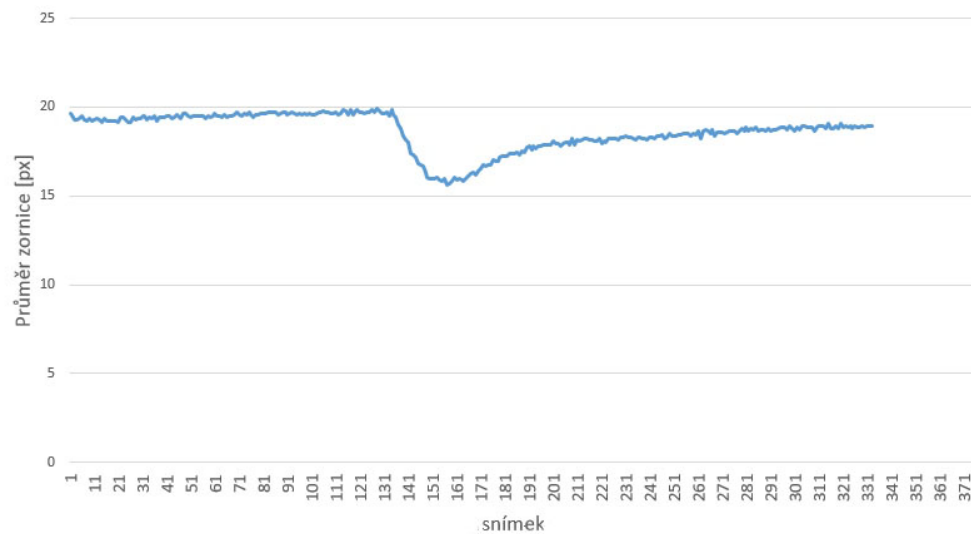
Obrázek 6.4. Průběh zornicového reflexu 3. participanta

6.6 Participant 4

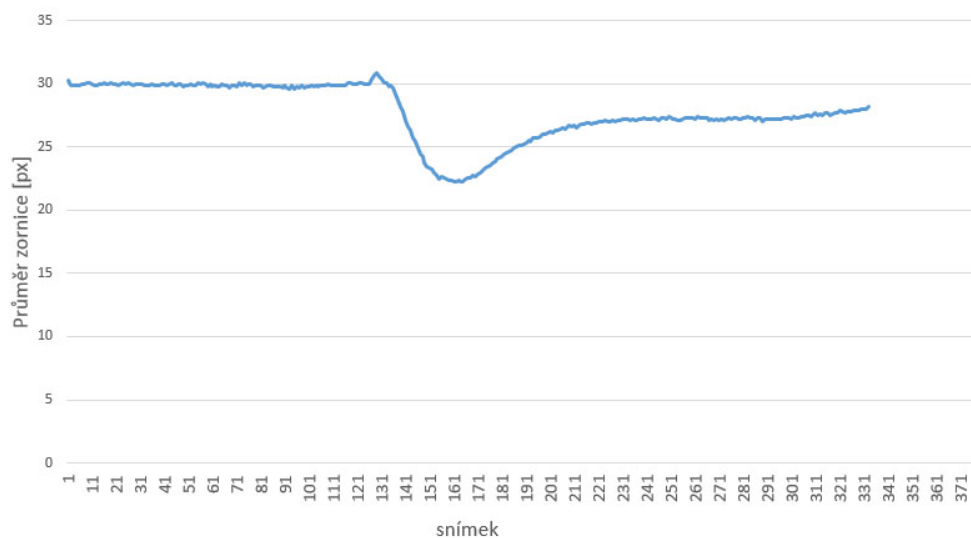
Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant neměl vadu zraku. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.5 se podobá referenční křivce 6.1. Opět analýza s mírným šumem, který nepůsobí potíže.

6.7 Participant 5

Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant neměl vadu zraku. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.6 se podobá referenční křivce 6.1. Analýza proběhla téměř bez šumu, těsně před nástupem miózy se zdá, že proběhla úleková reakce mírný rozšířením zornice.



Obrázek 6.5. Průběh zornicového reflexu 4. participanta



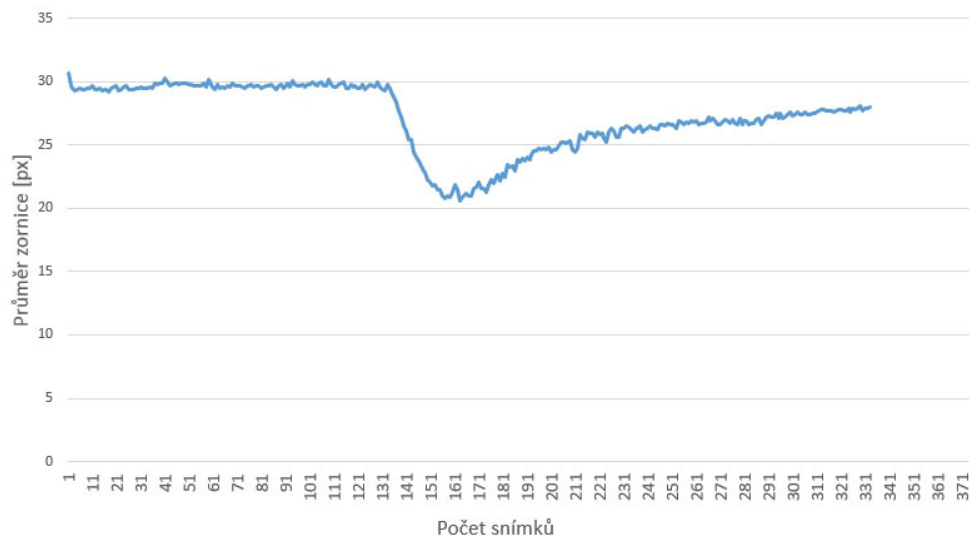
Obrázek 6.6. Průběh zornicového reflexu 5. participanta

6.8 Participant 6

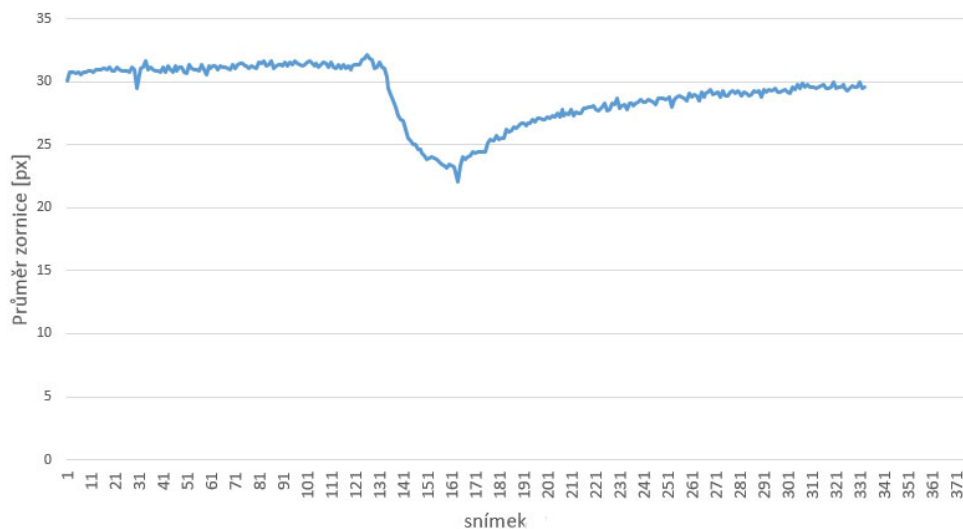
Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant trpěl krátkozrakostí. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.7 se podobá referenční křivce 6.1. Analýza je oproti 6.7 mnohem více zašuměná, ale stále lze jasně vyčíst parametry zornicového reflexu.

6.9 Participant 7

Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant trpěl krátkozrakostí. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.8 se podobá referenční křivce 6.1. Analýza je zhruba stejně zašuměná jako v případě předchozího participanta, tedy čitelná.



Obrázek 6.7. Průběh zornicového reflexu 6. participanta



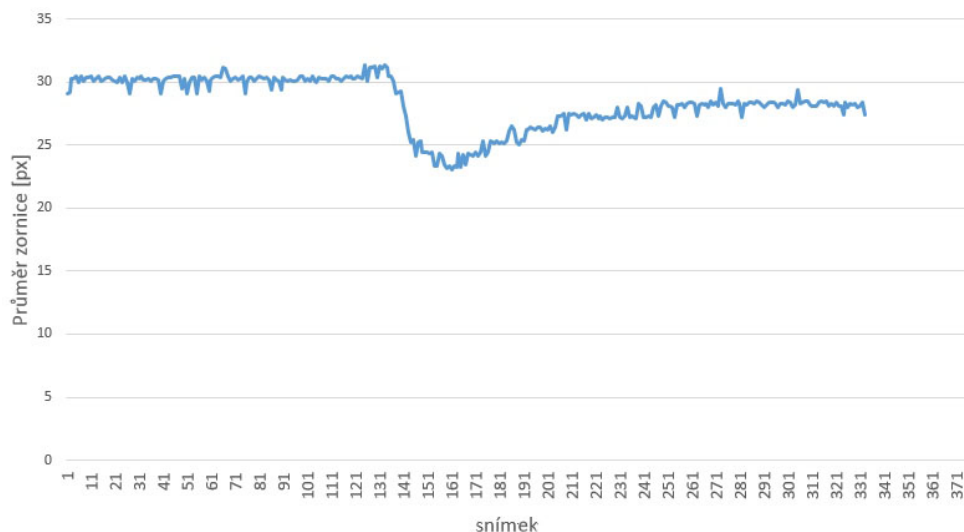
Obrázek 6.8. Průběh zornicového reflexu 7. participanta

6.10 Participant 8

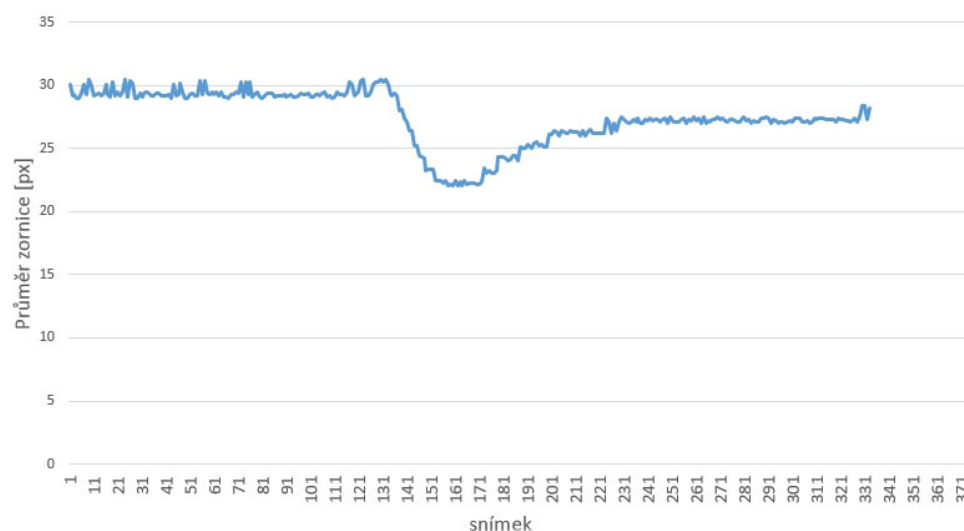
Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant trpěl krátkozrakostí. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.9 se podobá referenční křivce 6.1. Analýza je společně s posledními dvěma participanty poměrně dost zašuměná, ale lze jasně vidět průběh smrštění zornice. Zašumění je v celém průběhu analýzy.

6.11 Participant 9

Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant trpěl dalekozrakostí. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.10 se podobá referenční křivce 6.1. Analýza je zpočátku poměrně dost zašuměná, ale lze jasně vidět průběh smrštění zornice. Ve fázi po záblesku se úroveň šumu zmenšuje.



Obrázek 6.9. Průběh zornicového reflexu 8. participanta



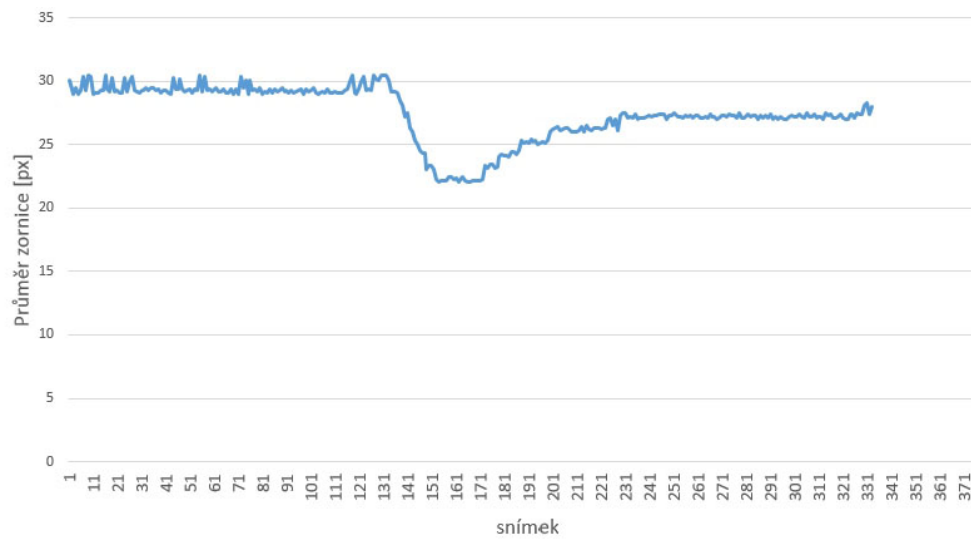
Obrázek 6.10. Průběh zornicového reflexu 9. participanta

6.12 Participant 10

Participant bez problému pochopil mnou sdělené instrukce, participant trpěl dalekozrakostí. Hlasový navigátor pro něj byl srozumitelný a výsledná analýza průběhu 6.11 se podobá referenční křivce 6.1. Analýza je opět zpočátku poměrně dost zašuměná, ale lze jasně vidět průběh smrštění zornice a ve fázi po záblesku se úroveň šumu zmenšuje.

6.13 Vyhodnocení testu

Testování dynamického pupilometru proběhlo úspěšně. Systém čtyř červených navigačních diod se osvědčil a všichni participanté byli schopni s jeho pomocí správně přiložit pupilometr. Participant 6.7 dosáhl nejkvalitnějšího výsledku a to nejspíše z důvodu, že nechal celou dobu měření hodně otevřené oko, které pak nikde nezakrývalo zornici a nezpůsobovalo šum. Participanté s vadami zraku měli více zašuměné výsledné analýzy



Obrázek 6.11. Průběh zornicového reflexu 10. participanta

než participantů bez vad zraku. Hlasové navigaci všichni rozuměli a to jak z obsahové stránky, tak i zvukovému podání.

Kapitola 7

Závěr

Na závěr je potřeba zhodnotit stav dynamického pupilometru, který byl vytvořen v rámci této diplomové práce. Již první prototypy byly schopny pořizovat kvalitní záběry pupilárního reflexu, ale pouze za předpokladu, že měřená osoba byla schopna pupilometr správně přiložit. Participantů měli pupilometr často ke tváři přiložen nakřivo a z naměřených dat nebylo možné zrekonstruovat pupilárního reflexu. Pomocí iterativního prototypování a testování prototypu na různých lidech, včetně těch s nejvíce rozšířenými vadami zraku (krátkozrakost, dalekozrakost) se podařilo vyvinout zařízení, které samo hlasově naviguje měřenou osobou přes všechny fáze měření, dokáže upozornit pacienta na špatné přiložení v průběhu měření a zkontroluje nápravu takové chyby. Nakonec zanalyzuje výsledek měření a uloží výsledný tvar křivky. Oproti komerčně dostupným dynamickým pupilometrům, se jedná o řešení za zlomek ceny z hlediska nákladů. Navíc oproti nim umožňuje operovat samoobslužně a je dostatečně skladný a přenosný, aby jej pacienti mohli mít doma. Do budoucna bych se tedy chtěl podílet na výrobě série většího počtu kusů, kde samozřejmě bude asi potřeba spoustu věcí změnit zejména z hlediska plastových dílů, protože technologie výroby plastů pomocí vstříkávání vyžaduje jinak tvarované modely včetně míst, pro rozložení pnutí při ochlazování jak bylo zmíněné v sekci 4.3.4 z hlediska vlastností plastu ABS. Mezitím co se pupilometr vyvíjel proběhly nové pokroky i na platformě Raspberry Pi, která nově nabízí Raspberry Pi verze Zero. Raspberry Pi Zero zabírá zhruba 30% plochy původních Raspberry Pi, ale přináší nové výzvy z důvodu chybějícího rozhraní ethernet, které se využívá při vývoji pro vzdálený přístup do pupilometru. Další novinkou je Raspberry Pi kamera 2, která obsahuje podstatně vylepšený snímač s technologií back-side illuminated, který značně zvyšuje citlivost snímače na světlo, díky přesunutí vodivých cest na zadní stranu snímače. Zatím ale není na trhu odvozená kamera, která by měla na sobě šroubovatelný objektiv jako kamera Waveshare (obrázek 4.13).

Příloha A

Zadání práce

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra počítačové grafiky a interakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jan Lukeš**

Studijní program: Otevřená informatika
Obor: Softwarové inženýrství

Název tématu: **Dynamická pupilometrie a její využití pro detekci relapsu afektivních poruch**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou dynamické pupilometrie a její využití pro detekci relapsu afektivních poruch.
2. Naimplementujte aplikaci pro vyhodnocení parametrů pupilárního reflexu.
3. Výslednou aplikaci otestujte a validujte na vzorku 10 zdravých uživatelů.

Seznam odborné literatury:


- [1] T Partala, V Surakka, Pupil size variation as an indication of affective processing, International journal of human-computer studies, 2003
[2] Wioletta Nowak, Anna Żarowska, Elżbieta Szul-Pietrzak¹ and Marta Misiuk, System and measurement method for binocular pupillometry to study pupil size variability, BioMedical Engineering OnLine 2014, 13:69

Vedoucí: Ing. Daniel Novák, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016


prof. Ing. Jiří Žára, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 24. 3. 2015

Příloha B

Obsah CD

```
| dp.pdf
|
\---src
  +---3d tisk
  |     box.scad
  |     honeycomb.scad
  |     roundCornersCube.scad
  |     rpi_camera_box.scad
  |
  +---dp
  | | afektivni_poruchy.tex
  | | akomodace_oka.pdf_tex
  | | anatomie_pupilarniho_reflexu.tex
  | | ctulogo-blue.pdf
  | | ctulogo.pdf
  | | ctustyle.tex
  | | diplomka.lbr
  | | diplomka.ref
  | | diplomka.tex
  | | hw.tex
  | | literatura.bib
  | | opmac-bib-iso690.tex
  | | opmac-bib-simple.tex
  | | opmac-bib.tex
  | | opmac-d.tex
  | | opmac-u.tex
  | | opmac.tex
  | | pdfuni.tex
  | | prilohy.tex
  | | sw.tex
  | | testovani.tex
  | | texput.log
  | | uvod.tex
  | | zaver.tex
  |
  +---ctustyle
  | | cmelak1.jpg
  | | ctulogo-blue.pdf
  | | ctulogo.pdf
  | | ctuslides.tex
  | | ctustyle-doc.log
  | | ctustyle-doc.pdf
  | | ctustyle-doc.ref
```

```
| | ctustyle-doc.tex
| | ctustyle-ts.tex
| | ctustyle.tex
| | example-ts.tex
| | mybase.bbl
| | mybase.bib
| | pdfuni.tex
| | popis.tex
| | prilohy.tex
| | q.log
| | slidy.pdf
| | slidy.tex
| | uvod.tex
| |
| \---pic
| 2_nepov.jpg
| 2_pov.jpg
| 3_pov.jpg
| 4_pov.jpg
| akomodace_oka.pdf
| Akomodace_oka.svg
| bscap0000.jpg
| bscap0001.jpg
| canny_filter.pdf
| detec_circle.pdf
| diagram_mereni.pdf
| dioptr_stara_kamera.jpg
| duplicator_i3.jpg
| duplicator_i3.pdf
| kamera_s_objektivem.jpg
| nexus_kamera_dead.jpg
| ocnice_kamerar.pdf
| ocnice_mala.jpg
| p1.jpg
| p10.jpg
| p2.jpg
| p3.jpg
| p4.jpg
| p5.jpg
| p6.jpg
| p7.jpg
| p8.jpg
| p9.jpg
| podpis.jpg
| prahovani.pdf
| prototyp_4_diody.jpg
| prototyp_4_diody_infra_sviti.jpg
| prototyp_4_diody_sviti.jpg
| prototyp_ctvrty_box.jpg
| prototyp_ctvrty_plosnak.jpg
| prototyp_ctvrty_plosnak_eagle.jpg
| prototyp_kruhy.jpg
| prototyp_treti_plosnak_fritzing.jpg
```

```
|      prvni_kamera.jpg
|      prvni_prototyp.jpg
|      raspberry_pi_2.jpg
|      raspberry_pi_2_s_kamerou.jpg
|      rpi_pinout.pdf
|      Scan0003.JPG
|      schematic_diagram_of_the_human_eye_cs.pdf
|      screen_craftware.jpg
|      screen_openscad.jpg
|      srovnani_profi.jpg
|      tubus_maly.jpg
|      vyska_vrstvy.pdf
|      zadani.pdf
|      zadani.tiff
|
| \---pupilometr
|      record_pup.py
```

Literatura

- [1] Cyril HÖSCHL, Jaromír ŠVESTKA a Jan LIBIGER. *Psychiatrie*. 1. vydání. Praha: Tigris, 2002. ISBN 8090013015.
- [2] Wikipedia. *Afektivní poruchy*.
https://cs.wikipedia.org/wiki/Afektivn%C3%AD_poruchy.
- [3] *Nervus oculomotorius*.
http://www.wikiskripta.eu/index.php/Nervus_oculomotorius.
- [4] Filip Mareš. *Akomodace oka - zobrazení obrazu na sítnici*.
http://www.wikiskripta.eu/index.php/Soubor:Akomodace_oka.svg.
- [5] Tchoř. *Řez oka - žlutá skvrna dole*.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/Schematic_diagram_of_the_human_eye_cs.svg.
- [6] Giselle L Ferrari, Jefferson LB Marques, Rajiv A Gandhi, Simon R Heller a Fábio K Schneider. *Using dynamic pupillometry as a simple screening tool to detect autonomic neuropathy in patients with diabetes*.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2893537/>.
- [7] Raspberry Pi Foundation. *What is a Raspberry Pi*.
<https://www.raspberrypi.org/about/>.
- [8] Cygig. *Nozzle diameter and layer height in 3D Printer*.
http://www.cygig.com/2013_08_01_archive.html.
- [9] Yutaka Tokiwa. *Biodegradability of Plastics*.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2769161/>.
- [10] Wikipedia.org. *Glass transition*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Glass_transition.
- [11] Angus Deveson. *2016 Slicer Throw Down Part 2 - The Results!*
<https://youtu.be/GHnbkRm9IGg>.
- [12] Pragoboard. *Ceník POOL Servis*.
http://www.pragoboard.cz/download/cenik_pool.pdf.
- [13] Intersil. *Eye safety for proximity sensing using infrared light-emitting diodes*.
<http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an17/an1737.pdf>.
- [14] *Nariadení vlády č. 291/2015 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením*.
- [15] Vishay. *High Power Infrared Emitting Diode, 950 nm, GaAlAs/GaAs*.
<http://www.ges.cz/sheets/5/5100186.pdf>.
- [16] Paul Barna. *Fundamentals of the Infrared Physical Layer*.
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00243a.pdf>.
- [17] Seoul Semiconductor. *Specification LW514*.
<http://www.ges.cz/sheets/1/lw514.pdf>.
- [18] Wikipedia. *Python (programming language)*.
[https://en.wikipedia.org/wiki/Python_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language)).

-
- [19] OpenCV. *Dokumentace OpenCV*.
<http://docs.opencv.org/>.
- [20] PiCamera. *Dokumentace PiCamera*.
<https://picamera.readthedocs.io/>.
- [21] Metrovision. *Vision Monitor Pupillometry*.
http://www.metrovision.fr/pdf/PVM-PU_US.pdf.