



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra kybernetiky

Praktické problémy pupilometrie

Practical problems of pupillometry

Diplomová práce

Studijní program: Biomedicínské inženýrství a informatika

Studijní obor: Biomedicínské inženýrství

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

Bc. Alena Palečková

Praha 2013

Prohlášení autora práce

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

V Praze dne 6. 5. 2013

Palečková

Podpis autora práce

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra kybernetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Bc. Alena P a l e č k o v á
Studijní program: Biomedicínské inženýrství a informatika (magisterský)
Obor: Biomedicínské inženýrství
Název tématu: Praktické problémy pupilometrie

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši odborné literatury v oblasti měření velikosti pupily a vlivu fotometrických veličin na velikost pupily.
2. Navrhněte experiment pro hodnocení chování pupily v závislosti na různých vizuálních stimulech s ohledem na fotometrické veličiny.
3. Proveďte vyhodnocení provedených experimentů a vytvořte postup pro správné pupilometrické měření.

Seznam odborné literatury:

- [1] Norman S. Greenfield, Richard A. Sternbach: Handbook of psychophysiology. New York, Holt, Rinehart and Winston, 1972.
[2] John L. Andreassi: Psychophysiology. Psychology Press, New York, 2007.

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

Platnost zadání: do konce letního semestru 2013/2014



prof. Ing. Vladimír Mařík, DrSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 1. 2013

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Vratislavu Fabiánovi, Ph.D. za odbornou pomoc při návrhu a řešení práce.

Dále děkuji své rodině a blízkým za podporu během studia.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou pupilometrie.

Jsou zde shrnuty základní pojmy a poznatky nutné ke správnému pochopení reakcí pupily a práci ve videookulografické laboratoři. Jsou popsány fotometrické veličiny, jejich vliv a vliv dalších faktorů na velikost pupily. V práci jsou zahrnuty experimenty ukazující chování pupily v závislosti na různých vizuálních stimulech.

V rámci práce byl vytvořen model, popisující změny velikosti pupily v závislosti na osvětlení.

V práci je uveden postup pro správné pupilometrické měření.

Klíčová slova

Pupilometrie, fotometrie, videookulografie.

Abstract

This master thesis is focused on pupillometry.

It summarizes the basic knowledge needed to properly understand the reactions of the pupil and work in the videooculography laboratory. Photometric quantities, their influence and influence of other factors on the size of the pupil are described. The thesis includes experiments showing the response of the pupil to different visual stimuli.

The model describing the pupil size as a function of illumination was created.

The thesis explains the procedure of correct pupillometric measurement.

Key words

Pupillometry, photometry, videooculography.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíle práce	11
3	Teoretické základy	12
3.1	Viditelné záření	12
3.2	Lidské oko	12
3.2.1	Pupila	13
3.3	Vliv osvětlení na vidění	14
3.4	Spektrální odezva	15
3.5	Radiometrie	16
3.5.1	Důležité pojmy.....	16
3.5.2	Množství záření.....	17
3.5.3	Zářivý tok.....	17
3.5.4	Zářivost	17
3.5.5	Ozáření.....	17
3.5.6	Intenzita vyzařování.....	17
3.5.7	Zář.....	18
3.5.8	Expozice.....	18
3.6	Fotometrie	18
3.6.1	Světelné množství	18
3.6.2	Světelný tok	19
3.6.3	Svítivost	19
3.6.4	Osvětlení	19
3.6.5	Světlení	20
3.6.6	Jas.....	21
3.6.7	Osvit.....	22
3.7	Helmholtz-Kohlrausch efekt	22
3.8	Videookulografie.....	22
3.9	Kontrast	22
3.10	Systémy barev	23
3.10.1	RGB (Red Green Blue) systém.....	23
3.10.2	Soustava XYZ.....	25

3.10.3	HSL (Hue Saturation Lightness).....	26
3.10.4	HSV (Hue Saturation Value)	26
3.10.5	CMY(K) (Cyan Magenta Yellow (Black)).....	27
4	Význam velikosti pupily	28
4.1	Hloubka ostrosti	28
4.2	Sítnicové osvětlení	28
4.3	Kvalita sítnicového obrazu.....	28
5	Faktory ovlivňující velikost pupily	29
5.1	Osvětlení	29
5.2	Spontánní změny	30
5.2.1	Chování ve tmě	31
5.3	Zrakové klamy	31
5.4	Psychologické faktory	32
5.4.1	Mentální aktivita	32
5.4.2	Úlek.....	32
5.4.3	Citově zabarvená slova/zvuky	32
5.4.4	Estetická preference	32
5.4.5	Zájem a sexuální vzrušení.....	33
5.5	Bolest.....	33
5.6	Únava	33
5.7	Blízký reflex.....	33
5.8	Konsenzuální světelný reflex	34
5.9	Věk	34
5.10	Farmakogenní původ	35
6	Pupilární reflex	36
6.1	Velikost stimulu	36
6.2	Doba trvání stimulu.....	36
6.3	Weberův zákon.....	36
6.4	Talbotův zákon.....	37
6.5	Ferry-Porterův zákon	37
6.6	Modelování pupilárního reflexu.....	37
7	Experimentální část.....	40
7.1	Návrh experimentů.....	40

7.2	Metodika	40
7.3	Reakce na zvýšení a snížení osvětlení	42
7.3.1	Návrh experimentu	42
7.3.2	Výsledky	42
7.4	Spontánní změny	45
7.4.1	Návrh experimentu	45
7.4.2	Výsledky	45
7.5	Chování ve tmě	47
7.5.1	Návrh experimentu	47
7.5.2	Výsledky	47
7.6	Vliv polarity impulzu na tvar pupilárního reflexu	49
7.6.1	Návrh experimentu	49
7.6.2	Výsledky	49
7.7	Pupilární reflex a Weberův zákon	51
7.7.1	Návrh experimentu	51
7.7.2	Výsledky	51
7.8	Vliv délky impulzu na pupilární reflex	53
7.8.1	Návrh experimentu	53
7.8.2	Výsledky	53
8	Postup pro správné pupilometrické měření	55
9	Závěr	57
	Citovaná literatura.....	58
	Přílohy dostupné na CD	62
	Funkce v Matlabu pro úpravu dat	62
	Model chování pupily v Matlabu.....	62
	Příloha A - Návod k aplikaci I4Tracking	

Seznam obrázků

Obr. 1 Viditelné spektrum, hodnoty vlnových délek v nanometrech. Použito se svolením Photonics Handbook. Copyright 2013, Laurin Publishing, Pittsfield MA. (4)	12
Obr. 2 Lidské oko (5).....	12
Obr. 3 Spektrální citlivost 3 druhů čípků (8)	13
Obr. 4 Detekovaná pupila	14
Obr. 5 Křivka adaptace na tmu. Na ose x trvání adaptace v minutách, na ose y osvětlení testovací plochy v mikroluxech. (10)	15
Obr. 6 Spektrální odezva, fotopické vidění (červeně) a skotopické vidění (modře). Použito se svolením Photonics Handbook. Copyright 2013, Laurin Publishing, Pittsfield MA. (4)	16
Obr. 7 Steradián. Použito se svolením Photonics Handbook. Copyright 2013, Laurin Publishing, Pittsfield MA. (4).....	16
Obr. 8 Svítivost	19
Obr. 9 Osvětlení	20
Obr. 10 Světlení	21
Obr. 11 Jas	21
Obr. 12 Vliv kontrastu. Na levém obrázku se barvy A a B zdají odlišné, na pravém je zřetelné, že jsou stejné. (13).....	23
Obr. 13 Chromatický diagram CIE 1931 RGB systému (15).....	24
Obr. 14 Funkce trichromatických členitelů (16).....	25
Obr. 15 Diagram chromatičnosti CIE 1931 (17)	25
Obr. 16 Modely HSL a HSV (21).....	27
Obr. 17 Model CMY (22)	27
Obr. 18 Sítnicové osvětlení v závislosti na velikosti pupily. Courtesy: National Eye Institute, National Institutes of Health (NEI/NIH). (23).....	28
Obr. 19 Průměr pupily podle různých vztahů. Vytvořeno pomocí (25).....	30
Obr. 20 Ukázka použitých stimulů (27).....	31
Obr. 21 Průměr pupily ve tmě v závislosti na věku (33) Publikováno se svolením Macmillan Publishers Ltd: Nature, copyright 1958.....	34
Obr. 22 Ukázka práce modelu. Reakce na zvýšení osvětlení, viz 7.7.	39
Obr. 23 Ukázka práce modelu. Reakce na snížení osvětlení, viz 7.3.	39
Obr. 24 Měřicí zařízení	41
Obr. 25 Reakce na zvýšení osvětlení. Data pouze z jednoho měření. Muž 26 let.....	43
Obr. 26 Reakce na zvýšení/snížení osvětlení. Zprůměrováno z 25 měření. Muž 26 let.	44
Obr. 27 Spontánní změny velikosti pupily.	46
Obr. 28 Spontánní změny velikosti pupily ve tmě. Muž 22 let.	48
Obr. 29 Pupilární reflex vyvolaný pozitivním/negativním pulzem. Zprůměrováno z 20 měření. Muž 26 let.	50
Obr. 30 Weberův zákon. Zprůměrováno z 20 měření. Muž 26 let.	52
Obr. 31 Vliv délky impulsu na pupilární reflex. Zprůměrováno z 20 měření. Muž 26 let.	54

1 Úvod

Pupilometrie se zabývá měřením velikosti pupily (zornice). Na velikost pupily mají kromě osvětlení významný vliv i nevizuální faktory, např. zvuky, únava, emoce, věk.

Jedná se o neinvazivní metodu.

V psychologii se tato metoda studuje již od 60. let 20. století, kdy Hess a Polt zveřejnili studii „Pupil size as related to interest value of visual stimuli“.

Pupilární reakce na stimuly se objevují spontánně a velikost pupily je obtížné vědomě ovládat. Dilatace pupily může být vědomě vyvolána pouze nepřímým způsobem – představením si události nebo předmětu, které by normálně dilataci vyvolaly. Potlačit vědomě dilataci pupily vyvolanou externím stimulem není možné. (1)

Pupilometrie se využívá zejména ve výzkumu. Jedná se např. o vývojovou psychologii, kde je pupilometrie využita ke zkoumání reakcí nemluvňat, zkoumání emocí, sexuálního zájmu, estetických preferencí.

Předpokládá se možné využití pupilometrie jako diagnostické metody např. pro neurochirurgické pacienty.

2 Cíle práce

Cílem práce je vytvořit ucelený přehled základních pojmů a poznatků nutných k správnému pochopení reakcí pupily a práci ve videookulografické laboratoři.

Cílem je popsání fotometrických veličin, jejich vlivu a vlivu dalších faktorů na velikost pupily, praktická ukázka chování pupily v závislosti na různých vizuálních stimulech, vytvoření postupu pro správné pupilometrické měření a vytvoření podrobného návodu použití vybavení videookulografické laboratoře a aplikace I4Tracking. Tento návod bude uveden v příloze diplomové práce.

3 Teoretické základy

Pro pochopení reakcí pupily je nejprve nutné seznámit se se základními pojmy a skutečnostmi.

Zrak se považuje za nejvýznamnější z lidských smyslů, umožňuje nám získat 75 - 90 % informace o okolí. (2)

3.1 Viditelné záření

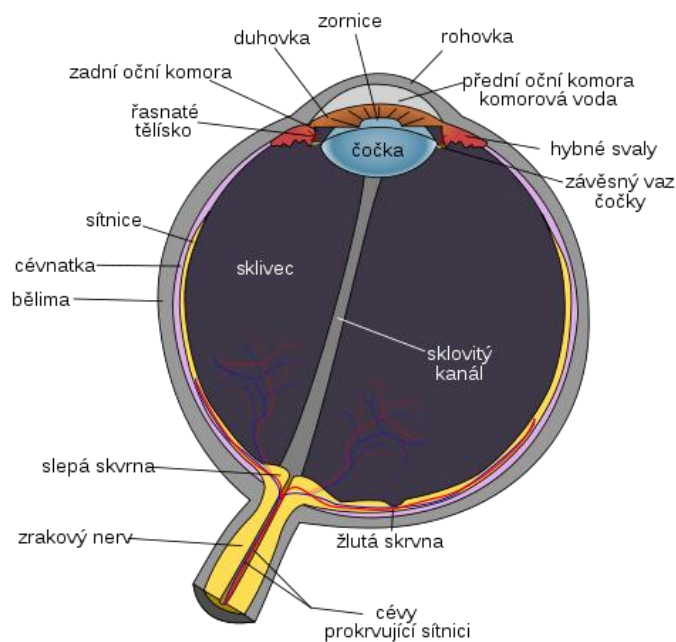
Jedná se o elektromagnetické záření o vlnových délkách 380 nm – 780 nm (3).



Obr. 1 Viditelné spektrum, hodnoty vlnových délek v nanometrech. Použito se svolením Photonics Handbook. Copyright 2013, Laurin Publishing, Pittsfield MA. (4)

3.2 Lidské oko

Struktura oka je zobrazena na Obr. 2.

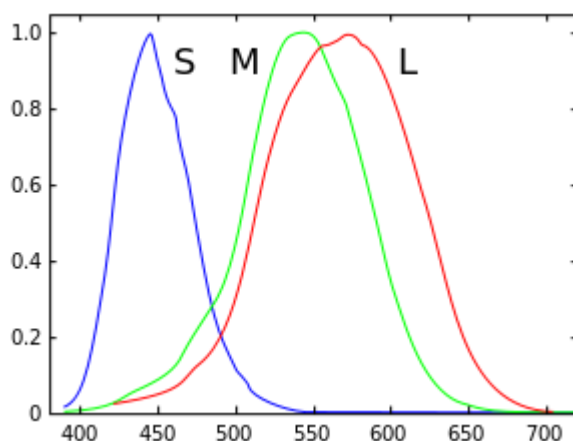


Obr. 2 Lidské oko (5)

Lidské oko představuje optický systém, zobrazující vnější předměty na vnitřní vrstvu fotocitlivých receptorů – sítnici. Optická soustava oka sestává z rohovky, komorové vody, oční čočky a sklivce. Optickou izolaci od nežádoucího osvětlení zajišťuje cévnatka. Pupila (zornice) tvořená přibližně kruhovým otvorem v duhovce plní funkci clony. (6)

Poloměr oční koule u dospělého člověka je asi 24 mm. Světlo vyvolává fotochemickou reakci na sítnici (retina). Impuls generovaný touto reakcí je přenesen do mozku. (3) Na sítnici jsou 2 typy světločivných buněk, tyčinky a čípky. Tyčinek je přibližně 100 milionů, čípků 5 milionů. Čípky umožňují barevné vidění. (7)

Existují tři druhy čípků, každý druh je maximálně citlivý na jednu barvu a na ostatní barvy méně. První druh je citlivý na červenou, druhý na zelenou a třetí druh na modrou barvu. (2)



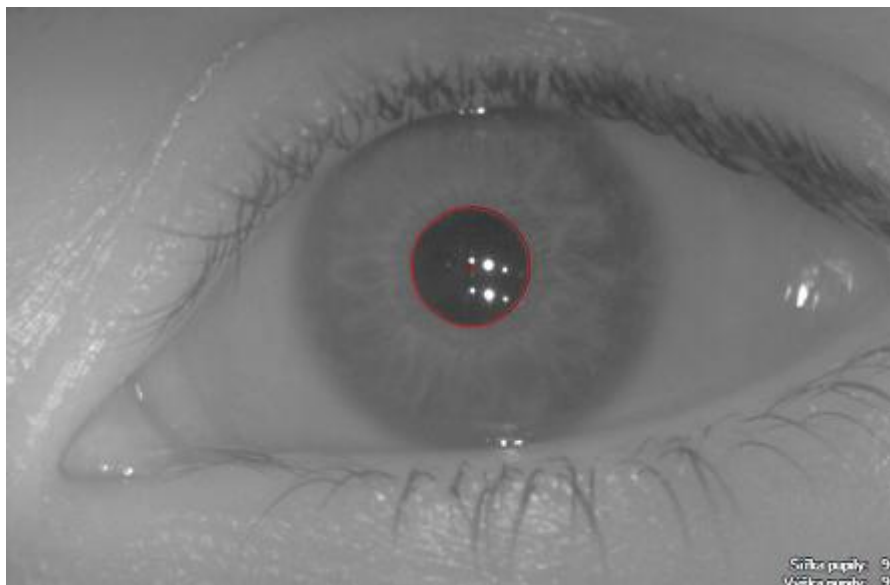
Obr. 3 Spektrální citlivost 3 druhů čípků (8)

3.2.1 Pupila

Je tvořena přibližně kruhovým otvorem v duhovce. Změnou své velikosti ovlivňuje sítnicové osvětlení, hloubku ostroty a kvalitu sítnicového obrazu.

Velikost pupily je ovládána dvěma antagonistickými (působí vůči sobě opačným směrem) svaly, které jsou pod autonomní kontrolou:

- Sphincter pupillae – zmenšuje pupilu,
- Dilator pupillae – roztahuje pupilu. (9)



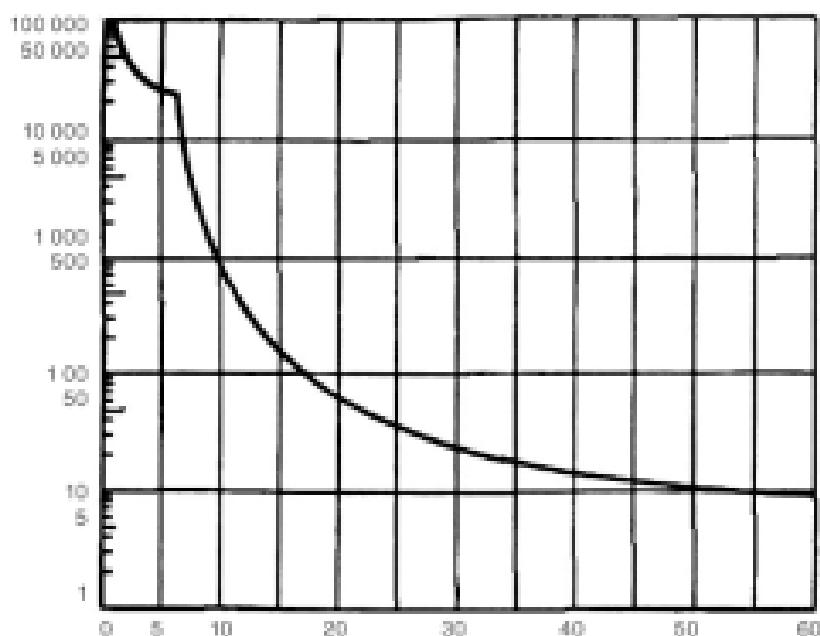
Obr. 4 Detekovaná pupila

3.3 Vliv osvětlení na vidění

Oko je schopné vidět objekty při různém osvětlení. V přímém slunečním světle, kde osvětlení je 100 000 lx, tak i ve tmě při osvětlení 0,0003 lx.

Adaptaci oka na různá osvětlení pomáhá pupila. (3) Průměr pupily se pohybuje od 2 mm (vysoké osvětlení) do 8 mm (tma). (7) Změny velikosti pupily jsou nedostatečné pro přizpůsobení oka celému rozsahu vnímaného světla. Této funkci pomáhají tyčinky a čípky, které mění citlivost sítnice. (3)

Ve světlém prostředí (jas 3 cd.m^{-2} a vyšší) čípky umožňují fotopické vidění. V temném prostředí (jas $0,003 \text{ cd.m}^{-2}$ a nižší) tyčinky umožňují skotopické vidění. Tyčinky ztrácejí citlivost při jasu přibližně $10^{-6} \text{ cd.m}^{-2}$. Tento jas odpovídá 5 - 14 fotonům dopadajícím na tyčinky. V prostředí s průměrným osvětlením funguje mezopické vidění. Uvedené hodnoty jasu závisí i na jiných podmínkách, např. barvě stimulu. (3)



Obr. 5 Křivka adaptace na tmu. Na ose x trvání adaptace v minutách, na ose y osvětlení testovací plochy v mikroluxech. (10)

Křivka adaptace na tmu popisuje minimální hodnotu osvětlení, kterou zrak vnímá. Křivka se skládá ze dvou částí – první (do 8 minut) představuje adaptaci čípků, druhá část pak adaptaci tyčinek. (10)

Při nárůstu osvětlení se vidění mění ze skotopického přes mezopické na fotopické. Tato změna je hotová za 1 minutu. (3)

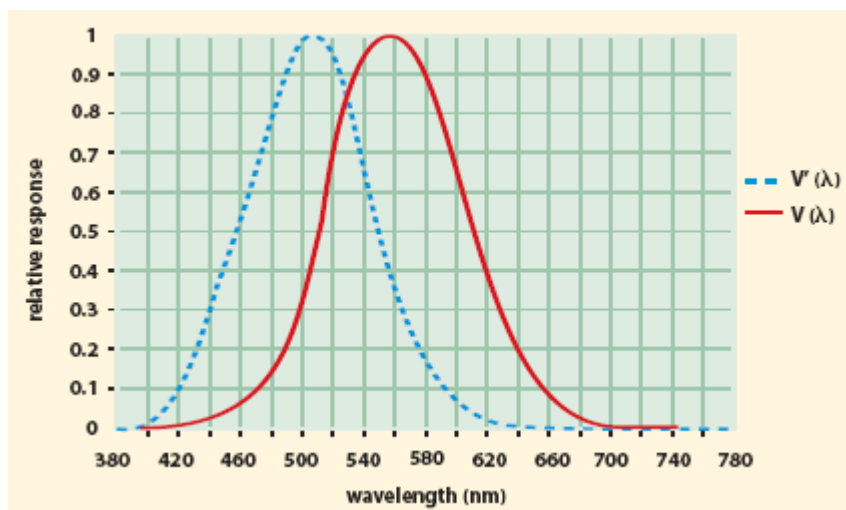
Při snížení osvětlení je změna vidění pomalejší. Trvá přibližně 30 min, než se oko adaptuje na skotopické vidění. (3)

Oko může rozlišovat jas ve velmi velkém rozmezí, nikoli však současně. Oko se vždy přizpůsobí na střední geometrickou hodnotu jasu a kolem ní rozlišuje černou a bílou. (11)

3.4 Spektrální odezva

Jedná se o odezvu oka na záření o různé vlnové délce. Stejné množství energie záření se stává pro lidské oko méně viditelné v závislosti na změně vlnové délky od maxima. Mimo oblast 380 nm – 780 nm se záření stává pro lidské oko neviditelným. (3)

Poloha maxima se liší pro fotopické a skotopické vidění. Spektrální odezva tyčinek a čípků je odlišná.



Obr. 6 Spektrální odezva, fotopické vidění (červeně) a skotopické vidění (modře). Použito se svolením Photonics Handbook. Copyright 2013, Laurin Publishing, Pittsfield MA. (4)

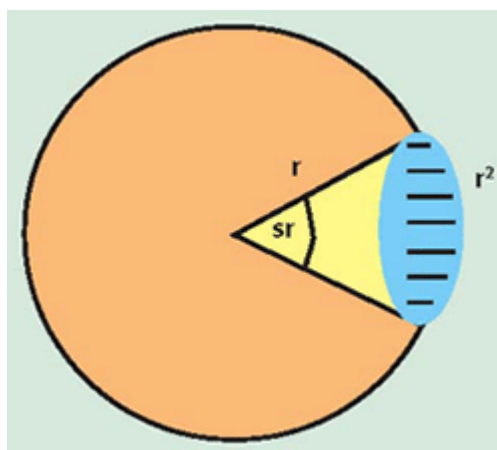
3.5 Radiometrie

Zabývá se matematickým popisem a měřením šíření elektromagnetického záření o vlnových délkách 1 nm až 1 mm (3), včetně jevů záření ovlivňujících, např. propustností, odrazivostí, difrakcí. Definiuje základní radiometrické veličiny a jejich rozměry.

V této části práce popisují základní radiometrické veličiny, jejich značku, jednotku a název v angličtině, to považuji za nutné z důvodu usnadnění orientace v anglických textech. Kurzívou jsou uvedené další možné značky, s kterými se lze setkat v literatuře.

3.5.1 Důležité pojmy

Prostorový úhel ω [sr]



Obr. 7 Steradián. Použito se svolením Photonics Handbook. Copyright 2013, Laurin Publishing, Pittsfield MA. (4)

Steradián je prostorový úhel v centru koule, který vymezí plochu r^2 .

Bodový zdroj

Jeho geometrické rozměry jsou v porovnání se vzdáleností k pozorovateli tak malé, že je můžeme zanedbat.

Prostorový zdroj

Jeho geometrické rozměry vzhledem ke vzdálenosti k pozorovateli nelze zanedbat. Je nutné uvažovat nejen vzdálenost zdroj - pozorovatel, ale i úhel, pod kterým pozorovatel zdroj sleduje.

3.5.2 Množství záření

Značka: Q_e . Jednotka: J (joule). Název v angličtině: Radiant energy.

3.5.3 Zářivý tok

Značka: Φ_e, φ_R . Jednotka: W (watt). Název v angličtině: Radiant flux.

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1)$$

t: čas.

Jde o energii za čas přenesenou zářením. (12)

3.5.4 Zářivost

Značka: I_e . Jednotka: $W \cdot sr^{-1}$. Název v angličtině: Radiant intensity.

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} \quad (2)$$

3.5.5 Ozáření

Značka: E_e, W . Jednotka: $W \cdot m^{-2}$. Název v angličtině: Irradiance.

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (3)$$

Jde o zářivý tok dopadající na plochu S ozářeného tělesa. (12)

3.5.6 Intenzita vyzařování

Značka: M_e . Jednotka: $W \cdot m^{-2}$. Název v angličtině: Radiant exitance.

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (4)$$

S: plocha zdroje záření. (3)

3.5.7 Zář

Značka: L_e , P . Jednotka: $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$. Název v angličtině: Radiance.

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS \cdot \cos \theta \cdot d\omega} \quad (5)$$

θ : úhel mezi normálou rovinného elementu a směrem pozorování,

S: plocha zdroje záření. (3)

3.5.8 Expozice

Značka: H_e . Jednotka: $W \cdot s \cdot m^{-2}$. Název v angličtině: Radiant exposure.

$$H_e = E_e \cdot t \quad (6)$$

t: čas.

3.6 Fotometrie

Zabývá se viditelným elektromagnetickým zářením o vlnových délkách 380 nm - 780 nm. Reprezentuje způsob, jak lidské oko vnímá odpovídající radiometrické veličiny.

Radiometrické veličiny mohou být převedeny do fotometrických pomocí vztahu

$$(fotometrická\ vel.) = K(\lambda) \cdot (radiometrická\ vel.) \quad (7)$$

kde pro fotopické vidění

$$K(\lambda) = 638 \cdot V(\lambda) \quad (8)$$

a pro skotopické vidění

$$K(\lambda) = 1700 \cdot V'(\lambda) \quad (9)$$

kde $V(\lambda)$ a $V'(\lambda)$ jsou spektrální odezvy (viz. Obr. 6). (3)

3.6.1 Světelné množství

Značka: Q_v . Jednotka: lm.s. Název v angličtině: Quantity of light.

3.6.2 Světelný tok

Značka: Φ_v , φ_L . Jednotka: lm (lumen). Název v angličtině: Luminous flux.

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad (10)$$

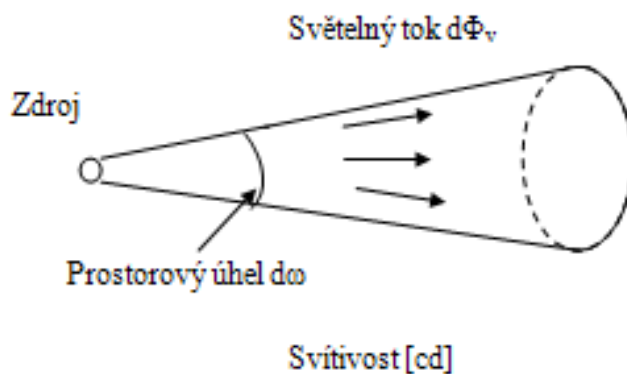
Lumen je definován jako světelný tok vyzářený do prostorového úhlu 1 steradián bodovým zdrojem o svítivosti 1 kandela.

3.6.3 Svítivost

Značka: I_v . Jednotka: cd (kandela). Název v angličtině: Luminous intensity.

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\omega} \quad (11)$$

Kandela patří mezi jednotky SI. Je definována jako „Svítivost zdroje, který v daném směru emituje monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz a má zářivost v tomto směru $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$.“ (3)



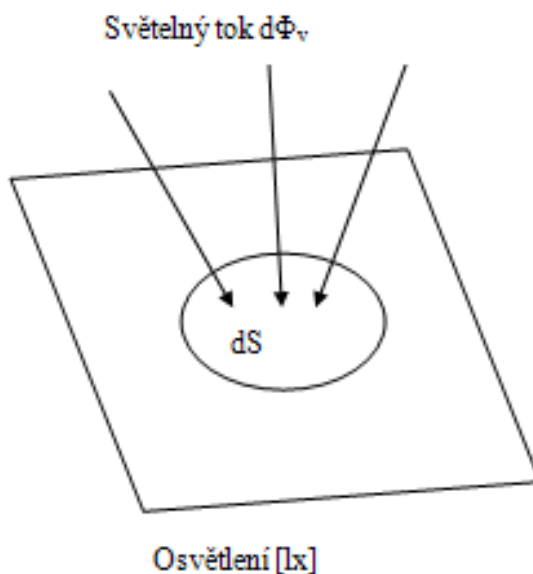
Obr. 8 Svítivost

3.6.4 Osvětlení

Značka: E_v . Jednotka: $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} = \text{lx}$ (lux). Název v angličtině: Illuminance.

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \quad (12)$$

Lux je definován jako osvětlení vytvořené světelným tokem 1 lumen rovnoměrně rozloženým na ploše 1 m^2 . (3)



Obr. 9 Osvětlení

Síticové osvětlení (retinal illuminance) E_r

Používá se jednotka td (troland). Při pozorování povrchu se stejnoměrným jasnem L [$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$] a pupilou o průměru D [mm] se vyjádří jako

$$E_r = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} [\text{td}] \quad (13)$$

Síticové osvětlení jde vyjádřit i v luxech, pomocí vztahu:

$$E = 0.0036 \cdot \tau \cdot E_r [\text{lx}] \quad (14)$$

τ : propustnost oka (≈ 0.6 až 0.9),

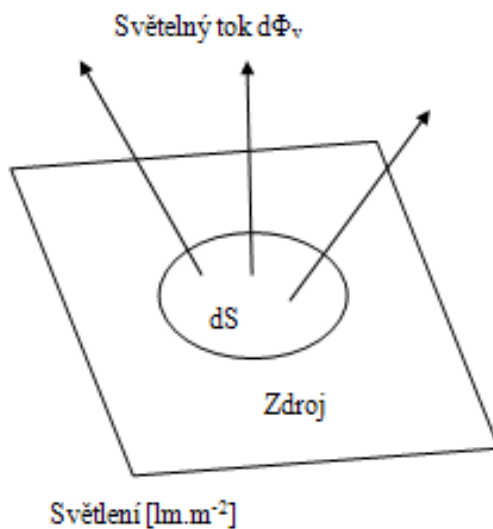
E_r : síticové osvětlení vyjádřeno v trolandech. (7)

3.6.5 Světlení

Značka: M_v , H . Jednotka: $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$. Název v angličtině: Luminous exitance.

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \quad (15)$$

S : plocha zdroje záření.



Obr. 10 Světlení

3.6.6 Jas

Značka: L_v , L . Jednotka: $\text{cd.m}^{-2} = \text{nt (nit)}$. Název v angličtině: Luminance.

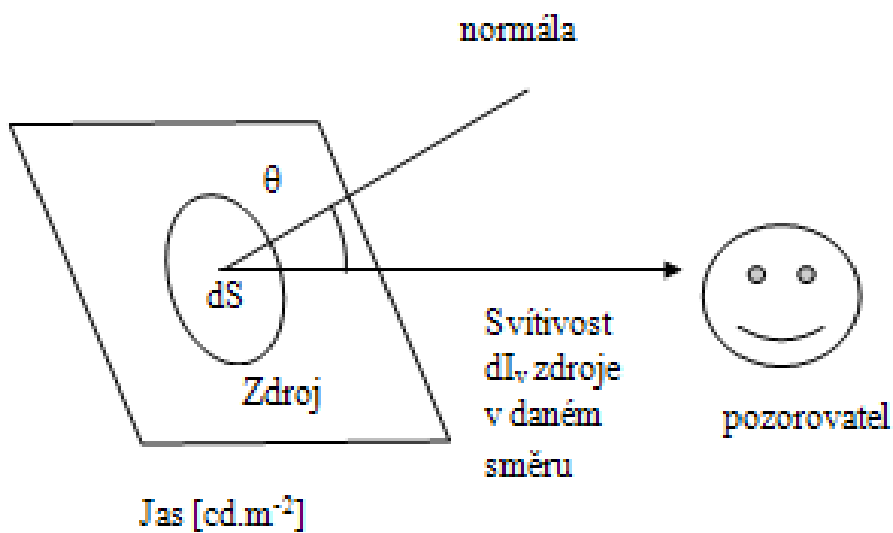
$$L_v = \frac{d\Phi_v}{dS \cdot \cos \theta \cdot d\omega} \quad (16)$$

S: plocha zdroje záření,

θ : úhel mezi normálou plochy zdroje a pozorovatelem.

Jas je veličina, která nejlépe odpovídá světlosti (brightness) kterou vnímá lidské oko.

Jas se určuje u plošných (nikoli bodových) zdrojů. (3)



Obr. 11 Jas

3.6.7 Osvit

Značka: H_v . Jednotka: lx.s. Název v angličtině: Luminous exposure.

$$H_v = E_v \cdot t \quad (17)$$

t: čas.

3.7 Helmholtz-Kohlrausch efekt

Jas odpovídá nejlépe počítku světlosti, tak jak ji vnímá lidské oko. Světlost však závisí také na barvě. Např. bílé světlo se stejným jasnem jako červené světlo se bude zdát méně jasné. Podíl B/L (světlost/jas) se mění v závislosti na barvě.

Pro porovnání světlostí dvou různých barev CIE (International commission on illumination) doporučuje použít vztah:

$$\log(L_1) + f_1 = \log(L_2) + f_2 \quad (18)$$

kde f je korekční faktor

$$f = 0,256 - 0,184y - 2,527xy + 4,656x^3y + 4,657xy^4 \quad (19)$$

x, y jsou chromatické souřadnice (viz kapitola 3.10.2). Pokud tento vztah platí, barvy mají stejnou světlost (3).

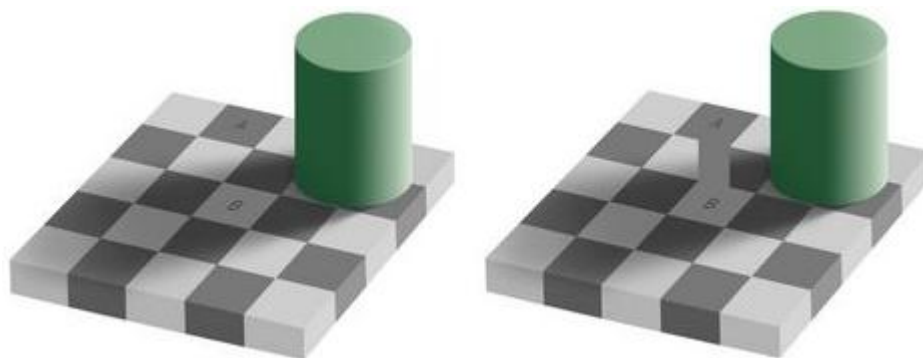
3.8 Videookulografie

Jedná se o metodu pro sledování očních pohybů. Metoda je jednoduchá, neinvazivní a dostatečně přesná. Používaný systém I4Tracking snímá oční pohyby nezávisle na pohybu hlavy. Z důvodu potřeby možnosti měření nezávisle na světelných podmínkách laboratoře je oko přisvětlováno dvěma infračervenými diodami.

Mezi další metody měření očních pohybů patří např. elektrookulografie (EOG), magnetookulografie (MOG), infračervená okulografie (IROG).

3.9 Kontrast

Vnímání jasu je závislé na jasu pozorované plochy, ale i na jasu okolního prostředí.



Obr. 12 Vliv kontrastu. Na levém obrázku se barvy A a B zdají odlišné, na pravém je zřetelné, že jsou stejné. (13)

Tyto klamy mají vliv na velikost pupily, viz kapitola 5.3.

3.10 Systémy barev

Systémy barev popisují barvy kvantitativně. V této sekci popíšeme základní používané systémy.

Systém barev je metoda, kterou můžeme specifikovat, vytvořit a vizualizovat barvu. Nejdůležitější pro uživatele aplikace I4Tracking je systém RGB, v kterém se v aplikaci barvy zadávají.

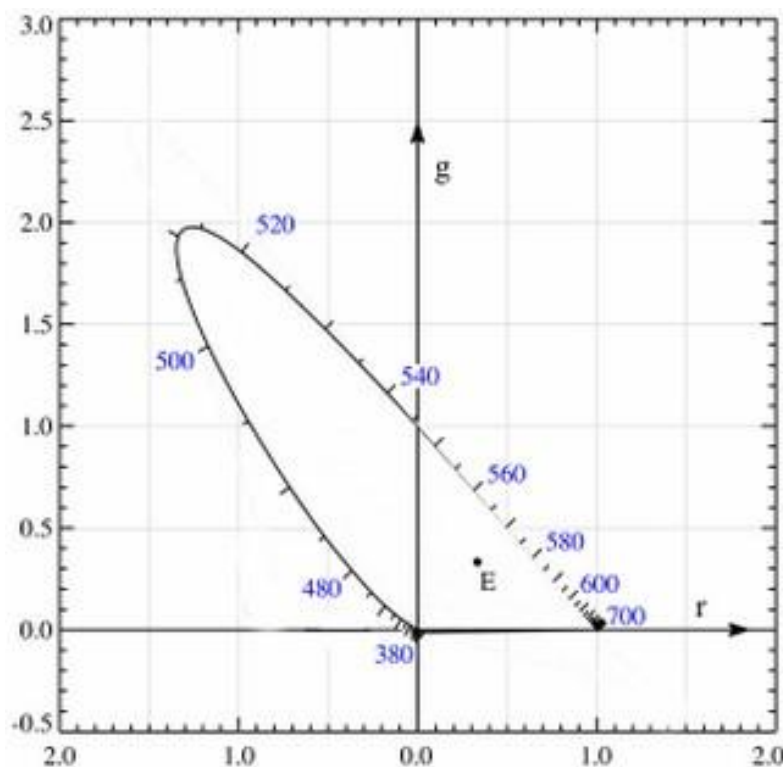
Návrhem barevných zobrazovacích systémů se zabývá kolorimetrie. Kolorimetrie vychází ze srovnávacích měření mezi analyzovanou barvou a složkami definovanými systémem barev. Srovnání je provedeno standardním pozorovatelem, který posuzuje, kdy nastane stejný vjem (metamerie). (14)

3.10.1 RGB (Red Green Blue) systém

Jedná se o aditivní metodu (tvoří barevné odstíny kombinací tzv. základních barevných světél).

[R], [G], [B] jsou monochromatická světla o vlnových délkách $\lambda_R=700$ nm, $\lambda_G=546,1$ nm, $\lambda_B=435,8$ nm.

Základním stimulem je bílá barva s ekvienetickým spektrem. Množství referenčních stimulů [R], [G], [B] potřebné ke shodě se základním stimulem jsou v poměru 1,0000:4,5907:0,0601 vyjádřeno ve fotometrických jednotkách (ekvienetické bílé světlo $1,0000+4,5907+0,0601$ lm může být srovnáno s kombinací 1,0000 lm, 4,5907 lm a 0,0601 lm referenčních stimulů [R], [G], [B]). (3)



Obr. 13 Chromatický diagram CIE 1931 RGB systému (15)

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (20)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (21)$$

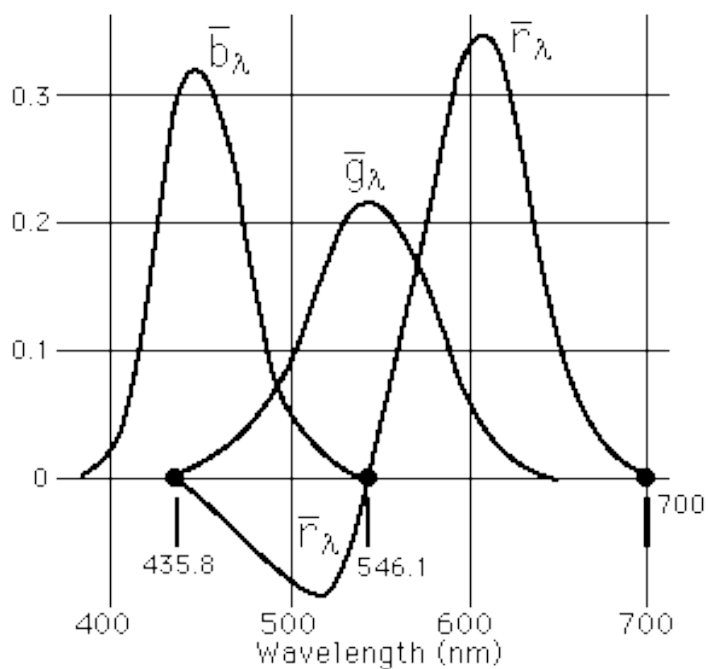
$$b = \frac{B}{R + G + B} \quad (22)$$

(3)

Funkce trichromatických členitelů jsou množství referenčních stimulů [R], [G], [B] potřebné k dosažení stimulu konkrétní vlnové délky. Funkce dosahují i negativní hodnoty. To proto, že při porovnávání monochromatického stimulu F_λ s mixem monochromatických stimulů [R], [G], [B] není někdy možné dosáhnout shody. V praktických experimentech srovnávání barev je proto $[F_\lambda]$ smíchán s [R] a poté porovnáván s kombinací [G] a [B]. Rovnice je poté vyjádřena:

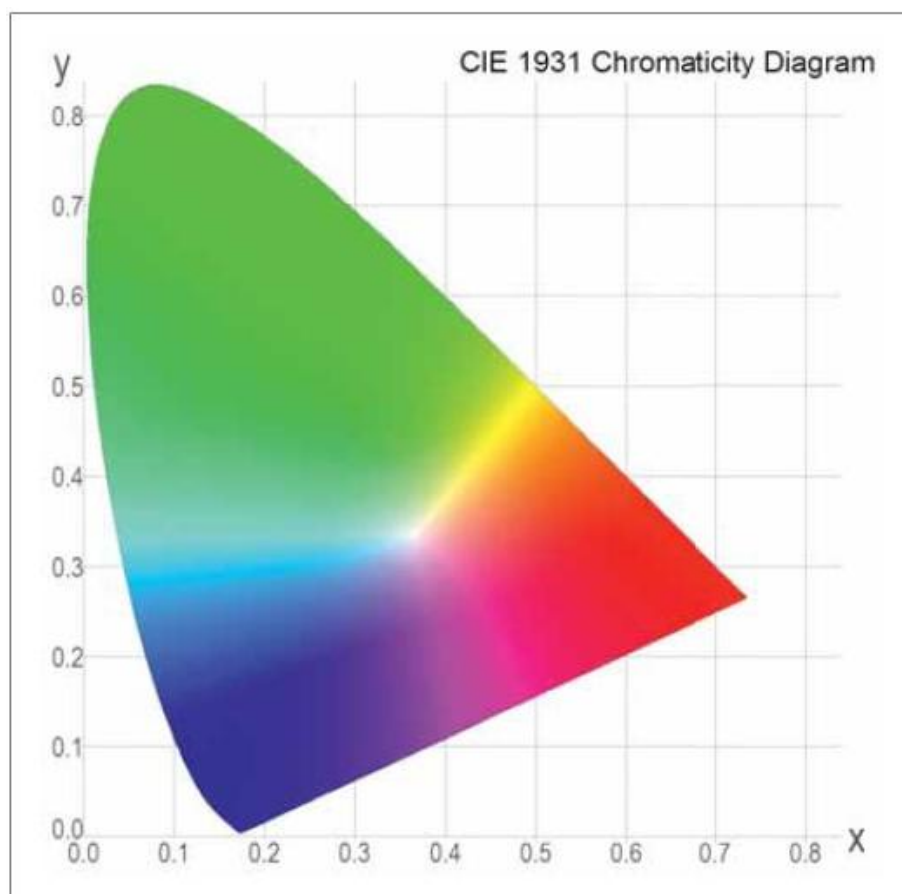
$$[F_\lambda] + R[R] = G[G] + B[B] \quad (23)$$

(3)



Obr. 14 Funkce trichromatických členitelů (16)

3.10.2 Soustava XYZ



Obr. 15 Diagram chromatičnosti CIE 1931 (17)

Převodní vztahy mezi systémy RGB a XYZ:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,24 & -1,54 & -0,50 \\ -0,98 & 1,88 & 0,04 \\ 0,06 & -0,20 & 1,06 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,41 & 0,36 & 0,18 \\ 0,21 & 0,72 & 0,07 \\ 0,02 & 0,12 & 0,95 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (25)$$

(18)

$$x = \frac{0,49000r + 0,31000g + 0,20000b}{0,66697r + 1,13240g + 1,20063b} \quad (26)$$

$$y = \frac{0,17697r + 0,81240g + 0,01063b}{0,66697r + 1,13240g + 1,20063b} \quad (27)$$

$$z = \frac{0,00000r + 0,01000g + 0,99000b}{0,66697r + 1,13240g + 1,20063b} \quad (28)$$

(3)

3.10.3 HSL (Hue Saturation Lightness)

Výhodou je srozumitelnost pro uživatele, který barvy specifikuje intuitivně.

Barva se specifikuje

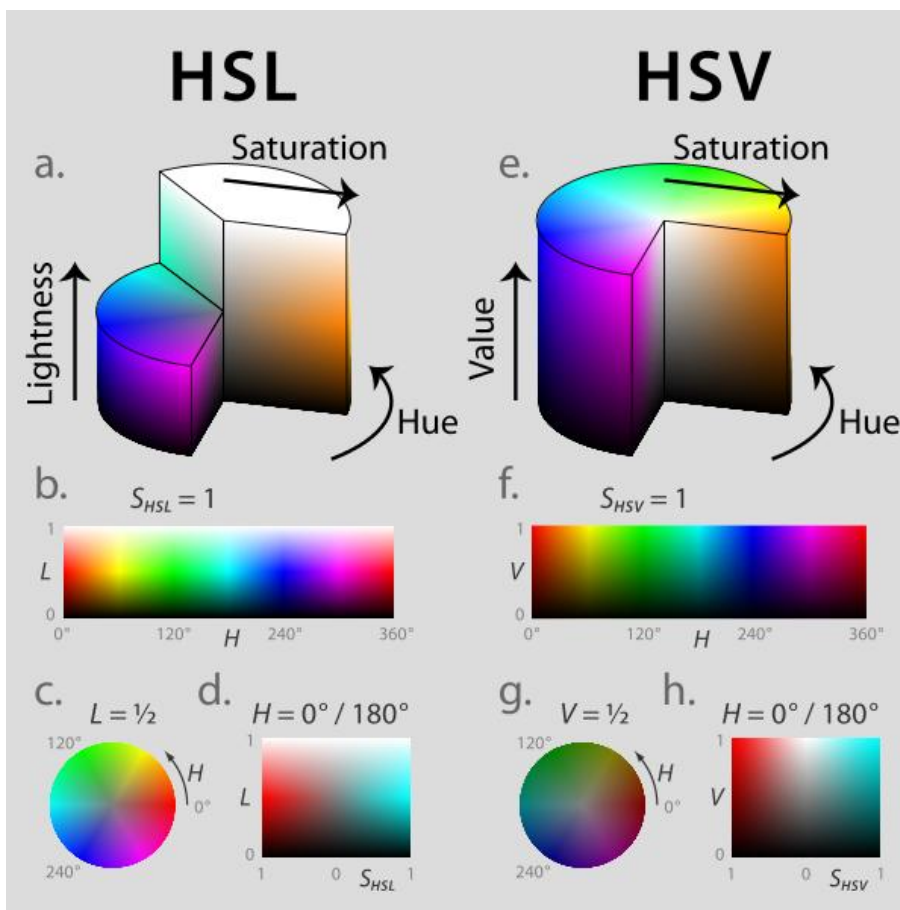
- odstínem (hue), hodnoty 0 - 360,
- nasycením (saturation), hodnoty 0 (bez barvy) – 1 (syťá, intenzivní barva),
- světlostí, hodnoty 0 (černá barva) - 0,5 (čistá barva) – 1 (bílá). (19)

3.10.4 HSV (Hue Saturation Value)

Někdy také nazýván HSB (Hue Saturation Brightness).

Barva se specifikuje

- odstínem (hue), hodnoty 0 - 360,
- nasycením (saturation), hodnoty 0 (bez barvy) – 1 (syťá, intenzivní barva),
- jasnem (value), hodnoty 0 (černá) -1 (světlá). (20)

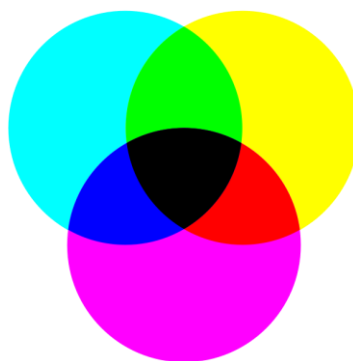


Obr. 16 Modely HSL a HSV (21)

3.10.5 CMY(K) (Cyan Magenta Yellow (Black))

Jedná se o subtraktivní barevný model. Výchozí je bílá barva, přidáváním tří základních barev (azurové, purpurové a žluté) se vytvářejí další barvy. Když jsou tyto tři barvy plně saturované, vznikne barva černá.

Jedná se o barevný model používaný tiskárnami. Čtvrtý kanál (černá barva) byl přidán, aby tiskárny mohly používat k tisku černé černý inkoust, nikoliv míchat dražší barevné inkousty. (20)



Obr. 17 Model CMY (22)

4 Význam velikosti pupily

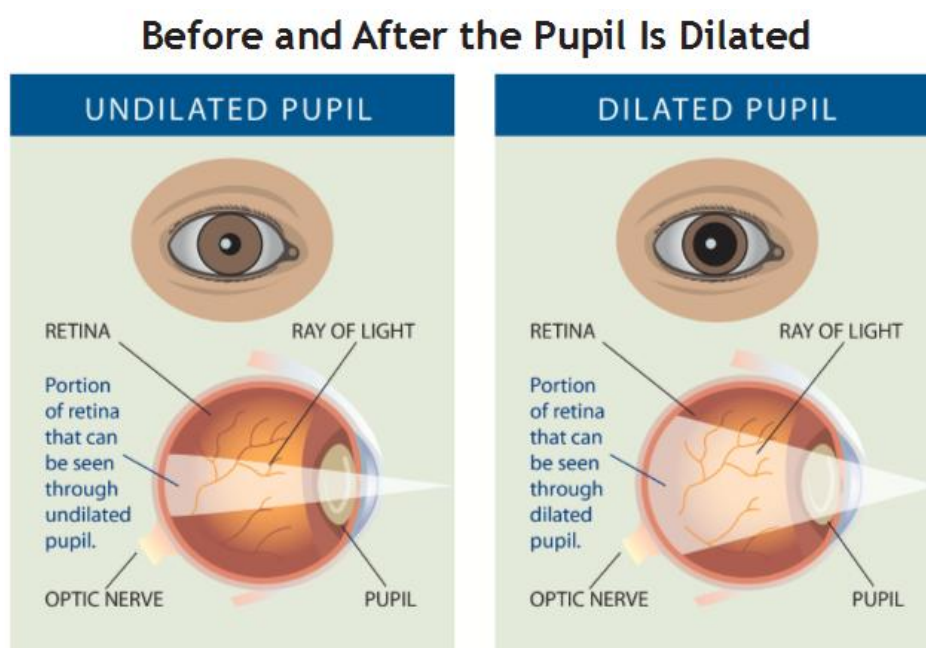
4.1 Hloubka ostrosti

Průměr pupily ovlivňuje hloubku ostrosti. Čím je pupila větší, tím menší je hloubka ostrosti. (7)

Jako ostré vnímáme i detaily nacházející se mezi rovinami nad a pod zaostřenou rovinou. Hloubka ostrosti je vzdálenost těchto rovin (tedy vzdálenost nejbližšího a nejvzdálenějšího předmětu, které se jeví jako ostré).

4.2 Sítnicové osvětlení

Průměr pupily ovlivňuje sítnicové osvětlení. (7) Viz rovnice č. 13 (strana 20).



Obr. 18 Sítnicové osvětlení v závislosti na velikosti pupily. Courtesy: National Eye Institute, National Institutes of Health (NEI/NIH). (23)

4.3 Kvalita sítnicového obrazu

Při větších průměrech pupily aberace způsobují zhoršení kvality obrazu na sítnici. Při malém průměru kvalitu omezuje difrakce. Ideální rovnováha mezi těmito efekty je při průměru 2 mm – 3 mm. (7)

5 Faktory ovlivňující velikost pupily

Vliv různých stimulů na velikost pupily nemůže být zkoumán bez znalosti spontánních změn velikosti pupily a vlivu dalších faktorů na pupilu působících. V této kapitole uvedu stručný přehled těchto faktorů.

5.1 Osvětlení

Osvětlení je nejvýznamnější faktor ovlivňující velikost pupily. Průměr pupily se pohybuje od 2 mm při vysokém osvětlení po 8 mm ve tmě. (7)

Při nárůstu osvětlení se plocha pupily zmenšuje (mióza). Při nízké svítivosti zdroje impulsu se uplatňuje latence 0,5 s před započítáním konstrikce. Při zvýšení svítivosti se latence snižuje na 0,2 s – 0,3 s. Reakce na zvýšení osvětlení je hotova v průběhu několika sekund, reakce na snížení osvětlení může trvat až minutu. (7)

Vztahy pro výpočet průměru pupily v závislosti na jasu:

Moon a Spencer:

$$D = 4,9 - 3,00 \cdot \tanh\{0,400[\log_{10}(L) + 1,0]\} \quad (29)$$

De Groot a Gebhard:

$$\log_{10}(D) = 0,8558 - 4,01 \cdot 10^{-4}[\log_{10}(L) + 8,6]^3 \quad (30)$$

(7)

Mezi novější vztahy patří např.

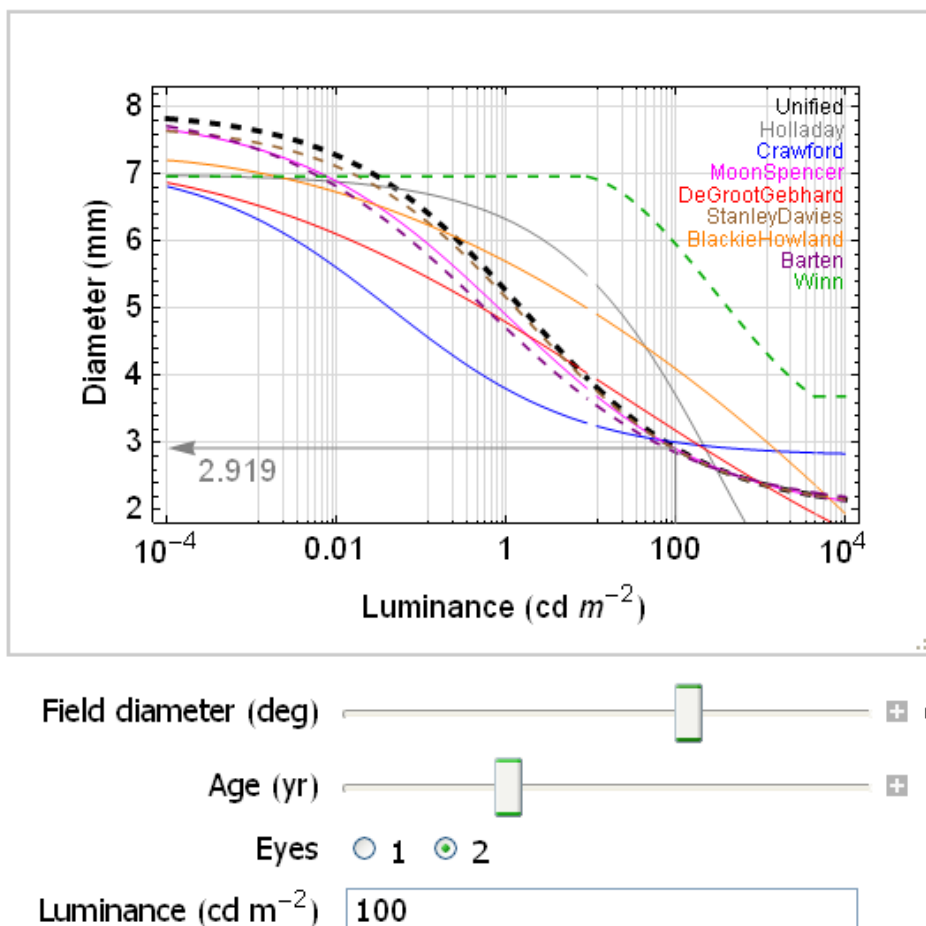
Blackie a Howland

$$D = 5,697 - 0,658 \log L + 0,07(\log L)^2 \quad (31)$$

D: průměr pupily [mm], L: jas [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$]. (24)

Na stránkách (25) je možné využít interaktivní modely vykreslující závislost průměru pupily na jasu pomocí různých vztahů, “pupil calculator” počítající průměr pupily v závislosti na jasu, šířce pole, letech a model popisující vztah mezi jasem a retinálním osvětlením.

Pupil diameter formulas



Obr. 19 Průměr pupily podle různých vztahů. Vytvořeno pomocí (25).

5.2 Spontánní změny

Při normálních hodnotách fotopického osvětlení velikost pupily kolísá s frekvencí 1,4 Hz. (7) Tento stav je zván „pupillary unrest“. U mladých jedinců a vysokém osvětlení může být frekvence oscilací až 2 Hz. U vysokých frekvencí jsou změny velikosti pupily menší.

Frekvence změn narůstá spolu s nárůstem osvětlení. (26)

Během bdělého stavu se kolísání objevuje současně u obou očí a má amplitudu kolem 1 mm. (9)

Tyto pravidla, vliv vzrůstajícího osvětlení na frekvenci a velikost spontánních změn velikosti pupily, platí pro všechny jedince. Jsou ale překvapivě výrazné rozdíly ve frekvenci, rozsahu a obecném vzoru těchto změn mezi jedinci. Důvod těchto výrazných interpersonálních rozdílů je neznámý. Vzor těchto spontánních změn

u jednotlivce je věrně reprodukován v opakovaných testech. Tento vzor je identický u jednovaječných dvojčat. (26)

5.2.1 Chování ve tmě

Doba dilatace pupily po odebrání světla je závislá na adaptaci oka na světlo. V případě, že pupila byla adaptována pouze částečně, dilatace je rychlejší, v případě oka dobře adaptovaného na vyšší osvětlení je doba dilatace delší.

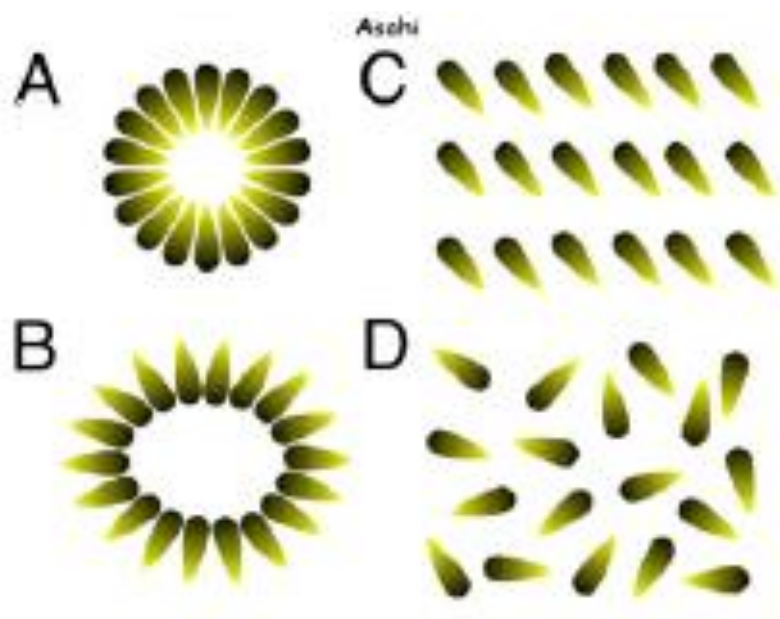
Po odeznění „light-off“ efektu velikost pupily zdravého, dobře odpočínutého jedince ve tmě zůstává obvykle stálá po dobu několika minut. Pupily zůstávají velké, dokud je jedinec pozorný, když se začne projevovat nuda a únava, pupily začnou oscilovat. Současně začne stabilně klesat velikost pupily (26).

Perioda těchto změn trvá 3 sekundy a více, mění se i velikost změn, tyto změny pokrývají velkou část rozsahu velikosti pupily. (26)

5.3 Zrakové klamy

Laeng a Endestad zkoumali vliv světelných iluzí na velikost pupily.

Použili a upravili čtyři originální iluze, kde se neshoduje jas skutečný a jas vnímaný. Všechny stimuly měly stejný jas, přesto pupila reagovala odlišně – podle subjektivního vnímání světla. Pozorované rozdíly v průměru pupily byly v řádu desetin mm. (27)



Obr. 20 Ukázka použitých stimulů (27)

5.4 Psychologické faktory

5.4.1 Mentální aktivita

Malé změny průměru pupily (často méně než 0,5 mm) nastávají při kognitivním zpracování a jiných behaviorálních aktivitách. (9)

Dilatace nastává po krátké latenci (100 ms - 200 ms) od začátku zpracování a mizí po jeho skončení. Velikost dilatace je úměrná zátěži, mentálnímu úsilí. (28)

Reakce pupily jsou velmi citlivé indikátory mentálního úsilí. (9)

5.4.2 Úlek

Silný úlek způsobuje dilataci (zvětšení) pupily. Reakce nastává za 0,2 s. Dilatace přetrvává, i pokud je vysoké osvětlení. (9)

5.4.3 Citově zabarvená slova/zvuky

Partala a Surraka zkoumali vliv sluchové emocionální stimulace.

Velikost pupily byla větší během citově pozitivní a negativní stimulace (např. dětský smích, pláč) než během stimulace neutrálními zvuky (např. kancelářský šum). Změna průměru pupily byla přibližně 0,15 mm pro neutrální, 0,20 mm pro pozitivní a negativní stimulaci. Velikost dilatace pupily není ovlivněna pohlavím, není významný rozdíl mezi velikostmi dilatace způsobenou pozitivním a negativním stimulem. (29)

5.4.4 Estetická preference

Vlivu estetického působení obrazu na velikost pupily se věnovali Johnson, Muday, Schirillo. Ve své práci porovnávali velikost pupily a slovní vyjádření estetického působení. Třiceti pozorovatelům promítali osm Mondrianových maleb, pro každou jejich originální verzi a sedm rotovaných obrazů. Tímto omezili možný vliv různého osvětlení a kontrastů, který by vyvstal při porovnávání estetického působení rozdílných kreseb. Velikost pupily byla větší pro obrazy s vertikálními a horizontálními čarami než pro obrazy se šikmými čarami. Čím více se malba pozorovatelům líbila, tím větší byla pupila. Rozdíly v průměru pupily mezi rotovanými obrazy dosahovaly desetin mm. (30)

5.4.5 Zájem a sexuální vzrušení

Zkoumání vlivu zájmu a sexuálního vzrušení na velikost pupily se věnoval již Hess v 60. letech 20. století. K snímání oka používal fotoaparát se snímací frekvencí 2 Hz, k měření velikosti pupily použil ruční měření pravítkem, během experimentů neměřil osvětlení.

Ve své práci ukázal rozdílné změny velikosti pupily vyvolané stejným stimulem v závislosti na pohlaví (např. větší dilataci u žen vyvolanou obrázkem dítěte než u mužů, větší dilataci u mužů vyvolanou obrázkem svlečené ženy než u žen), dokázal dilataci pupily pro šokující fotografie.

Dále uvádí, že konstrikce je charakteristická pro odpuzující fotografie (např. postižené dítě, žralok), zatímco dilatace se objevuje u příjemných, zajímavých obrázků, pro nezajímavé nebo nudné obrázky byly pozorovány pouze mírné odchylky ve velikosti pupily. (31)

Toto tvrzení další výzkumníci nepotvrdili, výsledky naopak ukazují na to, že i na negativní, nepříjemné stimuly pupila reaguje dilatací. (9)

Další výzkumy ukázaly, že dilatace pupily vyvolaná erotickým stimulem nemusí být vyvolaná pouze sexuálním zájmem, ale i novostí obrazu nebo zájmem obecně. (9)

5.5 Bolest

Vlivu bolesti se věnovali výzkumníci Oka, Chapman, Jacobson. Zjistili, že velikost pupily se zvětší po bolestivém podnětu. Změna závisí na velikosti bolesti, pohlaví a věku. U žen nastává větší změna, starší lidé mají větší zpoždění reakce. (32)

5.6 Únava

Někteří výzkumníci uvádějí, že průměr pupily je největší u odpočínutého člověka. Snižuje se se zvyšující se únavou, minimální průměr má pupila před spánkem. (9) Pupilometrie by mohla být použita k měření ospalosti.

5.7 Blízky reflex

Průměr pupily se zmenšuje, když oko akomoduje/konverguje. (7) Akomodační odezva nastává, když se vizuální předmět přesune z daleka do blízka. (6)

5.8 Konsenzuální světelný reflex

Pupily obou očí reagují stejně na stimulaci pouze jednoho oka. (7)

Světlo svítící do jednoho oka vyvolává v tomto oku přímou odezvu, v druhém oku konsenzuální odezvu. (6)

5.9 Věk

Velikost pupily se s přibývajícím věkem snižuje. Reakce na změny v osvětlení jsou s přibývajícím věkem menší. (7)

Maximální velikost pupily u oka adaptovaného na tmu je v letech dospívání. Maximální průměr je v 10 letech věku (přibližně 7,5 mm), snižuje se k průměru přibližně 5 mm ve věku 80 let. (33)

Za fotopických podmínek jsou rozdíly ve velikosti pupily v závislosti na věku menší. Čím jsou vyšší hodnoty osvětlení, tím nižší je závislost velikosti pupily na věku, zároveň klesá interindividuální variabilita jedinců stejného věku. (34)

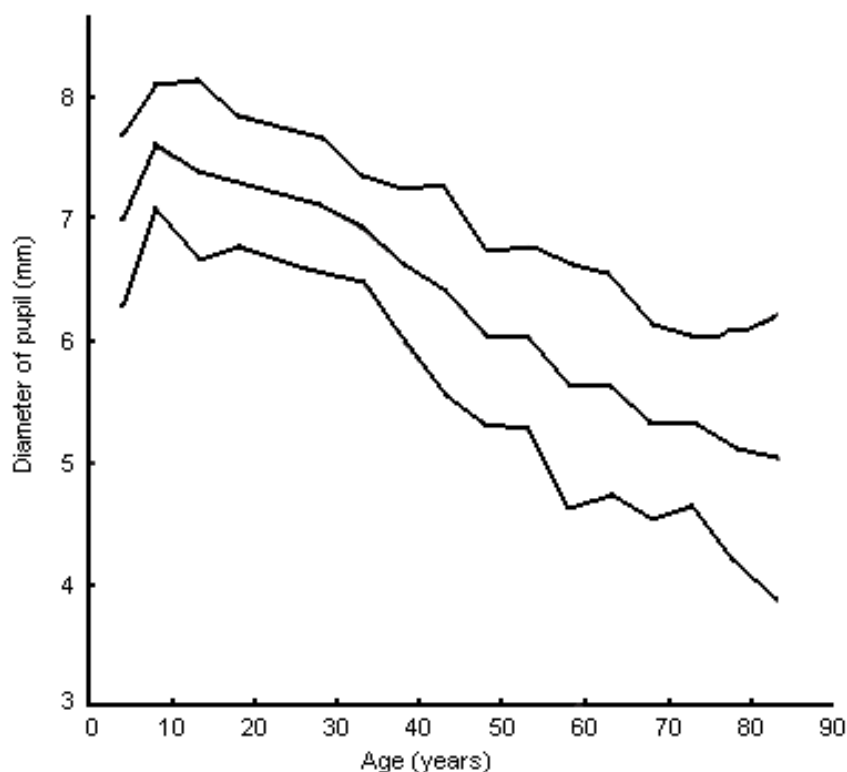


Fig. 2. Mean values of diameter of pupil in the dark with corresponding root-mean-square errors of one measurement as a function of age according to Kadlecová, Peleška and Vaško.

Obr. 21 Průměr pupily ve tmě v závislosti na věku (33) Publikováno se svolením Macmillan Publishers Ltd: Nature, copyright 1958.

5.10 Farmakogenní původ

Mydriatika – látky vyvolávající rozšíření pupily (mydriázu). (7) Mezi mydriatika patří např. heroin, kokain, halucinogeny, antiparkinsonika. (6)

Miotika – látky vyvolávající zúžení pupily (miózu). (7) Mezi miotika patří např. kapky do očí, opiáty, některá antihypertenziva. (6)

Nebyly prokázány žádné korelace mezi fluktuacemi velikosti pupily a dýcháním, pulzem, nebo signálem z EEG. (26)

Velikost pupily při různých hodnotách osvětlení je nezávislá na pohlaví, barvě duhovky. (34)

6 Pupilární reflex

Tvar a doba trvání pupilárního reflexu závisí na typu světelného stimulu a vlastnostech pupilomotorického systému. (26)

6.1 Velikost stimulu

Reakce na slabý záblesk světla má dlouhou latenci následovanou pomalou, krátkou a málo rozsáhlou kontrakcí. Při zvýšení osvětlení se latentní doba zkracuje, kontrakce je rychlejší, více výrazná a přetrvává po delší čas. (26)

Fyziologické hodnoty latence se pohybují mezi 220 ms a 450 ms. Amplituda reflexu se zvyšuje s rostoucím osvětlením. (35)

Maximální rychlost konstriktce je přibližně 8 mm.s^{-1} , maximální rychlost dilatace je přibližně $2,5 \text{ mm.s}^{-1}$. (35)

6.2 Doba trvání stimulu

Reflex závisí také na době trvání stimulu. Pokud je stimul krátký, doba kontrakce je také krátká a okamžitě nastává redilatace. Při delším trvání stimulu je udržena kontrakce a reakce se stává výraznější. Doba latence a rychlost kontrakce jsou stejné pro stimuly o stejném osvětlení (nezávisí na délce stimulu). (26)

Pokud stimul není přerušen, pupily se na nějaký čas plně kontrahují a poté se částečně redilatuji (dilatace závisí na hodnotě osvětlení, při nižších hodnotách osvětlení je větší průměr pupily), oko se adaptuje na světlo. Redilatace je rychlá při nižších hodnotách osvětlení, při vyšších hodnotách osvětlení je pomalejší. (26)

6.3 Weberův zákon

Říká, že nejmenší rozpoznatelná změna intenzity stimulu je úměrná intenzitě původního stimulu.

Pro pupilární reflex to znamená, že reakce není úměrná absolutní hodnotě osvětlení, ale dílčí změně $\frac{\Delta E_v}{E_v}$. Pro nízké původní osvětlení E_v a změnu ΔE_v bude reakce výraznější než pro vyšší původní osvětlení E_v a stejnou změnu ΔE_v .

6.4 Talbotův zákon

Týká se pulsujícího světla.

V případě, že frekvence pulsace je vyšší než frekvence kritická, zdánlivý jas zdroje je roven průměrné hodnotě jasu. Hodnota kritické frekvence závisí na sítnicovém osvětlení, maximální hodnoty asi 50 Hz kritická frekvence dosahuje při přibližně 300 td. (12)

6.5 Ferry-Porterův zákon

Určuje hodnotu kritické frekvence.

$$f_k = k_1 + k_2 \cdot \log_{10} L_v [\text{Hz}] \quad (32)$$

Kde $L_v [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}]$ je jas, $k_1=30,26$ a $k_2=12,6$ jsou experimentálně zjištěné konstanty.

6.6 Modelování pupilárního reflexu

Během šedesátých a sedmdesátých let 20. století vzniklo několik modelů popisujících pupilární reflex.

Mezi nejjednodušší modely popisující závislost velikosti pupily na osvětlení patří modely statické, již zmíněné v kapitole 5.

Mezi modely jednodušší patří model Starkův, Clynesův, Sandbergův. Ke složitějším modelům, které zohledňují polaritu světelného pulzu (snížení/zvýšení osvětlení), délku pulzu, Weberův i Talbotův zákon, patří Websterův model (viz (36)). Tento model je pouze výukový, je určen pouze pro krátké impulzy o nízké amplitudě na málo jasném pozadí.

V programu Matlab jsem provedla implementaci upraveného modelu od Pamplony (37). Zdrojový kód je dostupný na příloženém CD.

Model vychází z následujících vztahů:

$$\frac{dM}{dD} \frac{dD}{dt} + 2,3026 \operatorname{atanh} \left(\frac{D - 4,9}{3} \right) = 5,2 - 0,45 \ln \left[\frac{\phi(t - \tau)}{\phi} \right] \quad (33)$$

kde

D: průměr pupily [mm]

ϕ : světelný tok dopadající na sítnici [lm]

$$\phi = E \cdot A \quad (34)$$

E: osvětlení [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$]

A: plocha pupily [m^2]

τ : latence [ms]

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (35)$$

$$\tau = 445,7 - 2,4 \cdot E \quad (36)$$

$\bar{\phi}$: práh (hodnota, pod kterou se již plocha pupily nemění), $\bar{\phi} = 4,8118 \cdot 10^{-10} \text{ lm}$

$$M(D) = \text{atanh}\left(\frac{D - 4,9}{3}\right) \quad (37)$$

dt během konstrikce

$$dt_c = \frac{T_c - T_p}{S} \quad (38)$$

dt během dilatace

$$dt_d = \frac{3(T_c - T_p)}{S} \quad (39)$$

T_c : současný čas [ms]

T_p : čas předchozí simulace [ms]

S: konstanta ovlivňující rychlost konstrikce/dilatace, individuálně odlišná.

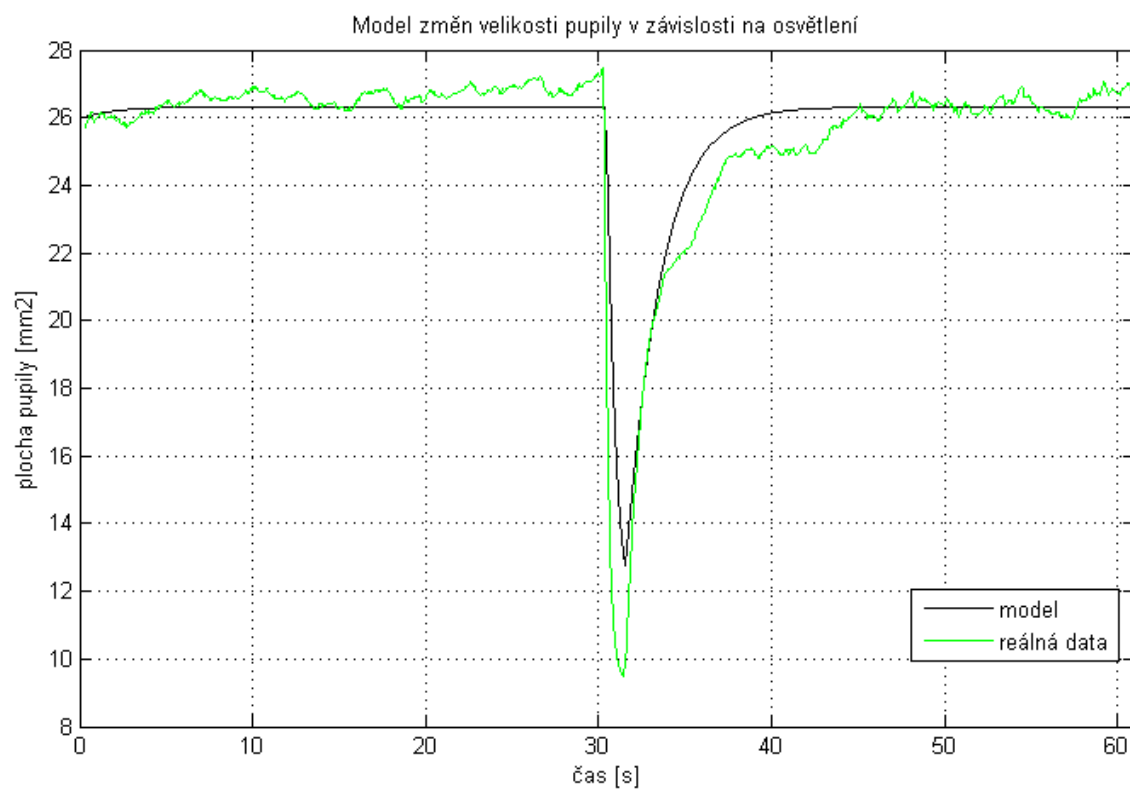
Vstupem do modelu jsou hodnoty osvětlení [lx] v závislosti na čase [s].

Výstupem jsou hodnoty plochy pupily [mm^2] v závislosti na čase [s].

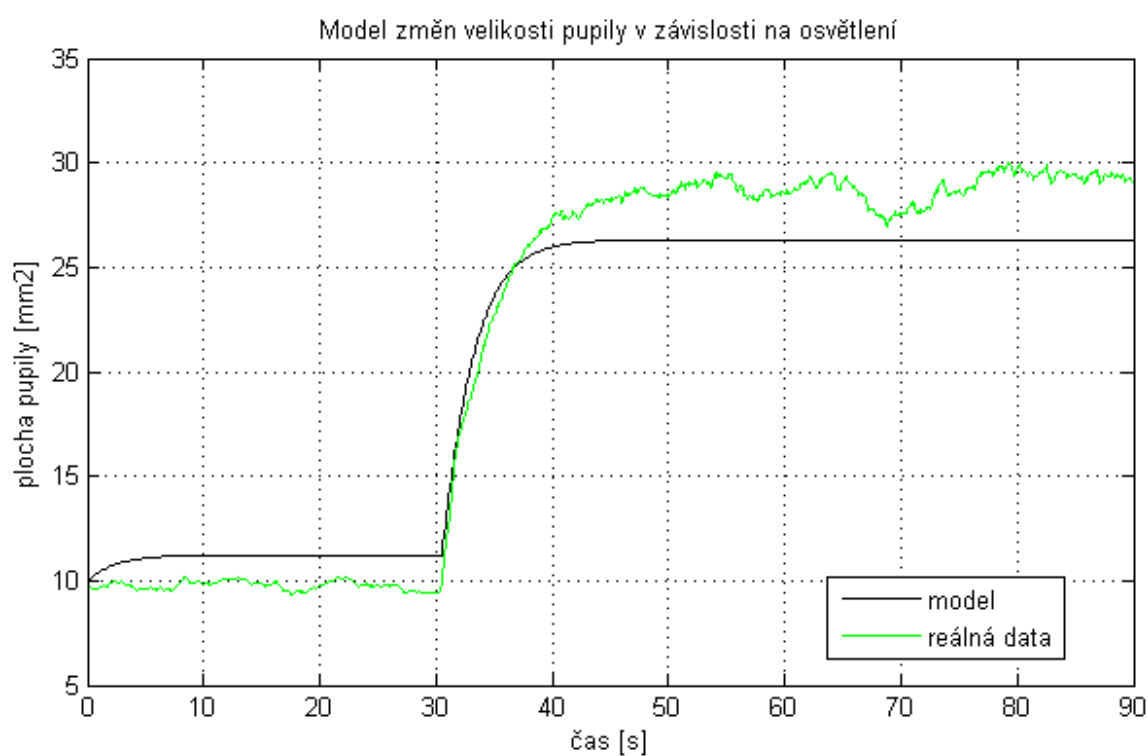
Přestože model nesimuluje úplně přesně tvar pupilárního reflexu, je vhodným pomocníkem při vytváření pupilometrických experimentů, dobře modeluje zejména dobu nutnou k ustálení velikosti pupily a velikost pupily při stálém osvětlení.

V modelu nejsou zahrnuty další faktory ovlivňující velikost pupily.

Ukázka práce modelu:



Obr. 22 Ukázka práce modelu. Reakce na zvýšení osvětlení, viz 7.7.



Obr. 23 Ukázka práce modelu. Reakce na snížení osvětlení, viz 7.3.

7 Experimentální část

V této části popíši návrh, metodiku a výsledky experimentů. Zaměřila jsem se na praktickou ukázkou zákonitostí popsaných výše.

7.1 Návrh experimentů

Stimulace bude probíhat pomocí jedné barvy promítané na celou obrazovku.

Použité barvy:

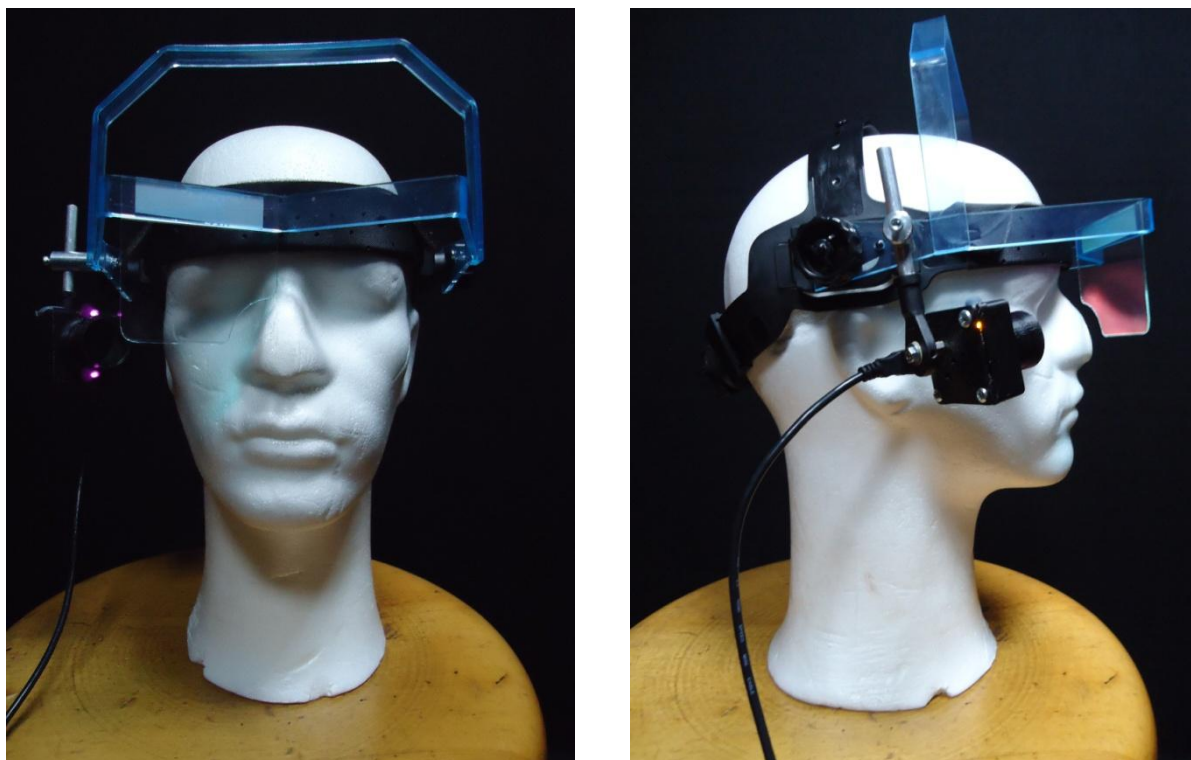
Barva		RGB
černá		0; 0; 0
šedá		160; 160; 160
bílá		255; 255; 255

Barvy byly zvoleny tak, aby mezi černou a šedou, šedou a bílou byl stejný rozdíl ve změřeném osvětlení.

Barva	Změřené osvětlení [lx]
černá	0,4
šedá	33,3
bílá	66,2

7.2 Metodika

Měření všech experimentů proběhlo v laboratoři videookulografie pomocí systému I4Tracking.



Obr. 24 Měřicí zařízení

Měření byli dobrovolníci, muži ve věku 22 let – 31 let. Všichni účastníci měli normální zrakovou ostrost, neměli poruchu barvocitu.

Měřený byl usazen ve vzdálenosti přibližně 60 cm od obrazovky. Při experimentu bylo měřeno osvětlení pomocí luxmetru umístěného vedle hlavy měřeného přesně 60 cm od obrazovky. Měřena byla dále velikost pupily a oční pohyby.

Oko bylo snímáno pomocí snímkové frekvence 75 Hz.

Byly dodrženy požadavky uvedené v postupu pro správné pupilometrické měření (viz kapitola 8).

U všech experimentů, kromě spontánních změn a chování ve tmě, bylo třeba experiment opakovat alespoň dvacetkrát a výsledný signál získat průměrováním jednotlivých měření, tak aby se reakce pupily na provedenou změnu v osvětlení odlišila od nežádoucích artefaktů - spontánních změn.

Ze vstupních dat jsem odstranila mrknutí (v datech jako nulová plocha pupily) a příliš rychlé, nefyziologické změny (rychlost konstrikce vyšší jak 8 mm.s^{-1} , rychlost dilatace vyšší jak $2,5 \text{ mm.s}^{-1}$, změna polohy středu pupily o více jak $500^\circ.\text{s}^{-1}$). Před průměrováním bylo nutné data z jednotlivých měření interpolovat do shodných časů.

Jako první snímek na začátky experimentů jsem vždy umístila přechodový snímek o době trvání několik sekund, tak abychom nesníмали pupilární reflex po zahájení experimentu.

7.3 Reakce na zvýšení a snížení osvětlení

Cílem měření je ukázat, že snížení osvětlení povede k větší změně velikosti pupily než zvýšení osvětlení o stejnou hodnotu.

7.3.1 Návrh experimentu

Zvýšení osvětlení:

Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	šedá	5
2	šedá	30
3	bílá	60

Snížení osvětlení:

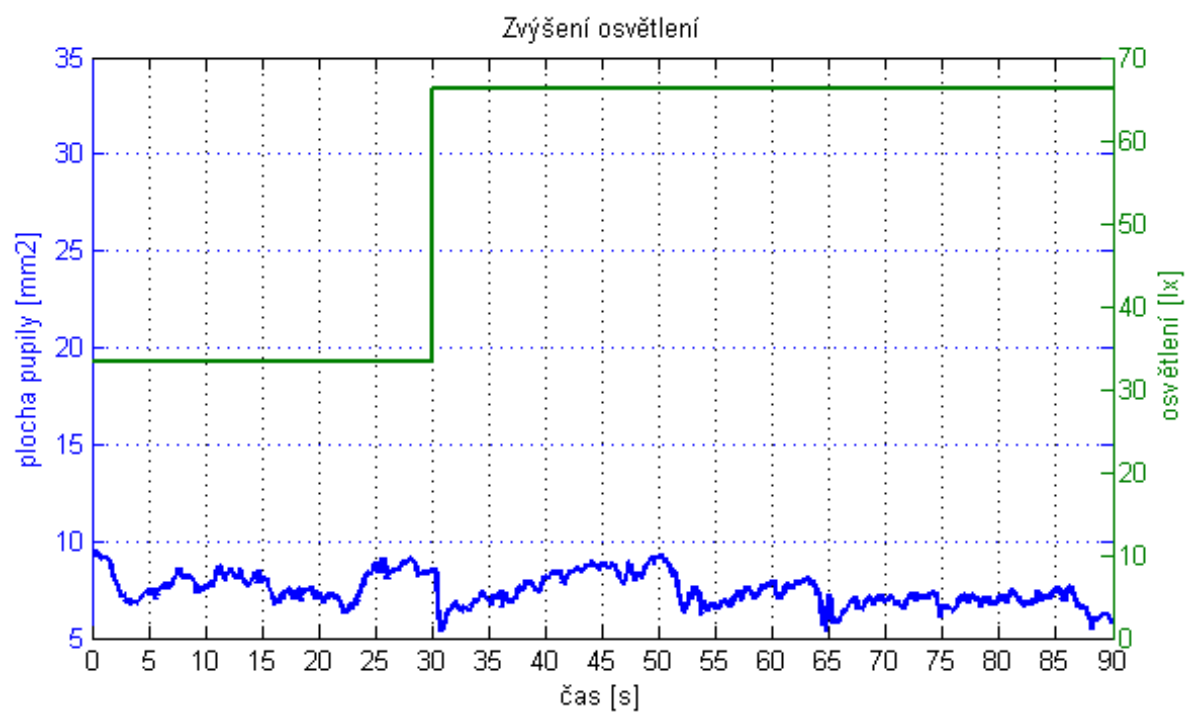
Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	šedá	5
2	šedá	30
3	černá	60

7.3.2 Výsledky

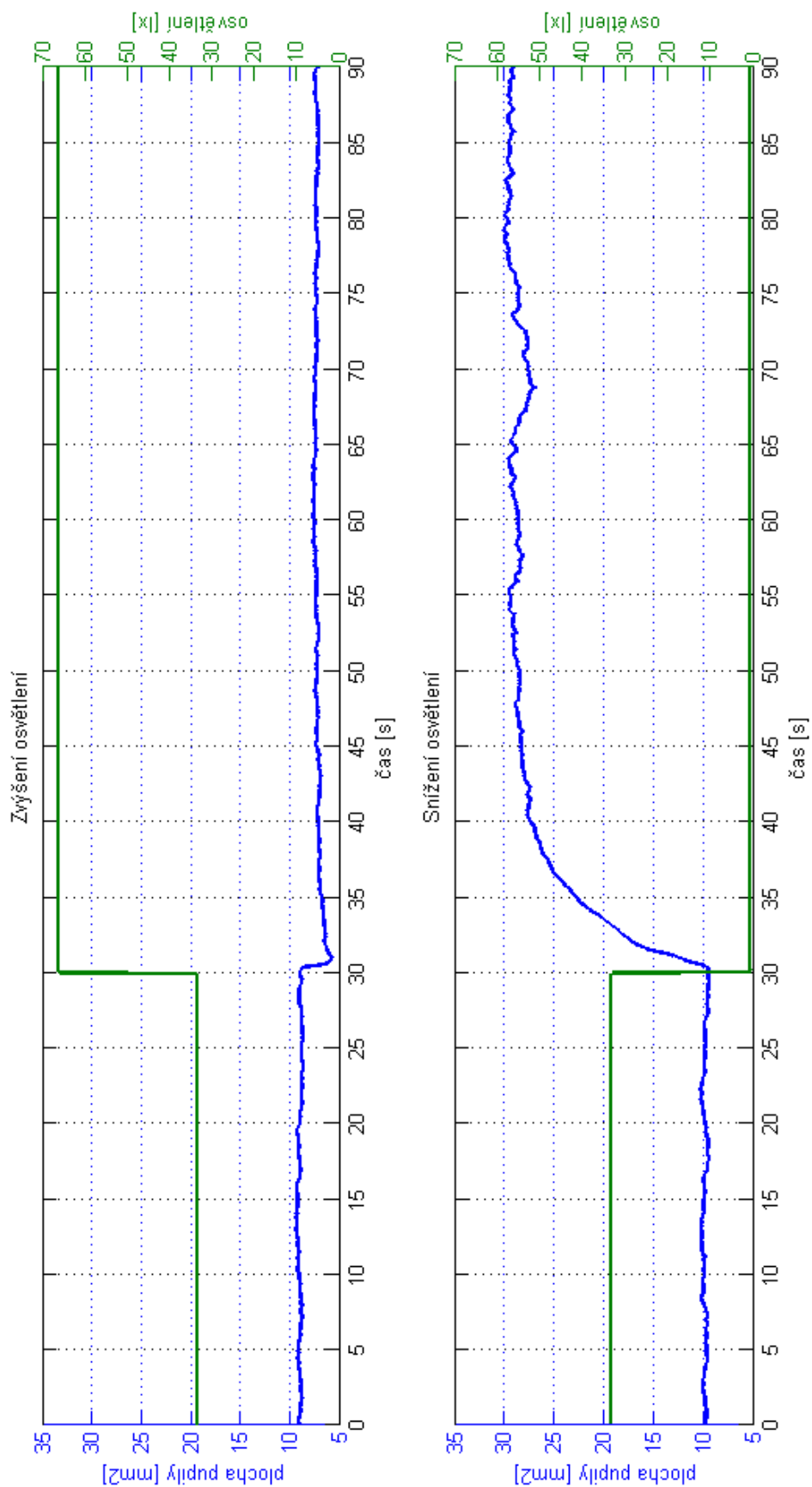
Je zřetelné, že snížení osvětlení vyvolá řádově větší změnu plochy pupily než zvýšení osvětlení o stejnou hodnotu.

Doba ustálení velikosti pupily je delší pro větší změnu plochy.

Na ukázkou příkládám i graf dat získaných pouze z 1 měření. Je zřetelné, že měření je nutné opakovat vícekrát, tak aby se změna velikosti pupily způsobená změnou osvětlení odlišila od nežádoucích artefaktů.



Obr. 25 Reakce na zvýšení osvětlení. Data pouze z jednoho měření. Muž 26 let.



Obr. 26 Reakce na zvýšení/snížení osvětlení. Zprůměrováno z 25 měření. Muž 26 let.

7.4 Spontánní změny

Cílem je ukázat spontánní změny velikosti pupily při neměnném osvětlení. Experiment bude proveden u několika jedinců, tak aby se ukázaly interpersonální rozdíly.

7.4.1 Návrh experimentu

Při vyšším osvětlení:

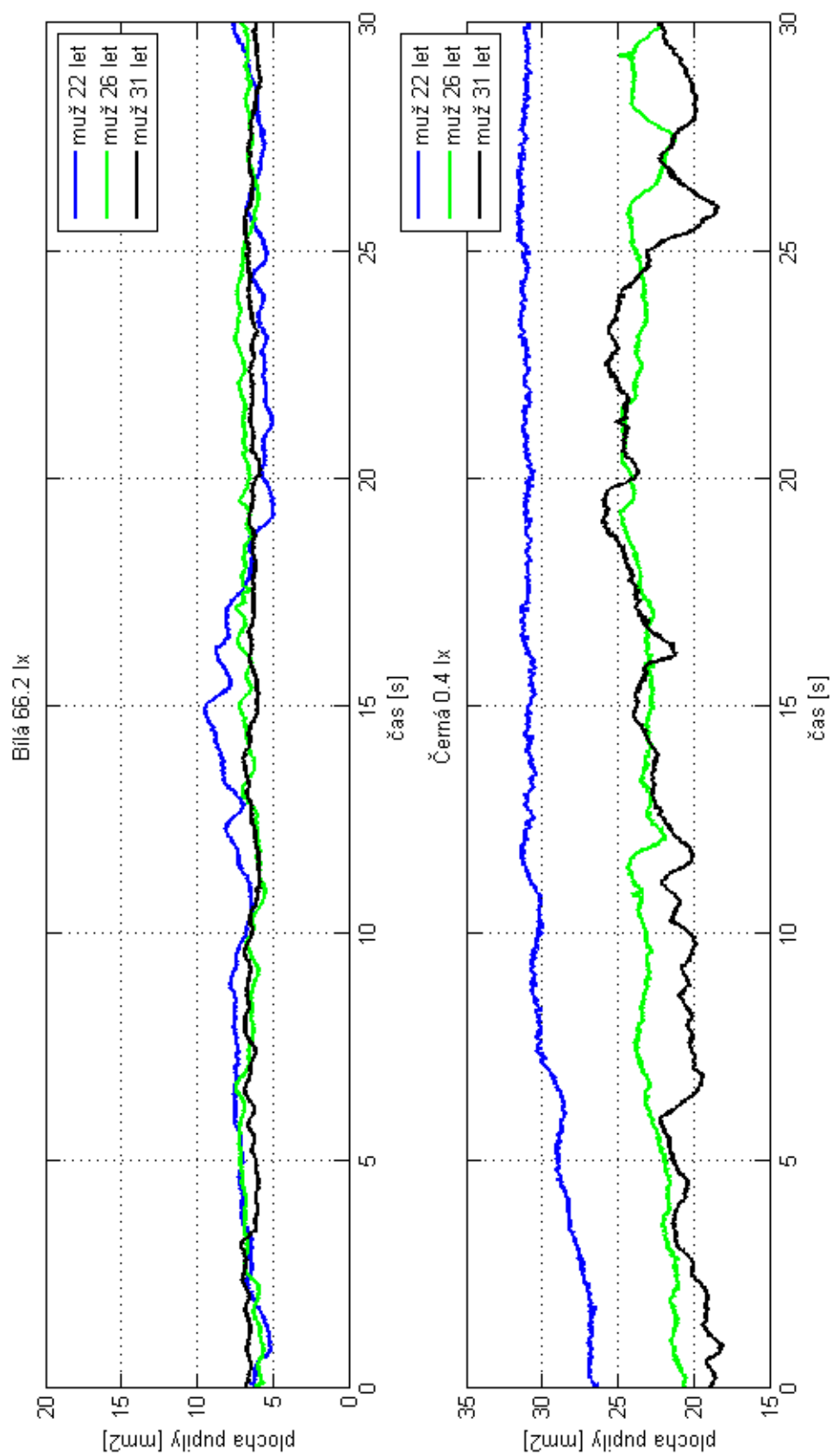
Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	bílá	10
2	bílá	30

Při nižším osvětlení:

Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	černá	10
2	černá	30

7.4.2 Výsledky

Jsou zřetelné spontánní změny, viditelné jsou zejména při nižším osvětlení výrazné interpersonální rozdíly.



Obr. 27 Spontánní změny velikosti pupily.

7.5 Chování ve tmě

Cílem je ukázat spontánní změny velikosti pupily ve tmě.

Předpokládáme několik minut stálou velikost pupily a po uplynutí této doby objevení oscilací pokrývajících velkou část rozsahu velikosti pupily.

7.5.1 Návrh experimentu

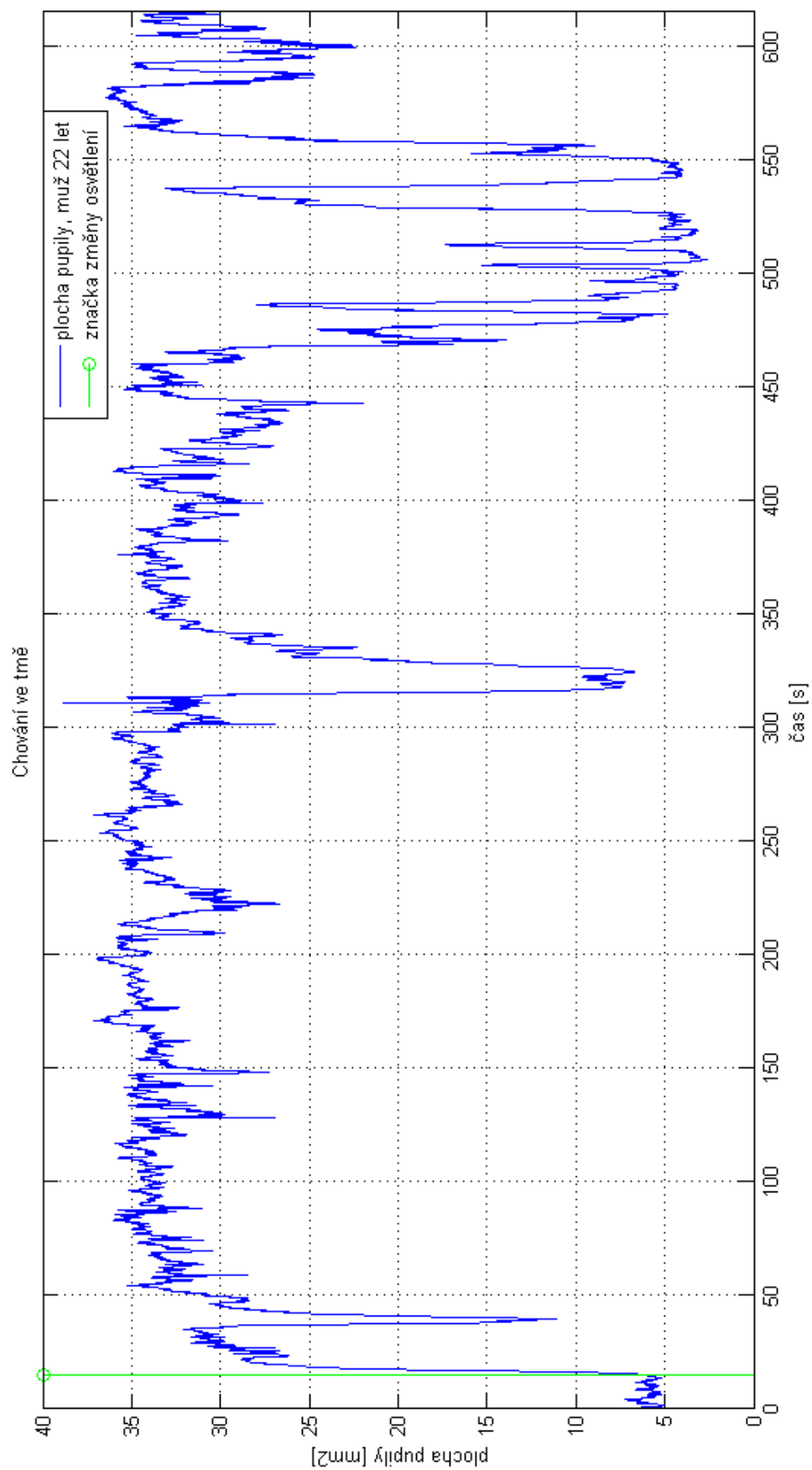
Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	bílá	15
2	bílá	15
3	tma	600

Po uplynutí 30 sekund, kdy bude měřený stimulován bílou barvou při zapnutém osvětlení v místnosti, bude zhasnuto světlo a vypojen monitor.

7.5.2 Výsledky

Oscilace se v signálu objevují již od začátku měření. Po 5 minutách nastávají oscilace s velkou amplitudou.

Měření však bylo ovlivněno způsobem snímání velikosti pupily. Přestože v místnosti byla tma, snímané oko je přisvětlováno infračervenými diodami, jejichž spektrum částečně zasahuje do oblasti viditelného záření.



Obr. 28 Spontánní změny velikosti pupily ve tmě. Muž 22 let.

7.6 Vliv polarity impulzu na tvar pupilárního reflexu

Cílem je ukázat rozdílný tvar pupilárního reflexu vyvolaného pozitivním/negativním pulzem o stejné amplitudě a době trvání.

7.6.1 Návrh experimentu

Pozitivní změna osvětlení:

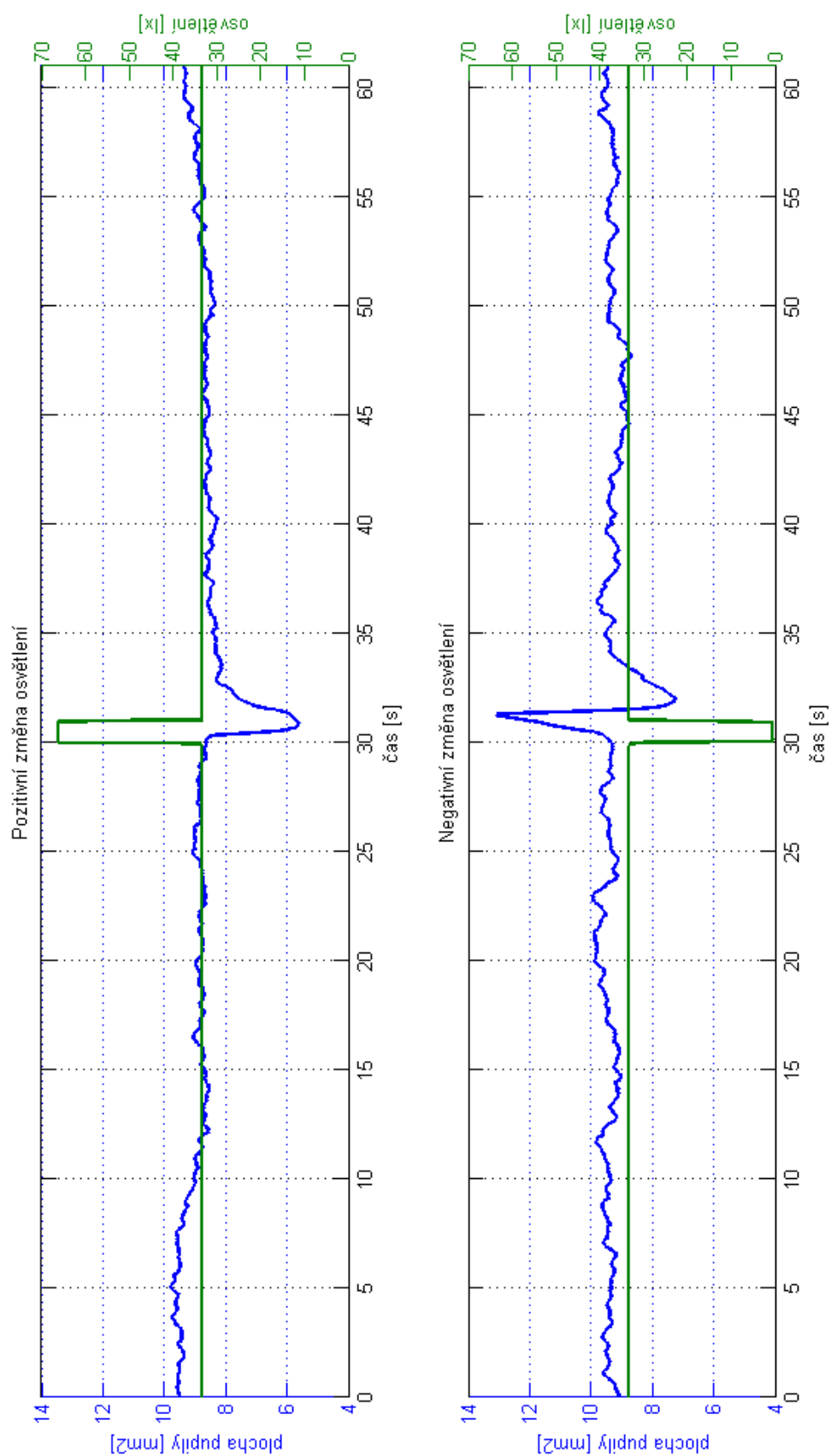
Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	šedá	5
2	šedá	30
3	bílá	1
4	šedá	30

Negativní změna osvětlení:

Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	šedá	5
2	šedá	30
3	černá	1
4	šedá	30

7.6.2 Výsledky

Můžeme pozorovat odlišný tvar pupilárního reflexu. Reflex vyvolaný snížením osvětlení není stejný jako reflex vyvolaný zvýšením osvětlení, pouze o opačné amplitudě.



Obr. 29 Pupilární reflex vyvolaný pozitivním/negativním pulzem. Zprůměrováno z 20 měření. Muž 26 let.

7.7 Pupilární reflex a Weberův zákon

Cílem je ukázat platnost Weberova zákona. Čekáme, že pulz při nízké původní hodnotě osvětlení vyvolá výraznější reflex než pulz o stejné amplitudě při vyšším původním osvětlení.

7.7.1 Návrh experimentu

Změna z šedé na bílou:

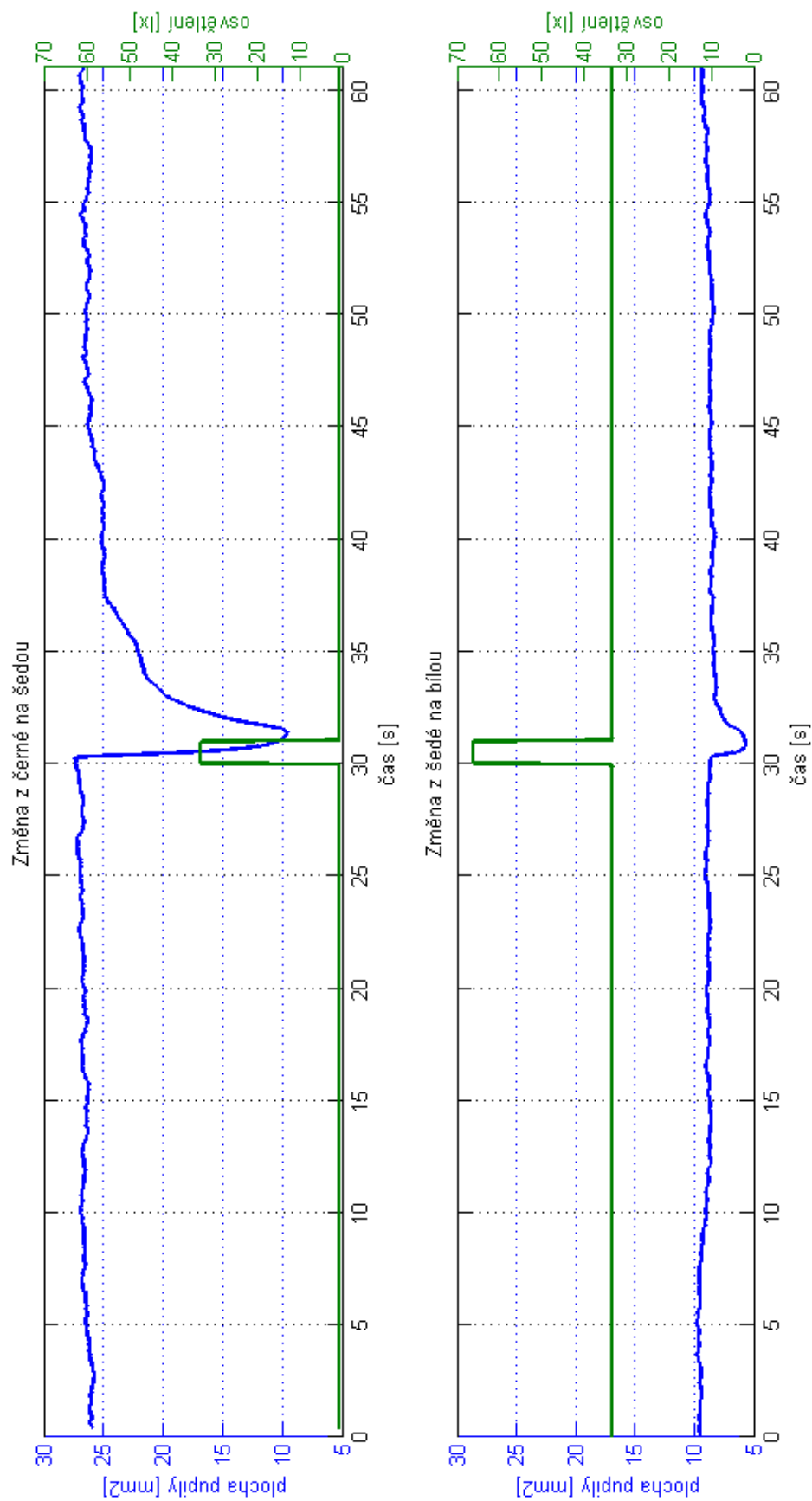
Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	šedá	5
2	šedá	30
3	bílá	1
4	šedá	30

Změna z černé na šedou:

Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	černá	5
2	černá	30
3	šedá	1
4	černá	30

7.7.2 Výsledky

Pulz při nižší původní hodnotě osvětlení vyvolá řádově větší změnu pupily než při vyšší původní hodnotě osvětlení, doba ustálení velikosti pupily je delší.



Obr. 30 Weberův zákon. Zprůměrováno z 20 měření. Muž 26 let.

7.8 Vliv délky impulzu na pupilární reflex

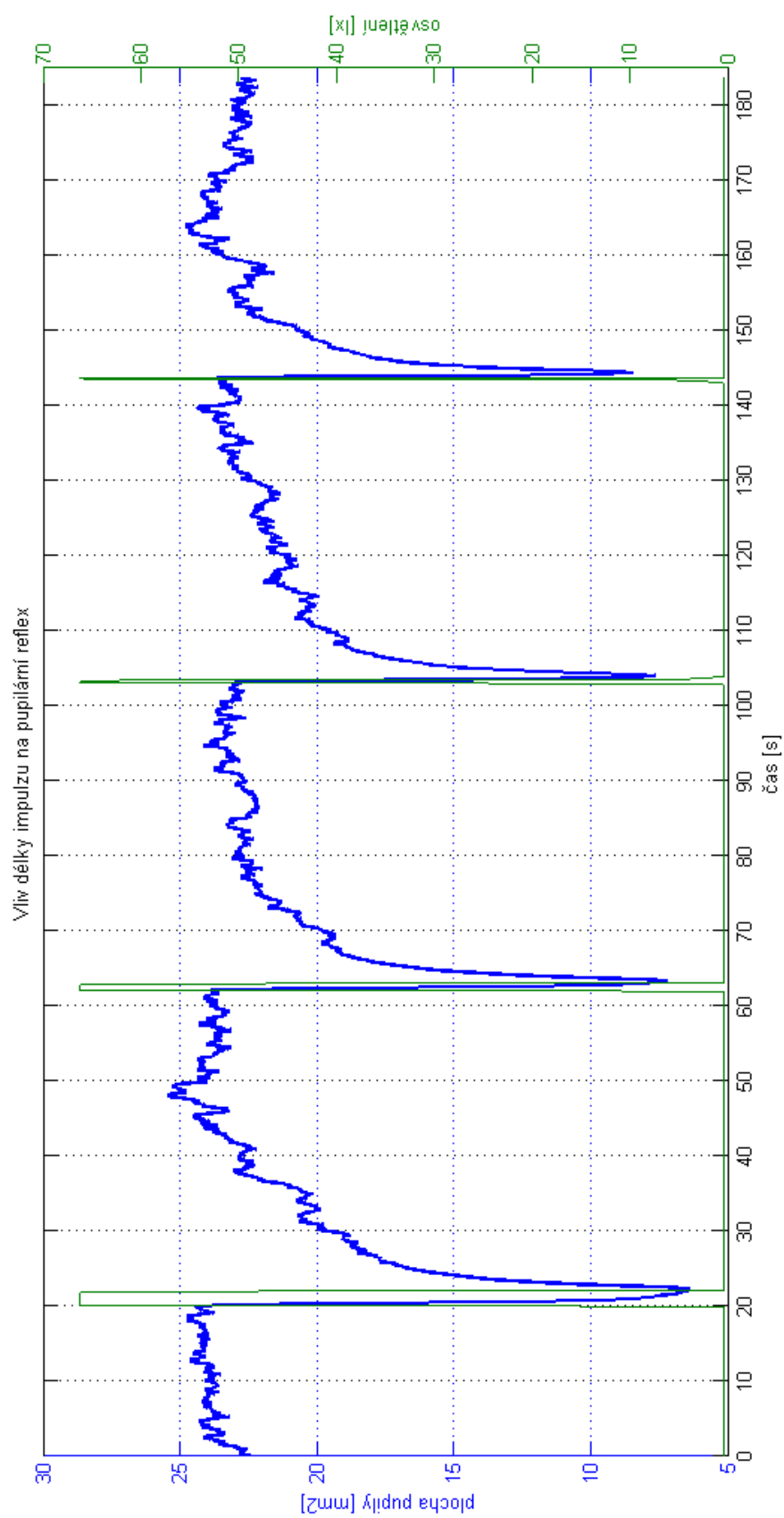
Cílem je ukázat, že kratší impulz vyvolá pupilární reflex o nižší amplitudě. Očekáváme, že latence a rychlost kontrakce nezávisí na délce stimulu.

7.8.1 Návrh experimentu

Číslo snímku	Barva	Doba trvání [s]
1	černá	5
2	černá	20
3	bílá	2
4	černá	40
5	bílá	1
6	černá	40
7	bílá	0.5
8	černá	40
9	bílá	0.25
10	černá	40

7.8.2 Výsledky

Kratší impulz vyvolá reflex o nižší amplitudě, doba redilatace je kratší.



Obr. 31 Vliv délky impulsu na pupilární reflex. Zprůměrováno z 20 měření. Muž 26 let.

8 Postup pro správné pupilometrické měření

Při pupilometrickém měření je nutné brát ohled na všechny faktory, které na velikost pupily mohou mít vliv (viz kapitola 5).

Při návrhu experimentu:

- Je vhodné použít model (dostupný v příloze na CD), který modeluje chování pupily v závislosti na osvětlení.

Při měření signálu je nutné brát v úvahu zejména následující faktory a dodržovat tyto zásady:

- Osvětlení

Nejvýznamnější faktor ovlivňující velikost pupily. Při každém pupilometrickém měření je nutné současně měřit hodnotu osvětlení pomocí luxmetru. Je nutné brát v úvahu, že luxmetr je nastaven na fotopickou spektrální odezvu.

- Je nutné zachovat stálou vzdálenost mezi měřeným a monitorem.
- Je nutné zajistit, aby luxmetr (umístěný vedle hlavy měřeného), nebyl v zorném poli měřeného.
- Je nutné zachovat během experimentu ticho.
- Je nutné vyvarovat se bolestivých, nepříjemných podnětů, které může vyvolávat např. špatně upevněná helma.
- Je nutné zamezit možným odrazům v polopropustném sklíčku před okem měřeného.
- Únava

Je vhodné provádět pouze krátké experimenty v řádu minut, aby se zabránilo únavě měřeného.

Při zpracování signálu:

- Je nutné odstranit nefyziologické vzorky (rychlost konstrikce vyšší jak 8 mm.s^{-1} , rychlost dilatace vyšší jak $2,5 \text{ mm.s}^{-1}$, změna polohy středu pupily o více jak $500^\circ.\text{s}^{-1}$), vzniklé chybou detekčního algoritmu.

- Je vhodné odstranit mrknutí.

V příloze na CD je dostupná funkce v programu Matlab, která odstraní nefyziologické vzorky i mrknutí, *odstranit_spatne_vzorky.m*.

Při vyhodnocování signálu je nutné brát v úvahu zejména následující faktory:

- Vliv osvětlení
- Spontánní změny

Přirozené změny průměru pupily dosahující frekvence až 2 Hz a amplitud v desetinách mm.

- Chování ve tmě

Po několika minutách ve tmě objevení oscilací s periodou 3 s a více a rozsahem pokrývajícím velkou část rozsahu velikosti pupily a současně stabilní pokles velikosti pupily.

- Věk měřeného.

9 Závěr

V úvodu práce jsem vytvořila přehled základních pojmů a poznatků nutných k správnému pochopení reakcí pupily a práci ve videookulografické laboratoři. Popsala jsem základní anatomii oka a jeho vlastnosti, shrnula jsem teoretické základy radiometrie, fotometrie, systémů barev a dalších souvisejících oborů.

Vysvětlila jsem význam velikosti pupily a popsala jsem vliv různých faktorů na její velikost a dynamiku.

V rámci práce jsem vysvětlila pupilární reflex a vytvořila jsem matematický dynamický model popisující reakci pupily na osvětlení. Tento model odpovídá reálným datům a je použitelný při návrhu pupilometrických experimentů.

S použitím systému I4Tracking jsem navrhla a provedla experimenty ilustrující zákonitosti popsané v teoretické části. Pro účely zpracování dat jsem navrhla vhodné algoritmy, které odstraňují mrknutí oka a nefyziologické změny velikosti pupily. Získaná data jsem zpracovala těmito algoritmy a vyhodnotila. Výsledky provedených experimentů jsou součástí práce a odpovídají teoretickým předpokladům.

Vytvořila a ověřila jsem postup pro správné pupilometrické měření, ve kterém je brán ohled na zmíněné faktory ovlivňující velikost pupily.

Dále jsem vytvořila podrobný návod pro použití vybavení videookulografické laboratoře a aplikace I4Tracking. Tento návod je uveden v příloze práce.

Citovaná literatura

1. LAENG, B., S. SIROIS a G. GREDEBACK. Pupillometry: A Window to the Preconscious?. *Perspectives on Psychological Science*. 2012-01-05, vol. 7, issue 1, s. 18-27. DOI: 10.1177/1745691611427305. Dostupné z: <http://pps.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/1745691611427305>
2. ROSINA, Jozef, Hana KOLÁŘOVÁ a Jiří STANEK. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2006, 230 s. ISBN 80-247-1383-7.
3. OHTA, Noboru a Alan R ROBERTSON. *Colorimetry: fundamentals and applications*. Chichester, West Sussex: J. Wiley, 2005, xvi, 334 s. ISBN 04-700-9472-9.
4. Photometry: The Answer to How Light is Perceived. *Photonics handbook* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=25119>
5. Soubor: Schematic diagram of the human eye cs.svg. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2009 [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Schematic_diagram_of_the_human_eye_cs.svg
6. KUCHYNKA, Pavel. *Oční lékařství*. 1.vyd. Praha: Grada, 2007, [40], 768 s. ISBN 978-802-4711-638.
7. ATCHISON, George Smith; David. *Optics of the human eye*. 1. publ. Oxford [u.a.]: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 07-506-3775-7.
8. File:Cones SMJ2 E.svg. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. 2007 [cit. 2013-03-17]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cones_SMJ2_E.svg
9. ANDREASSI, John L. *Psychophysiology: human behavior and physiological response*. 5th ed. Mahwah: Lawrence Erlbaum, 2007. ISBN 08-058-4951-3.
10. BOGUSZAKOVÁ, Jarmila. Zrak a vidění: Vybrané kapitoly z fyziologie zraku. *Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování* [online]. 2003, roč. 2003, č. 4 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23169
11. VÍT, Vladimír. *Televizní technika: Přenosové barevné soustavy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1997, 719 s. ISBN 80-860-5604-X.
12. MALACARA, Daniel. *Color vision and colorimetry: theory and applications*. Bellingham, WA: SPIE Press, c2002, vii, 164 p. ISBN 08-194-4228-3.

13. Top 15 des illusions d'optique. *Futura-Sciences* [online]. [cit. 2013-04-15].
Dostupné z: http://www.futura-sciences.com/galerie_photos/showphoto.php/photo/4657
14. ZMEŠKAL, Oldřich, Michal ČEPPAN a Petr DZIK. Barevné prostory a správa barev. [online]. 2002 [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/stud06_rozn02.pdf
15. FLEMMING. Separation of 'Colour' and 'Brightness'. [online]. [cit. 2013-04-03].
Dostupné z: <http://home.btconnect.com/mike.flemming/technical/colour/Colour2.htm>
16. Color Space. [online]. [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/colspa.html>
17. Solutions and Services: CIE Chromaticity diagram. *Arrow* [online]. [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://www.arroweurope.com/markets-solutions/markets/lighting/solutions-and-services.html>
18. ŠONKA, Milan, Václav HLAVÁČ a Roger BOYLE. *Image processing, analysis, and machine vision*. 3rd ed. Toronto: Thomson, 2008, xxv, 829 s. ISBN 978-0-495-24428-7.
19. Color Models. *Photozone* [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.photozone.de/colorimetric-systems-and-color-models>
20. MONACO, Matthew K. *Color Space Analysis for Iris Recognition* [online]. Morgantown, West Virginia, 2007 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://csee.wvu.edu/IIAS/docs/thesis/monaco-thesis.pdf>. West Virginia University.
21. File:Hsl-hsv models.svg. *Wikimedia commons* [online]. 2010 [cit. 2013-03-08].
Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hsl-hsv_models.svg
22. File:CMY ideal version.svg. *Wikimedia Commons* [online]. 2009 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CMY_ideal_version.svg
23. Healthy Vision Starts With a Dilated Eye Exam. *National Eye Institute* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: http://www.nei.nih.gov/nehep/programs/visionandaging/materials/DilatedEyeExamParticipantHandout_tagged.pdf
24. WATSON, A. B. a J. I. YELLOTT. A unified formula for light-adapted pupil size. *Journal of Vision* [online]. 2012-09-04, vol. 12, issue 10, s. 12-12 [cit.

- 2013-04-04]. DOI: 10.1167/12.10.12. Dostupné z:
<http://www.journalofvision.org/lookup/doi/10.1167/12.10.12>
25. Pupil formula: Demonstrations. [online]. 2012 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z:
<http://www.journalofvision.org/site/misc/cdf/watson-yellott-pupil-demos.html>
26. LOEWENFELD, Irene E a Otto LOWENSTEIN. *The pupil: anatomy, physiology, and clinical applications*. Boston: Butterworth-Heinemann, c1999, 2 v. ISBN 07-506-7143-2.
27. LAENG, B. a T. ENDESTAD. Bright illusions reduce the eye's pupil. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2012-02-07, vol. 109, issue 6, s. 2162-2167 [cit. 2013-05-04]. DOI: 10.1073/pnas.1118298109. Dostupné z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1118298109>
28. JACKSON, Beatty. Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*. roč. 1982, č. 2, s. 276-292. Dostupné z:
<http://www.wpic.pitt.edu/research/biometrics/SPR%202011%20Workshop/SPR%202011%20References/Beatty%20Pupil%20Review%20%20PsychBull%201982.pdf>
29. PARTALA, Timo a Veikko SURAKKA. Pupil size variation as an indication of affective processing. *International Journal of Human-Computer Studies* [online]. 2003, vol. 59, 1-2, s. 185-198 [cit. 2013-05-01]. DOI: 10.1016/S1071-5819(03)00017-X. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S107158190300017X>
30. JOHNSON, Morgan G., Jeffrey A. MUDAY a James A. SCHIRILLO. When viewing variations in paintings by Mondrian, aesthetic preferences correlate with pupil size. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts* [online]. 2010, vol. 4, issue 3, s. 161-167 [cit. 2013-05-04]. DOI: 10.1037/a0018155. Dostupné z: <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/a0018155>
31. HESS, Eckhard H. Attitude and Pupil Size. *Scientific American*. 1965, vol. 212, issue 4, s. 46-54. DOI: 10.1038/scientificamerican0465-46. Dostupné z:
<http://www.nature.com/doifinder/10.1038/scientificamerican0465-46>
32. SHUNICHI, Oka, Richard CHAPMAN a Robert C. JACOBSON. Phasic Pupil Dilation Response to Noxious Stimulation: Effects of Conduction Distance, Sex, and Age. *Journal of Psychophysiology* [online]. roč.2000, č. 2, s. 97-105

- [cit. 2013-05-04]. DOI: 10.1027//0269-8803.14.2.97. Dostupné z:
<http://www.psychcontent.com/content/b454584211042543/>
33. KADLECOVÁ, V., M. PELEŠKA a A. VAŠKO. Dependence on Age of the Diameter of the Pupil in the Dark. *Nature* [online]. 1958-11-29, vol. 182, issue 4648, s. 1520-1521 [cit. 2013-05-04]. DOI: 10.1038/1821520a0. Dostupné z:
<http://www.nature.com/doifinder/10.1038/1821520a0>
 34. WINN, B., D. WHITAKER, D. B. ELLIOTT a N. J. PHILLIPS. Factors Affecting Light-Adapted Pupil Size in Normal Human Subjects. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* [online]. roč. 1994, č. 3, s. 1132-1137 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.iovs.org/content/35/3/1132.full.pdf>
 35. ELLIS, C. J. The pupillary light reflex in normal subjects. *British Journal of Ophthalmology* [online]. 1981-11-01, vol.65, issue 11, s. 754-759 [cit. 2013-04-01]. DOI: 10.1136/bjo.65.11.754. Dostupné z:
<http://bjo.bmj.com/cgi/doi/10.1136/bjo.65.11.754>
 36. WEBSTER, John G. Pupillary Light Reflex: Development of Teaching Models. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* [online]. 1971, BME-18, issue 3, s. 187-194 [cit. 2013-05-04]. DOI: 10.1109/TBME.1971.4502830. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4502830>
 37. PAMPLONA, Vitor Fernando. *Photorealistic Models for Pupil Light Reflex and Iridal Pattern Deformation* [online]. Porto Alegre, 2008 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: http://vitorpamplona.com/deps/papers/2008_UFRGS_DISS.pdf. Master thesis. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.

Přílohy dostupné na CD

Funkce v Matlabu pro úpravu dat

odstranit_moc_rychle.m

Odstraní všechny nefyziologické vzorky s příliš velkou rychlostí kontrakce/dilatace a očních pohybů.

odstranit_mrknuti.m

Odstraní vzorky, kde měřený mrkl.

odstranit_spatne_vzorky.m

Zahrnuje funkce *odstranit_moc_rychle.m* a *odstranit_mrknuti.m*.

Model chování pupily v Matlabu

model_chovani_pupily_v_zavislosti_na_osvetleni.m

Vstupem do modelu jsou hodnoty osvětlení [lx] v závislosti na čase [s].

Výstupem jsou hodnoty plochy pupily [mm²] v závislosti na čase [s].

Příloha A - Návod k aplikaci I4Tracking

Aplikace I4Tracking slouží společně se zařízením k měření pupilometrických ukazatelů. Zařízení využívá principu videookulografie se zaznamenáváním pohybů oka vysokorychlostní kamerou a zpracováním těchto snímků k účelu určení středu zornice a velikosti pupily. Zařízení je vhodné pro zkoumání jevů, které přímo i nepřímo souvisí se změnou lidského oka.

Návod zpracovala: Alena Palečková, palecale@fel.cvut.cz.

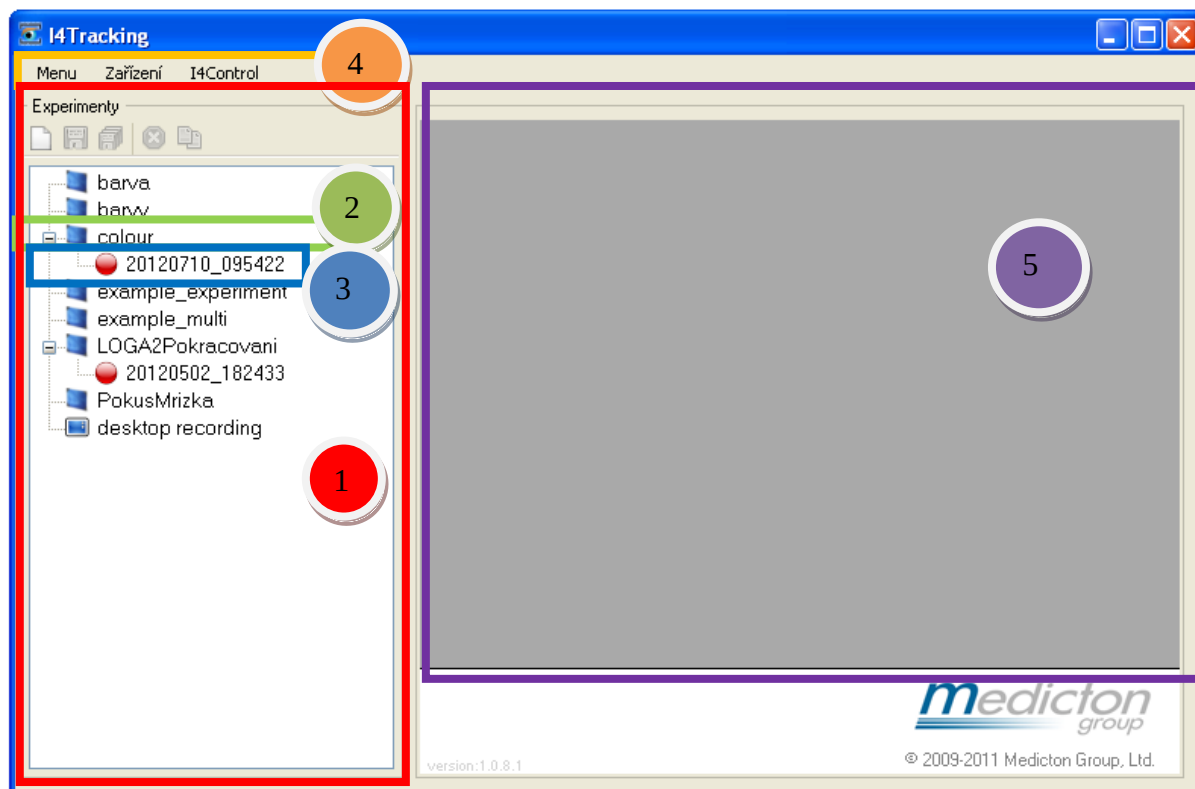
Obsah

1	I4Tracking prostředí	3
2	Tvorba experimentu.....	6
2.1	Vytvoření experimentu.....	6
2.2	Nastavení vlastností a kalibrace	7
2.2.1	Nastavení vlastností experimentu	8
2.2.2	Nastavení kalibrace.....	9
2.3	Přidání stránky	9
2.3.1	Vlastnosti stránky	11
2.3.2	Upravení stránky.....	11
2.3.3	Editace zón.....	13
3	Nastavení zařízení	17
3.1	Náhled videa.....	18
3.2	Nastavení luxmetru	18
3.3	Nastavení kamery.....	20
4	Analýza a vizualizace naměřených dat.....	21
4.1	Přehrání naměřených dat.....	22
4.2	Analýza měření	23
4.3	Vizualizace dat	24

4.3.1	Tabulka s daty	29
4.3.2	Pupilometrie	29
	Seznam obrázků	30

1 I4Tracking prostředí

Po spuštění aplikace se zobrazí základní okno (Obr.1). Zde vlevo (1) jsou přehledně k dispozici všechny návrhy experimentů (2) i již provedené experimenty (3). K dispozici je ovládací lišta (4). Vpravo (5) je prostor, v kterém se spravují jednotlivé experimenty.

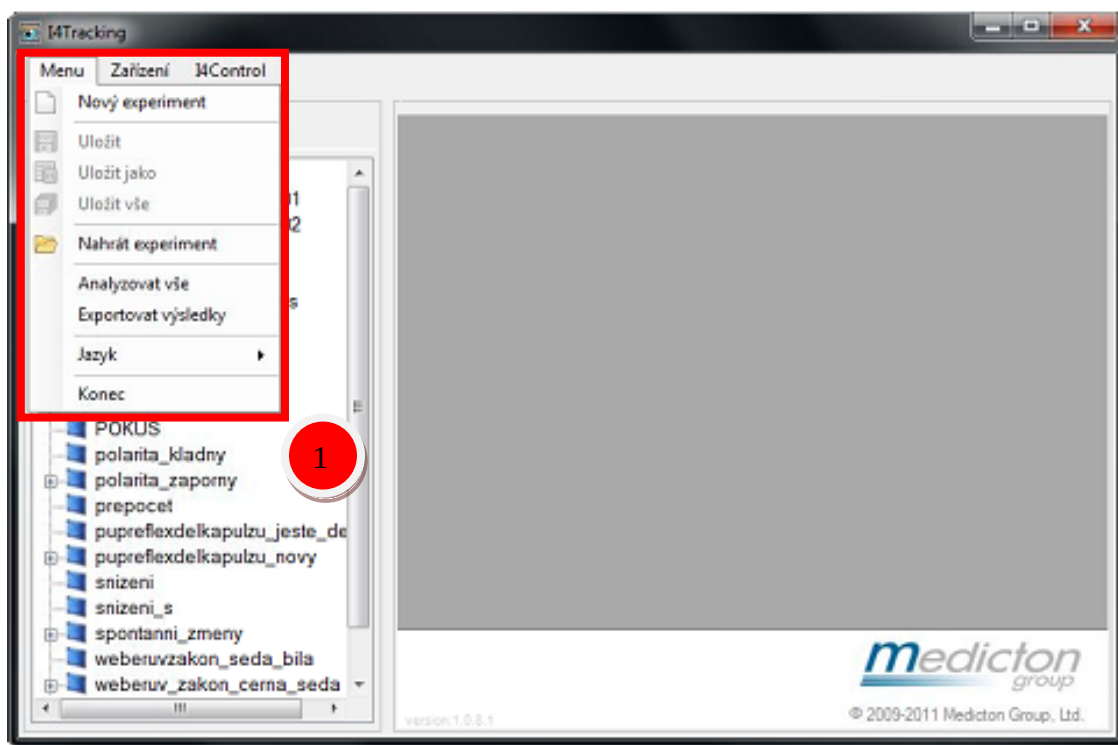


Obr. 1 Základní dialog

V ovládací liště se po kliknutí levým tlačítkem myši na Menu zobrazí nabídka (1) (Obr.2). Kliknutím levým tlačítkem myši je možné

- vytvořit nový experiment,
- uložit experiment (tlačítko Uložit, uloží rozpracovaný experiment v aktuálním stavu, Uložit jako, umožňuje uložit experiment pod libovolným názvem, Uložit vše – uloží všechny provedené změny v experimentech),
- nahrát experiment (umožní importovat do aplikace již vytvořený experiment),
- analyzovat vše (analyzuje všechny experimenty, výsledky uloží ve formátu *.csv),
- exportovat výsledky (výsledky uloží ve formátu *.xml),

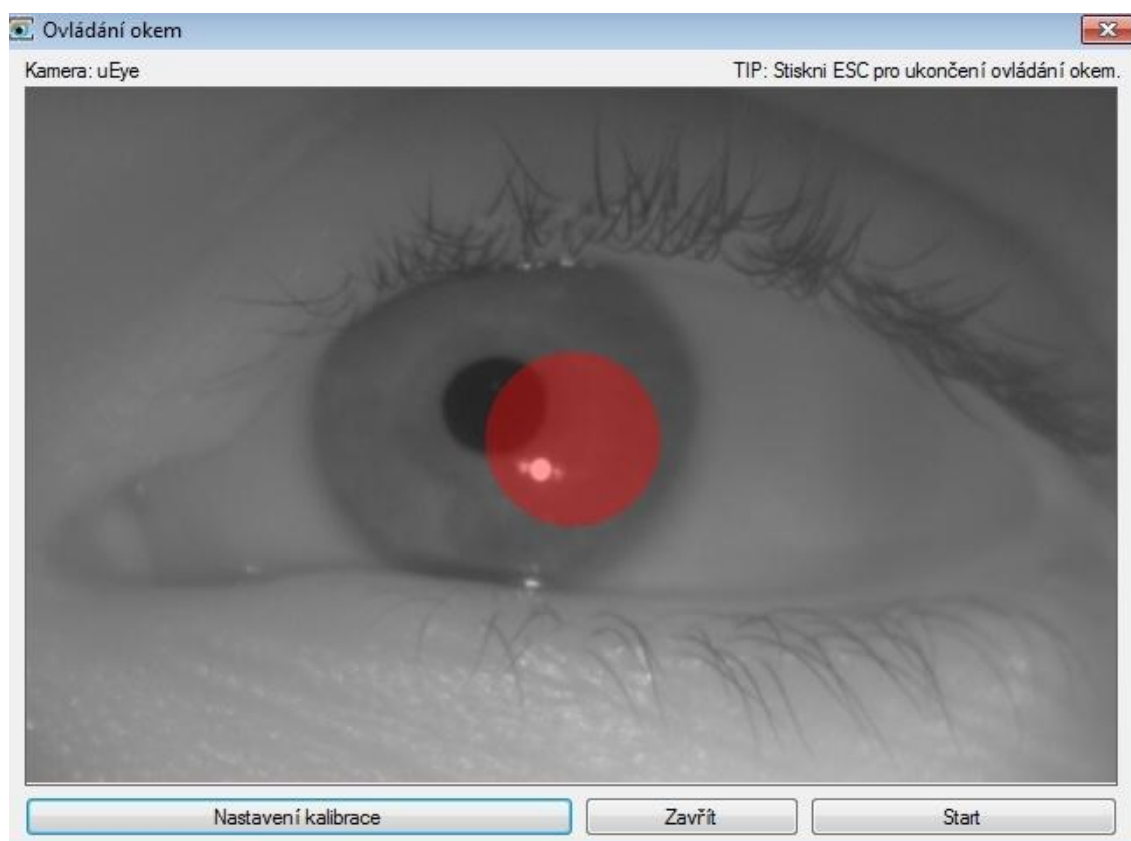
- jazyk - umožňuje změnu jazyka za běhu aplikace, na výběr je čeština, angličtina, ruština,
- konec - ukončí aplikaci.



Obr. 2 Nabídka Menu

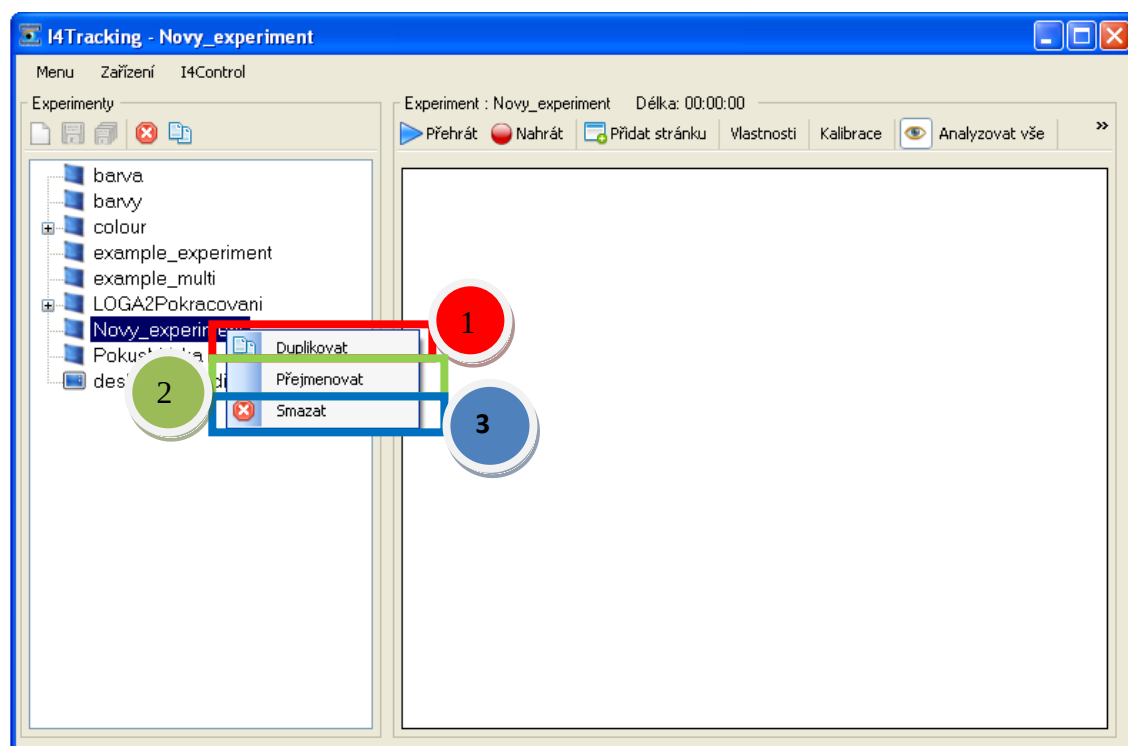
Nabídka Zařízení v ovládací liště umožňuje upravit nastavení připojených měřících zařízení (viz kapitola Nastavení zařízení).

Nabídka I4Control v ovládací liště umožňuje vyzkoušet ovládání pohybu kurzoru pomocí oka (Obr.3).



Obr. 3 I4Control

Po kliknutí pravým tlačítkem na název experimentu je ho možno Duplikovat (1), Přejmenovat (2), Smazat (3) (Obr.4)



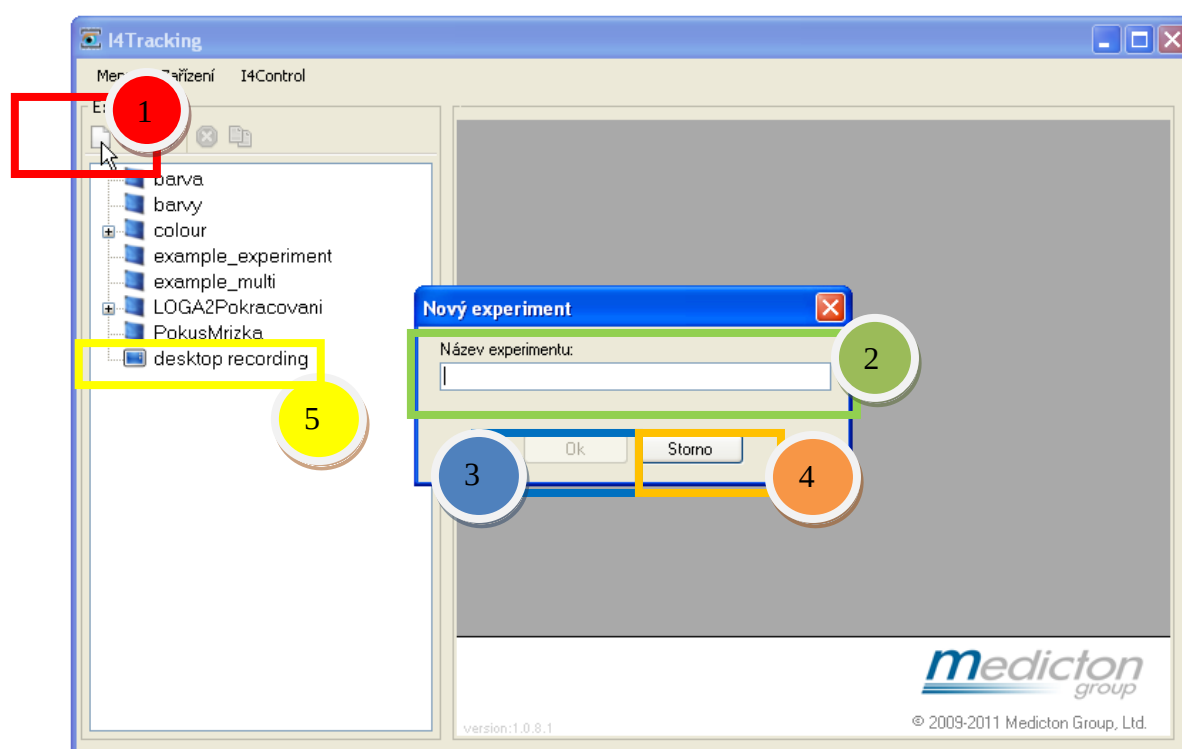
Obr. 4 Práce s experimentem

2 Tvorba experimentu

2.1 Vytvoření experimentu

Vytvoření nového experimentu zahájíme kliknutím levým tlačítkem myši na ikonu nového experimentu (1) (tuto možnost je možné zvolit také v Menu) (Obr. 5).

Po vložení názvu nového experimentu (2) a stisknutí tlačítka Ok (3) se vytvoří nová položka v seznamu experimentů. Vytvoření nového experimentu je možné zrušit stisknutím Storno (4).



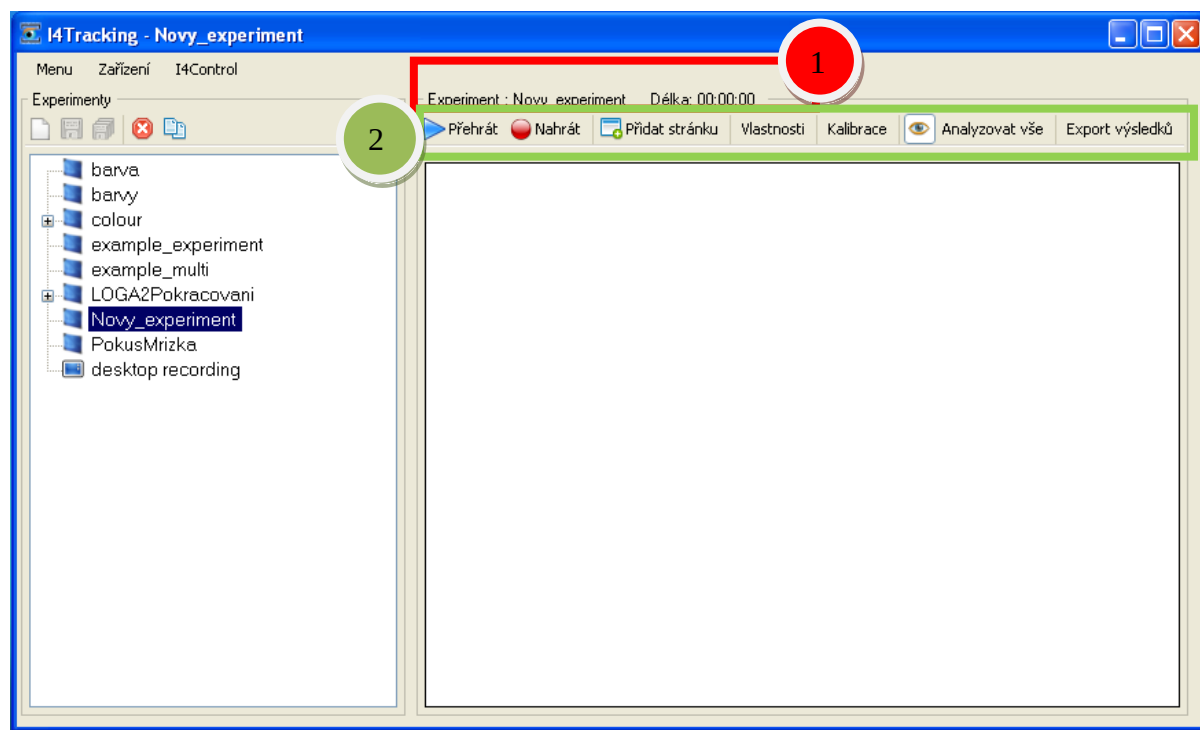
Obr. 5 Vytvoření nového experimentu

Speciálním experimentem je „desktop recording“ (5). Jedná se o přednastavený experiment, který po spuštění začne nahrávat pracovní plochu počítače a tedy veškerou práci uživatele. Tato funkce je dostupná pouze na systému Windows 7, s vypnutou službou Aero a nainstalovanými kodeky pro WME (Wintermute engine, nástroj pro tvorbu grafiky).

2.2 Nastavení vlastností a kalibrace

U otevřeného experimentu se zobrazují jeho vlastnosti (Obr. 6). (1) Je uveden název experimentu a jeho délka. V liště (2) jsou zobrazeny možnosti práce s experimentem.

- Přehrát (přehraje experiment s vizualizací rozpoznaných dat jako slide show),
- Nahrát (spustí měření daného experimentu),
- Přidat stránku (přidá novou stránku, viz Přidání stránky),
- Vlastnosti (zobrazí vlastnosti experimentu, viz Obr. 7),
- Kalibrace (viz Obr.8),
- Analyzovat vše (analyzuje všechny experimenty, výsledky uloží ve formátu *.csv),
- Export výsledků (výsledky uloží ve formátu *.xml).



Obr. 6 Možnosti experimentu

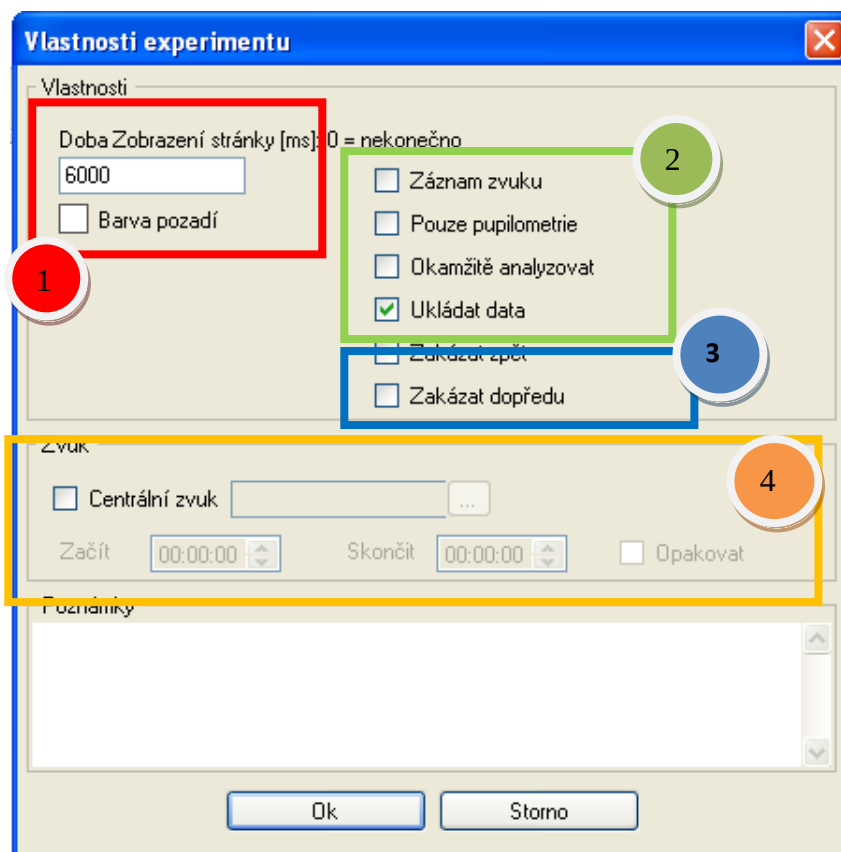
2.2.1 Nastavení vlastností experimentu

Ve vlastnostech experimentu (Obr. 7) je potřeba nastavit implicitní dobu zobrazení a barvu pozadí stránek (1) (tyto vlastnosti je možno změnit u každé jednotlivé stránky). Doba zobrazení není exaktní a na pomalejších počítačích může docházet k prodlevám.

Dále je nutné nastavit možnosti ukládání dat (2). Vždy je dobré mít zaškrtnuto ukládat data. V takovém případě je záznam z kamery uložen na disk a může být kdykoli přepočítán. Pokud zaškrtneme Okamžitě analyzovat data, dojde po naměření experimentu ke spuštění výpočtů. Tento způsob není doporučen vlivem délky trvání analýzy.

Implicitně je při experimentu možné stisknutím šipky vpravo přeskočit na další stránku a stisknutím šipky vlevo, vrácení se na předchozí stránku. Tuto možnost lze zakázat zaškrtnutím Zakázat dopředu/Zakázat zpět (3).

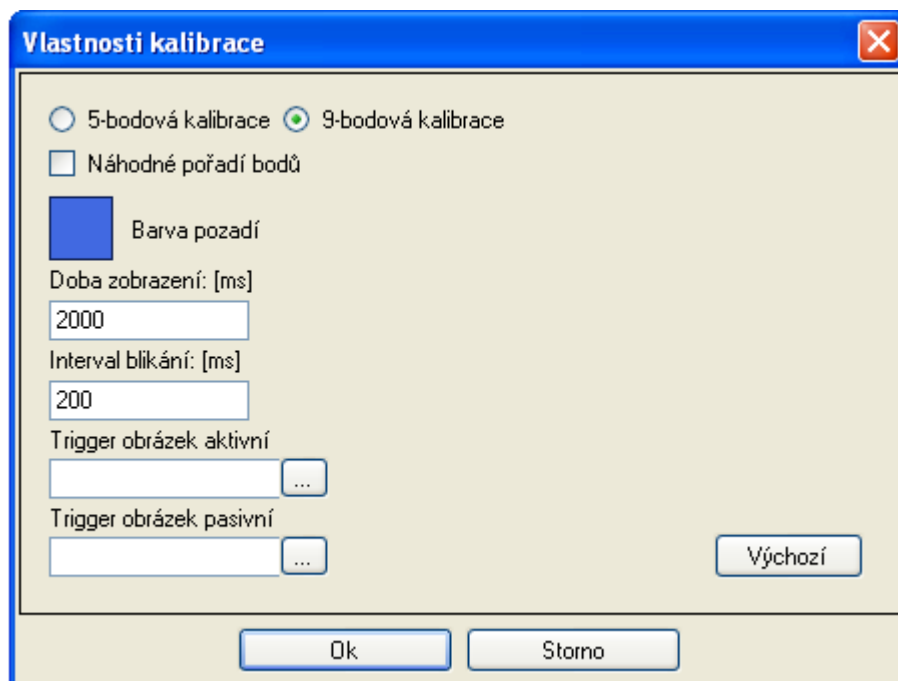
Dále je možné k experimentu přidat centrální zvuk. Lze nastavit jeho začátek a konec přehrávání nebo opakování (smyčku). (4)



Obr. 7 Vlastnosti experimentu

2.2.2 Nastavení kalibrace

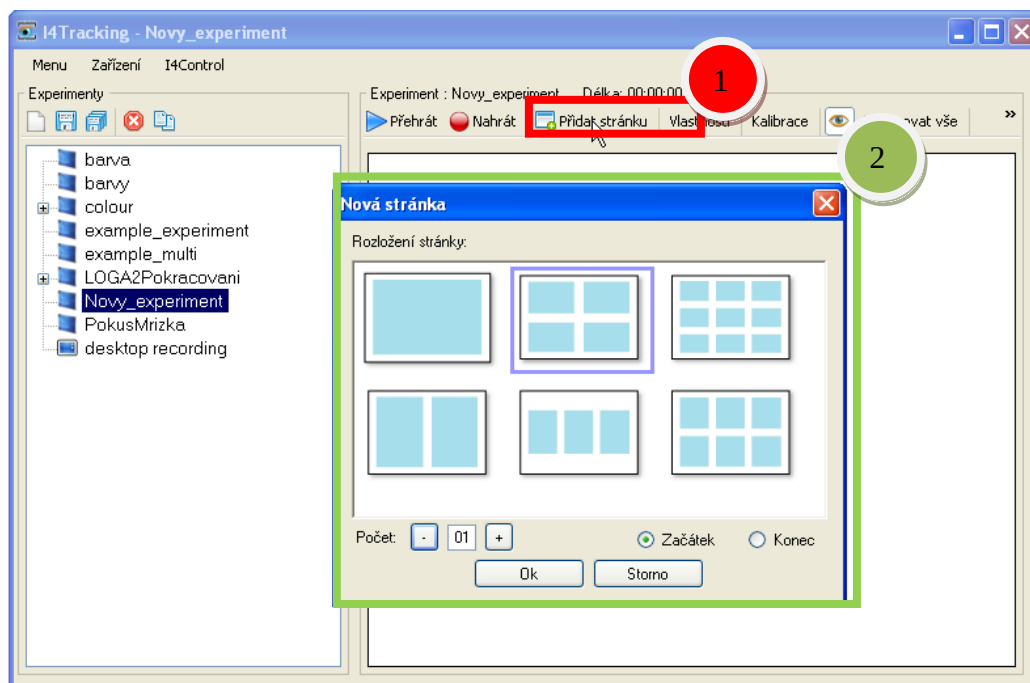
Po kliknutí levým tlačítkem myši na tlačítko Kalibrace (viz 2 v Obr. 6) se objeví okno Vlastnosti kalibrace (Obr. 8). Okno umožňuje nastavit jak barvu pozadí kalibrace, tak typ kalibrace (5ti bodový nebo 9ti bodový), zda budou kalibrační body zobrazovány po řadě, nebo náhodně. Dále dobu zobrazení bodu, dobu skrytí a nakonec samotnou texturu kalibračního bodu.



Obr. 8 Vlastnosti kalibrace

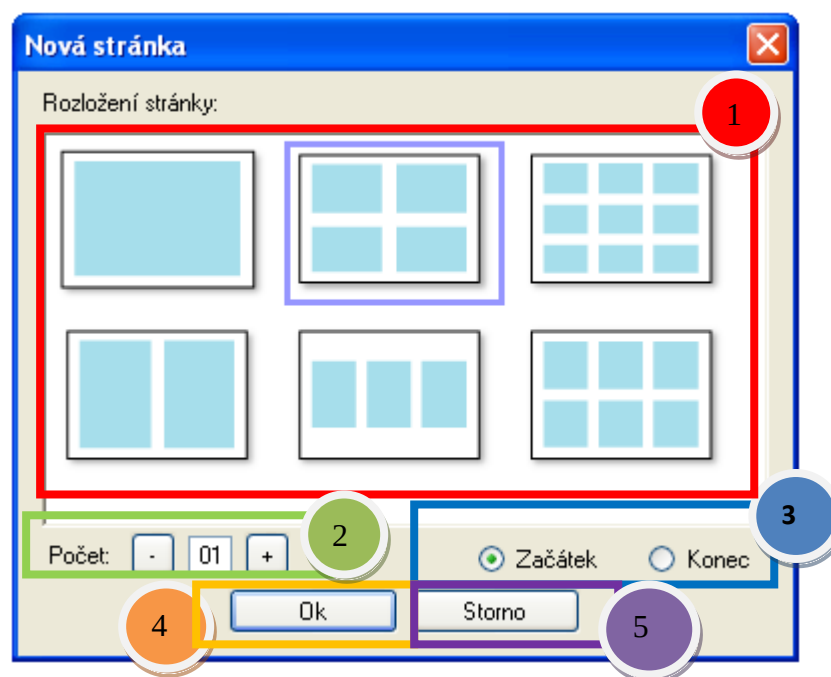
2.3 Přidání stránky

Nyní je nutné do experimentu vložit snímky a nastavit jejich vlastnosti. Po kliknutí levým tlačítkem myši na Přidat stránku (1) se zobrazí okno (2) (Obr. 9) s nabídkou přednastavených šablon.



Obr. 9 Přidání stránky

Zde (Obr. 10) je možné vybrat, kolik částí má mít nová stránka (1), počet přidanych stránek (2), kam se má nová stránka/stránky přidat (jako první nebo jako poslední stránky experimentu) (3). Přidání je nutné potvrdit stiskem tlačítka Ok (4). Přidání je možné zrušit stiskem tlačítka Storno (5).

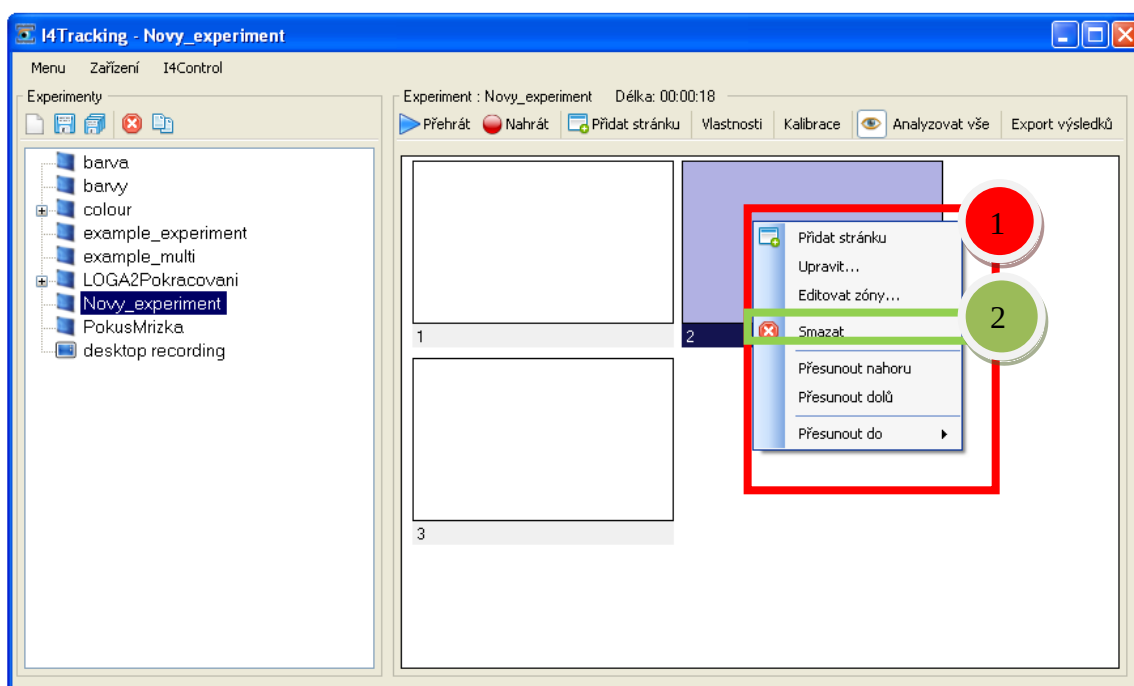


Obr. 10 Možnosti nové stránky

2.3.1 Vlastnosti stránky

Po kliknutí pravým tlačítkem myši na stránku se zobrazí možnosti (1) (Obr. 11):

- Přidat stránku (přidá novou stránku do experimentu, viz Obr. 10),
- Upravit (viz Obr. 12),
- Editovat zóny (viz Editace zón),
- Smazat,
- Přesunout nahoru (přesune stránku na začátek otevřeného experimentu),
- Přesunout dolů (přesune stránku na konec otevřeného experimentu),
- Přesunout do (zkopíruje stránku na konec zvoleného experimentu).



Obr. 11 Možnosti stránky

2.3.2 Upravení stránky

Po kliknutí levým tlačítkem myši na Upravit (nebo dvojným poklepáním levého tlačítka myši na stránku) se objeví okno (Obr. 12). Zde v (1) je možno vybrat Vlastnosti (týkající se celé stránky) nebo jednotlivé části stránky (pojmenované Obrázek 1-x) .

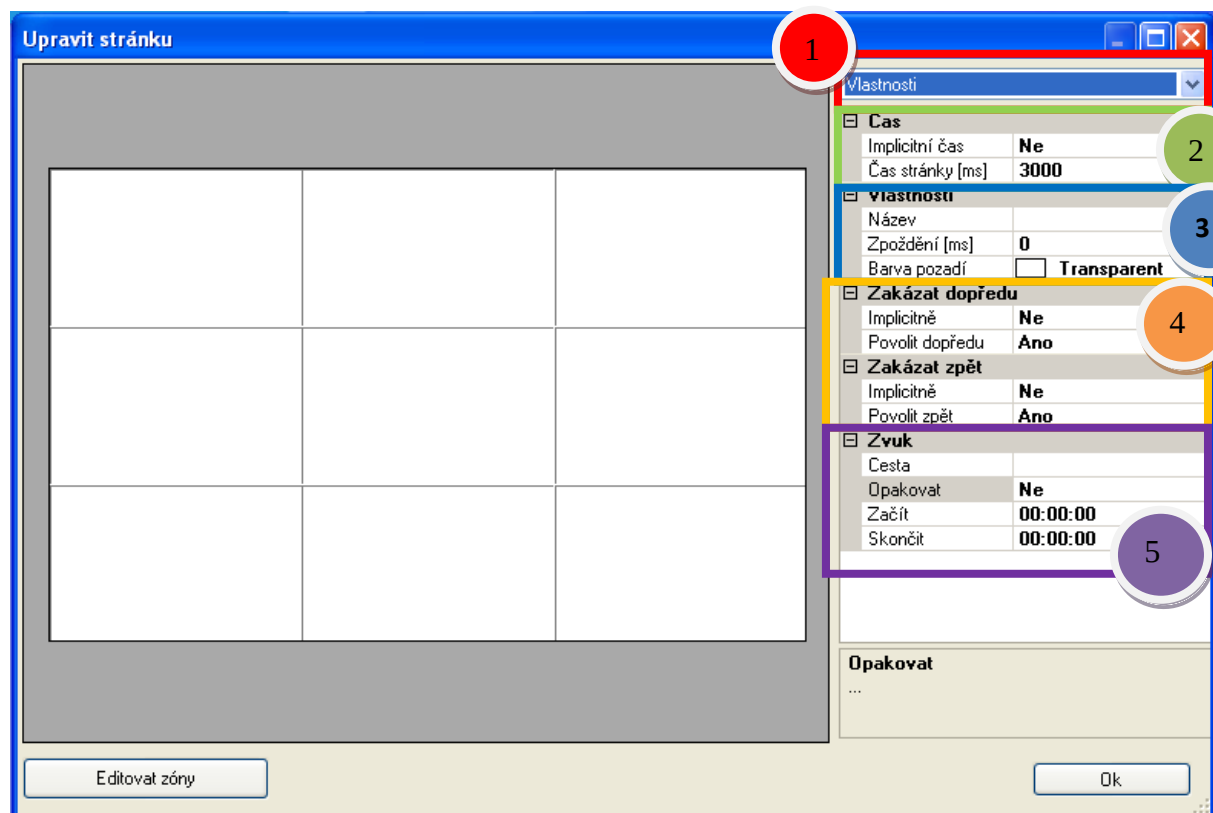
Je zde možné zvolit dobu zobrazení stránky – implicitně je tato hodnota převzata z nastavení experimentu (2).

Je možné doplnit název stránky (doporučeno, název se objeví v tabulce výsledků), zpoždění než se stránka zobrazí (po dobu zpoždění se zobrazuje bílá stránka) a barvu pozadí (3).

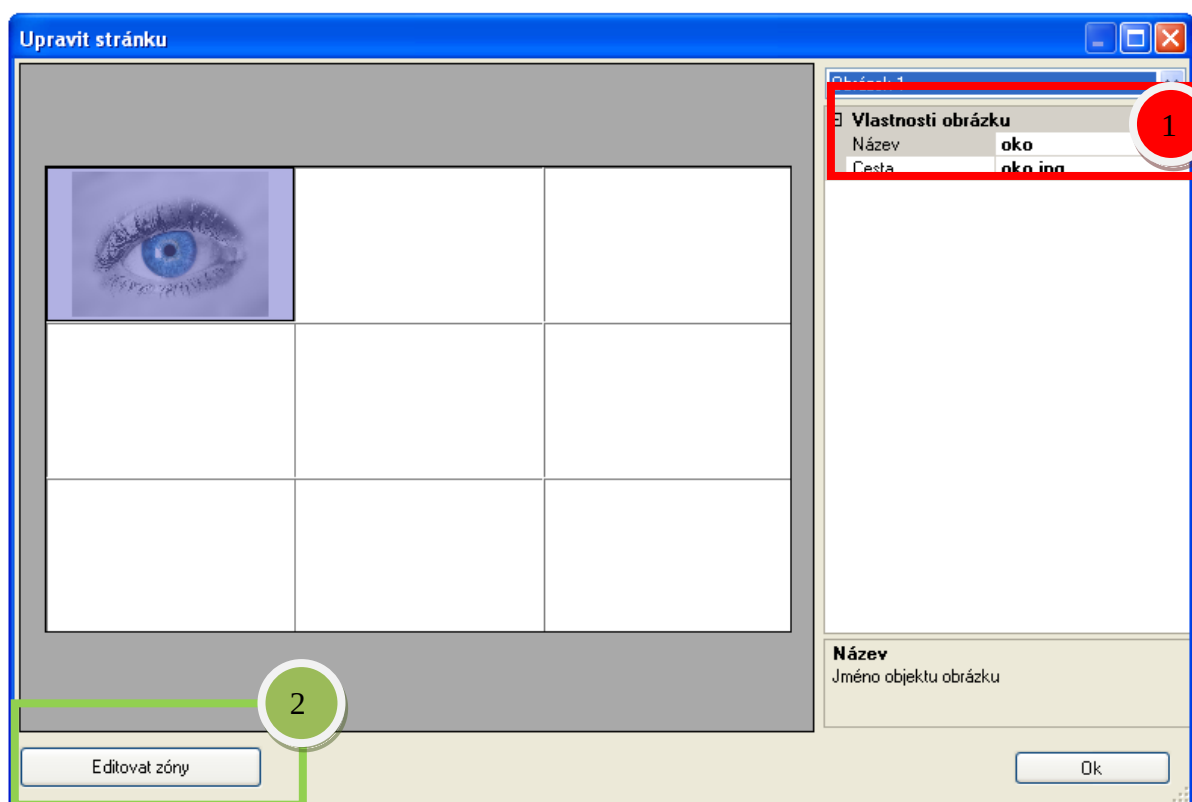
Dále je možné zakázat dopředu/zakázat zpět (4).

Možnost přidat zvuk (5) zmizí, pokud je již navolen centrální zvuk (viz Obr. 7).

Do stránky je možno vložit obrázek (1)(Obr. 13).



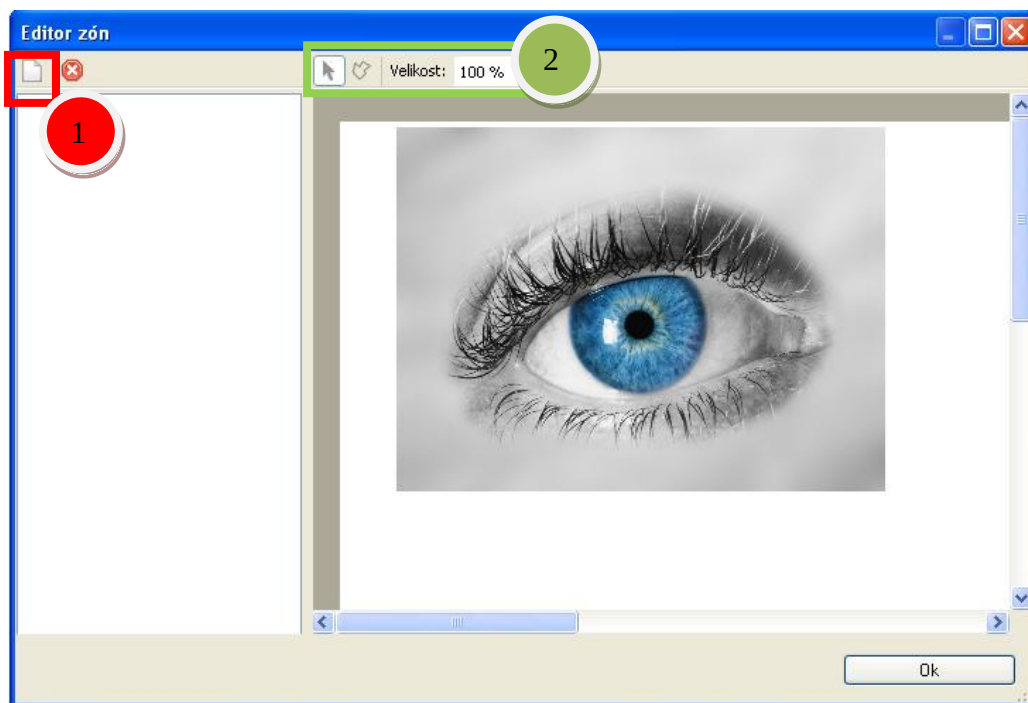
Obr. 12 Upravení stránky



Obr. 13 Vložení obrázku

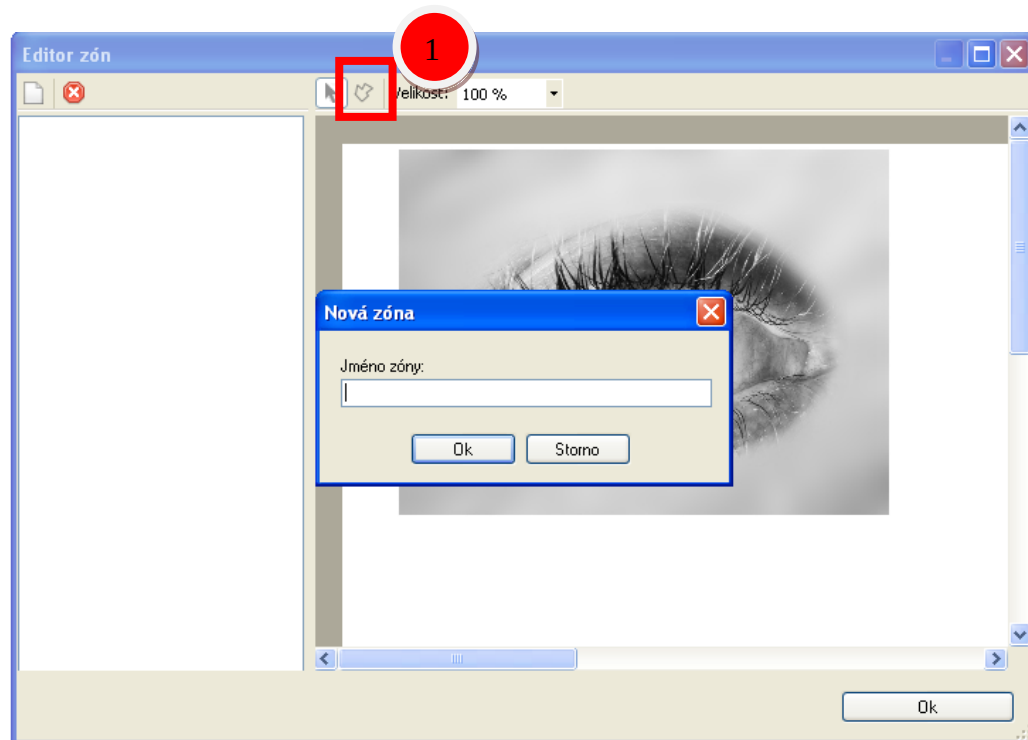
2.3.3 Editace zón

Po kliknutí levým tlačítkem myši na tlačítko Editovat zóny (2 v Obr. 13 nebo 2 v Obr. 11) se zobrazí okno Editor zón (Obr. 14). Vytvoření zón slouží jako pomocný nástroj pro interpretaci vyhodnocených dat. Editace zón je možná i v již provedených experimentech.



Obr. 14 Editor zón

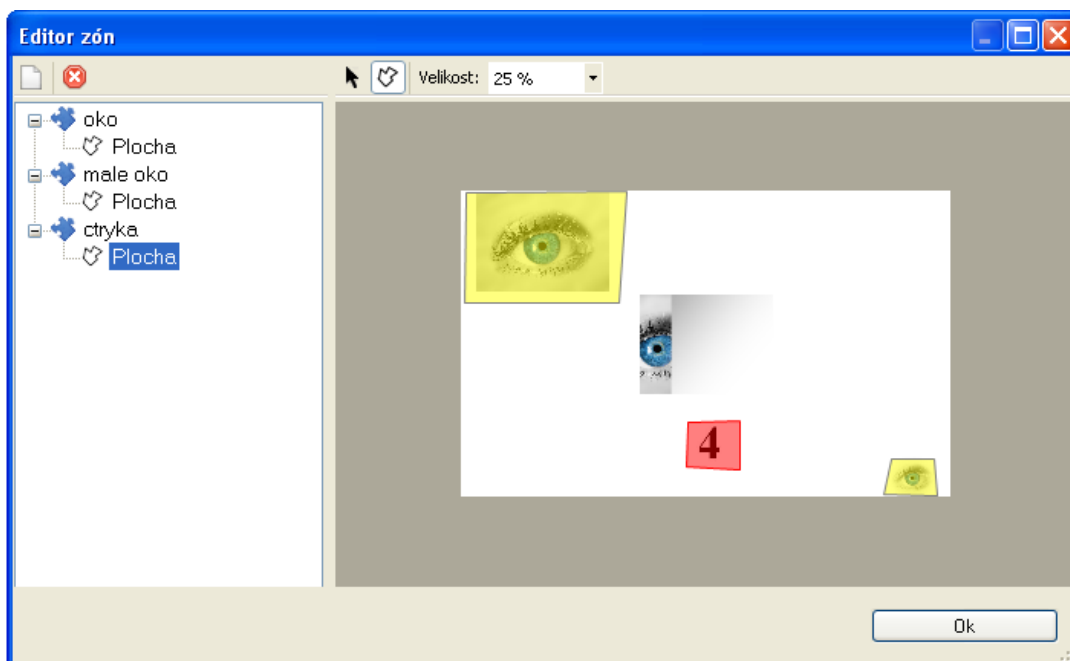
Pomocí (2) můžeme upravit velikost zobrazení stránky. Po kliknutí levým tlačítkem myši na (1) se zobrazí okno pro zadání názvu zóny (Obr. 15).



Obr. 15 Vytvoření nové zóny

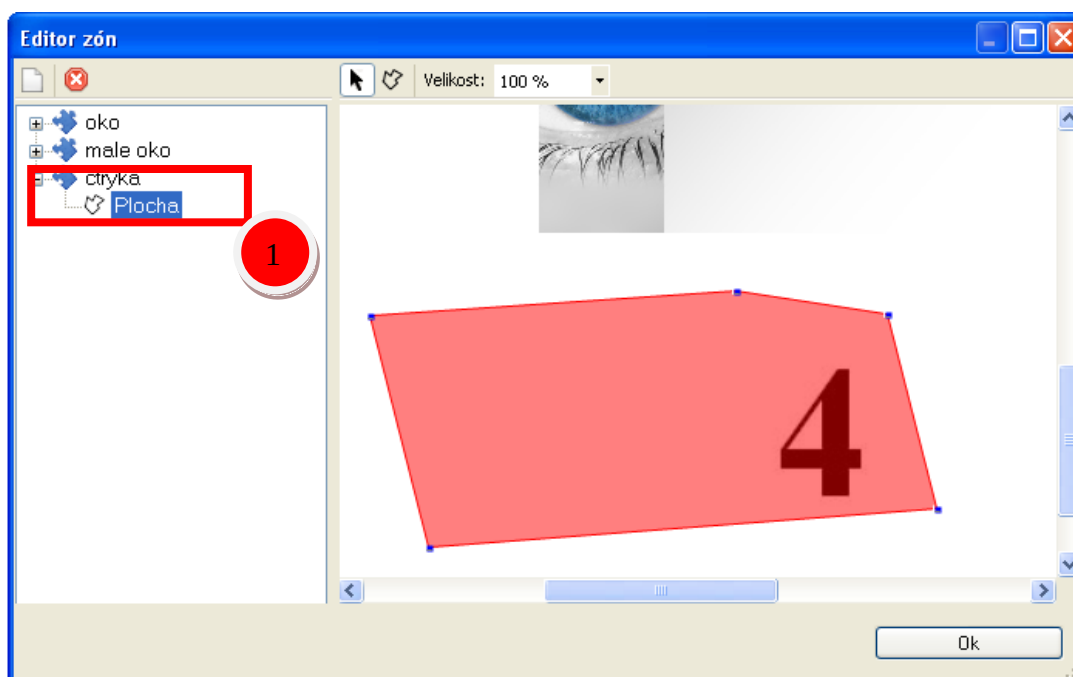
Zóna je vytvořena po zadání názvu a stisknutí Ok. Poté je potřeba kliknout na Vytvořit plochu (1 v Obr. 15). Poté klikáním levým tlačítkem myši po stránce

vytvoříme vrcholy mnohoúhelníku ohraničujícího plochu. Poslední bod uzavřeme kliknutím pravým tlačítkem myši. Stránka může mít více zón, pod jednu zónu může patřit více ploch.



Obr. 16 Zóny

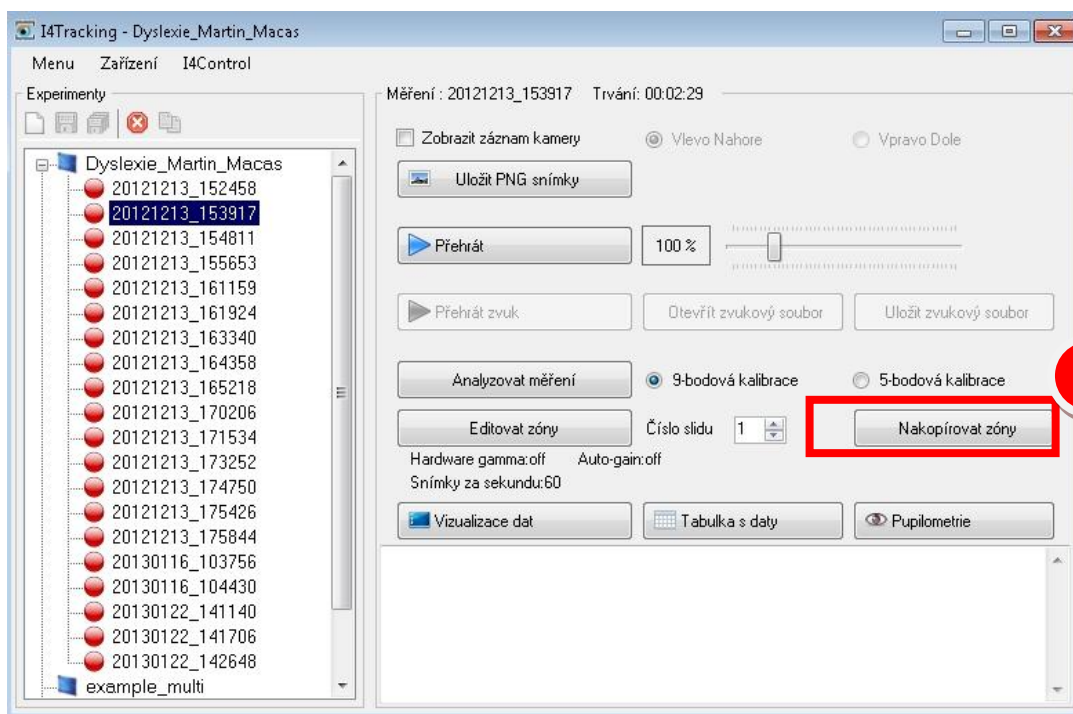
Chceme-li upravit tvar plochy, stačí kliknout na její název (1 v Obr. 16). Tato plocha se zobrazí červeně. Pomocí levého tlačítka myši je možné přemístit body (jsou označeny jako modré čtverečky).



Obr. 17 Tvorba plochy

Poté co vytvoříme všechny stránky, si již můžeme přehrát vytvořený experiment a začít nahrávat měření. (viz Obr. 6).

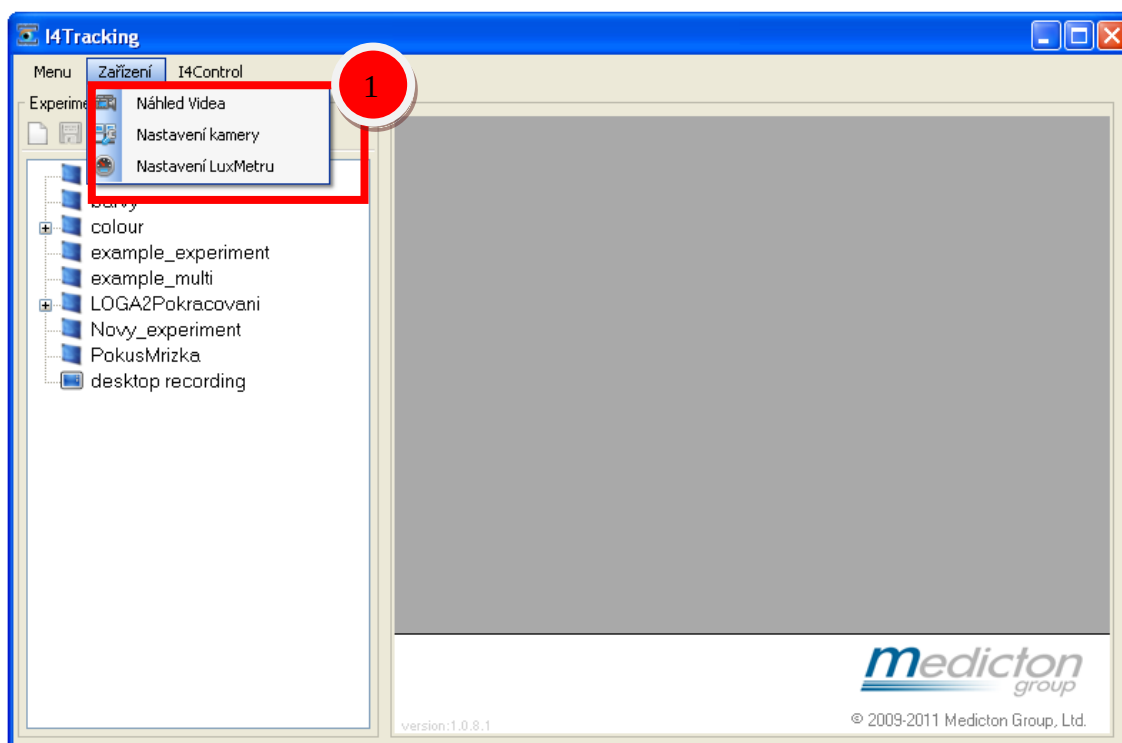
V případě, že dojde k zapomenutí nastavení zón před započítím měření, je možné využít funkci Nakopírování zón. Ta umožňuje pro již proběhlá měření (experiment měl po celou dobu stejné nastavení) rozkopírovat nastavení zón jednotlivých stran.



Obr. 18 Nakopírování zón

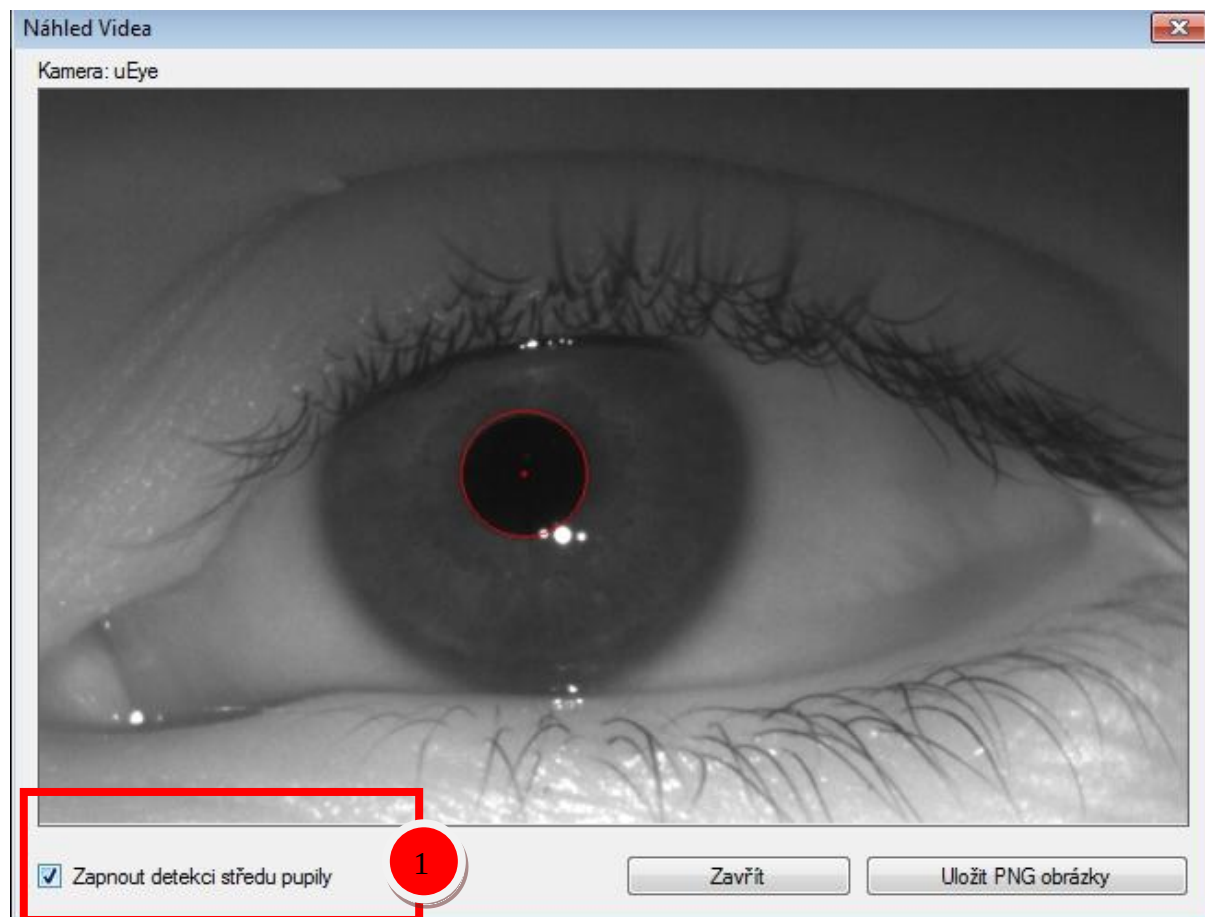
3 Nastavení zařízení

Po kliknutí levým tlačítkem na Zařízení, se objeví nabídka (1) (Obr. 19). Je možné získat Náhled videa (Obr. 20), upravit nastavení kamery (Obr. 23) a luxmetru (Obr. 21)



Obr. 19 Zařízení

3.1 Náhled videa

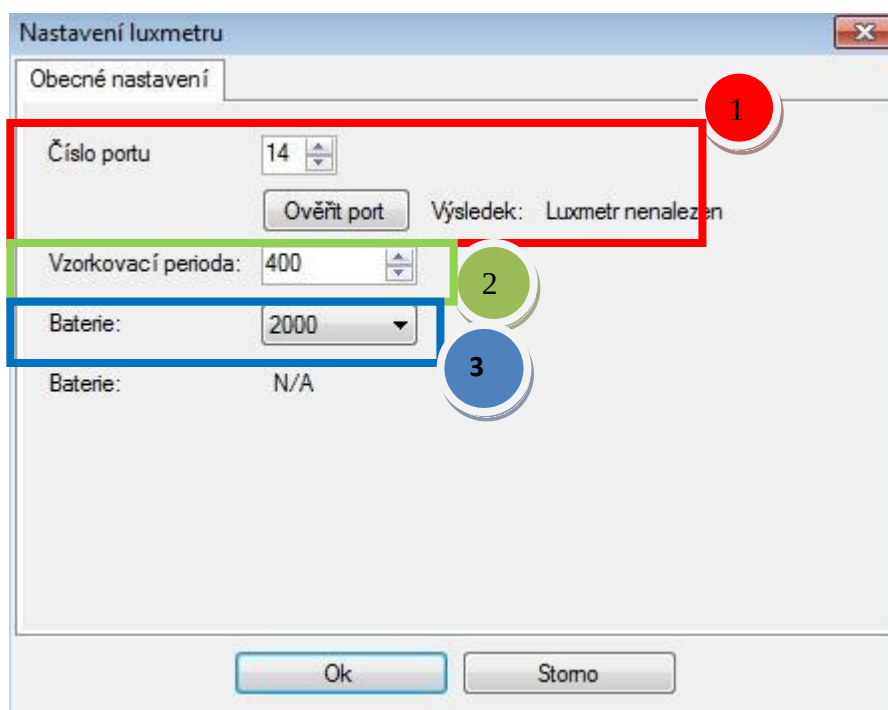


Obr. 20 Náhled videa

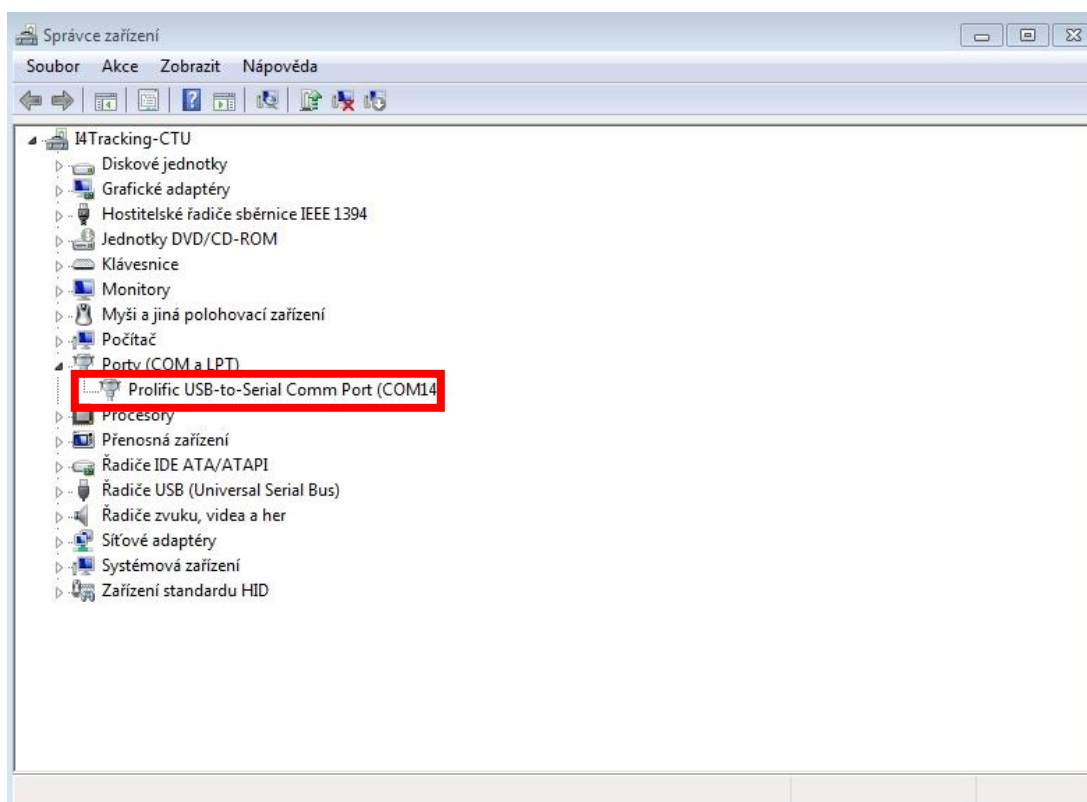
Zobrazí se náhled obrazu z kamery. Je možné zapnout detekci středu pupily (1). Slouží pro kontrolu správného umístění brýlí.

3.2 Nastavení luxmetru

V případě, že je v rámci experimentu zapotřebí měřit světelnou intenzitu pozadí, je nutné k aplikaci připojit vhodný Luxmetr. Před měřením je třeba nastavit komunikační port luxmetru (1). Tuto informaci můžeme získat ve správci zařízení (Obr. 22). Dále je potřeba nastavit vzorkovací periodu (2) a rozsah luxmetru (3).



Obr. 21 Nastavení luxmetru



Obr. 22 Správce zařízení

3.3 Nastavení kamery

Před měřením je potřeba upravit nastavení kamery.

Je možné nastavit

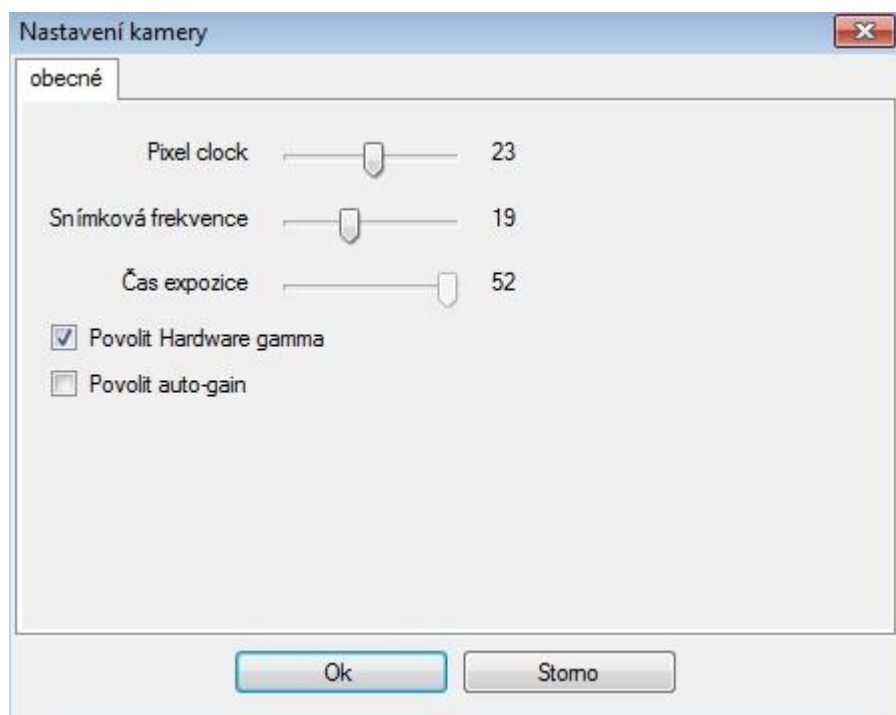
- Pixel clock. Ukazatel, který spoluurčuje snímkovací frekvenci. Čím vyšší hodnota, tím může být vyšší snímaná frekvence.
- Snímkovou frekvenci „fps“ (počet snímků za vteřinu).

Při vysokých rychlostech (nad standardních 25fps) může v nedostatečně osvětleném prostředí docházet ke ztmavení obrazu a chybné detekci algoritmu. Také může dojít k chybám záznamu v případě, že nastavenou rychlost nebude stíhat měřicí počítač.

- Čas expozice (pouze informativní údaj, je dán nastavením předchozích dvou hodnot)

Povolit Hardware gamma by mělo být zaškrtlé. Jedná se o funkci kamery, která zvyšuje odstup informací a šumu.

Povolit auto-gain není třeba mít zaškrtlé. Tato funkce pouze aditivně zesvětluje video.



Obr. 23 Nastavení kamery

4 Analýza a vizualizace naměřených dat

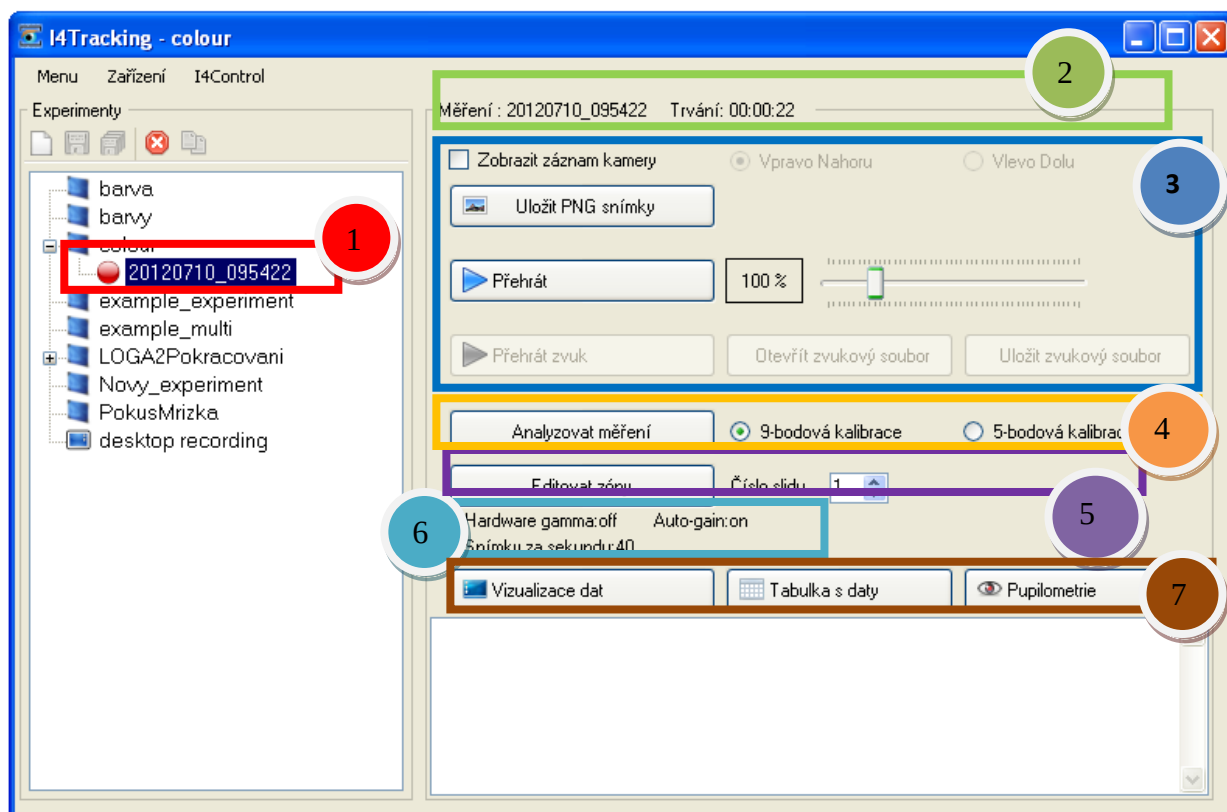
Pro analýzu naměřených dat je třeba nejdříve vybrat experiment (1) (Obr. 24). Zde (2) je zobrazen název měření a jeho délka.

Dále stačí stisknout Analyzovat měření (4), nebo pomocí hlavního Menu a tlačítka Analyzovat vše. Je nutné zvolit, jakým způsobem bylo měření kalibrováno, zda se jednalo o 9ti nebo 5ti bodovou kalibraci. Po dokončení analýzy dojde k naplnění tabulky výsledků a vytvoření *.csv soubor s výsledky.

Měření můžeme následně přehrát (3) (viz Přehrání naměřených dat).

Je možno zvolit si rychlost přehrávání pomocí posuvníku, zobrazit záznam z kamery, přehrání zvuku. Po klepnutí levým tlačítkem myši na tlačítko Uložit PNG snímky se vyvolá standardní dialog pro nalezení místa na disku, kam se uloží všechny nasnímané obrázky oka ve formátu *.png.

Je možné editovat zóny (5), viz Editace zón. Každé měření v sobě obsahuje informace o nastavení, za nichž bylo provedeno (6). Pomocí poslední trojice tlačítek je možné zobrazit naměřená data formou vizualizace, tabulky, nebo zkrácené tabulky (7).



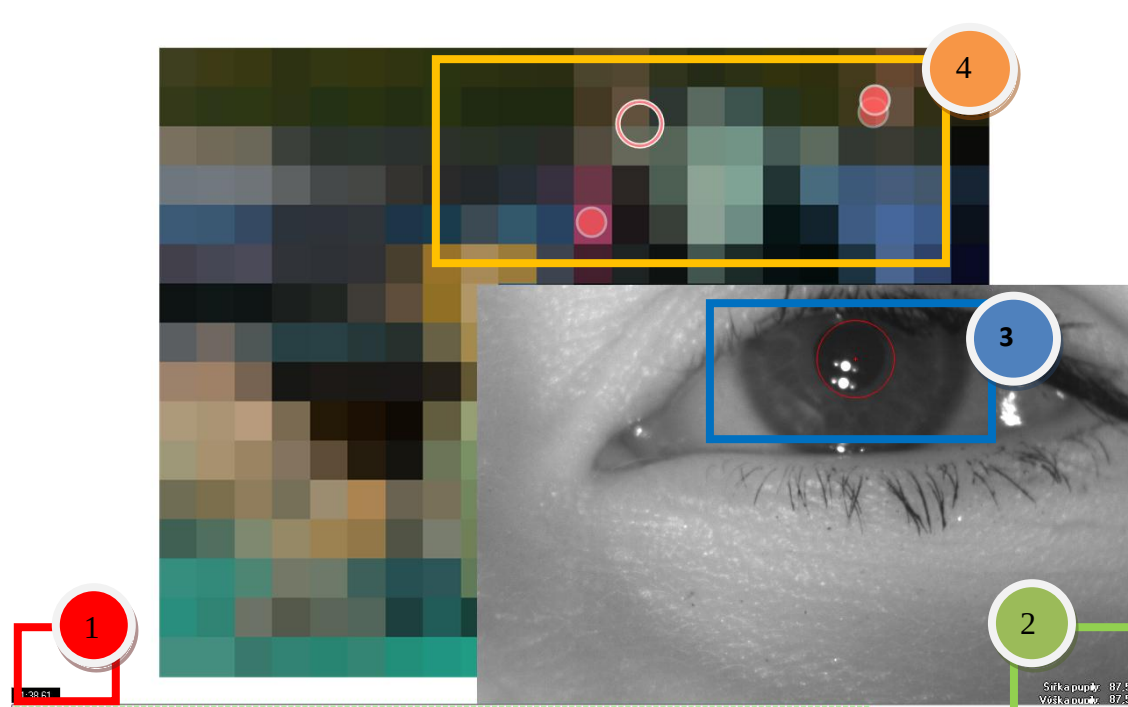
Obr. 24 Práce s naměřenými daty

4.1 Přehrání naměřených dat

Po kliknutí levým tlačítkem myši na tlačítko Přehrát (viz Obr. 24) se zobrazí záznam experimentu (viz Obr. 25).

Vlevo dole (1) je zobrazen čas záběru. Vpravo dole/vlevo nahoře (podle naší volby) je zobrazen záznam kamery. Zde je v (2) zobrazena výška a šířka pupily, v (3) je červeným kruhem označena pupila.

Po obrazovce se zobrazují červené tečky (4) podle toho, kam se měřený dívá.



Obr. 25 Přehrání naměřených dat

4.2 Analýza měření

V souboru *.csv jsou uložena všechna naměřená data.

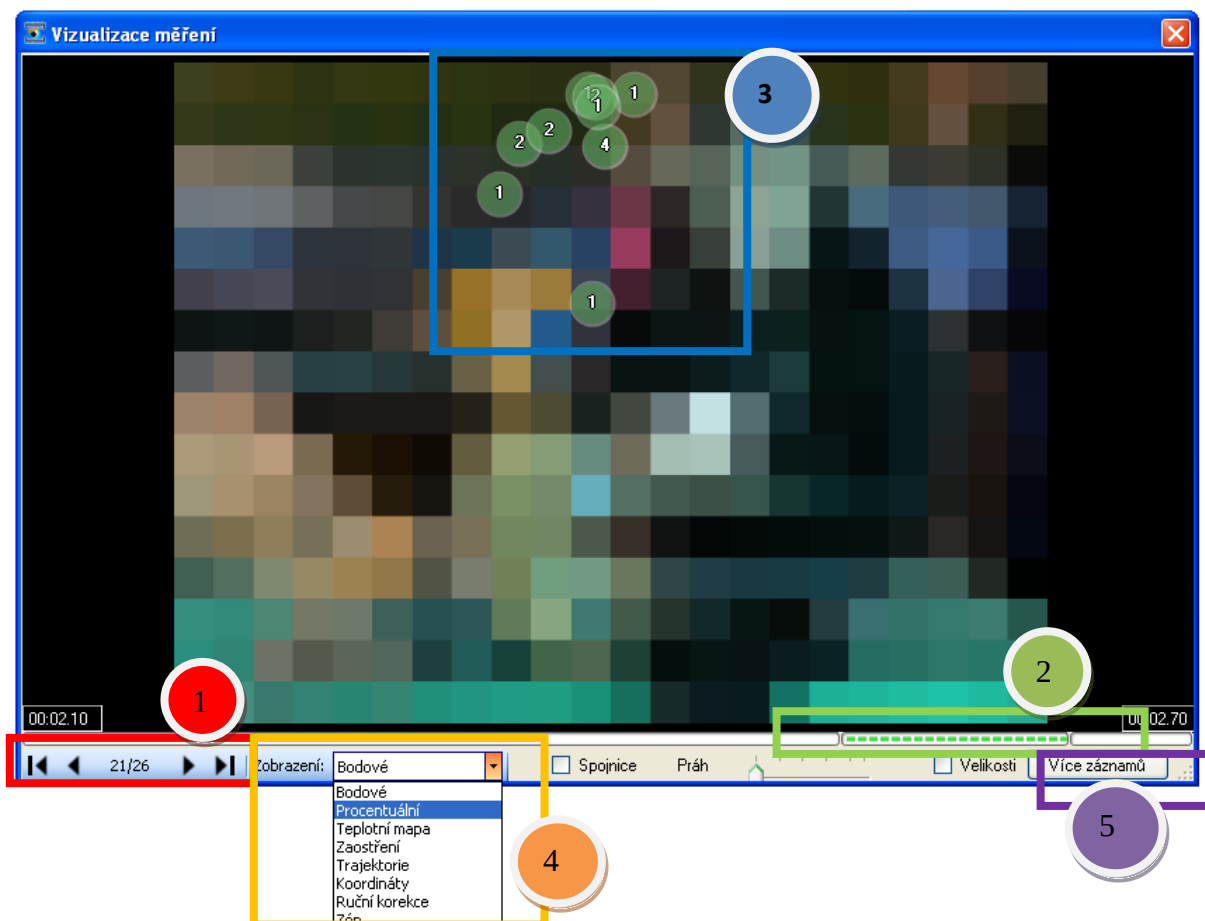
Screen	Screen Name	Time	Eye opened	Screen coords x	Screen coords y	Pupil center x	Pupil center y	Pupil area	Images	Zones	Luces	Luces time
1	black	0	Ano	941	77	359	186	6801,5				
1	black	24,9	Ano	941	77	359	186	6815,6				
1	black	50	Ano	940	89	359	187	6796,6				
1	black	75	Ano	941	77	359	186	6737,9				
1	black	100	Ano	941	77	359	186	6734,2				

Obr. 26 Naměřená data

Screen – číslo stránky. Screen Name – jméno stránky. Time – čas měření. Eye opened – obsahuje hodnoty Ano (oko bylo otevřené), Ne (oko byl zavřený). Screen coords x a y jsou souřadnice středu pupily na stránce. Pupil center x a y jsou souřadnice středu pupily na záběru z kamery. Pupil area – obsah pupily. Images – název obrázku, na který se měření dívá. Zones – zóna, do které se měření dívá. Luces – hodnota osvětlení [lx]. Luces time – čas, kdy bylo změřeno osvětlení, v [ms] od začátku měření.

4.3 Vizualizace dat

Po kliknutí na tlačítko Vizualizace dat (viz (7) v Obr. 24) se zobrazí okno (Obr. 27).



Obr. 27 Vizualizace měření

Zde (1) lze pomocí šipek vybrat číslo stránky, která nás zajímá. Šipka s pruhem napravo nás přesune k poslední stránce, šipka s pruhem nalevo k první.

Na (2) je možné vybrat úsek měření, který nás zajímá. Kliknutím levým tlačítkem myši na bílou lištu vybereme začátek úseku zájmu, kliknutím pravým tlačítkem konec.

Přes stránku se nám zobrazuje, kam se měření díval (3). Toto zobrazení je možno měnit pomocí výběru v liště Zobrazení (4).

Možná zobrazení:

Bodové. Je možné zobrazit spojnice mezi daty, zvolit práh (při jeho zvyšování zůstávají pouze body, na které se měření koukal déle) a zvolit velikosti bodů (při zaškrtnutém poli Velikosti se velikost bodů zvyšuje společně s dobou, po kterou se měření na daný

bod díval, při odškrtnutém poli jsou všechny body stejně velké). Náhled zobrazení viz Obr. 27.

Procentuální. Uvádí, kolikrát se měřený díval na konkrétní obrázek. U každého obrázku se zobrazují 3 čísla. První uvádí procentuální hodnotu z doby, kdy se měřený díval na stránku, druhé procentuální hodnotu z celkové doby zobrazení stránky (zahrnuje tedy i čas např. kdy se měřený díval mimo obrazovku), třetí číslo znamená počet shlédnutí obrázku.

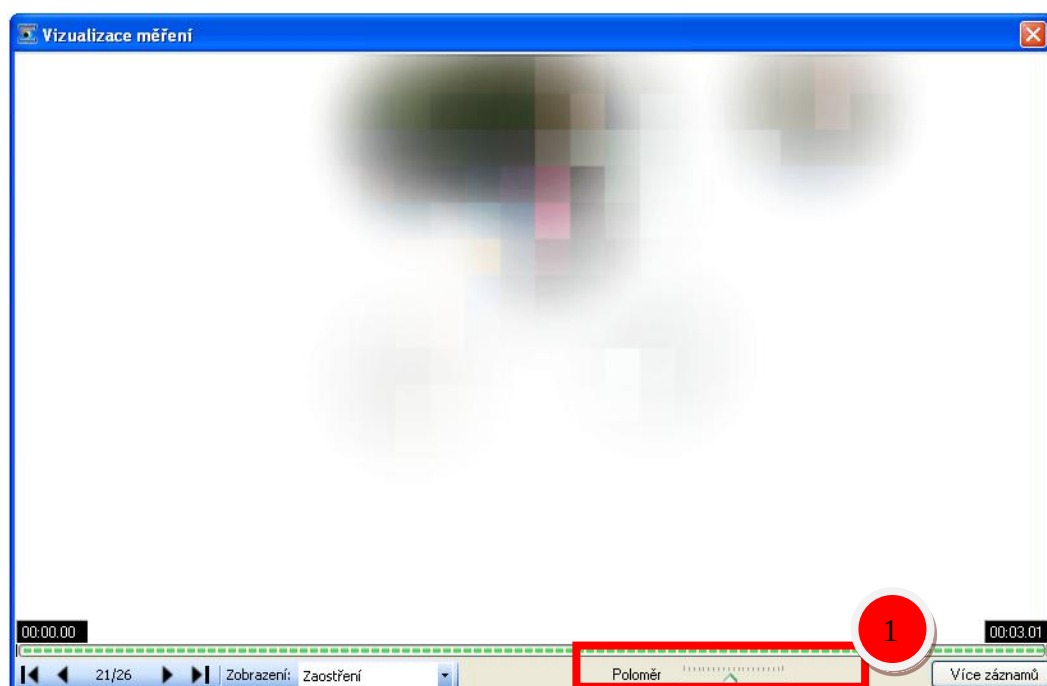
Teplotní mapa.



Obr. 28 Teplotní mapa

Mapu je možno zobrazit v černé (na tmavší body se měřený díval déle), což by však např. v ukázkovém příkladě nebylo přehledné. Proto je možné zvolit barevnou mapu (1). Na modré oblasti se měřený díval kratší čas, na červené déle. Dále je možné upravit poloměr bodů (2).

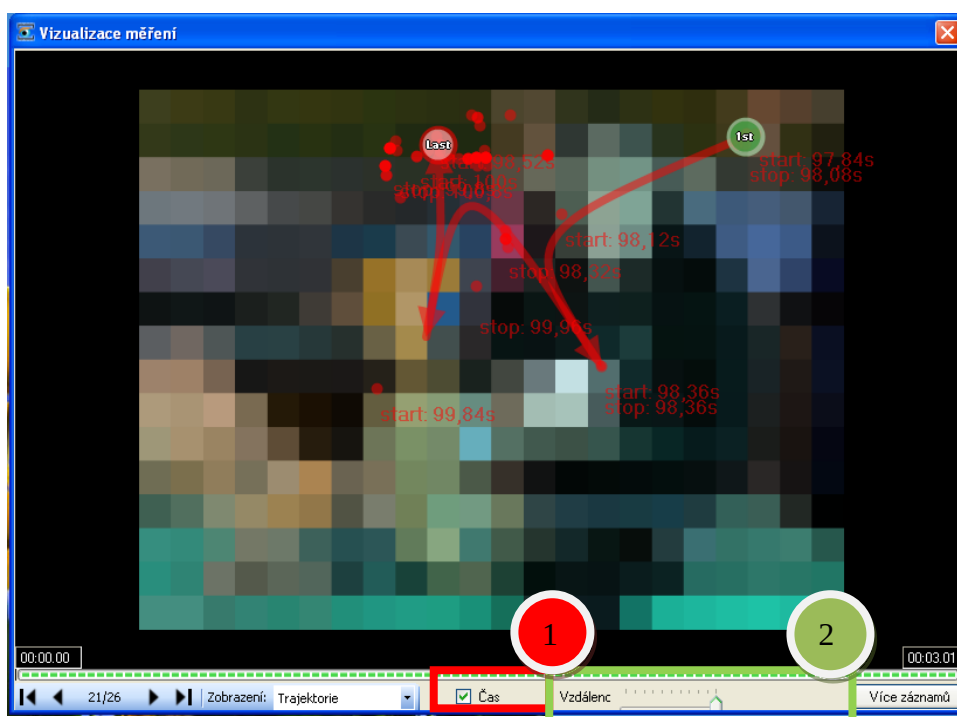
Zaostření



Obr. 29 Zaostření

Zobrazují se pouze oblasti, na které se měření díval. Je možné změnit poloměr oblastí (1).

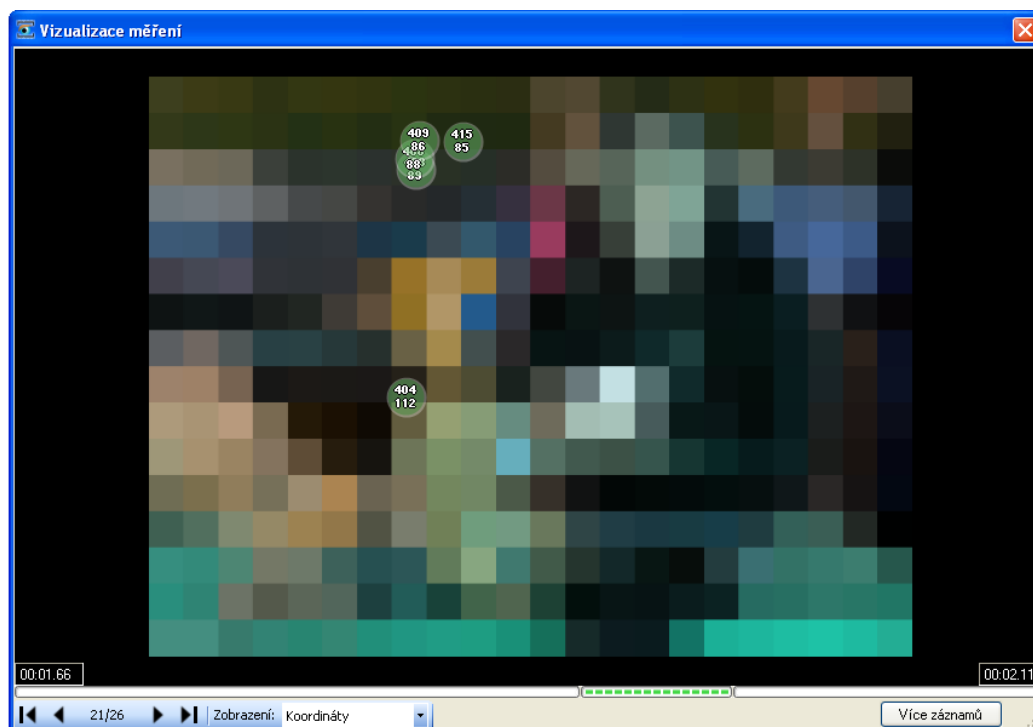
Trajektorie



Obr. 30 Trajektorie

Trajektorie zobrazuje pohyb oka mezi body. K bodům je možné přiřadit čas pozorování (1) a rozptyl (2).

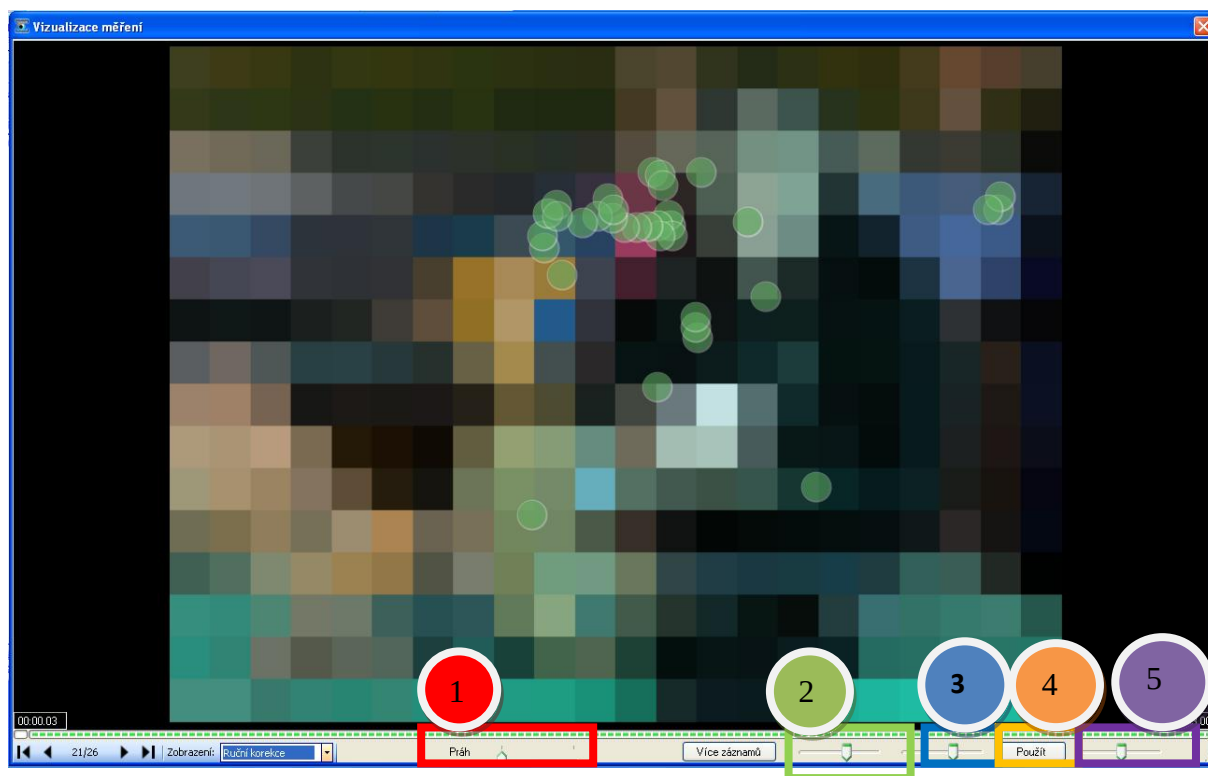
Koordináty



Obr. 31 Koordináty

Zobrazuje body, na které se měřený díval, společně s koordinátami centra pupily v záznamu z kamery.

Ruční korekce



Obr. 32 Ruční korekce

Ruční korekci je vhodné použít v případě, kdy body jsou očividně posunuté z místa, kde bychom je očekávali (způsobené např. pohybem brýlí během měření).

Práh (1), podobně jako u bodového zobrazení, při jeho zvyšování zůstávají pouze body, na které se měření koukal déle.

Posuvník (2) posouvá body v horizontálním směru. Posuvník (3) ve vertikálním. Posuvník (5) umožňuje rotaci.

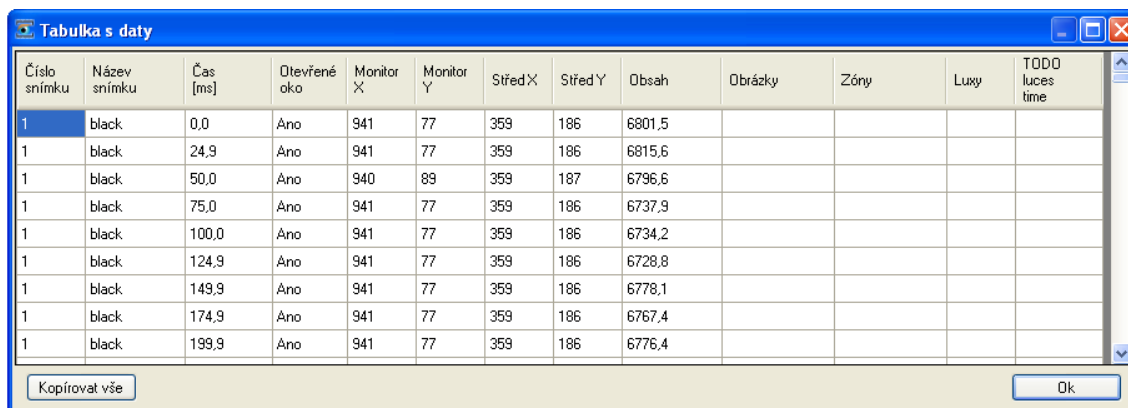
Kliknutím na tlačítko Použít (4) se dané změny uloží.

Zóny

Zobrazí uživatelem nastavené zóny ve stránce, jejich názvy a čas, po který se měření do dané zóny díval, vyjádřený v procentech z celkové doby zobrazení stránky. Při zaškrtnutí pole Zóny se hodnoty přepočítají na procenta z doby, po kterou se měření díval na zóny.

4.3.1 Tabulka s daty

Po kliknutí na tlačítko Tabulka s daty (viz Obr. 24) se zobrazí tabulka (Obr. 33).

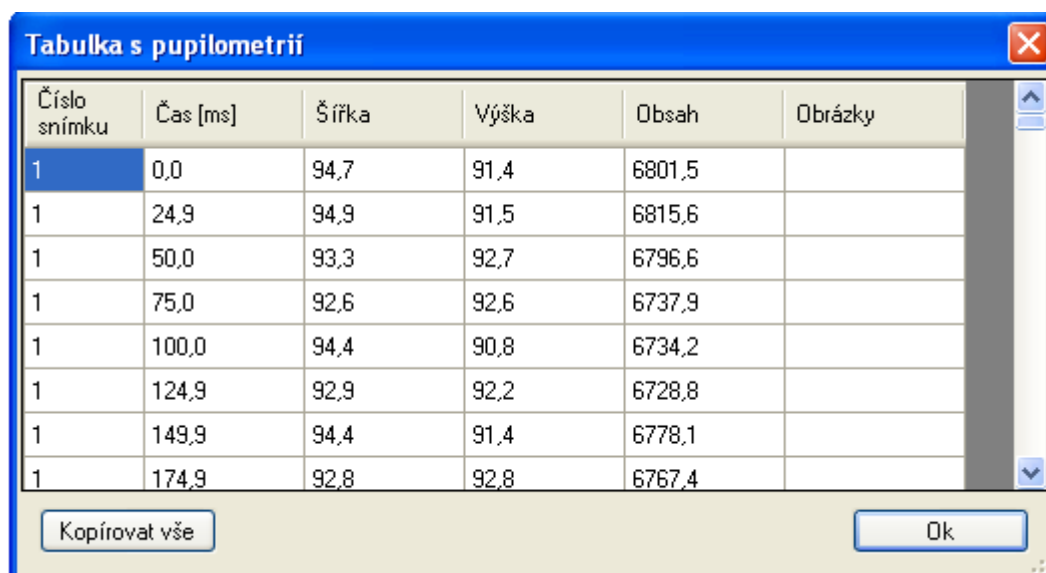


Číslo snímku	Název snímku	Čas [ms]	Otevřené oko	Monitor X	Monitor Y	Střed X	Střed Y	Obsah	Obrázky	Zóny	Luxy	TODO lucas time
1	black	0,0	Ano	941	77	359	186	6801,5				
1	black	24,9	Ano	941	77	359	186	6815,6				
1	black	50,0	Ano	940	89	359	187	6796,6				
1	black	75,0	Ano	941	77	359	186	6737,9				
1	black	100,0	Ano	941	77	359	186	6734,2				
1	black	124,9	Ano	941	77	359	186	6728,8				
1	black	149,9	Ano	941	77	359	186	6778,1				
1	black	174,9	Ano	941	77	359	186	6767,4				
1	black	199,9	Ano	941	77	359	186	6776,4				

Obr. 33 Tabulka s daty

4.3.2 Pupilometrie

Po kliknutí na tlačítko Pupilometrie (viz Obr. 24) se zobrazí tabulka s pupilometrií (Obr. 34). Obsahuje číslo snímku, čas měření, šířku, výšku a obsah pupily. Oproti tabulce s daty obsahuje navíc právě údaje o výšce a šířce pupily.



Číslo snímku	Čas [ms]	Šířka	Výška	Obsah	Obrázky
1	0,0	94,7	91,4	6801,5	
1	24,9	94,9	91,5	6815,6	
1	50,0	93,3	92,7	6796,6	
1	75,0	92,6	92,6	6737,9	
1	100,0	94,4	90,8	6734,2	
1	124,9	92,9	92,2	6728,8	
1	149,9	94,4	91,4	6778,1	
1	174,9	92,8	92,8	6767,4	

Obr. 34 Tabulka s pupilometrií

Seznam obrázků

Obr. 1 Základní dialog.....	3
Obr. 2 Nabídka Menu	4
Obr. 3 I4Control.....	5
Obr. 4 Práce s experimentem.....	5
Obr. 5 Vytvoření nového experimentu	6
Obr. 6 Možnosti experimentu	7
Obr. 7 Vlastnosti experimentu	8
Obr. 8 Vlastnosti kalibrace	9
Obr. 9 Přidání stránky	10
Obr. 10 Možnosti nové stránky.....	10
Obr. 11 Možnosti stránky	11
Obr. 12 Upravení stránky.....	12
Obr. 13 Vložení obrázku.....	13
Obr. 14 Editor zón	14
Obr. 15 Vytvoření nové zóny	14
Obr. 16 Zóny.....	15
Obr. 17 Tvorba plochy.....	15
Obr. 18 Nakopírování zón.....	16
Obr. 19 Zařízení	17
Obr. 20 Náhled videa	18
Obr. 21 Nastavení luxmetru.....	19
Obr. 22 Správce zařízení.....	19
Obr. 23 Nastavení kamery	20
Obr. 24 Práce s naměřenými daty	22
Obr. 25 Přehrání naměřených dat	23
Obr. 26 Naměřená data	23
Obr. 27 Vizualizace měření	24
Obr. 28 Teplotní mapa	25
Obr. 29 Zaostření	26
Obr. 30 Trajektorie	26
Obr. 31 Koordináty.....	27
Obr. 32 Ruční korekce	28
Obr. 33 Tabulka s daty.....	29
Obr. 34 Tabulka s pupilometrií.....	29