FAKULTA ZDRAVOTNICKÝCH STUDIÍ TUL

Bakalářská práce

Biofyzikální limity použití metody pupilometrie u akutních neurologických stavů

Studijní program: B0914P360007 Biomedicínská technika
Autor práce: **Adam Ebrahimi**
Vedoucí práce: prof. Ing. Aleš Richter, CSc.
Fakulta zdravotnických studií

Liberec 2024

Zadání bakalářské práce

Biofyzikální limity použití metody pupilometrie u akutních neurologických stavů

Jméno a příjmení:	**Adam Ebrahimi**
Osobní číslo:	D22000129
Studijní program:	B0914P360007 Biomedicínská technika
Zadávající katedra:	Fakulta zdravotnických studií
Akademický rok:	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Cíle a výstupy práce:

1. Porovnání metod používaných pro testování pupilárního reflexu u různých neurologických stavů.
2. Návrh vlastní metody pupilometrie, za použití kamery a následného zpracování obrazu.
3. Výsledkem práce bude doporučení a odůvodnění ideální metody a přístroje pro klinickou praxi.

Teoretická východiska:

Pupilární (zornicový) reflex, také nazývaný fotomorický reflex, způsobuje akomodaci zornice vlivem intenzity okolního světla. Vyšetření pupilárního reflexu patří mezi základní neurologická vyšetření. Vyšetření se provádí buď konvenčně za použití baterky jakožto zdroje světla, kterou se prosvěcují oči a sleduje se změna velikosti zornice. Tato metoda nese sebou značnou míru subjektivity, jelikož výsledek je určen pouze pozorováním. Další, poměrně novou variantou je použití pupilometru, který je schopný za pomocí infračervené kamery a výpočetní techniky určit poměrně přesná data použitelná pro zhodnocení neurologického stavu pacienta.

Metody práce:

Využít zpracování obrazu pro vyhodnocení záznamu zornicového reflexu.
Provést měření kvality zornicového reflexu: pupilometrem, baterkou a za pomoci studentovi navržené metody.
Porovnání užitných vlastností jednotlivých metod.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

Achamallah, Natalie et al. 2021. Pupillary Light Reflex Is Not Abolished by Epinephrine and Atropine Given During Advanced Cardiac Life Support in Patients Who Achieve Return of Spontaneous Circulation. J Intensive Care Med 36, 459–465. https://doi.org/10.1177/0885066620906802
ČÍHÁK, Radomír. 2016. Anatomie 3. 3.vyd. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-5636-3.
Emelifeonwu, John A. et al. 2018. Saved by the Pupillometer! – A role for pupillometry in the acute assessment of patients with traumatic brain injuries? Brain Injury 32, 675–677. https://doi.org/10.1080/02699052.2018.1429021
Godau, Jana et al. 2022. Automated Pupillometry for Assessment of Treatment Success in Nonconvulsive Status Epilepticus. Neurocrit Care 36, 148–156. https://doi.org/10.1007/s12028-021-01273-6
McNett, Molly et al. 2017. Correlations Between Hourly Pupillometer Readings and Intracranial Pressure Values. Journal of Neuroscience Nursing 49, 229–234. https://doi.org/10.1097/JNN.0000000000000290
Nozaki, Kohei et al. 2019. Pupillary Light Reflex as a New Prognostic Marker in Patients With Heart Failure. Journal of Cardiac Failure 25, 156–163. https://doi.org/10.1016/j.cardfail.2018.09.009
PALEČKOVÁ, Alena. *Praktické problémy pupilometrie.* Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnika, Katedra kybernetiky. Vedoucí práce Ing. Vratislav Fabia?n, Ph.D.
Seidl, Z., 2015. Neurologie pro studium i praxi, 2., přeprac. a dopl. vyd. ed. Grada, Praha.
Romagnosi, Federico et al. 2022. Neurological Pupil Index for the Early Prediction of Outcome in Severe Acute Brain Injury Patients. Brain Sciences 12, 609. https://doi.org/10.3390/brainsci12050609
Sharma, Sourabh et al. 2016. Factors influencing the pupillary light reflex in healthy individuals. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 254, 1353–1359. https://doi.org/10.1007/s00417-016-3311-4

Vedoucí práce: prof. Ing. Aleš Richter, CSc.
Fakulta zdravotnických studií

Datum zadání práce: 10. července 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2024

L.S.

prof. MUDr. Karel Cvachovec, CSc., MBA
děkan

doc. Ing. Daniel Jirák, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 30. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

29. dubna 2024 Adam Ebrahimi

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu prof. Ing. Aleši Richterovi, CSc. za vedení této bakalářské práce. Jeho odborné rady a věcné připomínky mi byly velkým přínosem. Dále bych chtěl poděkovat paní Ing. Darině Liederhausové, Ph.D. za pomoc, asistenci a cenné rady během návrhu vlastní pupilometrické metody a za poskytnutí nástrojů a prostoru pro její realizaci.

ANOTACE

Biofyzikální limity použití metody pupilometrie u akutních neurologických stavů

Práce zkoumá pupilometrické vyšetření a její význam při diagnostice u akutních neurologických stavů. V teoretické části práce se rozebírá viditelné a infračervené elektromagnetické vlnění. Teoretická část zaměřuje na anatomii zrakového ústrojí a nervových drah zapojených do pupilomotorického reflexu. Končí vysvětlením významu tohoto reflexu jakožto nástroje pro diagnostiku a vysvětlením principu infračervené pupilometrie. V praktické části je představen návrh pupilometrické metody za použití digitální kamery a následného vyhodnocení záznamu pomocí zpracování obrazu. Práce porovnává vyšetření pomocí infračerveného automatizovaného pupilometru, studentovi metody a pomocí manuální kvalitativní metody za použití svítilny. Poslední část práce slouží jako doporučení a odůvodnění ideální metody pro neurologii.

Klíčová slova: pupilometrie, vyšetření zornic, neurologie, zpracování obrazu, matlab

ANNOTATION

Biophysical limits of pupillometry in acute neurological conditions

This thesis deals with pupillometric examination and its importance in the diagnosis of acute neurological conditions. The theoretical part of the thesis discusses visible and infrared electromagnetic waves. Furthermore, the theoretical part focuses on the anatomy of the visual system and the neural pathways involved in the pupillomotor reflex. The theoretical part ends with an explanation of the importance of this reflex as a diagnostic tool and an explanation of the principle of infrared pupillometry. The practical part presents the student's design of the pupillometry method using a digital camera and the subsequent evaluation of the recording by image processing. The thesis also compares the examination using an infrared automated pupillometer, the student's method and a manual qualitative method using a flashlight. The last part of the thesis serves as a recommendation and justification of the ideal method for neurology.

Keywords: pupillometry, pupil examination, neurology, image processing, matlab

Obsah

Seznam symbolů a zkratek 11

1 Úvod 12

2 Teoretická část 13

2.1.1 Elektromagnetické vlnění 13

2.1.2 Viditelné světlo 14

2.1.3 Infračervené záření 14

2.2 Anatomie zrakového ústrojí 14

Duhovka 16

Zornice 16

Sítnice 16

Čočka 17

2.2.1 Přídatné orgány oka 18

2.2.2 Zraková dráha a zrakové centrum 18

2.2.3 Cévní zásobení oka 19

2.3 Pupilomotorický reflex 20

2.3.1 Aferentní část reflexního oblouku 21

2.3.2 Parasympatická eference pro svěrač zornice 21

2.3.3 Sympatická eference pro rozvěrač zornice 22

2.3.4 Dráha pupilární reakce při konvergenci 22

2.3.5 Dráha dilatačního reflexu u psychosenzorických podnětů 22

2.3.6 ipRGC gangliové buňky 23

2.4 Vyšetření zornic pohledem 23

2.5 Infračervená pupilometrie 24

3 Výzkumná část 25

3.1 Cíle 25
3.2 Předpoklady experimentu 26
3.3 Způsob využití programu Matlab pro pupilometrii 29
3.3.1 Převod na šedotonový obraz 29
3.3.2 Filtrování obrazu pomocí mediánového filtru 30
3.3.3 Prahování zornice 30
3.3.4 Vyplnění mezer binárního obrazu 31
3.3.5 Analýza spojitých oblastí binárního obrazu 32
3.3.6 Přepočet na milimetry 32
3.4 Měření pomocí studentovi metody 33
3.5 Pupilometr Neuroptics NPI-200 35
3.5.1 Data získaná přístrojem 36
3.5.2 Neurological pupillary index 36
3.5.3 NPi jako možná indikace vývoje stavu pacienta 37
3.6 Měření pomocí pupilometru NPI-200 39
3.6.1 Zhodnocení měření pomocí NPI-200 42
3.7 Měření kvalitativní metodou za pomocí svítilny 43
3.7.1 Zhodnocení měření za pomocí svítilny 43
3.8 Porovnání pupilometrických metod 44
4 Zvážení etických a bezpečnostních aspektů experimentu 46
4.1 Zvážení etických aspektů experimentu 46
4.2 Zvážení bezpečnostních aspektů experimentu 46
5 Diskuze 47
6 Návrh doporučení pro praxi 48
7 Závěr 49

Seznam použité literatury 50
Seznam tabulek/grafů 53
Seznam obrázků/schémat 54
Seznam příloh 55
Příloha A: MATLAB program pro pupilometrii 55

Seznam symbolů a zkratek

a.	arteria
aa.	arteriae
LED	světlo emitující dioda
NPi	Neurological pupillary index
m.	musculus
n.	nervus
nn.	nervi
v.	vena
vv.	venae

1 Úvod

Vyšetření zornicového reflexu je součástí základního neurologického vyšetření, které umožňuje hodnocení funkce autonomního nervového systému a mozkového kmene. Tato metoda spočívá v pozorování reakcí zornic na světelný podnět, jejich schopnost kontrakce a dilatace. Zornicový reflex je tedy přirozenou reakcí zornice na změnu intenzity osvětlení. Rychlá a přesná reakce zornice na světlo signalizuje správnou funkci neurologických drah.

Standartní manuální vyšetření zornicového reflexu probíhá za pomocí svítilny, kterou se prosvěcují zornice a pozoruje se jejich změna velikosti, rychlost stahu a symetrie. Vyhodnocení výsledků, však bývá velice subjektivní, jelikož je určeno pouze pozorováním osoby, která vyšetření provádí.

Další poměrně nová metoda vyšetření zornicového reflexu je za použití infračerveného pupilometru, konkrétně NeurOptics NPi-200. Toto zařízení využívá infračervené spektrum k přesnému měření průměru zornice a jeho změn v reakci na světelný podnět. Schopnost detekovat a zaznamenat změny v dynamice zornice v reálném čase umožňuje detailnější analýzu a interpretaci reflexu. NPI-200 poskytuje kvantitativní data o rychlosti, amplitudě a latenci zornicové reakce. Dalším údajem, který přístroj dokáže získat je NPi (Neurological Pupillary index), který algoritmicky ze získaných dat vyjádří celkovou míru reakce zornice na osvit. Studie naznačují, že by NPi mohl sloužit jako indikátor vývoje zdravotního stavu u neurologicky akutních pacientů.

Cílem práce je ověřit užitné vlastnosti jednotlivých metod. Součástí výzkumné části je i návrh vlastní pupilometrické metody za použití digitální průmyslové kamery a následného vyhodnocení záznamu za použití zpracování obrazu. Dále se jednotlivé metody porovnají a bude doporučena ideální metoda nebo přístroj pro klinickou praxi.

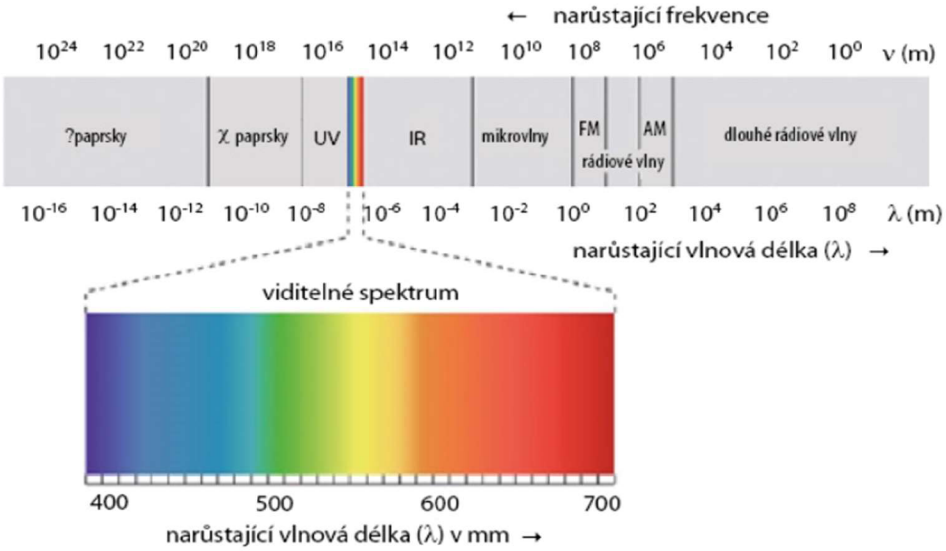
2 Teoretická část

2.1.1 Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění je vlnění příčné a má dvě navzájem závislé složky, první elektrickou charakterizuje vektor intenzity elektrického pole E. Druhou magnetickou, tu vyjadřuje vektor magnetické indukce B. Vektory jsou si navzájem kolmé a jsou kolmé i ke směru šíření vlny. Elektromagnetická vlnění lze obecně popsat frekvencí f, vlnovou délkou λ a rychlostí šíření vlnění v. Frekvence udává počet kmitů za sekundu. Její jednotkou je 1 Hz, který je vyjádřen v základních jednotkách jako s^{-1}. Vlnová délka je definovaná jako dráha, o kterou postoupí vlna za dobu jednoho kmitu. Rychlost šíření vlnění lze definovat jako vzdálenost, o kterou postoupí vlna vlnové délky λ za jednu sekundu. Ve vakuu je elektromagnetické vlněné šířeno rychlostí světla $c = 2{,}9979 \cdot 10^8$ m. s^{-1}. Vztah lze vyjádřit rovnicí:

$$f = \frac{c}{\lambda} \qquad \text{(rovnice 1)}$$

Rovnice udává, že s rostoucí frekvencí se snižuje vlnová délka a na druhou stranu s klesající frekvencí vlnová délka roste (viz obr. 1). Elektromagnetické spektrum má začátek v gama paprscích s nejkratší vlnovou délkou, dále přes rentgenové záření a ultrafialové záření, až po viditelnou část spektra. Větší vlnovou délku, než má viditelné světlo, má infračervené spektrum, mikrovlny a rádiové vlny (Rosina et al., 2021).



Obr. 1 Spektrum elektromagnetického záření (Rosina, Vránová a Kolářová, 2021)

2.1.2 Viditelné světlo

Viditelné světlo zabírá poměrně krátké pásmo s vlnovými délkami 380 – 760 nm. Ideálním zdrojem bílého světla by bylo absolutně černé těleso o teplotě 5000 – 6000 K. Viditelné spektrum vyvolává zrakové vjemy a fotochemické účinky na kůži člověka (Beneš et al., 2022).

2.1.3 Infračervené záření

Infračervené záření je emitované atomy nebo molekulami v důsledku jejich vibračních a rotačních pohybů. Přirozený zdroj tohoto záření je Slunce. Rozlišujeme tři spektrální oblasti infračerveného záření: blízké infračervené záření (IR-A) s vlnovými délkami 0,76–1,4 μm, střední infračervené záření (IR-B) v rozmezí 1,4–3,0 μm a vzdálené infračervené záření (IR-C) s vlnovými délkami nad 3 μm.

IR-A záření má nejvyšší energii, což mu umožňuje pronikat nejhlouběji do tkání a je málo absorbováno vodou, nachází se ve slunečním spektru. Záření středního pásma IR-B je výrazněji absorbováno vodou, ale dokáže ještě proniknout sklem a vydávají ho různé světelné zdroje, jako zářivky a žárovky. Vzdálené IR-C záření je silně absorbováno vodou i sklem.

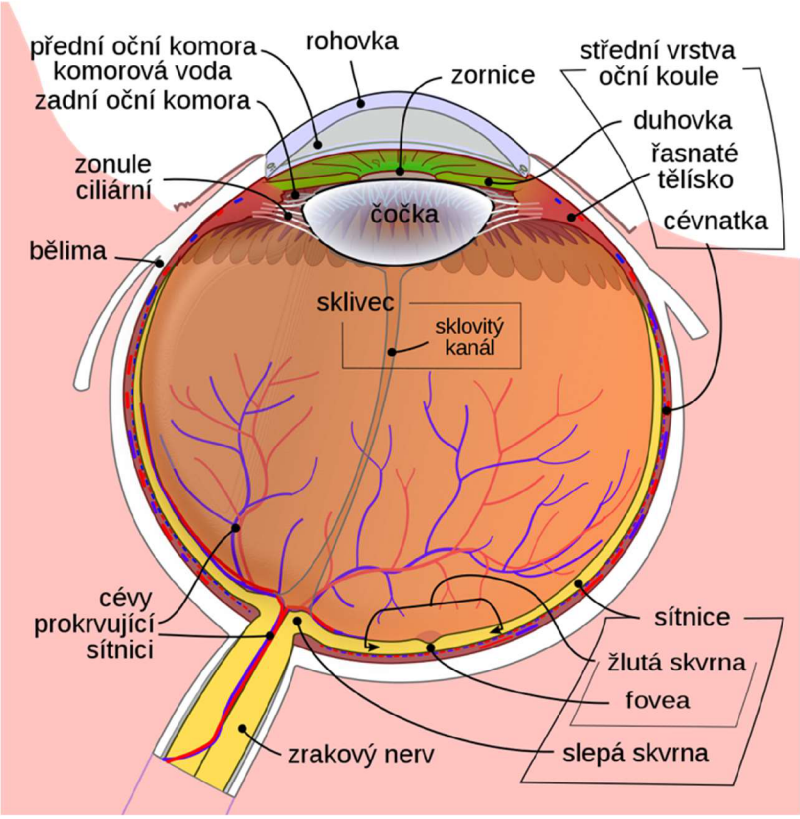
Vlivem absorpce vodou je infračervené záření hlavně absorbováno kůží, přičemž penetrace blízkého pásma sahá až do podkoží. Expozice záření vyvolává lokální rozšíření krevních cév a tepelný erytém, dále může reflexně indukovat vazodilataci v hlubších tkáních. Zahřívání kůže nad 45 °C může způsobit bolest. Vzhledem k absorpci v očních tkáních může záření poškodit zrak. Terapeuticky se infračervené záření využívá k léčení bolesti, zánětů a pro uvolnění svalových křečí díky reflexním účinkům (Beneš et al., 2022).

2.2 Anatomie zrakového ústrojí

Oko je párový orgán uložený v očnici. Skládá se z oční koule, jakožto smyslového orgánu, a přídatných orgánů očních, které zajišťují ochranu, pohyblivost a další funkce oční koule.

Oční koule (bulbus oculi) má tři vrstvy. Vazivovou vnější vrstvu, ta se skládá ze vzadu uložené bělimy a přední rohovky. Cévnatou střední vrstvu, ta má tři části: cévnatku, řasnaté těleso a duhovku (uvnitř duhovky se nachází zornice). Poslední vrstvou je nervová vnitřní vrstva, častěji nazývaná sítnice (viz obr. 2).

Bělima zabírá téměř 80 % povrchu oční koule, tvoří ji husté fibrilární vazivo a má mléčně bílou barvu. Rohovka je bezbarvá, průhledná a zakřivená přední část, připomínající tvarem kulový vrchlík (Čihák, 2016).



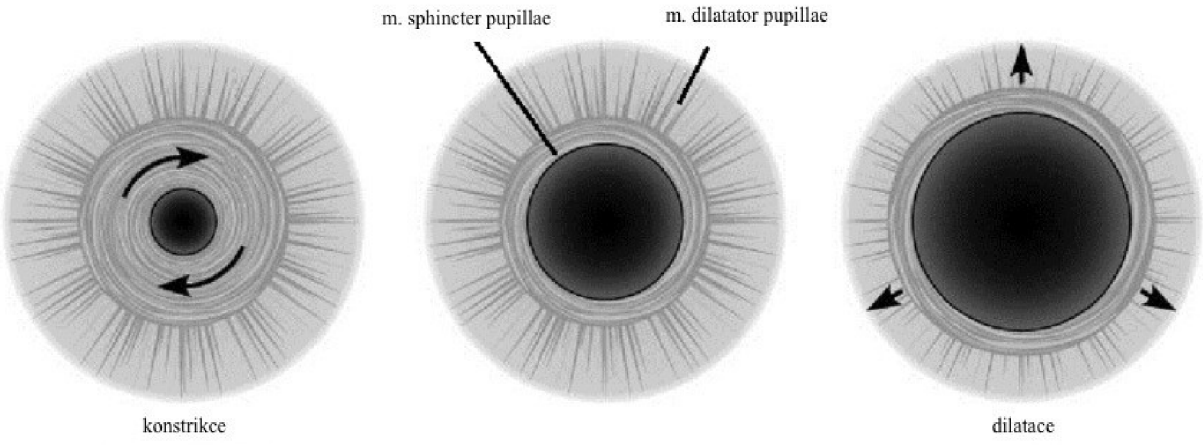
Obr. 2 Anatomie zrakového ústrojí (Rhcastilhos, 2009)

Cévnatka zabírá největší část prostřední vrstvy stěny oční koule, zaujímá její zadní 2/3. Je bohatá na kapiláry a má podobu černohnědé blány. Povrchovou stranou se přikládá k bělimě. Dutinová část cévnatky naléhá na sítnici. Má dvojí funkci. První funkcí je výživa hlubokých vrstev sítnice. Druhá funkce je mechanická, pružným napětím táhne za zadní okraj řasnatého tělesa, čímž napíná závěsný aparát čočky a napomáhá tak k udržení zaostření oka na dálku. (Synek a Skorkovská, 2014).

Řasnaté těleso leží za duhovkou a je připojeno na okraj čočky, má tvar mezikruží. Na příčném řezu má tvar trojúhelníku. Dochází zde k produkci komorového moku. Uvnitř je vazivová podpůrná tkáň a hladká svalovina řasnatého svalu (m. ciliaris). Hlavní funkcí svalu je akomodace čočky (Čihák, 2016).

Duhovka

Duhovka má tvar mezikruží, její středový otvor se nazývá zornice. Duhovka stojí frontálně a dělí přední prostor oka na přední a zadní komoru oční. Přední plocha má individuálně charakteristickou kresbu a barvu, díky tomu se dá využívat k identifikaci osob. Uvnitř zornice se pod povrchovým vazivem nachází vrstva hladké svaloviny obsahující dva svaly musculus: sphincter pupillae a musculus dilatator pupillae (viz obr. 3) (Čihák, 2016).



Obr. 3 Svěrač a rozvěrač zornice (Tomeo-Reyes, 2015)

Zornice

Zornice (pupilla) je okrouhlý otvor v duhovce, který má funkci fotografické clony. Reguluje množství světla vstupující do oční koule. Její průměr se mění zhruba od 2 do 8 mm. Zúžení zornice se nazývá mióza, její rozšíření se nazývá mydriáza. Mióza nastává při příliš velkém osvětlení sítnice, kdežto mydriáza při malém osvětlení. Zúžení zornice je významné i pro zvýšení hloubky ostrosti, mióza totiž eliminuje dopad paprsků pod větším úhlem. Změna průměru zornice je umožněna dvěma antagonistickými hladkými svaly, musculus sphincter pupillae a musculus dilator pupillae (česky svěrač a rozvěrač zornice). Svěrač je inervován z parasympatických vláken. Rozvěrač naproti tomu ze sympatických vláken (Králíček, 2023).

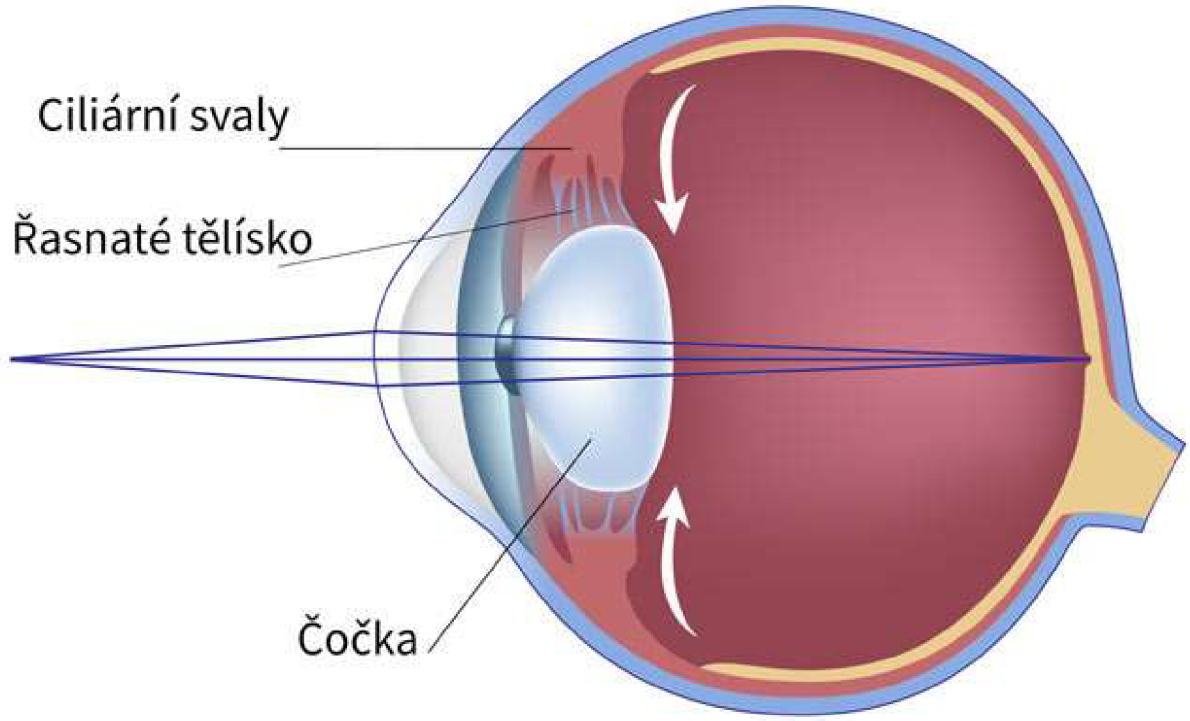
Sítnice

Sítnice je nejvnitřněji uložená vrstva oční koule. Má vnitřní nervovou vrstvu a zevní pigmentovou vrstvu. Zevní vrstva zabírá menší část sítnice, neobsahuje světločivé buňky a nemá proto percepční schopnosti. Bývá také nazývaná slepou částí sítnice. Vnitřní část je poměrně větší a obsahuje světločivé buňky (tyčinky a čípky) a dva neurony zrakové dráhy. (Čihák, 2016).

Čípky převažují v centrálních oblastech sítnice, nejvíce jsou koncentrovány v oblasti žluté skvrny. Ve žluté skvrně jsou vrchní vrstvy sítnice odsunuty do stran a jedná se o místo nejostřejšího vidění. Místo kde axony gangliových buněk vystupují ze sítnice neobsahuje žádné fotoreceptory a je nazýváno slepá skvrna. Sítnice obsahuje zhruba 120 milionů tyčinek a 6-7 milionů čípků (Kittnar, 2020).

Čočka

Čočka je uložena za zornicí v zadní oční komoře, u dospělého člověka má průměr 9-10 mm. Je schopna měnit svou optickou mohutnost, ta se reguluje vyklenutím čočky, které způsobuje musculus ciliaris. Při pohledu do blízka se stahem tohoto svalu uvolní závěsný aparát čočky, čočka se následně vlastní elasticitou vyklene a zvýší tak svoji optickou mohutnost (viz Obr.4). Při pohledu do dálky sval relaxuje a čočka se díky tomu zploští a sníží svoji optickou mohutnost (Druga et al., 2013).



Obr. 4 Akomodace čočky pomocí ciliárních svalů (Šapito, 2024)

2.2.1 Přídatné orgány oka

Mezi přídatné orgány oka patří oční víčka, spojivka, slzný aparát a okohybné svaly.

Oční víčko slouží jako ochrana oka před zevním prostředím a poraněním. Prostor mezi horním a dolním víčkem se nazývá oční štěrbina. Přední plocha víčka je tvořena kůží a podkožím, obsahuje kruhovitý sval (m. orbicularis oculi) inervovaný n. facialis. Zadní stranu víčka tvoří spojivka, víčka jsou zpevněna tarzální ploténkou s Millerovým svalem (m. tarsalis superior et inferior) a zvedacím svalem (m. levator palpebrae) inervovaným n. oculomotorius. Na margo víčka jsou vývody meibomovských žláz a řasy s jejich žlázami (Pašta et al., 2017).

Spojivka je tenká, pružná sliznice pokrývající oční bulbus od korneosklerálního přechodu k záhybu (bulbulární spojivka), a pokračuje na vnitřní stranu víček (palpebrální spojivka). V oblasti vnitřního koutku je ztluštělá, tvoří poloměsíčitou řasu a na její vnitřní okraj nasedá karunkula. Spojivka je dobře prokrvená a hydratovaná, s funkcemi zahrnující ochranu, imunitní reakci a sekreci (Pašta et al., 2017).

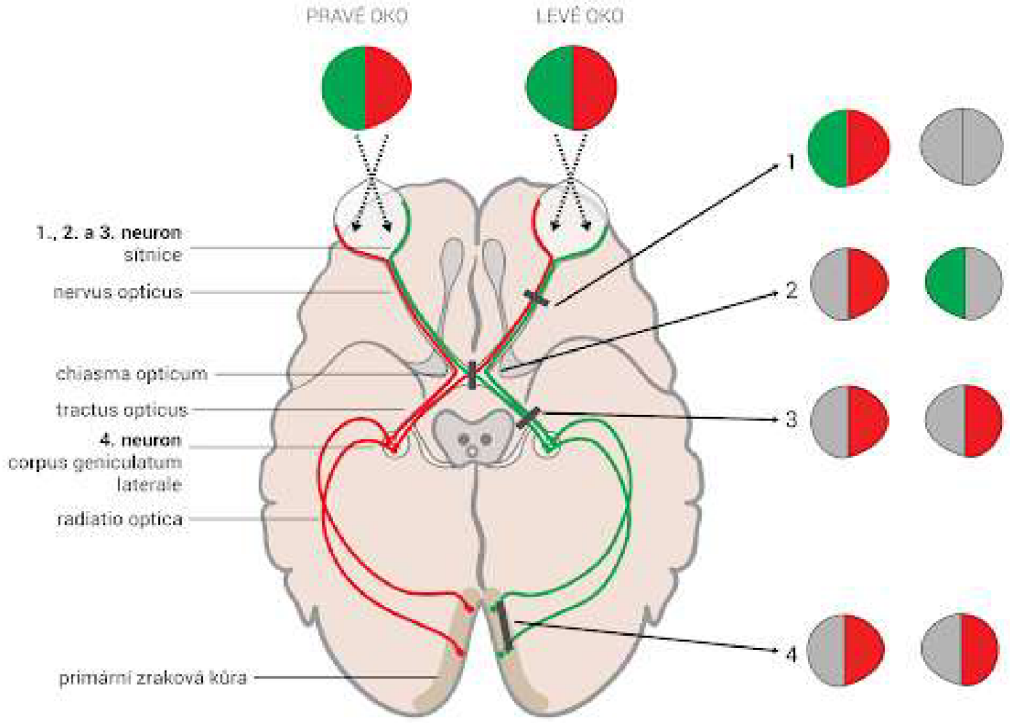
Slzný aparát obsahuje slzotvornou část, kde slzná žláza v horním vnějším kvadrantu očnice produkuje slzy, které ústí do horního záhybu. Slzovodná část začíná ve slzném jezírku, pokračuje slznými body a kanálky k slznému váčku a končí slzovodem ústícím do nosu (Pašta et al., 2017).

Okohybné svaly, zahrnující čtyři přímé (horní, dolní, zevní, vnitřní) a dva šikmé (horní a dolní), které umožňují pohyb očí. Všechny, kromě dolního šikmého vycházejí z vazivového prstence na konci očnice a připojují se k bulbu. Jejich úpony jsou uspořádány do tzv. Tillauxovy spirály. Inervace z n. trochlearis pro horní šikmý, z n. abducens pro zevní přímý a z n. oculomotorius pro ostatní svaly. Funkce zahrnují různé směry pohybu očí, jako je addukce, abdukce, elevace a rotace bulbu (Pašta et al., 2017).

2.2.2 Zraková dráha a zrakové centrum

Zraková dráha je tříneuronová, a spojuje sítniční fotoreceptory se zrakovým centrem v mozku. První neuron tvoří bipolární buňky v sítnici, druhý neuron jsou gangliové buňky, jejichž axony formují zrakový nerv a přecházejí chiasmou opticum s částečným překřížením vláken. Tyto axony pokračují do thalamu, kde končí a propojují se s těly třetího neuronu. Neurity třetího neuronu směřují do zrakového centra v týlním laloku (viz obr. 4). Zraková dráha obsahuje asi 1 milion

nervových vláken, s majoritou ve zrakové, a menšinou v pupilomotorické dráze. Rozlišuje se periferní úsek do thalamu a centrální úsek do zrakového centra (Pašta et al., 2017).



Obr. 4 Průběh zrakové dráhy (Jakub Štefala et al., 2014)

2.2.3 Cévní zásobení oka

Oko je zásobováno krví z arterie ophthalmica, odnože arterie carotis interna. Arteria centralis retinae, větev arterie ophthalmica, vstupuje do nervus opticus za bulbus oculi a na papile se větví na horní a dolní větev, dále se dělící na arteriola temporalis retinae superior/inferior a arteriola nasalis retinae superior/inferior. Tyto větve zásobují sítnici kromě vrstvy tyčinek a čípků, jež jsou vyživovány z cévnatky. V okolí výstupu nervus opticus pronikají skleru aa. ciliares posteriores breves, větvící se v lamina choroidocapillaris a zásobující pigmentový epitel, tyčinky a čípky. Aa. ciliares posteriores longae pronikají skleru, směřují do corpus ciliare a u báze duhovky tvoří větvení s aa. ciliares anteriores, vytvářející circulus arteriosus iridis major. Aa. ciliares anteriores vycházejí z okohybných svalů a procházejí sklerou (Druga et al., 2013).

Krev z oka odvádějí čtyři vv. vorticosae, sbírající krev z cévnatky a ústící do vv. ophthalmicae superior et inferior. Vv. ciliares odvádějí krev z řasnatého tělesa a Schlemmova kanálku, mají

stejný průběh jako odpovídající arterie. Vena centralis retinae sleduje stejný průběh jako arteria, ale má tenčí větve. V. ophthalmica superior odtéká do sinus cavernosus, v. ophthalmica inferior do plexus pterygoideus (Druga et al., 2013).

2.3 Pupilomotorický reflex

Regulace šířky zornice je klíčová pro správnou funkci oka, neboť umožňuje adaptaci na různé světelné podmínky. Tato adaptace je dosažena díky dvěma hladkým svalům duhovky, které jsou inervovány vegetativním nervovým systémem. M. sphincter pupillae, silný kruhový sval nacházející se při okraji duhovky, je ovládán parasympatickým nervovým systémem a zodpovídá za zúžení zornice. Na druhé straně, m. dilator pupillae, který je slabší a pokrývá zadní plochu duhovky, je stimulován sympatickým nervovým systémem a způsobuje rozšíření zornice. Oba svaly, unikátní svým ektodermálním původem, pracují antagonisticky, aby zajistily přesnou regulaci množství světla vstupujícího do oka prostřednictvím zornice. Když je mozkový kmen poškozen, často pozorujeme mydriázu, což je důsledek dominantního sympatického tonu (Druga et al., 2013).

Léze v horní části krčního sympatiku vedou k jednostranné mióze. Obvykle bývá šířka zornice stejná na obou stranách, což nazýváme izokorie. Rozdílná šířka zornic se nazývá anizokorie (viz obr. 5) (Fiala a Valenta 2020).

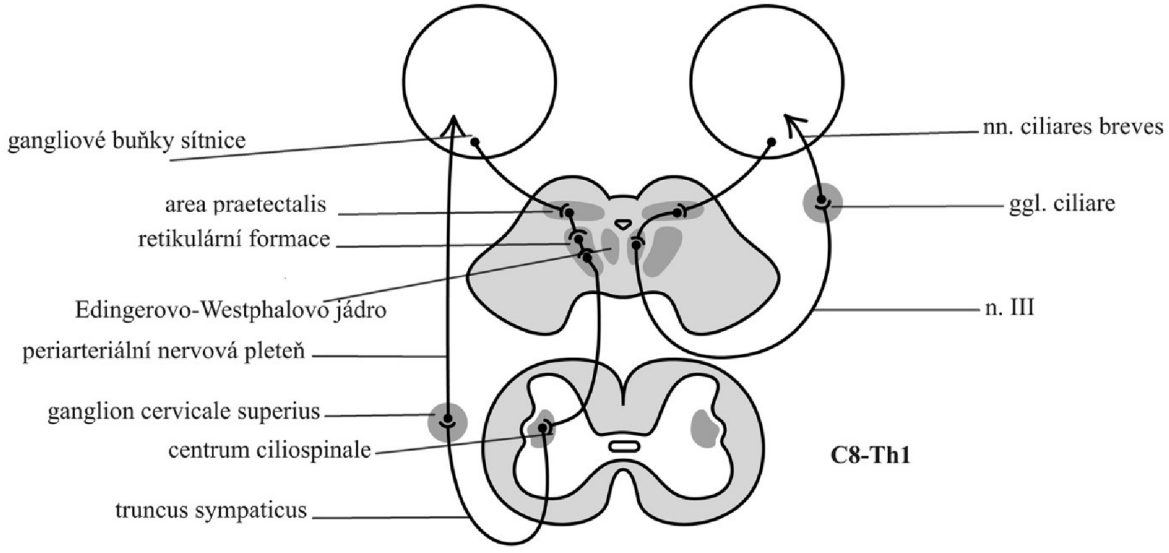
Obr. 5 Anizokorie zornice (Tair1978, 2023)

2.3.1 Aferentní část reflexního oblouku

Aferentní část reflexního oblouku začíná u fotoreakce aktivací retinálních fotoreceptorů, s největší aktivitou v makulární oblasti a na nazální straně retinální periferie. Přibližně 20 % všech vláken optického nervu tvoří pupilomotorickou aferentní dráhu. Tato vlákna procházejí chiasmatem a podléhají křížení, takže neurony z odpovídajících polovin sítnice obou očí pokračují do stejnojmenných optických traktů. Poté, co pupilomotorická vlákna opustí hlavní zrakovou dráhu před zevním genikulátem, směřují do area pretectalis, kde končí. Vztahy mezi pretektálními jádry a jádry Edingerova-Westphalova, zahrnující vzájemné a křížené propojení, umožňují synchronizovanou reakci zornic na světelné podněty, vedoucí ke konsensuální fotoreakce, kdy osvětlení jedné poloviny sítnice vyvolá zúžení obou zornic (Otradovec, 2003).

2.3.2 Parasympatická eference pro svěrač zornice

Eferentní dráha, která řídí svěrač zornice, je složena ze dvou neuronů. První, preganglionární neuron, vytváří spojení mezi parasympatickým jádrem n. oculomotorius a ciliárním gangliem umístěným v očnici. Druhý neuron, postganglionární, je zodpovědný za inervaci svěrače zornice. Vlákna vycházející z Edingerova-Westphalova jádra se nejprve připojují k motorickým vláknům z jiných jader n. oculomotorius (viz obr. 6), překonávají černé jádro a následně opouštějí mozkový kmen přes fossa interpeduncularis. Tento nerv následně sleduje trajektorii podél lebeční báze, prochází kavernózním splavem a vstupuje do očnice horní orbitální štěrbinou. V ciliárním gangliu dojde k připojení vláken, která pak jako nn. ciliares breves směřují



Obr. 6 Vlevo reflexní dráha pro mydriázu, vpravo pro miózu (Králíček, 2023)

ke svěrači zornice, přičemž pouze asi 3 % parasympatických vláken je určena právě svěrači, zatímco většina míří k ciliárnímu svalu. Toto rozdělení vysvětluje, proč mohou léze ciliárního ganglia výrazně více ovlivnit pupilární reakci než akomodaci (Otradovec, 2003).

2.3.3 Sympatická eference pro rozvěrač zornice

Sympatická inervace musculus dilator pupillae zahrnuje komplexní tříneuronový systém. Začíná v hypothalamu, odkud první neuron, centrální část kraniálního sympatiku, vede signál k ciliospinálnímu centru umístěnému mezi obratli C8 a Th3. Odtud druhý, preganglionární neuron přenáší impulzy přes rami communicantes do horního krčního ganglia, nacházejícího se ve výši obratlů C2 až C3. Poslední, postganglionární neuron pokračuje dvěma hlavními trasami do očnice, buď podél vnitřní krkavice do Gasserova ganglia a dále s první větví trigeminu k rozšiřovači zornice, nebo přes plexus caroticus a cavernosus. Tyto nervy, které neprocházejí interpolací v ciliárním gangliu, jsou vedeny do bulbu oka a duhovky. Na rozdíl od parasympatického systému, sympatická dráha se během svého průběhu nikde nezkříží, což znamená, že její poškození má vždy dopad pouze na stejnou stranu těla, což vede k homolaterální poruše zornice (Otradovec, 2003).

2.3.4 Dráha pupilární reakce při konvergenci

Reakce zornice při pohledu na blízké předměty, zahrnující konvergenci zorných os a akomodaci, představuje zvláštní účelovou reakci, která není klasifikována jednoznačně jako reflex nebo synkinéza. Tento jev, při kterém dochází k zúžení zornice, je více spjat s konvergencí zorných os než s akomodací. Základním podnětem pro tuto reakci je neostré zobrazení objektu na sítnici, což vyvolává signalizaci směrem do zrakové kůry a následně do mozkového kmene. Signály jsou přenášeny k parasympatickému jádru n. oculomotorius a k dalším okulomotorickým centrům, což vede k aktivaci svalů zodpovědných za konvergenci, akomodaci a zúžení zornice. Tato integrace signálů z různých částí mozku umožňuje koordinovanou oční reakci, přizpůsobující zrakový systém pro optimální vnímání blízkých objektů (Otradovec, 2003).

2.3.5 Dráha dilatačního reflexu u psychosenzorických podnětů

Rozšíření zornice vyvolané psychickými, senzorickými a senzitivními podněty je koordinováno přes komplexní síť nervových drah. Tyto podněty jsou zpracovávány v hypotalamických vegetativních centrech, kam jsou přiváděny jak přímo z mozkové kůry v důsledku emočních reakcí, tak nepřímo přes senzorické a senzitivní cesty, včetně zadních kořenů míšních nervů a nervu trigeminus, který reaguje na bolest. Od hypotalamu signály postupují přes

mezencefalon a prodlouženou míchu do ciliospinálního centra, odkud sympatická nervová dráha přenáší impulzy k svalu m. dilator pupillae, což vede k rozšíření zornice (Otradovec, 2003).

2.3.6 ipRGC gangliové buňky

Vnitřně fotosenzitivní retinální gangliové buňky (ipRGC), obsahující fotopigment melanopsin jsou obsaženy v sítnici, nepodílí se však na přenosu obrazové informace. Jejich maximální citlivostí je v krátkovlnné části spektra, hrají klíčovou roli v neurologickém spojení mezi retinou a centry řízení zornicového reflexu a cirkadiánního systému. Tyto buňky se nachází v sítnici, mají axony směřující do několika mozkových regionů, včetně suprachiasmatického jádra a olivárního pretectálního jádra, které reguluje zornicový reflex. Vlnové délky 460–490 nm byli prokázány jako zásadní pro aktivaci zornicového reflexu prostřednictvím ipRGC (Bonmati-Carrion et al, 2016).

2.4 Vyšetření zornic pohledem

Vyšetření zornic je součástí základního neurologického vyšetření. Při vyšetření se sleduje tvar, velikost, izokorie a reakce na osvit a konvergenci.

Tvar zornic by měl být okrouhlý (pravidelný) nepravidelnost tvaru naznačuje buď rozštěp zornice, ten může být vrozený nebo poúrazový. Nepravidelný tvar může také poukazovat na zánět duhovky.

Za normálního fyziologického stavu bývají zornice izokorické. Anizokorie zornice se nejčastěji vyskytují u kompresí mozku v důsledku epidurálního hematomu nebo nádoru (Chrobák, 2007).

Zúžení zornic může mít více příčin. Mióza může být vyvolána farmakologicky, zejména vlivem opiátů. Vliv na miózu může mít zánět duhovky či progresivní paralýza jako je 3. stadium syfilis. V bezvědomý bývají zornice také mitotické, ne však v hlubokém bezvědomý. Nejčastěji mióza znamená poškození sympatických krčních vláken. Při poškození krčního sympatiku provází miózu pokles víčka (ptóza) a vklesnutí oka do očnice (enoftalmus), tato trojice symptomů bývá nazývána, jako Claude-Bernardův-Hornerův syndrom (Nejedlá, 2015).

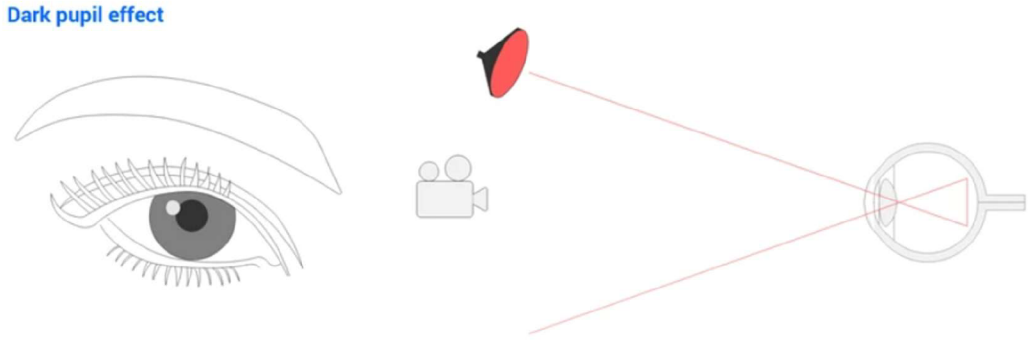
Rozšířené zornice mohou mít také farmakologickou příčinu, mohou vznikat působením atropinu nebo stimulantů. Mydriáza bývá projevem poškození parasympatických krčních vláken. Je přítomna i u hlubokých stavů bezvědomý jako je koma.

Reakce na konvergenci se vyšetřuje přiblížením prstu ze vzdálenosti cca 1 m do vzdálenosti zhruba 10 cm před oko. Pozoruje se pohyb zornice při pohledu do dály a do blízka (Dobiáš, 2013).

Reakce na osvit se provádí za použití svítilny, sleduje se změna velikosti zornice v důsledku osvícení oka. Sleduje se přímá a nepřímá reakce na světlo. Při vyšetření přímé se pozoruje změna velikosti zornice na osvíceném oku. Při nepřímé reakci by se měla změnit velikost zornice oka v důsledku osvícení oka druhého. Pokud nastane mióza v důsledku osvícení, označuje se tento jev jako pozitivní fotoreakce (Nejedlá, 2015).

2.5 Infračervená pupilometrie

Infračervená pupilometrie je poměrně nová metodou pro zhodnocení pupilomotorického reflexu pacient. Tato metoda využívá technologii, která zahrnuje osvětlení oka infračerveným světlem a měření odraženého obrazu pomocí infračerveného senzoru. To umožňuje kontinuální sledování velikosti zornice a jejích pohybů bez ovlivnění samotné zornice nebo citlivosti sítnice. Přístroj dokáže okamžitě zobrazit velikost zornice, proměnné pupilomotorického reflexu a dilataci zornice v reakci na světelný podnět (Larson a Berhrends, 2015).



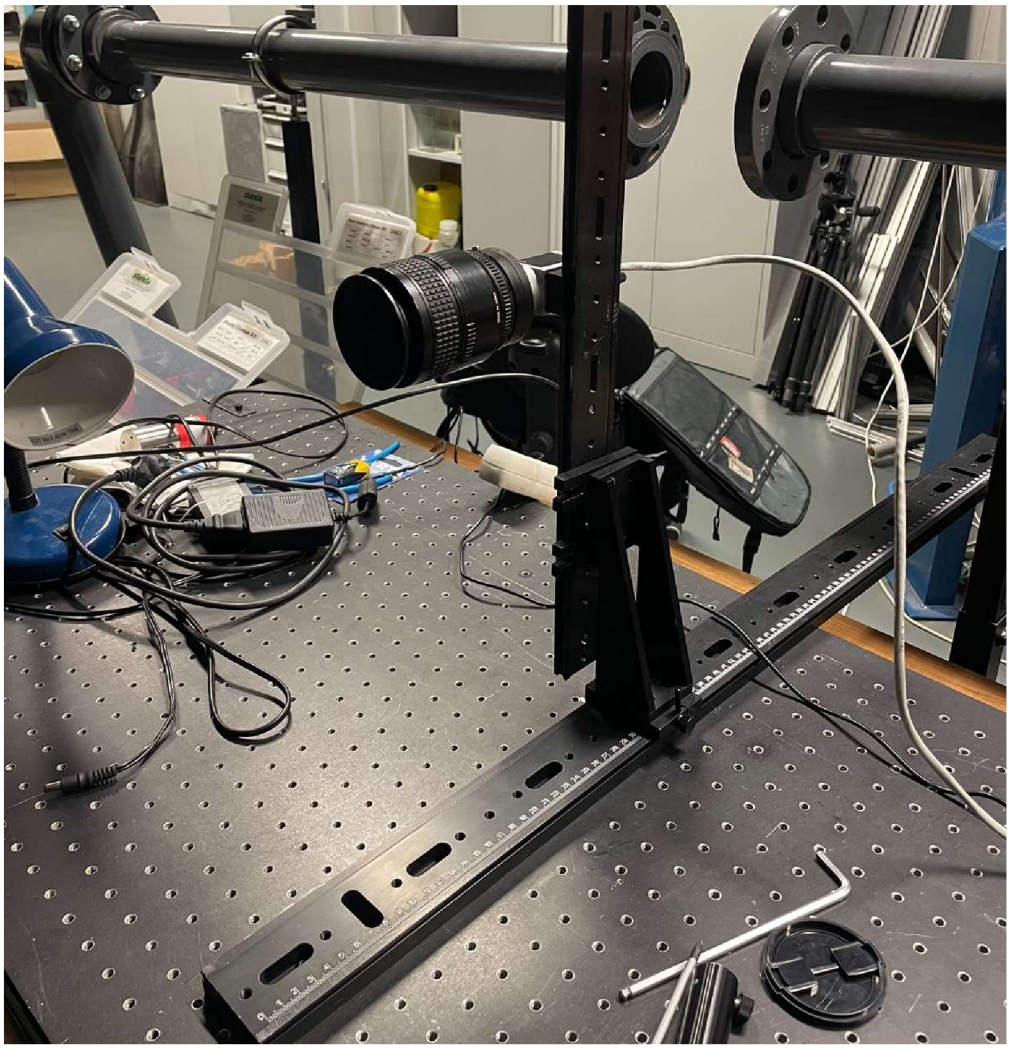
Obr. 8 Dark pupil effect (Tobii 2023)

Celý proces zaměření zornice funguje na principu zvaném dark pupil effect. Duhovka funguje jako reflektivní povrch pro infračervené světlo, zatímco zornice se v odraženém infračerveném obrazu jeví jako prázdný kruh nebo černý prostor (viz obr. 8). Tento jev je způsobený rozdílem v absorpci a reflexi infračerveného světla mezi zornicí a duhovkou (Tufuor, 2017).

3 Výzkumná část

3.1 Cíle

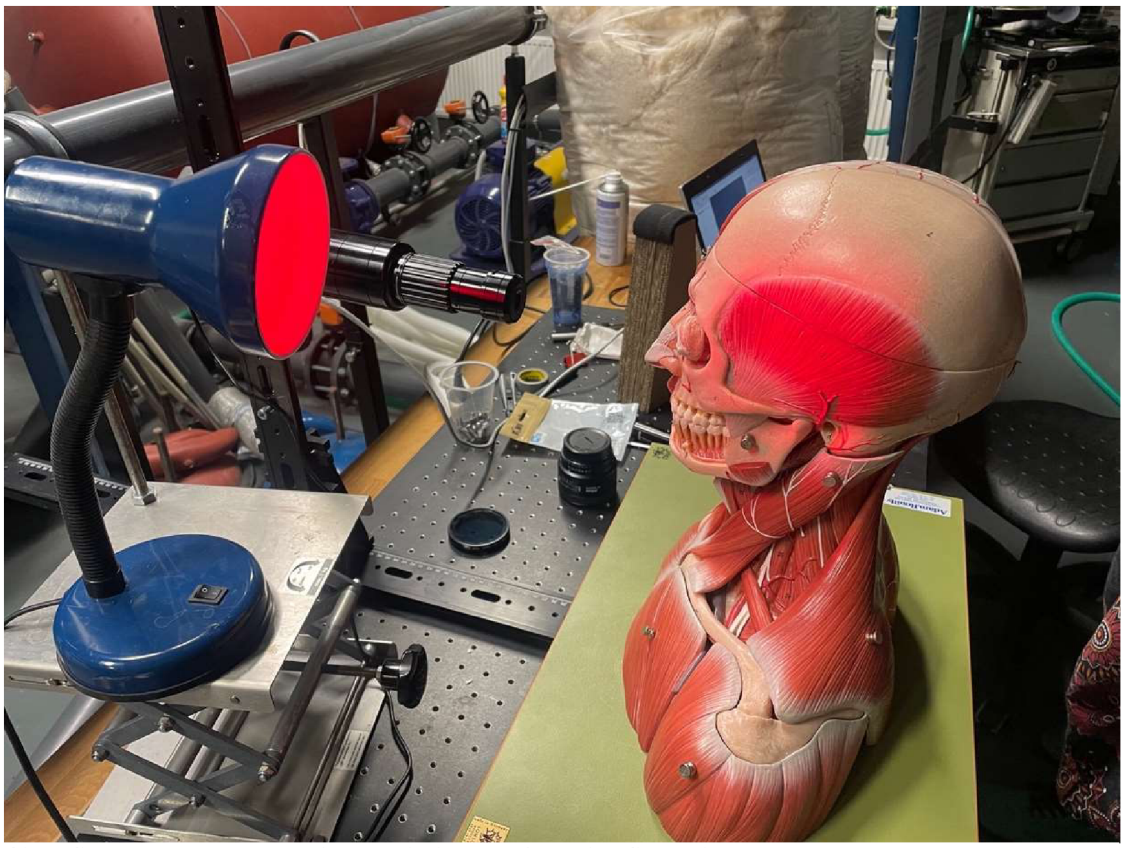
Cílem výzkumné části práce bylo, navrhnout vlastní metodu pro vyhodnocení pupilomotorického reflexu za pomocí digitální kamery a následného zpracování obrazu v programu MATLAB. Dalším cílem bylo provést měření zornicového reflexu za pomocí studentovi navržené metody, infračerveného pupilometru NPI-200 a prostřednictvím manuální používané kvalitativní metody za pomocí svítilny. Posledním cílem bylo porovnat jednotlivé metody a doporučit ideální metodu pro praxi.



Obr. 7 Posuvná soustava pro pupilometrii (Autor)

3.2 Předpoklady experimentu

Účelem experimentu bylo navrhnout vlastní metodu, pro vyhodnocení pupilomotorického reflexu. Studentova metoda spočívala v sekvenčním focení oka, které se osvítilo pomocí svítilny určené k pupilometrii. Vyhodnocení velikosti zornice a její změny bylo provedeno v programu MATLAB za použití zpracování obrazu (anglicky image processing).



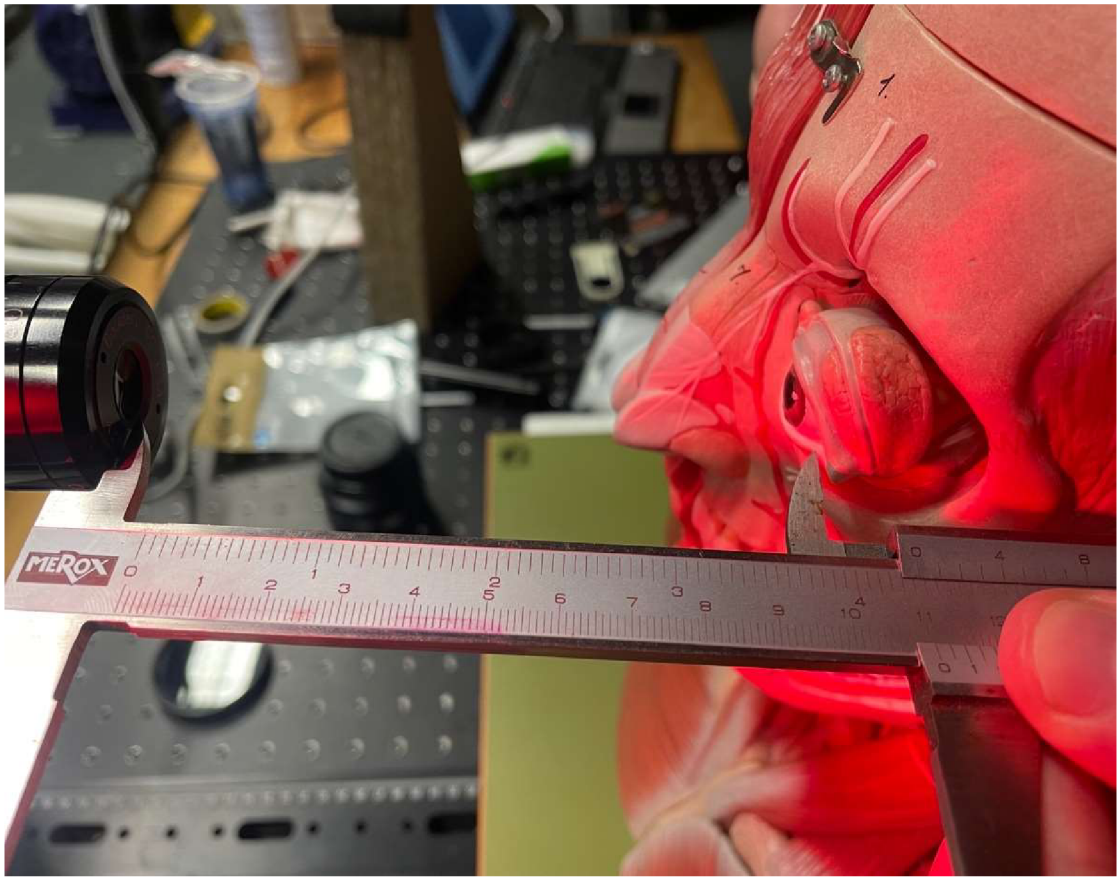
Obr. 8 Soustava s červeným osvětlením a objektivem InfiniProbe TS-160 (Autor)

Experiment proběhl na začátku zimy roku 2023 v prostorách Technické univerzity Liberec, konkrétněji v budově L v laserové laboratoři. Pro účely experimentu byla vybrána černobílá kamera acA2040-25gm od německého výrobce Basler s rozslišením 2048 x 2048 pixelů. Kamera je primárně určena pro strojové vidění a má softwarově nastavitelnou snímkovací frekvenci. Pro záznam byla nastavena na 400 snímků za sekundu. Kamera byla připevněna šrouby ve stojanu, který dovolal polohování do více směrů (viz obr. 7). Kameru bylo nutné připojit přes ethernetový

kabel k počítači a samotné ovládání záznamu se provádělo přes program pylon Viewer, který je pro ni určen.

Záznam pupilomotorického reflexu byl pořízen na třech figurantech, jejichž identita je anonymizována, a byli seznámeni s podmínkami experimentu.

Pro záznam byl vybrán režim sekvenčního focení, kamera přímo nenahrávala kontinuální video, ale výsledkem bylo stovky jednotlivých snímků. Pro experiment byli použity dva objektivy: InfiniProbe TS-160 Universal a Sigma 150 mm f/2,8 EX APO DG OS HSM Macro.



Obr. 9 Kalibrace kamery pomocí plastikového anatomického modelu (Autor)

Záznamy byly prováděny v zatemněné místnosti, aby bylo dosaženo co největší mydriázy, a samotné zúžení zornice by pak bylo na záznamu více patrné. Záznam byl nepřímo osvícen červenou lampou se světlem o vlnové délce 633 nm (viz obr. 8), které evokovalo minimální změnu zornice. Pro kalibraci kamery před provedením záznamu, byl použit plastikový anatomický model.

Důležité bylo umístit model tak, aby výška očí modelu byla stejná jako výška oči figuranta, který měl položenou bradu na opěrce. Také byla snaha o zachování vzdálenosti mezi objektivem a okem modelu/figuranta (viz obr. 9). Ostření a ovládání clony objektivu bylo provedeno manuálně.

Pro vyvolání pupilomotorického reflexu byla použita svítilna Nextorch Dr.K3S, která má index vykreslování barev Ra> 90 a teplota barvy (CCT) se pohybuje okolo 5000 K. Fotobiologická úroveň bezpečnosti je RG0, tím pádem nehrozí poškození očí. Svítilna disponuje i stupnicí znázorňující velikost zornice od 1-7 mm.

Obr. 10 Pořizování záznamu pupilomotorického reflexu na figurantovi (Autor)

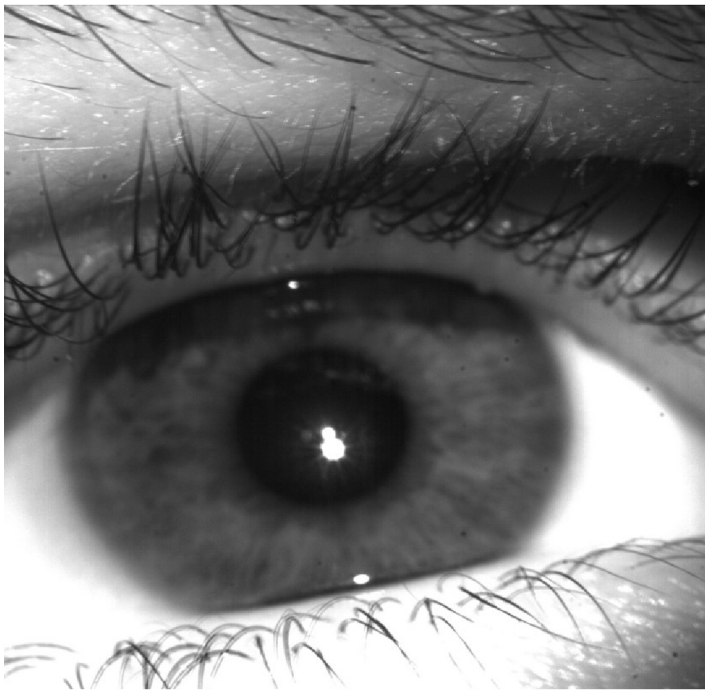
Po nastavení optické soustavy a polohy figuranta (viz obr. 10) byl spuštěn záznam a následně bylo snímané oko osvíceno po dobu zhruba 2 vteřin lékařskou svítilnou. Jednotlivé snímky byly složeny do video záznamu pomocí volně dostupného softwaru Blender, který má nástroje pro vytváření videí ze snímků. Práce se samotnými videi a fotografiemi se prováděla v programu Matlab pomocí jeho image processing toolbox.

3.3 Způsob využití programu Matlab pro pupilometrii

MATLAB (Matrix laboratory) je programovací jazyk a zároveň licencovaný software, který slouží jako interaktivní výpočetní prostředí pro numerické počty a vizualizaci dat. V této práci byla použita verze R2024a. Krom matematických operací disponuje i řadou nástrojů pro strojové učení, signálové zpracování či obrazovou analýzu. Matlab dále umožňuje i modelování, simulaci a analýzu komplexních systémů. Program je přístupný studentům skrze univerzitní licenci.

3.3.1 Převod na šedotonový obraz

Pořízené fotografie a záznamy se jevili být šedotónové (viz obr. 11), byli však ve formátu RGB a proto bylo nutné je před následnou prací s obrazem převést. Byla použita MATLAB funkce rgb2gray, která převedla tří kanálový obraz RGB na jednokanálový. Tento krok je důležitý pro následné zpracování obrazu, jelikož zjednodušuje získaná data.



Obr. 11 Originální snímek, před zpracováním obrazu (Autor)

3.3.2 Filtrování obrazu pomocí mediánového filtru

Prvním krokem ve zpracování obrazu bylo filtrování. Filtrování bylo za účelem odstranění nechtěných objektů a takzvaného sůl a pepř šumu. Jako ideální filtr se ukázal být mediánový filtr, který odstraňuje nechtěný šum, přesto však zachovává důležité hrany pro následnou segmentaci. Mediánový filtr je nelineární operace, při které se nad obrazem pohybuje definované okno a mění hodnoty pixelů ve středu okna na základě hodnot jejich sousedních pixelů. Hodnoty uvnitř okna jsou pro každou jeho pozici seřazeny a je vybrána střední hodnota (medián), kterou se nahradí hodnota středového pixelu okna. Proces se opakuje pro každý pixel v obraze, dokud není celý obraz zpracován. Touto metodou bylo dosaženo nejlepších výsledků, jelikož medián, jakožto střední hodnota seřazených pixelových hodnot, méně reaguje na velmi vysoké či nízké změny a dochází tak k minimálnímu zkreslení struktur.

3.3.3 Prahování zornice

Po filtrování bylo nutné nejprve na snímcích zvýraznit zornici. Jednou z použitých metod bylo prahování (anglicky tresholding). Prahování je jedna ze základních metod pro vytvoření binárního obrazu. Binární obraz je obraz, jehož pixely nabývají pouze dvou hodnot. Jedna hodnota reprezentuje černé pixely a druhá pixely bílé. Hodnota 0 se nejčastěji používá pro černé pixely a 1 pro pixely bílé (viz obr. 12).

Obr. 12 Binární obraz vzniklý prahováním (Autor)

Pro prahování je nutné určit hodnotu prahu. V případě šedotónového obrazu by všechny pixely s hodnotou vyšší než prahovou, byli nahrazeny hodnotou 1, čili by byli bílé. A všechny pixely s hodnotou menší, než je prahová byli černé, jejich pixel by měl hodnotu 0. Hodnotu prahu lze zjistit z histogramu nebo použít funkci adaptivního prahování, kdy si algoritmus spočítá sám, ideální hodnotu. Nejlepších výsledků bylo však dosaženo při použití hrubého prahování a nastavení pevné hodnoty, která byla zjištěna prostým experimentováním s více hodnotami, než bylo dosaženo požadovaného výsledku. Pro každý záznam však bylo nutné najít jinou hodnotu, kvůli jejich různorodému charakteru. Následné binární obrazy byli invertovány, tím pádem hodnoty pixelů zvýrazněných objektů byli 1 a pozadí 0. Invertování binárního obrazu, může usnadnit následnou práci s objekty.

3.3.4 Vyplnění mezer binárního obrazu

Binární obraz zornice obsahoval mezery, které vznikly v důsledku odlesků světel na povrchu oka. Pro vyplnění těchto mezer v binárním obrazu byla vybrána funkce MATLABu imfill. Tato metoda využívá proces zvaný zaplavení (anglicky flooding), funguje na principu vyplnění uzavřených oblastí které jsou funkcí identifikovány jako mezery nebo díry. Proces zaplavení začíná na okrajích mezer a postupuje se směrem dovnitř.

Obr. 13 Binární obraz po vyplnění mezer (Autor)

Postupně jsou od okrajů nahrazovány hodnoty pixelů mezer 0, hodnotami pro pixely objektu 1, dokud se mezera nezaplní. Při práci se snímky byla tato metoda použita specificky pro spodní polovinu obrazu, jelikož se jednalo o místo výskytu zornice. Celý proces zlepšil následnou analýzu spojitých oblastí (viz obr. 13).

3.3.5 Analýza spojitých oblastí binárního obrazu

Pro samotné vyhodnocení velikosti binarizované zornice byla nakonec vybrána funkce regionprops. Jedná se o pokročilou techniku analýzy obrazu v MATLABu, která je určena pro kvantifikaci vlastností objektů v binárním obrazu. Metoda regionprops umožňuje extrahovat geometrické vlastnosti jako jsou středy objektů (centroids), délky hlavních os (major axis length) a další parametry, které by mohli být užitečné pro vyhodnocení velikosti objektu. Funkce analyzuje spojité bílé objekty.

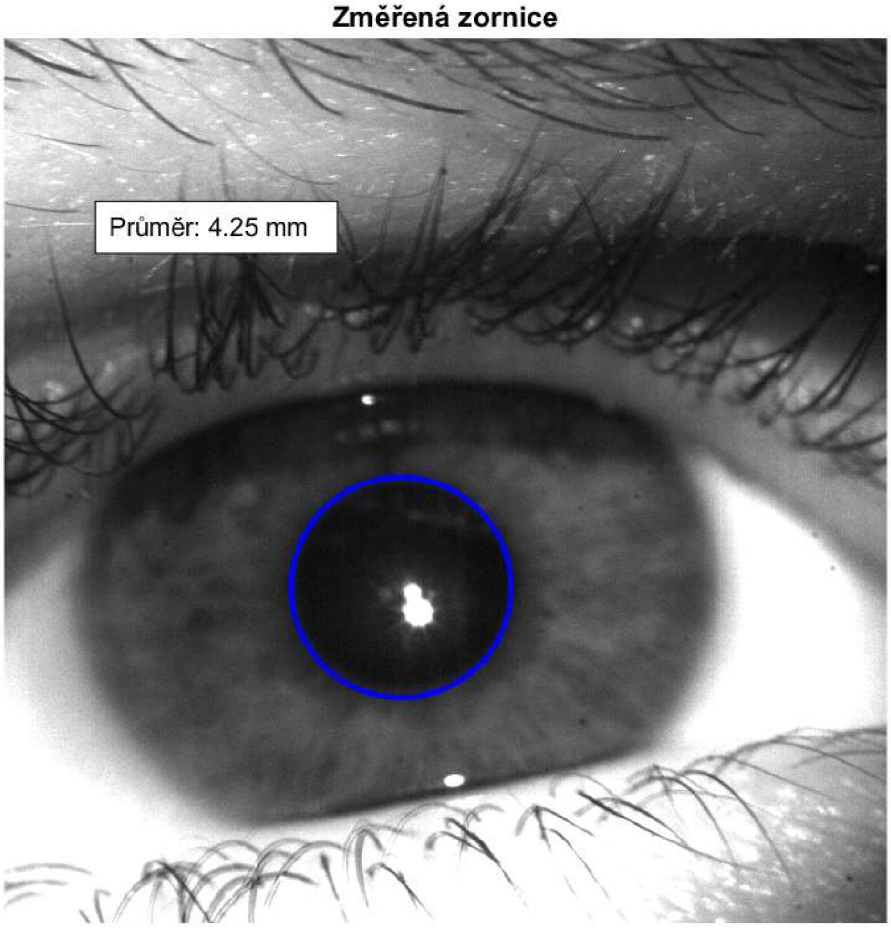
Při zpracování bylo nutné nastavit oblast zájmu na spodní polovinu obrazu, což byla oblast s nejvyšší pravděpodobností výskytu zornice. Tím byla analytická pozornost omezena pouze na relevantní oblasti, což zvýšilo rychlost zpracování a snížilo počet falešných detekcí z jiných oblastí snímku. V rámci regionprops se hledal největší objekt podle velikosti hlavní osy, což se předpokládalo, že bude zornice.

Z vypočtených statistických údajů pak byla určena poloha středu a délka hlavní osy tohoto objektu. Poloha středu nám poskytla střed pro kruh reprezentující zornici, zatímco délka hlavní osy byla použita pro výpočet průměru. Výsledný změřený průměr byl přepočten z pixelů na milimetry. Analyzovaná oblast z binárního obrazu, v tomto případě zornice byla zakreslena modře přes původní snímek a zobrazena v okně spolu s velikostí zornice.

3.3.6 Přepočet na milimetry

Pro přepočet pixelů na milimetry, byla použita fotografie milimetrové stupnice vyfocené stejným objektivem použitým pro pořízení záznamů. Důležité bylo, aby vzdálenost stupnice od objektivu byla stejná jako vzdálenost oka od objektivu. Následně byla fotografie stupnice otevřena v programu MATLAB a pomocí analytických nástrojů se ručně změřila velikost jednoho milimetru

v pixelech, ta byla pro objektiv sigma zhruba 120 pixelů. Tato hodnota byla poté použita v kódu pro přepočet velikosti zornice z pixelů na milimetry (viz obr. 14).



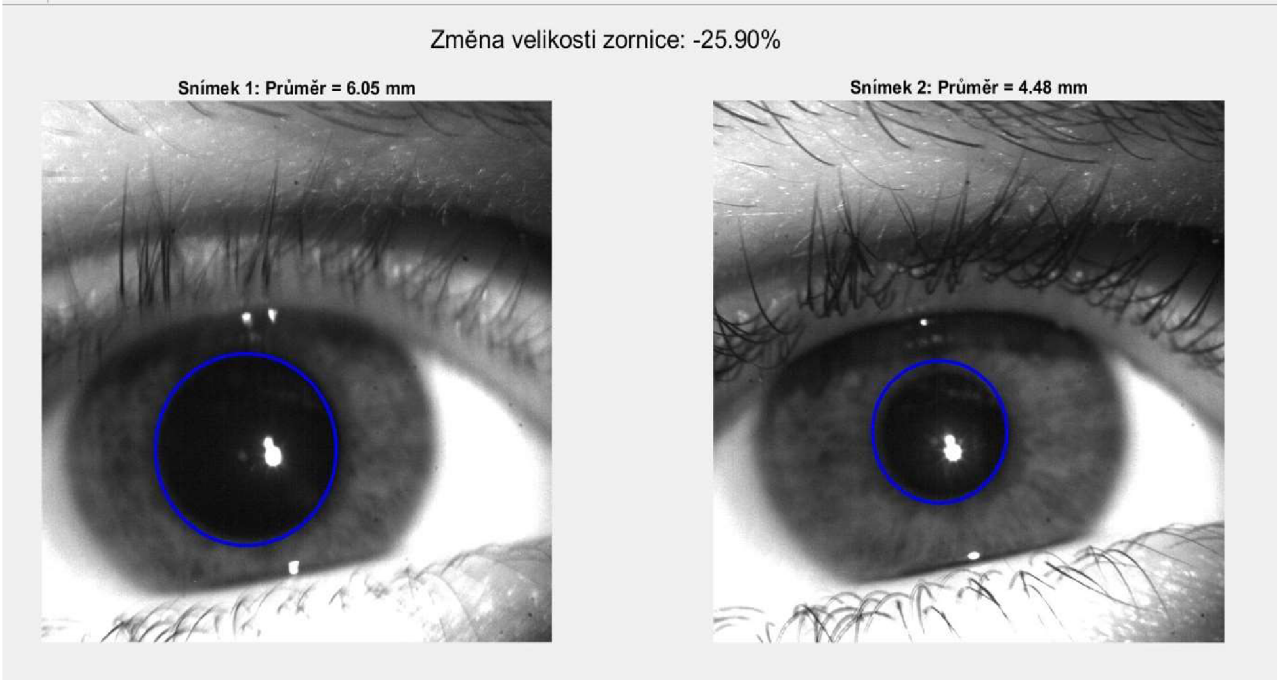
Obr. 14 Zornice s průměrem přepočítaným na milimetry (Autor)

3.4 Měření pomocí studentovi metody

Bylo vybráno jedno video a jedna sada snímků, které byly nejlépe zachycena a následné zpracování obrazu na nich fungovalo nejlépe. Pro měření byla snaha o analýzu videa, ta se však ukázala být moc výpočetně náročná. Proces pro změření zornice na videu byl stejný jako na fotografii. Všechny výše zmíněné kroky, se dali do smyčky, která opakovala celý proces na každý snímek videa zvlášť. Vzhledem k příliš vysoce zvolené snímkovací frekvenci při pořizování záznamů, obsahovala krátká 2-3 sekundová videa stovky snímků. Tím pádem bylo nutné opakovat celý proces několiksetkrát. Krom výpočetní náročnosti byla analýza videí i časově náročnější

a podléhala více chybám. Program třeba i správně označil zornici, ale nezobrazil nikde její velikost, i když v kódu byli dodrženy kroky pro změření a zobrazení velikosti průměru.

Kvůli vzniklým komplikacím byla zvolena analýza dvou fotografií. Byl vybrán první a poslední snímek záznamu, jelikož šlo o místa největších extrémů velikosti zornice. Na každém z těchto dvou snímků proběhlo kompletní zpracování obrazu od převodu z RGB, filtrování, prahování, vyplnění mezer, analýzu spojitých oblastí až po následný přepočet pixelů na milimetry. Oba snímky s vyznačenými zornicemi byli zobrazeny v jednom okně. Byl přidán i krok pro porovnání těchto velikostí a následně byla změna velikosti v procentech vypsána spolu s velikostmi zornic v milimetrech (viz obr. 15). Kód programu je uveden v příloze A.



Obr. 15 Výsledek měření pomocí studentovi metody (Autor)

Studentem navržená metoda postrádá možnost měření rychlosti stahu zornice, nelze pomocí ní určit kromě velikosti a její změny také rychlost jejího následného roztažení nebo latenci. Snímaná byla pouze vždy jedna zornice, tím pádem nelze určit symetrii reflexu.

I přes veškerou snahu autora o zachování stejných podmínek při jednotlivých měřeních, mohlo dojít k chybám vzniklých například pohybem figuranta nebo pohybem samotného objektivu při

ostření. Metoda také nemá určenou chybu měření a odchylky, tím pádem jsou získané údaje pouze orientační. Chyby při zpracování obrazu byli zapříčiněny z velké části vzniklými odlesky.

3.5 Pupilometr Neuroptics NPI-200

Kvantitativní vyšetření zornicového reflexu je umožněno díky přístroji NPI-200, od Amerického výrobce NeurOptics (viz obr. 16). Jedná se druhou generaci přístroje. Přístroj je napájen 3.7 V 3350 Amp/hodin lithium iontový akumulátorem. Jedná se o lékařské zařízení třídy 1, jelikož se jedná o neinvazivní zdravotnický prostředek. Přístroj je LED Produkt Třídy 1 dle IEC 60825.

NPI-200 je vybaven infračervenou kamerou a párem infračervených diod, které využívá pro osvícení záznamu a zaměření zornice. Pro zaměření zornice se využívá metody zvané dark pupil effect.

Obr. 16 Pupilometr NPI-200 v dobíjecí stanici (Neuroptics 2022)

Světelný impulz o hodnotě 1000 luxů a délce 0,8 sekund je zajištěn čtveřicí LED diod, které jsou umístěny kolem objektivu přístroje. Přístroj je vybaven malým dotykovým LCD displejem a tlačítky pro orientaci v operačním systému zařízení. Dvojice tlačítek LEFT a RIGHT slouží k pořízení záznamu pravého a levého oka. Pro měření na pacientech se používá plastový nástavec SmartGuard, který se používá zvlášť pro každého pacienta, kvůli zajištění hygienických protokolů.

SmartGuard (viz obr. 17) obsahuje RFID čip pro identifikaci pacienta a pro ukládání dat. Jedná se o jedinou část přístroje, která je v kontaktu s pacientem.

Obr. 17 Nástavec SmartGuard (Hannig, 2024)

3.5.1 Data získaná přístrojem

Přístroj měří maximální a minimální velikost zornice v milimetrech s chybou měření 0,03 mm. Rychlost zúžení zornice je měřena v milimetrech za sekundu. Přístroj dále měří latenci a NPi. Latence je měřený čas v sekundách od začátku světelného impulzu po začátek změny velikosti zornice. NPi neboli neurological pupillary index je skalární hodnota, která se pohybuje od 0 do 5 (± 0.1), a je odvozena z algoritmu založeného na integraci zmíněných proměnných zornice. NPi je jedním z patentů výrobce zařízení.

3.5.2 Neurological pupillary index

Algoritmus NPi byl vyvinut ke kvantifikaci zornicové reaktivity, z důvodu subjektivity běžného vyšetření. Proměnné zornic jako velikost, latence, zúžení, rychlost a rychlost dilatace jsou

parametry algoritmu NPi. Každá proměnná zornice pořízená pupilometrem se porovnává s referenčním modelem průměrů zdravých subjektů pro stejnou proměnnou. Nejprve se bere rozdíl a poté se standardizuje odpovídající odchylkou. Nakonec se soubor všech standardizovaných nebo z-skóre spojí do jedné tabulky na stupnici od 0 do 5 (viz tabulka 1). Skóre NPi 3 znamená, že reaktivita spadá do mezí normálního chování zornic (reakce je buď "rychlá" nebo "normální"). Hodnota NPi blížící se hodnotě 5 je považována za "svižnější" a fyziologicky normální. Hodnota NPi < 3 znamená abnormální reakci na světlo. Hodnota 1 znamená více abnormální než hodnota 3 (Olson a Fishel, 2016).

Měřená hodnota	Posouzení
3,0 – 4,9	Normální / „rychlá reakce“
< 3,0	Abnormální / „pomalá reakce“
0	Bez reakce / Atypická reakce

Tabulka 1 Reakce zornice podle NPi

3.5.3 NPi jako možná indikace vývoje stavu pacienta

Studie naznačují přímou korelaci mezi hodnotami NPi a zvýšením nitrolebního tlaku u pacientů s akutním poškozením mozku. Hodnoty NPi < 3 jsou považovány za abnormální a znamenají nižší reaktivitu zornice na světlo. Nižší reaktivita bývá způsobena různými faktory, ať už jde o kompresi nervů v důsledku krvácení, přímé mechanické poškození v oblasti mozkového kmene nebo ischemii. U akutních pacientů je důležité monitorovat hodnoty nitrolebního tlaku. Zvýšený nitrolební tlak může způsobit sekundární poškození. Vysoké hodnoty nitrolebního tlaku naznačují často horší výsledky pro uzdravení pacienta. Studie Pupillary reactivity as an early indicator of increased intracranial pressure (Chen et al., 2011) zahrnovala 134 pacientů z osmi různých klinických center intenzivní péče. Šlo o pacienty s traumatickým poraněním mozku, aneurysmatickým subarachnoidálním krvácením nebo intracerebrálním krvácením. U pacientů byli snímány hodnoty nitrolebního tlaku a byla měřena reaktivita zornice pomocí pupilometru společnosti NeurOptics. Výsledkem studie bylo prokázání vztahu nízkých hodnot NPi se zvyšujícími se hodnotami nitrolebního tlaku. První známky změny reaktivity zornice se projevili v průměru 16 hodin před zvýšením hodnot nitrolebního tlaku. Přičemž největší zvýšení těchto hodnot bylo u pacientů s nereaktivními zornicemi čili NPi se rovnalo nebo bylo blízko hodnotě 0.

Studie tedy ukázala výrazný obrácený vztah mezi klesající reaktivitou zornice a rostoucím nitrolebním tlakem. (Chen et al., 2011)

Studie Quantitative versus standard pupillary light reflex for early prognostication in comatose cardiac arrest patients (Oddo et al., 2018) zkoumala vztah mezi vývojem neurologického stavu komatózních pacientů po srdeční zástavě a hodnotami NPi. Do studie bylo zahrnuto 456 pacientů z deseti různých evropských středisek intenzivní péče. Studie byla dvojitě zaslepená a sledovala hodnoty zornicových reakcí během prvních tří dnů od přijetí na jednotku intenzivní péče. Vyhodnocení pupilomotorického reflexu bylo prováděno pomocí pupilometru NPI-200 a pomocí manuální kvalitativní metody se svítilnou. Výsledkem studie bylo, že hodnoty NPi ≤ 2 měli stoprocentní pozitivní prediktivní hodnotu a stoprocentní specifitu pro predikci nepříznivého vývoje neurologického stavu pacientů. Nepříznivý vývoj zahrnoval těžké neurologické postižení, vegetativní stav nebo smrt pacienta. Studie také poukázala na rozdílné výsledky mezi pupilometrem a manuální kvalitativní metodou a na větší přesnost výsledků z pupilometru. Studie poskytla cenné důkazy o možnosti použití hodnot NPi jako nástroje pro prognózu u pacientů po srdeční zástavě (Oddo et al., 2018).

Studie Detection of delayed cerebral ischemia using objective pupillometry in patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage (Aoun et al., 2020) zjišťovala vztah mezi vývojem zpožděné cerebrální ischemie a hodnotami NPi u pacientů po aneuryzmálním subarachnoideálním krvácením. Studie zahrnovala 56 pacientů jednotek neurologické intenzivní péče z University of Texas Southwestern Medical Center. U pacientů bylo prováděno pravidelné měření pomocí pupilometru. Data z pupilometru byla vyhodnocována spolu s transkraniálním dopplerovským měřením mozkových tepen. Výsledky ukázali vztah mezi výrazným snížením hodnot NPi a vývojem zpožděné cerebrální ischemie. Studie zdůraznila význam NPi jakožto nástroje pro prognózu této ischemie (Aoun et al., 2020).

3.6 Měření pomocí pupilometru NPI-200

Pupilometr použitý v bakalářské práci byl zapůjčen Technické univerzitě v Liberci od českého distributora pupilometrů Mondiag s.r.o. se souhlasem od Amerického výrobce NeurOptics. Jedná se o předposlední model výrobce. Bylo s ním provedeno měření na třech figurantech včetně autora.

Obr. 18 Zornice zaměřená pupilometrem (Autor)

Pupilometr je nutné vyjmout z dobíjecí stanice a zapnout pomocí tlačítka, které se drží po dobu 3 sekund, než se rozsvítí obrazovka přístroje. Po zapnutí se na displeji zobrazí upozornění s animací, které hlásí že je zapotřebí připojit nástavec SmartGuard. Bez připojeného nástavce, přístroj nedovolí provádět měření. SmartGuard je vždy určen pouze pro jednu osobu, kvůli dodržení hygienických protokolů. Obsahuje také RFID čip, který slouží jednak pro ukládání naměřených dat a také jako identifikátor pro pacienty. Při prvním použití nového nástavce, je nutné nejdříve zadat identifikační číslo pacienta. Identifikační číslo lze zadat ručně přímo v pupilometru. Nebo se přidá automaticky po načtení čárového kódu na identifikačním náramku pacienta.

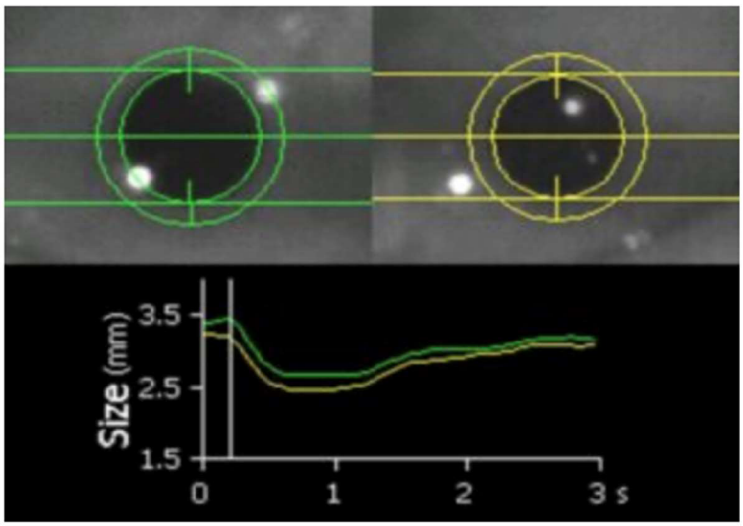
Pro získání identifikačního čísla z čárového kódu je k přístroji také dodávána čtečka, kterou je nejprve nutné spárovat s přístrojem.

Obr. 19 První strana s daty na obrazovce pupilometru (NeurOptics, 2024)

Po připojení nástavce SmartGuard na objektiv pupilometru se na obrazovce zobrazí identifikační číslo a hláška, že je přístroj připravený pro měření. Pro samotné měření je nutné přiložit pupilometr k jednomu z očí, tak aby se ochranný pěnový proužek nástavce dotýkal spodního kraje očnice. Přístroj by se měl umístit tak aby nástavec byl v pravém úhlu k ose vidění pacienta, aby se minimalizoval jakýkoliv náklon přístroje vůči měřené osobě. Víčko měřeného oka je zapotřebí lehce nadzvednout palcem. Pro spuštění měření slouží tlačítka left a right. Pro měření pravého oka byla zmáčknuto tlačítko right. Tlačítko je zapotřebí držet, dokud přístroj neprovede zaměření zornice (viz obrázek 18). Že je zornice zaměřená je signalizováno na displeji zobrazeným zeleným kruhem kolem zornice. Po zobrazení zeleného kruhu se tlačítko right uvolní a přístroj spustí pomocí čtveřice led diod světelný impulz a zaznamenává pupilomotorický reflex. Po změření pravého oka se provede stejný proces pro oko levé. Pro změření levého oka se používá tlačítka left. Po změření reflexu obou očí přístroj uloží číselné hodnoty do paměti uložené v nástavci.

Obr. 20 Strana dva s daty na obrazovce pupilometru (NeurOptics, 2024)

Na obrazovce přístroje se zobrazí hodnoty NPi a velikosti zornice pro levé a pravé oko. V tabulce je i porovnání hodnot pro levé a pravé oko. Pod tabulkou hodnot se zobrazí křivka představující změnu velikosti zornice za čas (viz obr. 19). Následně je možné v přístroji prohlížet všechna získaná data (viz obr. 20) a křivky jejich průběhů v čase. Přístroj umožňuje i přehrání záznamu samotného reflexu s označenou zornicí (viz obr. 21). V případě špatně provedeného měření, například z důvodu mrknutí oka, se v tabulce zobrazí nápis „rescan“ signalizující nutnost opakování měření. Naměřené hodnoty lze importovat do počítače přiložením nástavce SmatrGuard k čtečce RFID čipů od společnosti Omnikey. Data jsou importována do počítače jako hodnoty



Obr. 21 Záznam pupilomotorického reflexu na pupilometru (NeurOptics, 2024)

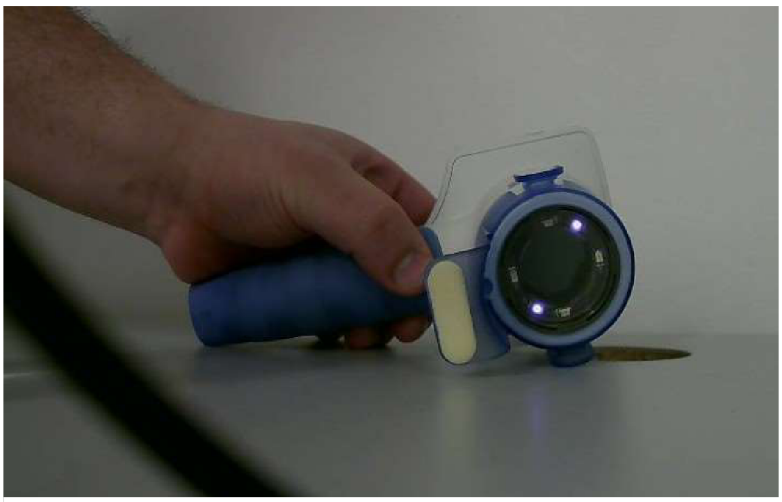
v Microsoft Excel tabulce (viz tabulka 2). Nahrávky reflexů a křivky změn trendů v čase jsou uloženy v paměti pupilometru a nelze je exportovat.

NPiL	SizeL	MinL	%L	CVL	MCVL	DVL	LatL	NPiR	SizeR	MinR	%R	CVR	MCVR	DVR	LatR
4,5	4,16	2,66	36	2,34	3,7	1,15	0,23	4,7	3,78	2,24	41	2,27	3,64	0,74	0,2
4,6	3,84	2,51	35	2,03	3,11	1,02	0,23	4,7	3,38	2,12	37	1,85	2,89	0,64	0,23
4,6	3,92	2,5	36	2,29	3,26	0,77	0,23	4,7	3,17	2,09	34	1,76	2,81	0,85	0,2
4,5	3,78	2,55	33	1,9	3,01	1,05	0,23	4,7	3,34	2,16	35	1,78	2,75	0,94	0,23
4,5	4	2,64	34	1,96	3,31	1,01	0,23	4,7	3,36	2,21	34	1,69	2,97	0,72	0,23
4,4	3,84	2,65	31	2,09	5,92	0,95	0,17	4,3	4	2,77	31	2,36	3,42	0,82	0,17
4,2	4,12	2,9	30	1,89	4,13	0,95	0,2	4	4,46	3,06	31	2,4	3,78	0,75	0,2

Tabulka 2 Importovaná data z nástavce SmartGuard do Microsoft Excel

3.6.1 Zhodnocení měření pomocí NPI-200

Při měření s pupilometrem NPI-200 bylo experimentováno s prostředím s různými světelnými podmínkami. Některá měření probíhala za úplné tmy, většina proběhla v dobře osvětlené místnosti s zářivkami. Díky využití infračervené kamery a dvojic infračervených diod (viz obr. 22) neměla změna světelného prostředí žádný vliv na pořízený záznam a na následné vyhodnocení pupilomotorického reflexu. Měření bylo provedeno i na různých barvách očí. Veškerá měření proběhla rychle a neobjevili se žádné chyby přístroje. Přístroj včasně rozpoznal, pokud figurant mrknul a požádal o opakování měření. Veškerá měření pupilometrem byla prováděna za účelem ověření funkčnosti přístroje a pro prozkoumání jeho užitných vlastností. Data získaná přístrojem jsou pouze na ukázku, nemají žádný klinický význam. Všichni figuranti byli zdraví jedinci při



Obr. 22 Rozsvícené infračervené diody (Autor)

vědomí bez akutního neurologického poškození či komatózního stavu. Z toho důvodu u nich měření kvality pupilomotorického reflexu ani nemohlo získat data, která by o něčem vypovídala.

3.7 Měření kvalitativní metodou za pomocí svítilny

Běžně používanou metodou pro zhodnocení pupilomotorického reflexu je za použití lékařské svítilny. Pro měření byla použita svítilna Nextorch Dr.K3S, která byla použita i pro účely studentovi pupilometrické metody (viz. obr. 22). Zhodnocení kvality stahu zornice bylo provedeno na 2 figurantech. Sledovala se přímá i nepřímá reakce na světlo. Nejprve byla velikost zornice porovnána s referenční stupnicí na boku svítilny. Poté bylo osvíceno oko ze vzdálenosti zhruba 15 cm krátkým světelným impulzem. Následná změna ve velikosti zornice byla odhadnuta na základě podobnosti s velikostí na referenční stupnici. Stejný postup byl po několika minutové pauze aplikován na druhé oko. Vyšetření nepřímé reakce na světlo proběhlo stejně, pouze bylo pozorováno neosvícené oko.

Obr. 23 Svítilna Nextorch Dr.K3S (Autor)

3.7.1 Zhodnocení měření za pomocí svítilny

U všech měření byla přítomna pozitivní přímá i nepřímá reakce na světlo. I přes přítomnost referenční stupnice, bylo velice těžké určit velikost zornice pouze pozorováním. Pro netrénovaného jedince, které není zvyklý vyšetřovat pupilomotorický reflex pravidelně je i těžké určit zda byla reakce svižná nebo spíše pomalejší. Pří změně světelných podmínek, konkrétně za vyššího osvětlení, bylo horší určit změnu velikosti zornice. Měření bylo prováděno pouze za účelem

vyzkoušení si dané metody a ověření jejich užitných vlastností. Všichni figuranti byli zdraví jedinci bez akutního neurologického poškození či komatózního stavu. Z toho důvodu u nich měření kvality pupilomotorického reflexu ani nemohlo získat data, která by o něčem vypovídala.

Francouzská studie z roku 2016 Reliability of standard pupillometry practice in neurocritical care: an observational, double-blinded study testovala spolehlivost manuálního vyšetření pupilomotorického reflexu. Do studie bylo zahrnuto 59 pacientů po akutním poškození mozku z jednotek intenzivní péče nemocnic v Marseille a Saint-Pierre la Reunion (Couret et al). Bylo provedeno celkem 406 měření zornicových reakcí pomocí manuální metody a infračerveného automatizovaného pupilometru. V 18 % případů se výsledky těchto dvou metod lišily, což může být bráno jako významný rozdíl v kontextu intezivní medicíny. Při manuálním měření docházelo k chybným výsledkům obzvláště v případě anizokorie zornic u kterých byla shoda pouhých 50 %, největší problém představovali pacienti s menší velikostí zornice. U pacientů sedatovaných sufentanilem byla zaznamenaná značná nepřesnost manuálního měření. Sufentanil jakožto opioid způsobuje stažení zornic. Studie tedy ukázala na větší přesnost u dat získaných pomocí infračerveného pupilometru (Couret et al).

Studie Interrater Reliability of Pupillary Assessments (Olson et al) provedená týmem z University of Texas Southwestern Medical center, se zaměřila na porovnání spolehlivosti měření pupilomotorického reflexu pomocí infračerveného automatizovaného pupilometru a manuální kvalitativní metody. V rámci studie bylo provedeno celkem 2329 párových hodnocení na celkem 127 pacientech s neurologickými diagnózami, u kterých bylo zapotřebí pravidelně provádět vyšetření zornic. Výzkum poukázal na různorodé zhodnocení zornice v závislosti na osobě, která manuální měření prováděla. Dále bylo zjištěné že 33,3 % zornic vyhodnocených manuální metodou jako nereaktivních vyhodnotil pupilometr jakožto reaktivní. Studie tedy prokazuje a klade důraz na daleko větší přesnost a spolehlivost vyšetření pomocí infračervené pupilometrie (Olson et al).

3.8 Porovnání pupilometrických metod

V práci bylo provedeno a popsáno měření pomocí tří metod. Pomocí studentem navržené pupilometrické metody, pomocí automatizovaného infračerveného pupilometru od amerického výrobce Neuroptics, konkrétněji modelu NPI-200. V poslední řadě bylo provedeno měření pomocí manuální kvalitativní metody za pomocí lékařské svítilny určené k pupilometrii.

Studentova metoda spočívala v záznamu pupilomotorického reflexu průmyslovou kamerou a následného zpracování obrazu pomocí programu MATLAB. Hlavními nevýhodami studentovi metody, byl nízký počet získaných dat. Studentův program v MATLABu umožňoval zisk pouze maximální a minimální hodnoty velikosti zornice a procentuální změny velikosti mezi těmito extrémy. Chyběla možnost sledování rychlosti stahu zornice, či latence. Získané hodnoty také byli pouze orientační kvůli nestanovené chybě měření a odchylce. Příprava celé optické soustavy byla příliš časově náročná. Pro spuštění záznamu a vyvolání reflexu světelným impulzem byla nutná přítomnost minimálně dvou osob, přičemž jedna spouštěla záznam a druhá světelný impulz na oko figuranta. Zvolená kamera se také neukázala být ideální volbou pro záznam. Samotné oko, které bylo zapotřebí osvítit působilo jako reflexní plocha pro světelný impulz. Odlesky způsobovali řadu problému pro následné zpracování obrazu. Mezi výhody patří možnost zpětného přehrání záznamu zornicové reakce.

Pupilometr NPI-200, fungoval velice jednoduše a intuitivně. Samotné měření bylo velice rychlé a získaná data je možné ve formě tabulky uchovávat spolu s lékařskou dokumentací. Umožňuje i sledování změny trendů v čase. Díky využití infračervené kamery a metody dark pupill effect byla zornice zaměřena velice rychle. Nástavec SmartGuard zajišťuje stejnou vzdálenost od oka při každém měření. Díky detekci mrknutí jsou eliminována špatná měření. Pro provedení měření pomocí pupilometru není zapotřebí žádných předešlých zkušeností a je zvládnutelné i pro naprosté laiky. Navíc umožňuje prohlednutí si záznamu reakce zornic spolu se změnou trendů hodnot.

Kvalitativní manuální vyšetření je nejběžněji používaná metoda používané pro vyhodnocení zornicových reakcí. Je však zatížena velkou mírou subjektivity. Výsledky jsou určeny pouhým pozorováním osoby, která vyšetření provádí. Vyšetření touto metodou vyžaduje určité zkušenosti, jelikož není lehké pro netrénovanou osobu určit velikost zornice pouze pohledem. I při použití referenční stupnice pro porovnání velikosti, nemusí být zjištěné údaje stoprocentní. Vyhodnocení bývá nejhorší u malých zornic, jelikož změna velikosti bývá na první pohled velice nepatrná. Při vyšetření za vyššího osvětlení, bývá změna velikosti také málo znatelná.

4 Zvážení etických a bezpečnostních aspektů experimentu

4.1 Zvážení etických aspektů experimentu

Vedoucí práce a student zvážili veškeré etické aspekty experimentu. Všichni figuranti udělili souhlas s účastí na výzkumu. Identita těchto figurantů byla anonymizována. Nebyl sbírán žádný biologický materiál a jejich jména ani obličeje nevystupují nikde v práci. Při řešení práce nebylo ani nijak nakládáno s jmény ani s jinými údaji figurantů. Veškerá data získána při měření zornicových reakcí slouží pouze jako ilustrační materiál této práce, nebyla žádná snaha o posouzení zdravotního stavu figurantů. Při měření pomocí pupilometru NPI-200 bylo postupováno podle pokynů výrobce a data byla ukládána do přístroje pod anonymizovanými identifikačními čísly, která byla figurantům přiřazena náhodně. Po provedených měřeních byla veškerá data z přístrojů a jejich nástavců smazána.

4.2 Zvážení bezpečnostních aspektů experimentu

Vedoucí práce a student zvážili veškerá bezpečností rizika experimentu. Pupilometr NPI-200 od amerického výrobce NeurOptics je lékařské zařízení třídy 1, jelikož se jedná o neinvazivní zdravotnický prostředek. Přístroj je LED Produkt Třídy 1 dle IEC 60825 a je osvobozen od povinnosti 510k podle US FDA (United States Food and Drug Administration) a označen CE (Conformité Européenne) pro Evropský hospodářský prostor pro použití u dospělých i dětí. Při měření pomocí tohoto přístroje byli dodržovány veškeré hygienické protokoly a pro každého figuranta byl použit nový nástavec SmartGuard. Použitá lékařská svítilna má fotobiologickou úroveň bezpečnosti RG0, tím pádem nehrozilo poškození očí při jejich přímém osvitu. Figurantům tedy při experimentu nehrozilo riziko poškození zraku ani jiné bezpečnostní riziko. Světelný impulz ani nezpůsoboval žádné bolestivé podněty.

5 Diskuze

Jako nejpřesnější a nejvhodnější se ukázala být metoda za použití pupilometru NPI-200. Data získaná přístrojem nejsou zatížena subjektivitou osoby, která měření provádí. Výhodou přístroje je také zachování stejných podmínek pro jednotlivá měření jako je vzdálenost od oka nebo světelný impulz. Infračervená kamera spolu s dvojicí infračervených diod funguje rychle pro zaměření zornice. Jednou z hlavních výhod přístroje je získání NPi, který vyhodnocuje celkovou míru pupilomotorického reflexu. Studie (Chen et al., 2011) a (Fountas et al., 2006) dokázali možnost predikce i malých změn nitrolebního tlaku pomocí nízkých hodnot NPi. Studie (Oddo et al., 2018) a Neurological Pupil Index for the Early Prediction of Outcome in Severe Acute Brain Injury Patients (Romagnosi et al., 2022) potvrdili možnost prognózy budoucího vývoje neurologického stavu u komatózních pacientů po srdeční zástavě na základě hodnot NPi.

6 Návrh doporučení pro praxi

Na základě zkoumání a porovnání dostupných metod se infračervená pupilometrie, jeví jako ideální metoda pro vyhodnocování pupilomotorického reflexu u akutních neurologických stavů. Konkrétněji se doporučuje použití přístroje od amerického výrobce NeurOptics, NPI-200. Přístroj je schopný měřit maximální a minimální průměr zornice v milimetrech, reaktivitu zornice jako procentuální změnu velikosti. Dále lze pomocí pupilometru určit rychlost stahu zornice po vyvolání světelného impulzu a následnou rychlost roztažení po ukončení světelného impulzu, obě tyto hodnoty jsou uváděny v jednotkách mm za sekundu. V neposlední řadě získáme informace o latenci vyjádřenou v sekundách, což je doba trvání mezi světelným impulzem a začátkem reflexu. Poslední získanou hodnotou je NPi, anglicky neurological pupillary index, který hodnotí celkovou míru pupilomotorického reflexu, jedná se o patent společnosti NeurOptics. NPi je skalární veličina nabývající hodnot od 0 do 5. Pomocí hodnot NPi lze odhadnout budoucí vývoj zdravotního stavu pacientů s akutním mozkovým traumatem, nebo u komatózních pacientů po srdeční zástavě.

Přístroj je používán v několika různých zdravotnických zařízení v České republice. A je možné, že se v budoucnu rozšíří do více lékařských oborů, než je intenzivní medicína a neurologie.

7 Závěr

Bakalářské práce se zaměřuje na pupilometrii a její význam v kontextu neurologické intenzivní péče. V teoretické části je popsáno viditelné a infračervené spektrum. Součástí teoretické části je i anatomický popis zrakového ústrojí a pupilomotorických nervových drah. Je vysvětlen význam samotného reflexu. Teoretická část nastiňuje i průběh vyšetření zornic pouhým pohledem a vysvětluje princip fungování infračervené pupilometrie.

Ve výzkumné části bakalářské práce byli stanovené tři cíle. Prvním cílem byl návrh vlastní pupilometrické metody. Pro její realizaci bylo nutné postavit polohovatelnou soustavu obsahující kameru pro strojové vidění a vybrat vhodný objektiv. Pro nepřímé osvětlení bylo použito červené světlo o vlnové délce, jenž minimálně evokovala změnu zornice. Následně byli pořízeny záznamy zornicových reakcí na světelný podnět vyvolaný lékařskou svítilnou určenou pro pupilometrické účely. Pro vyhodnocení velikosti záznamu z fotografií a videí bylo využito programu MATLAB. V MATLABU byl vytvořený program, který s fotografiemi prováděl řadu operací potřebných pro následné vyhodnocení velikosti zornice. Po neúspěšných pokusech s vyhodnocením změny zornice na video záznamu byla vybrána metoda porovnání prvního a posledního snímku zornice. Vytvořený program změřil velikost zornice v milimetrech na snímcích ze začátku a z konce reflexu, poté vyhodnotil změnu velikosti v procentech. Studentem navržená metoda by neměla klinické uplatnění.

Druhým cílem bylo provést pupilometrické měření pomocí studentovi metody, pomocí infračerveného automatizovaného pupilometru NPI-200 a jako poslední pomocí manuální kvalitativní metody za použití svítilny. Po popsaní provedených měření se práce dostává k poslednímu cíli.

Třetím a také posledním cílem bylo porovnat jednotlivé pupilometrické metody a vybrat z nich jednu která by byla nejvhodnější pro použití v praxi. Jako nejlepší metodou v kontextu neurologické intenzivní péče se ukázala být metoda za použití pupilometru NPI-200 od výrobce NeurOptics.

Seznam použité literatury

AOUN, Salah G.; Sonja E. STUTZMAN; Phuong-Uyen N. VO; Tarek Y. EL AHMADIEH; Mohamed OSMAN et al., 2020. Detection of delayed cerebral ischemia using objective pupillometry in patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage. online. Journal of Neurosurgery, vol. 132, no. 1, s. 27–32. Dostupné z: https://doi.org/10.3171/2018.9.JNS181928.

BENEŠ, Jiří; Daniel JIRÁK a František VÍTEK, 2022. Základy lékařské fyziky. 5. vyd. Učební texty Univerzity Karlovy. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum. ISBN 978-80-246-5398-3.

BONMATI-CARRION, Maria Angeles; Konstanze HILD; Cheryl ISHERWOOD; Stephen J. SWEENEY; Victoria L. REVELL et al., 2016. Relationship between Human Pupillary Light Reflex and Circadian System Status. online. PLOS ONE, vol. 11, no. 9, s. e0162476. Dostupné z: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162476.

COURET, David; Delphine BOUMAZA; Coline GRISOTTO; Thibaut TRIGLIA; Lionel PELLEGRINI et al., 2016. Reliability of standard pupillometry practice in neurocritical care: an observational, double-blinded study. online. Critical Care, vol. 20, no. 1, s. 99. Dostupné z: https://doi.org/10.1186/s13054-016-1239-z.

ČIHÁK, Radomír, 2016. Anatomie 3. 3., upr. a dopl. vyd. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-5636-3.

DOBIÁŠ, Viliam, 2013. Klinická propedeutika v urgentní medicíně. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-4571-8.

DRUGA, Rastislav; Miloš GRIM a Karel SMETANA, 2013. Anatomie periferního nervového systému, smyslových orgánů a kůže. Praha: Galén : Karolinum. ISBN 978-80-7262-970-1.

FIALA, Pavel a Jiří VALENTA, 2020. Přehled anatomie centrálního nervového systému. Učební texty Univerzity Karlovy. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum. ISBN 978-80-246-4477-6.

FOUNTAS, Kostas N., Eftychia Z. KAPSALAKI, Theofilos G. MACHINIS, Angel N. BOEV, Joe S. ROBINSON a E. Christopher TROUP. Clinical Implications of Quantitative Infrared Pupillometry in Neurosurgical Patients. Neurocritical Care [online]. 2006, 5(1), 55-60. ISSN 1541-6933. Dostupné z: doi:10.1385/NCC:5:1:55

HANNIG, Manfred, 2024. MHM-Diagnostics - Intensive care / NeurOptics. online. In: MHM-Diagnostics Medizinprodukt-Beratung und Vertrieb. Dostupné z: https:///en/products-en/neuroptics. [citováno 2024-04-22].

CHROBÁK, Ladislav et al., 2007. Propedeutika vnitřního lékařství: nové, zcela přepracované vydání doplněné testy. 2. vyd. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-1309-0.

JAKUB ŠTEFELA; VÁCLAV BÁČA; TOMÁŠ HERMA; JOSEF FONTANA; DAVID KACHLÍK et al., 2014. 6.1 Zrak | CNS. online. In: Úvod do centrální nervové soustavy: online kurz. Anatomický ústav 3. LF UK, 2014-12-04. Dostupné z: http://www.cnsonline.cz/?p=295.

KITTNAR, Otomar, 2020. Lékařská fyziologie. 2., přepracované a doplněné vydání. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-247-1963-4.

KRÁLÍČEK, Petr, 2023. Úvod do speciální neurofyziologie. 4. vyd. Praha: Galén. ISBN 978-80-7492-641-9.

LARSON, Merlin D. a Matthias BEHRENDS, 2015. Portable Infrared Pupillometry: A Review. online. Anesthesia & Analgesia, vol. 120, no. 6, s. 1242–1253. Dostupné z: https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000000314.

NEJEDLÁ, Marie, 2015. Klinická propedeutika pro studenty zdravotnických oborů. Sestra. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-4402-5.

NEUROPTICS, 2024. Measure Pupil Reactivity with NPi-200 Pupillometer. online. In: The Smart Approach to Pupillary Evaluation - NeurOptics. Dostupné z: https://neuroptics.com/npi-200-pupillometer/. [citováno 2024-04-24].

ODDO, Mauro; Claudio SANDRONI; Giuseppe CITERIO; John-Paul MIROZ; Janneke HORN et al., 2018. Quantitative versus standard pupillary light reflex for early prognostication in comatose cardiac arrest patients: an international prospective multicenter double-blinded study. online. Intensive Care Medicine, vol. 44, no. 12, s. 2102–2111. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s00134-018-5448-6.

OLSON, DaiWai M. a Megan FISHEL, 2016. The Use of Automated Pupillometry in Critical Care. online. Critical Care Nursing Clinics of North America, vol. 28, no. 1, s. 101–107. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.cnc.2015.09.003.

OLSON, DaiWai M.; Sonja STUTZMAN; Ciji SAJU; Margaret WILSON; Weidan ZHAO et al., 2016. Interrater Reliability of Pupillary Assessments. online. Neurocritical Care, vol. 24, no. 2, s. 251–257. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s12028-015-0182-1.

OTRADOVEC, Jiří, 2003. Klinická neurooftalmologie. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-0280-3.

PAŠTA, Jiří et al., 2017. Základy očního lékařství. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum. ISBN 978-80-246-2460-0.

RHCASTILHOS, 2009. Schematic diagram of the human eye in czech. obrázek; online. In: Wikimedia Commons, 2009-07-05. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_diagram_of_the_human_eye_cs.svg. [citováno 2024-04-29].

ROMAGNOSI, Federico; Adriano BERNINI; Filippo BONGIOVANNI; Carolina IAQUANIELLO; John-Paul MIROZ et al., 2022. Neurological Pupil Index for the Early Prediction of Outcome in Severe Acute Brain Injury Patients. online. Brain Sciences, vol. 12, no. 5, s. 609. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/brainsci12050609.

ROSINA, Jozef; Jana VRÁNOVÁ a Hana KOLÁŘOVÁ, 2021. Biofyzika: pro zdravotnické a biomedicínské obory. 2., dopl. vyd. Praha: Grada. ISBN 978-80-271-2526-5.

SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ, 2014. Fyziologie oka a vidění. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-3992-2.

ŠAPITÓ, 2024. Akomodace oka. online. In: Šapitó - černobílé hračky. Dostupné z: https://www.sapito.cz/blog/akomodace/. [citováno 2024-04-26].

TAIR1978, 2023. Anizokorie. obrázek; online. In: Wikipedia, 2023-05-27. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Anizokorie&oldid=22832409. [citováno 2024-04-26]. Page Version ID: 22832409.

TOBII, 2023. Tobii Customer Portal. online. 2023-06-01. In: Connect with Tobii. Dostupné z: https://connect.tobii.com. [citováno 2024-04-26].

TOMEO-REYES, Inmaculada, 2015. Robust Iris Recognition using Decision Fusion and Degradation Modelling. Doctor of Philosophy Thesis. Queensland: Queensland University of Technology, Faculty of Science and Engineering. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/291074433_Robust_Iris_Recognition_using_Decision_Fusion_and_Degradation_Modelling#fullTextFileContent.

TUFUOR, Terence, 2017. Using Active IR for eye detection and tracking. PDF; online. 2017 Tech Notes. ECE Senior Capstone Project. Dostupné z: https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2017/05/Violet_Tufuor.pdf.

Seznam tabulek/grafů

Tabulka 1 Reakce zornice podle NPi 37
Tabulka 2 Importovaná data z nástavce SmartGuard do Microsoft Excel 42

Seznam obrázků/schémat

Obr. 1 Spektrum elektromagnetického záření (Rosina, Vránová a Kolářová, 2021) 13
Obr. 2 Anatomie zrakového ústrojí (Rhcastilhos, 2009) 15
Obr. 3 Svěrač a rozvěrač zornice (Tomeo-Reyes, 2015) 16
Obr. 4 Průběh zrakové dráhy (Jakub Štefala et al., 2014) 19
Obr. 5 Anizokorie zornice (Tair1978, 2023) 20
Obr. 6 Vlevo reflexní dráha pro mydriázu, vpravo pro miózu (Králíček, 2023) 21
Obr. 7 Posuvná soustava pro pupilometrii (Autor) 25
Obr. 8 Soustava s červeným osvětlením a objektivem InfiniProbe TS-160 (Autor) 26
Obr. 9 Kalibrace kamery pomocí plastikového anatomického modelu (Autor) 27
Obr. 10 Pořizování záznamu pupilomotorického reflexu na figurantovi (Autor) 28
Obr. 11 Originální snímek, před zpracováním obrazu (Autor) 29
Obr. 12 Binární obraz vzniklý prahováním (Autor) 30
Obr. 13 Binární obraz po vyplnění mezer (Autor) 31
Obr. 14 Zornice s průměrem přepočítaným na milimetry (Autor) 33
Obr. 15 Výsledek měření pomocí studentovi metody (Autor) 34
Obr. 16 Pupilometr NPI-200 v dobíjecí stanici (Neuroptics 2022) 35
Obr. 17 Nástavec SmartGuard (Hannig, 2024) 36
Obr. 18 Zornice zaměřená pupilometrem (Autor) 39
Obr. 19 První strana s daty na obrazovce pupilometru (NeurOptics, 2024) 40
Obr. 20 Strana dva s daty na obrazovce pupilometru (NeurOptics, 2024) 41
Obr. 21 Záznam pupilomotorického reflexu na pupilometru (NeurOptics, 2024) 41
Obr. 22 Rozsvícené infračervené diody (Autor) 42
Obr. 23 Svítilna Nextorch Dr.K3S (Autor) 43

Seznam příloh

Příloha A: MATLAB program pro pupilometrii

```
nazvySouboru = {'mydriaza1.tiff', 'mioza1.tiff'};
prumeryMM = zeros(1, length(nazvySouboru));
zpracovaneObrazy = cell(1, length(nazvySouboru));
statistiky = cell(1, length(nazvySouboru));
kruhy = cell(1, length(nazvySouboru));
for i = 1:length(nazvySouboru)
originalniObraz = imread(nazvySouboru{i});
   if size(originalniObraz, 3) == 3
      sedivyObraz = rgb2gray(originalniObraz);
   else
      sedivyObraz = originalniObraz;
   end
filtrovanyObraz = medfilt2(sedivyObraz, [7 7]);
prahovaHodnota = 25;
binarniObraz = imbinarize(filtrovanyObraz, double(prahovaHodnota)/255);
invertovanyBinarniObraz = imcomplement(binarniObraz);
[radek, ~] = size(invertovanyBinarniObraz);
pulBinarniObraz = invertovanyBinarniObraz(round(radek/2):end, :);
vyplnenyPulBinarniObraz = imfill(pulBinarniObraz, 'holes');
invertovanyBinarniObraz(round(radek/2):end, :) = vyplnenyPulBinarniObraz;

 staty = regionprops(vyplnenyPulBinarniObraz, 'Centroid', 'MajorAxisLength');
 statistiky{i} = staty;
   if ~isempty(staty)
      [~, idx] = max([staty.MajorAxisLength]);
      stred = staty(idx).Centroid;
      stred(2) = stred(2) + round(radek/2);
```

```
        prumerVpixelech = round(staty(idx).MajorAxisLength);
        prumeryMM(i) = prumerVpixelech / 120;
        polomer = prumerVpixelech / 2;
        theta = linspace(0, 2 * pi, 100);
        xKruh = stred(1) + polomer * cos(theta);
        yKruh = stred(2) + polomer * sin(theta);
        kruhy{i} = [xKruh; yKruh];
    end
    zpracovaneObrazy{i} = originalniObraz;
end
if prumeryMM(1) > 0
 procentualniZmena = ((prumeryMM(2) - prumeryMM(1)) / prumeryMM(1)) * 100;
else
    procentualniZmena = NaN;
end
figure;
for i = 1:length(nazvySouboru)
    subplot(1, 2, i);
    imshow(zpracovaneObrazy{i});
    hold on;
    if ~isempty(statistiky{i})
        plot(kruhy{i}(1,:), kruhy{i}(2,:), 'b', 'LineWidth', 2);
    end
    title(sprintf('Snímek %d: Průměr = %.2f mm', i, prumeryMM(i)));
    hold off;
end
sgtitle(sprintf('Změna velikosti zornice: %.2f%%', procentualniZmena));
```