

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta informatiky a informačných technológií

---

FIIT-5212-72138

Tomáš Juhaniak

# Kognitívne zaťaženie človeka pri používaní aplikácií

Bakalárska práca

Študijný program: Informatika

Študijný odbor: 9.2.1 Informatika

Miesto vypracovania: Ústav informatiky, informačných systémov a softvérového  
inžinierstva, FIIT STU v Bratislave

Vedúci práce: prof. Ing. Mária Bieliková, PhD

máj 2016



## ZADANIE BAKALÁRSKEHO PROJEKTU

Meno študenta: **Juhaniak Tomáš**  
Študijný odbor: Informatika  
Študijný program: Informatika  
Názov projektu: **Kognitívne zaťaženie človeka pri používaní aplikácií**

### Zadanie:

Oddávna existujú snahy o to, aby človek pracoval efektívne a tiež, aby trávil čas príjemne. Významnú úlohu pri zlepšovaní efektívnosti a tiež aj používateľského zážitku je kognitívne zaťaženie. Dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje kognitívne zaťaženie a tým aj používanie počítačovej aplikácie je práve používateľské rozhranie - jeho statický návrh ako aj navigácia v ňom. Problémy v rozhraní spravidla indikujú zvýšené kognitívne zaťaženie. Kognitívne zaťaženie môžeme merať viacerými spôsobmi, veľmi dobre ho indikuje rozšírenie zreničky, ktoré môžeme merať zariadením na sledovanie pohľadu, ale aj výraz tváre používateľa pri práci s aplikáciou, či niektoré fyziologické parametre ako napr. vodivosť kože.

Analyzujte možnosti merania kognitívneho zaťaženia s využitím kamery a rôznych senzorov a metódy, ktorými takéto merania možno vyhodnocovať. Navrhňte metódu, ktorá umožní vyhodnotiť používateľské rozhranie meraním kognitívneho zaťaženia. Na meranie kognitívneho zaťaženia využite existujúce metódy, resp. existujúce upravte podľa potreby. Vyberte si senzor, ktorý chcete použiť, resp. môžete aj skombinovať viaceré. Navrhnutú metódu implementujte a overte pre vybranú aplikáciu.

### Práca musí obsahovať:

Anotáciu v slovenskom a anglickom jazyku  
Analýzu problému  
Opis riešenia  
Zhodnotenie  
Technickú dokumentáciu  
Zoznam použitej literatúry  
Elektronické médium obsahujúce vytvorený produkt spolu s dokumentáciou

Miesto vypracovania: Ústav informatiky a softvérového inžinierstva, FIIT STU, Bratislava  
Vedúci projektu: prof. Ing. Mária Bieliková, PhD.

Termín odovzdania práce v zimnom semestri : 9. 12. 2015

Termín odovzdania práce v letnom semestri : 10. 5. 2016



Bratislava 21. 9. 2015

prof. Ing. Pavol Návrat, PhD.  
riaditeľ ÚISI



# Anotácia

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
FAKULTA INFORMATIKY A INFORMAČNÝCH TECHNOLOGIÍ  
Študijný program: Informatika

Autor: Tomáš Juhaniak

Bakalárska práca: Kognitívne zaťaženie človeka pri používaní aplikácií

Vedúci bakalárskej práce: prof. Ing. Mária Bieliková, PhD

máj 2016

Táto práca sa zaoberá analýzou možností vyhodnotenia kognitívnej náročnosti aplikácií na základe sledovania dilatácie zreničky počas práce s aplikáciou. Na základe doterajších výskumov efektov kognitívneho zaťaženia, ktoré preukázali, že kognitívne zaťaženie sa dá vyhodnocovať meraním dilatácie zreničky predpokladáme, že kognitívna záťaž sa dá vyhodnocovať aj na netriviálnych stimuloch ako sú počítačové aplikácie. Práve vďaka netriviálnosti stimulu, akými sú nestálosť rozhrania v čase a výrazná odlišnosť farebnosti jednotlivých komponentov rozhrania, sa šírka zreničky pri neutrálnom stave resp. minimálnom kognitívnom zaťažení mení v čase a tak sú existujúce metódy zaoberajúce sa vyhodnotením kognitívnej záťaže na základe dilatácie zreničky samostatne nepoužiteľné.

Najväčší problém pramení v získaní vhodnej referenčnej krivky neutrálnej šírky zreničky, ktorá je vo výskumoch uvažujúcich jednoduché stimuly nahradená referenčnou hodnotou. V práci sme navrhli metódu a realizovali nástroj, ktorý umožnil eliminovať problémy vznikajúce netriviálnosťou rozhraní a následne aplikovať poznatky z kognitívnej psychológie za účelom vyhodnotenia kognitívnej náročnosti aplikácií.



# Annotation

Slovak University of Technology Bratislava

FACULTY OF INFORMATICS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

Degree course: Informatics

Author: Tomáš Juhaniak

Bachelor Thesis: Measuring cognitive overload for use of software applications

Supervisor: prof. Ing. Mária Bieliková, PhD

may 2016

This work focuses on analysis of possibilities in evaluation of applications' cognitive severity based on observing pupil dilatation while an user interacts with the application. Based on actual research on cognitive overload effects, which demonstrated that cognitive overload is measurable by pupil dilatation, we assume that we can measure cognitive overload of complex stimuli just like computer applications. In terms of stimuli complexity, like changing content in time or significant chroma differences between concrete stimuli fragments, pupil range in neutral state, i.e. under minimal cognitive load is changing in time, so present methods cannot be applied independently.

Significant problem originates in acquiring an adequate reference line of neutral pupil range, which is in actual researches considering simple stimuli substituted by a reference value. In this work, we proposed a method and designed a tool, which lets us eliminate problems caused by interface complexity and then apply knowledges of cognitive psychology for the purpose of computer applications' cognitive severity assesment.





# Čestné prehlásenie

Čestne vyhlasujem, že túto bakalársku prácu som vypracoval samostatne, iba s použitím uvedených zdrojov a podľa pokynov vedúceho bakalárskej práce.

Bratislava, máj 2016

.....

Tomáš Juhaniak



## Podakovanie

Ďakujem vedúcej práce prof. Ing. Márii Bielikovej, PhD za jej odborné vedenie, cenné rady a pripomienky, ktoré mi poskytla pri spracovaní mojej bakalárskej práce. Moje podakovanie patrí aj spoluautorom článku na konferenciu UMAP, ktorý vznikol na základe výsledkov tejto bakalárskej práce, Ing. Patrikovi Hlaváčovi, Ing. Róbertovi Mórovi, Ing. Jakubovi Šimkovi, PhD. a prof. Ing. Márii Bielikovej, PhD., vďaka ktorým som získal odbornú spätnú väzbu. Bc. Metodovi Rybárovi a Márii Dragúňovej ďakujem za trpezlivosť a hodiny času strávené prípravou experimentov.

Tomáš Juhaniak



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sledovanie zreničky pomocou okulometra</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Dilatácia zreničky a jej zdroje</b>	<b>5</b>
3.1	Problémové vs. ignorovateľné zdroje . . . . .	5
3.2	Vplyv svietivosti stimulov . . . . .	6
3.3	Vplyv rozloženia kontrastných prvkov . . . . .	8
3.4	Trvalá oscilácia zreničky . . . . .	8
3.5	Zhrnutie . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Kognitívna záťaž a dilatácia zreničky</b>	<b>11</b>
4.1	Metóda indexovania kognitívnej aktivity - ICA . . . . .	11
4.2	Nárast dilatácie pri rovnakej záťaži a rôznej šírke zreničky . . . . .	12
4.3	Existujúce prístupy . . . . .	13
4.4	Zhrnutie . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Metóda vyhodnocovania kognitívnej záťaže</b>	<b>17</b>
5.1	Základné predpoklady metódy . . . . .	17
5.2	Kalibrácia modelu reakcií zreničky človeka . . . . .	18
5.2.1	Funkcionalita modelu . . . . .	18
5.2.2	Kalibrácia šírky zreničky pre jednotlivé úrovne svietivosti . . . . .	19
5.2.3	Kalibrácia trvania prispôsobenia zreničky na novú úroveň svietivosti . . . . .	20
5.3	Schopnosť určiť aktuálne vnímané hodnoty svietivosti stimulov . . . . .	21
5.3.1	Určenie vnímanej svietivosti farieb . . . . .	21
5.3.2	Váhovanie intenzity svietivosti periférne vnímaných prvkov stimulu na celkovú vnímanú svietivosť . . . . .	23
5.4	Kroky metódy určovania kognitívnej záťaže . . . . .	25
5.5	Realizácia metódy nástrojom na používateľské štúdie . . . . .	26
5.5.1	Účel a funkcionalita nástroja . . . . .	26
5.5.2	Základné princípy realizácie metódy . . . . .	27
5.5.3	Ukážka práce s nástrojom . . . . .	27

<b>6</b>	<b>Experimenty a overenie metódy</b>	<b>31</b>
6.1	Prípravné experimenty . . . . .	31
6.1.1	Zamietnutie použitia formuly HSP . . . . .	31
6.1.2	Zamietnutie prístupu ignorovania zmien vnímanej svietivosti periférnych častí . . . . .	32
6.2	Hľadanie algoritmu na určenie svietivosti farieb . . . . .	32
6.3	Hľadanie optimálneho parametru sigma normálneho rozdelenia . . . . .	35
6.4	Overenie funkčnosti filtrácie vplyvu svietivosti . . . . .	37
6.5	Overenie schopnosti detekovať prítomnosť kognitívnej záťaže . . . . .	39
6.6	Overenie schopnosti klasifikovať viaceré úrovne kognitívnej záťaže . . . . .	40
<b>7</b>	<b>Zhodnotenie</b>	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>Literatúra</b>	<b>45</b>
	<b>Dodatok A Používateľská príručka k implementovanému nástroju</b>	<b>47</b>
	<b>Dodatok B Vybrané ukážky zdrojových kódov</b>	<b>49</b>
B.1	Nástroj na spracovávanie experimentov: <code>experiment_parser</code> . . . . .	49
B.1.1	Oprava dát exportovaných okulometrom . . . . .	49
B.1.2	Funkcia na výpočet svietivosti farby . . . . .	51
B.1.3	Zjednodušená implementácia modelu reakcií zreničky človeka . . . . .	52
B.2	Nástroj na spracovávanie exportovaných súborov našim nástrojom: <code>exports_analyzer</code> . . . . .	53
B.2.1	Jednoduchosť načítania exportovaného súboru do samostatných kolekcii podľa typu hodnoty . . . . .	53
	<b>Dodatok C Protokol experimentu</b>	<b>55</b>
	<b>Dodatok D Rozšírené výsledky experimentov</b>	<b>57</b>
D.1	Kompletné výsledky vyhodnotenia experimentu detekcie úrovni kognitívnej záťaže . . . . .	57
D.2	Výsledky vyhodnotenia experimentu predpovedania šírky zreničky pre komplexné stimuly . . . . .	59
D.2.1	Použitie formuly $\max(r, g, b)$ bez úprav . . . . .	59
D.2.2	Použitie formuly $\max(r, g, b)$ s univerzálnym posunutím dilatácie modrej farby . . . . .	59

D.2.3	Použitie formuly $\max(r, g, b)$ s personalizovaným posunutím dilatácie modrej farby . . . . .	60
D.2.4	Súčet chýb v predpovedaní zreničky v experimente optimalizácie parametra $\sigma$ . . . . .	60
D.2.5	Kompletné výsledky nameraných zreničiek podľa jednotlivých stimulov . . . . .	61
<b>Dodatok E</b>	<b>Obsah priloženého média</b>	<b>63</b>
<b>Dodatok F</b>	<b>Článok na konferenciu IIT-SRC</b>	<b>65</b>
<b>Dodatok G</b>	<b>Článok na konferenciu UMAP</b>	<b>71</b>





# 1 Úvod

Z podstaty existencie počítačovej aplikácie možno usúdiť, že aplikácia je efektívne použiteľný nástroj, ktorý by nám mal umožniť vykonávať rôznorodé činnosti oveľa rýchlejšie a jednoduchšie. Vhodne zvolený obsah zobrazovaných informácií, intuitívne ovládanie a rozloženie komponentov rozhrania či relatívna zložitosť problémových úloh, ktoré aplikácia ponecháva riešiť používateľa, priamo určuje jednoduchosť, resp. náročnosť používania aplikácie, alebo jej kognitívnu náročnosť. Meraním kognitívnej záťaže používateľa počas práce s počítačom, vieme vyhodnocovať zložitosť práce s aplikáciami a to nielen na celkovej úrovni, ale aj z pohľadu ich jednotlivých fragmentov. Pokiaľ obrátíme pohľad záujmu na človeka, meraním kognitívnej záťaže môžeme obdobne vyhodnotiť efektívnosť práce človeka používajúceho počítačovú aplikáciu, či už v reálnom čase alebo post-analýzou.

Pokiaľ sa snažíme získať relevantné výsledky náročnosti úloh vykonávaných v praxi, musíme nájsť taký spôsob vyhodnocovania kognitívnej záťaže, ktorý by používateľa vôbec neobmedzoval. Jednou z takýchto metód je sledovanie dilatácie zreničky oka, ktorá reaguje na zmeny v kognitívnej záťaži používateľa. Táto metóda bola dokázaná na základe riešení rôznych problémových úloh, prevažne však pomocou jednoduchých a statických stimulov. Počítačové a obzvlášť webové aplikácie, na ktorých oblasť sa v tejto práci zameriavame, predstavujú dynamické a náročnejšie vyhodnotiteľné stimuly, na ktoré je potrebné použiť komplexnejšie a dokonalejšie metódy. Návrh metódy a vývoj nástroja na vyhodnocovanie kognitívnej záťaže používateľa pri práci s počítačom považujeme za významný posun v problémovej oblasti a to aj s potenciálom výskumného a komerčného uplatnenia. Z výskumného pohľadu sme sformulovali a dokázali hypotézu: „Sledovaním odchýlky predpovedanej dilatácie zreničky vieme vyhodnocovať kognitívnu záťaž počítačových aplikácií.“

Práca sa člení do 7 kapitol. V druhej kapitole poskytujeme základné informácie o technológii sledovania pohľadu a zariadeniach, ktoré tento výskum vyžaduje. V tretej kapitole analyzujeme doterajšie poznatky o zdrojoch dilatácie zreničky, ktorá nemá pôvod v kognitívnom zaťažení a je potrebné sa jej vystríhať alebo ju odfiltrávať. V štvrtej kapitole sa samostatne venujeme sledovanému zdroju dilatácie zreničky, a to kognitívnomu zaťaženiu v súvislostiach s dilatáciou zreničky, známym metódam na vyhodnocovanie a ich použiteľnosti v problémovej oblasti.

V piatej kapitole predstavujeme náš teoretický návrh metódy na vyhodnocovanie kognitívnej záťaže pri používaní počítačových aplikácií a tiež implementáciu nástroja na testovanie počítačových aplikácií pomocou našej metódy. Šiesta kapitola prináša zaujímavé výsledky získané vo vykonaných experimentoch. Prácu uzatvára zhodnotenie v siedmej kapitole. Prílohy dopĺňajú kapitolu návrhu o najzaujímavejšie časti zdrojových kódov a kapitolu vyhodnotenia o obsiahlejšie výsledky. V prílohách sme uviedli plné znenie článku odoslaného na konferenciu UMAP, ktorý vznikol na základe výsledkov našej práce, a tiež článku odprezentovaného na študentskej vedeckej konferencii IIT.SRC 2016, protokol k vykonávaným experimentom a používateľskú príručku k implementovanému nástroju.

## 2 Sledovanie zreničky pomocou okulometra

Každý výskum založený na sledovaní správania sa očí by nebol možný pokiaľ by sme nemali k dispozícii zariadenie umožňujúce sledovať pohľad a správanie sa očí. Sledovanie pohľadu prinieslo do oblasti testovania používateľského zážitku a obzvlášť vyhodnocovania počítačových aplikácií úplne nové možnosti. Moderné okulometre<sup>1</sup> dokážu s veľkou presnosťou určiť, kam sa používateľ pozerá, či je jeho oko v stave fixácie alebo sákadý, resp. akú šírku má zrenička ľavého aj pravého oka. Frekvencie zaznamenávania týchto dát sú v súčasnej dobe skutočne vysoké. Zariadenia, ktoré využíva táto práca sú Tobii TX300 (300Hz) eye-tracker ako vysokokvalitný okulometer vhodný pri pilotných experimentoch, ale aj Tobii X2-60 (60Hz) eye-tracker v počte 20 ks, vďaka čomu môžeme vykonávať hromadný zber dát dôležitých pri štatistickom vyhodnocovaní experimentov.

Princíp fungovania okulometra v jednoduchosti vysvetľuje [1]. Okulometer sníma odrazy človeku neviditeľného infračerveného žiarenia, ktoré sám vyžaruje smerom k očiam. Infračervená kamera tak dokáže nahrávať polohu očí aj pri slabom osvetlení v miestnosti a väčšinou je umiestnená pod alebo tesne nad monitorom, s ktorým používateľ pracuje. Tento spôsob sledovania pohľadu je natoľko neinvazívny, že používateľ ani nemusí tušiť, že je jeho pohľad zaznamenávaný.

Pokiaľ chceme zaznamenávať pohľad človeka s vysokou presnosťou, potrebujeme vykonať kalibráciu okulometra pre každého človeka, ktorého okulometer sníma. Počas tohto procesu sa človek pozerá na rôzne body zobrazené na obrazovke, vďaka čomu si dokáže okulometer vytvoriť model pohybu očí a počas experimentu mapovať jednotlivé polohy oka na súradnice zobrazovaného stimulu na obrazovke, na ktoré sa používateľ pozeral. V spolupráci s doplnkovým softvérom nakoniec získavame záznamy s ľahko použiteľnými hodnotami, z ktorých budeme v našej práci uvažovať najmä šírku zreničky, ale aj súradnice fixácie na zobrazenom stimule. Formát exportovaných dát môže vyzeráť podobne ako v obr. 1.

Z obr. 1 môžeme napríklad vyčítať, že pri zobrazenom čiernom stimule (prvý stĺpec) bola v sledovanom čase pravá zrenička (deviaty stĺpec) priemerne o 0.15 mm širšia ako ľavá (ôsmy stĺpec), čo tiež poukazuje na nezávislosť zreničiek vzhľadom k dilatácii. Druhý stĺpec obsahuje informáciu o čase v milisekundách, kedy boli in-

---

<sup>1</sup>Okulometer, angl. Eye-tracker (Sledovač pohľadu)

## 2 SLEDOVANIE ZRENIČKY POMOCOU OKULOMETRA

---

formácie v danom riadku zaznamenané. Zobrazený interval veľkosti 21 záznamov trval presne 67 milisekúnd.

1	MediaName	RecordingTimestamp	LocalTimeStamp	EyeTrackerTimestamp	FixationIndex	SaccadeIndex			
·	GazeEventType	GazeEventDuration	PupilLeft	PupilRight					
2	000.png	1546	11:16:36.329	1447236971237282	6	Fixation	3096	4,16	4,30
3	000.png	1549	11:16:36.333	1447236971240503	6	Fixation	3096	4,15	4,31
4	000.png	1553	11:16:36.336	1447236971243943	6	Fixation	3096	4,16	4,30
5	000.png	1556	11:16:36.339	1447236971247167	6	Fixation	3096	4,16	4,30
6	000.png	1560	11:16:36.343	1447236971250618	6	Fixation	3096	4,16	4,29
7	000.png	1563	11:16:36.346	1447236971253834	6	Fixation	3096	4,17	4,31
8	000.png	1566	11:16:36.349	1447236971257289	6	Fixation	3096	4,17	4,31
9	000.png	1569	11:16:36.353	1447236971260500	6	Fixation	3096	4,18	4,31
10	000.png	1573	11:16:36.356	1447236971263944	6	Fixation	3096	4,18	4,31
11	000.png	1576	11:16:36.359	1447236971267178	6	Fixation	3096	4,18	4,31
12	000.png	1580	11:16:36.363	1447236971270622	6	Fixation	3096	4,19	4,33
13	000.png	1583	11:16:36.366	1447236971273832	6	Fixation	3096	4,18	4,33
14	000.png	1586	11:16:36.369	1447236971277275	6	Fixation	3096	4,18	4,34
15	000.png	1589	11:16:36.373	1447236971280513	6	Fixation	3096	4,19	4,35
16	000.png	1593	11:16:36.376	1447236971283955	6	Fixation	3096	4,18	4,33
17	000.png	1596	11:16:36.379	1447236971287172	6	Fixation	3096	4,18	4,33
18	000.png	1600	11:16:36.383	1447236971290615	6	Fixation	3096	4,19	4,34
19	000.png	1603	11:16:36.386	1447236971293844	6	Fixation	3096	4,21	4,33
20	000.png	1606	11:16:36.389	1447236971297284	6	Fixation	3096	4,19	4,35
21	000.png	1609	11:16:36.393	1447236971300509	6	Fixation	3096	4,19	4,35
22	000.png	1613	11:16:36.396	1447236971303956	6	Fixation	3096	4,20	4,35

Obr. 1: Vzor dát exportovaných okulometrom

### 3 Dilatácia zreničky a jej zdroje

Odhliadnuc od zdrojov dilatácie, ktoré môžu vyvolávať u rôznych ľudí rôzne reakcie, každý človek má vlastný rozsah dilatácie. V práci [7] na datasete o veľkosti 1263 snímok očí preukazuje, že pristupovať k vyhodnocovaniu musíme opatrne. Hodnoty z okulometra, ktorý dokáže veľmi presne odmerať šírku zreničky, nemôžeme bez predspracovania použiť do funkcie vyhodnocovania ľubovoľného zdroja dilatácie. Zrenička s hodnotou 2.5 mm totiž môže u jedného človeka znamenať najvyššiu možnú dilatáciu, zatiaľ čo u iného sa tak nízka hodnota ani nedá dosiahnuť.

Prvým zdrojom variability je rôzna šírka dúhovky, podľa ktorej je vhodné určovať relatívnu šírku zreničky (pomer šírky zreničky a dúhovky) a druhým zdrojom je rôzna minimálna a maximálna hodnota dilatácie a tiež rôzny rozdiel medzi týmito hodnotami. V uvedenom datasete najväčšia maximálna relatívna šírka zreničky dosahuje hodnotu 0.7009, pričom jej minimálna hodnota je 0.5391. Najmenšia minimálna relatívna šírka zreničky v datasete je s hodnotou 0.2137, pričom pri jej maximálnej dilatácii dosahuje hodnotu 0.4762. Ďalším zistením bolo, že v uvedenom datasete je najväčší rozsah dilatácie, resp. rozdiel medzi maximálnou a minimálnou dilatáciou zreničky 0.3067, pričom predchádzajúce extrémne prípady majú rozsah 0.1618 pre najširšiu zreničku a 0.2625 pre najužšiu zreničku. Štúdiá tiež prezentuje 32 zreničiek usporiadaných podľa hodnoty minimálnej dilatácie a ich hodnoty maximálnej dilatácie, ktoré už nenasledujú v usporiadanom poradí práve z dôvodu rôznych rozsahov dilatácie, ktoré nie sú závislé ani od hraničných hodnôt.

Tieto vlastnosti nás nútia ohodnocovať intenzitu dilatácie relatívne, nie len na základe absolútnej zmeny šírky zreničky v mm.

#### 3.1 Problémové vs. ignorovateľné zdroje

Vo väčšine súčasných štúdií sa výskumníci snažia dokázať rozlíšiť dilatáciu spôsobenú viacerými zdrojmi. Takéto podstatné zdroje dilatácie zreničky sú zhrnuté v [8]. Prvý zdroj je nami sledovaná kognitívna záťaž. Ako bližšie opisujeme v kapitole 4, všeobecne platí, že zvýšená kognitívna záťaž sa podpíše pod rozšírenie zreničky a naopak.

Ďalším zdrojom je vzrušenie, či emócie. Práca [3] prezentuje metódu, ako merať kognitívnu záťaž plynúcu z úloh zobrazených na emočne výrazných aj nevýrazných stimuloch, čím okrem iného dokazuje vplyv emócií na dilatáciu zreničky. Túto metódu a aj dôvod nemožnosti jej využitia bližšie opisujeme v kapitole 4.

Keďže kognitívny aj emocionálny zdroj sú psychologické zdroje a dilatácia zreničky je spoločný nositeľ informácii o ich prítomnosti, extrakcia príspevku k dilatácii podľa samostatných zdrojov nie je možná bez doplňujúcej informácie, akými by mohli byť dáta namerané s inou metódou či meracím prístrojom - napr. EEG. Napriek tomuto zdanlivo problémovému charakteru zdroja si ho dovoľujeme zaradiť medzi ignorovateľné zdroje, keďže emociálny vplyv stimulov nepredpokladáme u počítačových aplikácií, ktoré sú väčšinou práve striktne emociálne neutrálne. Je však dobré poznať, že emócie môžu ovplyvniť výsledky merania a pri prípadnom vyhodnocovaní aplikácií s významným emocionálnym charakterom, generalizovať výsledky ako psychologickú záťaž. Prípustnosť takéhoto zjednodušenia je navyše podporená opäť jedným zo záverov štúdie [3], ktorá zistila prevahu vplyvu kognitívneho zaťaženia nad emocionálnym, na vlastnosti správania oka, teda nielen dilatácie zreničky. Posledným významným zdrojom dilatácie je svietivosť stimulu, ktorej sa budeme venovať v nasledujúcich podkapitolách, pretože sme ju zaradili medzi problémové zdroje dilatácie. Úvahy o možnom príspevku sakád k dilatácii zreničky vylučuje práca [5], kde sa nezistila korelácia medzi pohybom referenčného objektu a šírkou zreničky. Tento fakt je dôležitý obzvlášť pri práci s aplikáciami, kde sa pohľad používateľa pravidelne mení.

Existujú ďalšie faktory ovplyvňujúce dilatáciu zreničky, kde sa často spomína vek osoby. Tieto faktory by mohli robiť opäť problém, pokiaľ by sme počítali s absolútnymi hodnotami dilatácie, avšak dilatáciu meriame relatívne, a preto podobné faktory nemusíme pri návrhu metódy uvažovať.

## 3.2 Vplyv svietivosti stimulov

Svetelné podmienky majú na dilatáciu zreničky najväčší vplyv. Dilatácia zreničky má vo svojej podstate za úlohu regulovať množstvo svetla prenikajúceho na sietnicu oka. Aj ostatné vplyvy dilatácie ako kognitívna záťaž a emócie v podstate súvisia s týmto aspektom tým, že si "vyžadujú" pozmeniť ideálnu hodnotu vnímaného svetla. Z tohto dôvodu nemožno vplyv svietivosti stimulu ignorovať, naopak,

treba mu čo najlepšie porozumieť a vedieť dilatáciu zreničky ako reakciu na zmenu svetelných podmienok čo najlepšie predpovedať. Kvalitné výskumy vplyvu svietivosti stimulu na dilatáciu zreničky prebiehali už v 80-tych rokoch 20. storočia. Už intuícia nám nahovára, že pri zvýšenej svietivosti sa zrenička stiahne aby na sieťnicu preniklo menej svetla a naopak, pri zníženej viditeľnosti sa zrenička roztiahne. Presné správanie odhaľuje práca [6], kde sa podarilo získať funkciu vzťahu medzi intenzitou svietivosti stimulu a dilatáciou zreničky 1, kde  $x$  predstavuje intenzitu svetla a  $y$  šírku zreničky.

$$y = -0,12 + 0,66x - 0,04x^2 \quad (1)$$

Svietivosť stimulu, v našom prípade zobrazovaného rozhrania aplikácie prostredníctvom monitora, nepotrebujeme merať v žiadnych štandardizovaných jednotkách, nakoľko nás zaujíma rozsah dilatácie zreničky pri zobrazení čierneho a bieleho stimulu, tzn. čiernej a bielej obrazovky. Tento rozsah dilatácie vieme na začiatku pozorovania odmerať a pri dodržaní konštatných svetelných podmienok v miestnosti počas trvania experimentov nemôže nastať taká situácia, aby zrenička presiahla hodnoty z takto nameraného intervalu len na základe zmeny svietivosti, keďže všetky možné zobrazované stimuly budú mať svietivosť niekde medzi týmito hraničnými hodnotami. Pokiaľ by sme teda mali jednofarebné stimuly iba z farieb odtieňov sivej, teoreticky by sme vedeli predpovedať šírku zreničky pre jednotlivé stimuly veľmi jednoducho a presne. Jednotkou svietivosti teda môže byť percentuálne vyjadrenie dilatácie pri zobrazenom stimule vzhľadom k najnižšej nameranej hodnote rozsahu.

Pri hlbšom skúmaní princípov vnímania svetla a farieb ľudským okom sa dopracujeme k pojmu trichromatického vnímania farieb, ktoré je príznačné pre primátov a teda aj človeka. Túto čisto biologickú vlastnosť musíme uvažovať z dôvodu, že jednotlivé zložky RGB spektra prispievajú k vnímanej svietivosti stimulu nerovnomerne. Receptory v oku zodpovedné za rozlišovanie farieb sú u primátov práve tri – z čoho plynie pojem trichromatizmus [13]. Tieto receptory označujeme L, M a S podľa ich citlivosti na rôzne vlnové dĺžky svetla (long, medium, short), pričom tieto sa zvyčajne trochu zavádzajúco priradzujú základným farbám spektra – R,G,B. Dôležité je, že počet receptorov jednotlivých kategórií nie je rovnaký a to

spôsobuje rôzne vnímanie svietivosti stimulu. Na internete<sup>2</sup> je dostupných niekoľko formúl najmä z prostredia grafikov, ktoré sa snažia určiť vnímanú svietivosť farby pre výpočet kontrastu za účelom vhodnej čitateľnosti. Odbornejšie zdroje sa však tejto problematike z informatickej sféry venujú len minimálne a výskum vplyvu svietivosti rôznych farieb zobrazených na monitore počítača na dilatáciu zreničky sa nám dosiaľ nepodarilo dopátrať, čo nás motivovalo objasniť správanie zreničky na vlastnom experimente, nakoľko počítačové aplikácie sa často skladajú z rôznofarebného obsahu, ktorý testujúci používateľ striedavo sleduje a jeho zrenička sa na základe toho môže meniť aj bez prítomnosti zmien v kognitívnej záťaži.

### 3.3 Vplyv rozloženia kontrastných prvkov

Doposiaľ sme sa venovali iba primitívnym homogénnym jednofarebným stimulom, zameriavajúc sa len na vplyv intenzity svetla, ktoré farby prostredníctvom monitora emitujú. Rozhranie aplikácie sa však často skladá z rôznych fragmentov ako je menu, textový obsah, tlačidlá, reklamné panely a podobne, pričom tieto fragmenty môžu byť vo vzájomnom kontraste a teda aj emitujú rôzne intenzity svetla. Spočiatku by sme mohli túto vlastnosť rozhraní ignorovať a počítať svietivosť rozhrania bez ohľadu na to, kam sa testujúca osoba pozerá, keďže za štandardných podmienok máme celý obraz monitora úplne pokrytý zorným polom. V štúdiu [11] a tiež v [10] sa však podľa predpokladov ukázalo, že rozdiel šírky zreničky sa systematicky mení podľa toho, či sa testovaná osoba pozerá na svetlý alebo tmavý objekt. Z tohto dôvodu sa rozloženie kontrastných prvkov javí byť veľmi dôležitým a navádza k ďalšej možnosti využitia okulometra ako identifikátora oblasti stimulu, ktorú používateľ sleduje v každom momente práce s aplikáciou.

### 3.4 Trvalá oscilácia zreničky

Publikácia [2] prezentuje jav Hippus ako trvalú osciláciu zreničky s amplitúdou 1 mm na polomere s periódou okolo 5 sekúnd. Keďže je tento jav považovaný za nepredvídateľný, nevedeli by sme určiť či bola tak výrazná dilatácia spôsobená kognitívnou záťažou alebo úplne náhodne, čo by do značnej miery mohlo limitovať

---

<sup>2</sup>HSP Color Model — Alternative to HSV (HSB) and HSL, 2006 Darel Rex Finley, <http://alienryderflex.com/hsp.html>



vyhodnocovanie kognitívnej záťaže na základe dilatácie zreničky. Zároveň však [2] tvrdí, že mentálna aktivita spôsobuje okamžité potlačenie tohto javu, čím sa hippus stáva ignorovateľným zdrojom dilatácie, keďže sa pri práci s počítačovou aplikáciou predpokladá výrazná mentálna aktivita. Pre akékoľvek ďalšie merania zreničky sa odporúča merať zrenička nepretržite a jej hodnoty prezentovať ako priemer posledných nameraných, namiesto výberu jednej aktuálnej hodnoty [14].

### 3.5 Zhrnutie

Zdroje dilatácie zreničky tvoria zameranie pestrej škály experimentov vo veľkej časti vedeckej sféry. Jednotlivé vplyvy ako aj výsledná dilatácia sú často slabo predikovateľné. Naš cieľ vyhodnocovať kognitívnu záťaž aplikácií pomocou zreničky je teda netriviálnym, no uskutočniteľným a podložiteľným viacerými existujúcimi prácami, ktoré dokazujú najzávažnejšie fakty, ktoré cieľ našej práce predpokladá.



## 4 Kognitívna záťaž a dilatácia zreničky

Dilatácia zreničky ako prostriedok na detekciu a meranie kognitívnej záťaže preukazuje dobré vlastnosti jej využitia na tento účel [3]. Dôvodom dilatácie zreničky je nekontrolovateľná snaha prispôbovať pomer ostrosti a intenzity videnia, ktoré sú navzájom v protiklade. Práca [10] ilustruje tento princíp na príklade človeka čítajúceho knihu, u ktorého je ostrosť videnia dôležitejšia ako u človeka sústrediacего sa na predátora, ktorý ho môže kedykoľvek napadnúť. Človek čítajúci knihu nevykazuje silnú kognitívnu záťaž a jeho zreničky sa môžu stiahnuť, čím síce obmedzia priepustnosť svetla, ale zvyšujú ostrosť obrazu premietaného na sietnicu oka. Človek sústrediaci sa na priestor, z ktorého môže byť napadnutý predátorom vyžaduje čo najkratšiu dobu reakcie a tak sa kognitívna záťaž podpíše pod rozťahnutie zreničky, čím sa na úkor ostrosti videnia zvýši priepustnosť svetla a s ňou schopnosť detekovať minimálnu zmenu v prostredí.

V práci [4] autori vykonali porovnanie štyroch existujúcich prístupov k vyhodnocovaniu kognitívnej náročnosti úloh. Podľa očakávaní, najpresnejším prístupom je vyhodnocovanie na základe explicitného ohodnotenia náročnosti úlohy používateľom. Medzi zvyšné tri neintruzívne prístupy patrí aj prístup sledovania aktivity očí ( frekvencia žmurkania a dilatácia zreničky ). Spomedzi konkurencie prístupu sledujúceho úspešnosť vykonaných úloh a prístupu založenom na meraní času ich vykonávania, vyšiel prístup sledujúci aktivitu očí ako najspoľahlivejší, vďaka čomu môžeme predpokladať veľkú koreláciu medzi mozgovou činnosťou a prejavmi zrakového orgánu.

### 4.1 Metóda indexovania kognitívnej aktivity - ICA

Prepojenie mozgovej aktivity s dilatáciou zreničky je tak previazané, že priamo hodnota šírky zreničky nie je jedinou metrikou určujúcou kognitívnu záťaž. Ako sme uviedli v kapitole 3, dilatáciu zreničky ovplyvňujú aj svetelné podmienky a práve tento problém rieši alternatívna, existujúca, funkčná a používaná metóda ICA [9]. Tento index sa meria frekvenciou výskytu náhlych zmien zreničky, ktoré nemôžu byť spôsobené zmenou svetelných podmienok, a tak svetelné podmienky ani nemusíme uvažovať. Táto metóda je riešením pre dlhé a komplexné úlohy, akou je aj interakcia človeka s počítačom, pri ktorých bola v minulosti problémom

hardvérová a softvérová limitácia [9].

Z princípu merania náhlych zmien šírky zreničky spôsobených zmenou kognitívnej záťaže metódou ICA vieme naozaj rýchlo a spoľahlivo detekovať nástup kognitívnej záťaže a následne ho namapovať k problémovej časti aplikácie. Transformáciou spojitej krivky reálnej šírky zreničky v čase na diskkrétne udalosti predstavujúce prítomnosť dilatácie spôsobenej kognitívnou činnosťou však strácame významnú časť informácií, ktorých využitím by sme mohli dokázať presnejšie vyhodnocovať rozdiely v jednotlivých častiach aplikácií.

Ďalší problém metódy ICA a výhoda bezprostrednej metódy sa prejavuje pri reálnom experimente, ktorý môže trvať aj niekoľko desiatok minút. Napriek rôznym prístupom ako dosiahnuť čo najdokonalejšie dáta, ani pomocou výkonných okulometrov, nemôžeme dosiahnuť 100 percentne kompletne dáta o šírke zreničky počas trvania experimentu. Výpadky, okrem iného, môže spôsobovať žmurkanie, otáčanie hlavy či čiastočné vychádzanie zo snímateľnej oblasti. Pri bezprostrednej metóde si vieme tieto výpadky dopočítavať interpoláciou podľa poslednej hodnoty pred výpadkom a prvej hodnote po výpadku, čo pri skutočne krátkych výpadkoch v podstate neovplyvňuje meranie. Indexovacia metóda na rozdiel od spojitej - bezprostrednej metódy, je diskkrétneho charakteru a preto je počas výpadkov náchylnejšia na nesprávny odhad záťaže počas výpadku. Bližšie implementačné detaily tejto metódy sú chránené a nepublikované.

### 4.2 Nárast dilatácie pri rovnakej záťaži a rôznej šírke zreničky

Pri vyhodnocovaní záťaže na základe rozšírení zreničky jednoduchou a intuitívnou implikáciou: rozsah dilatácie => stupeň kognitívneho zaťaženia, vyvstáva otázka, či sa rovnaký nárast pri rôznych stavoch šírky zreničky rovná tomu istému zvýšeniu kognitívnej záťaže. Dilatácia zreničky je fyziologicky obmedzená, a preto ak dosiahne maximálne rozšírenie vplyvom svetelných podmienok, svaly spôsobujúce dilatáciu by museli vykonať omnoho väčšiu prácu pri ďalšej dilatácii spôsobenej kognitívnou záťažou. Odpoveď nachádzame v práci [11], kde sa ukázalo, že pri nevelkých zmenách svietivosti akými sú zmeny farby na pozadí stimulu, nedochádza k ovplyvneniu intenzity prípadnej dilatácie spôsobenej kognitívnou náročnosťou úlohy. To znamená, že nehľadiac na to, či je pozadie, na ktorom je zobrazená

úloha čierne alebo biele, absolútne zmeny v šírke zreničky sú takmer identické pri úlohách s rovnakou náročnosťou.

### 4.3 Existujúce prístupy

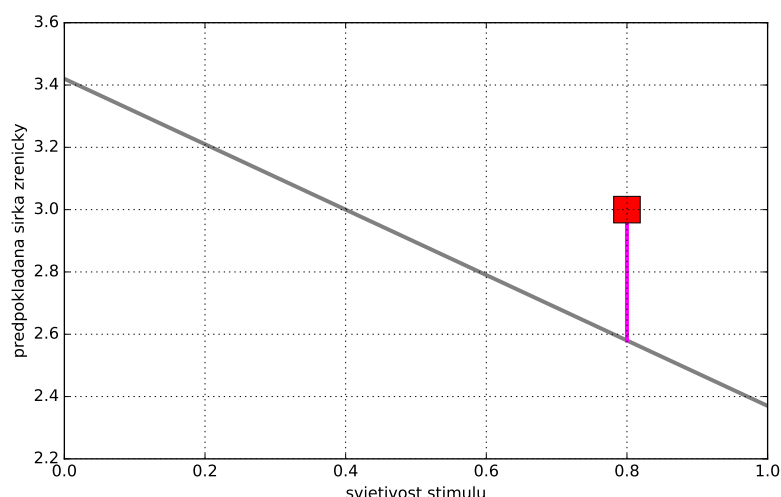
Vyhodnocovanie kognitívnej záťaže na základe dilatácie zreničky skúmajú výskumníci už desiatky rokov. Z psycho-fyziologického hľadiska je súčasný stav skutočne ďaleko a dostupných je množstvo štúdií, ktoré sledujú rôzne aspekty správania zreničky pri riešení úloh na jednoduchých stimuloch ako aj možných rušivých vplyvov opísaných v kapitole 3.

V [5] autor využíva ICA metódu v štúdiu s dvojitémi úlohami (dual-task studies), pričom skúma interferenciu vplyvov úlohy na ovládanie objektov a jazykovou úlohou. Prezentuje, že ICA metóda je na tento spôsob vyhodnocovania lepšia ako bezprostredné sledovanie dilatácie zreničky. Štúdia uvažuje stimul s pohybujúcim sa objektom, čím sa v aspekte dynamiky stimulu približuje počítačovej aplikácii, ktorá je v priebehu času zmenou obsahu a prvkov rozhrania dynamická. Zakomponovanie prístupu dvojitých úloh do vyhodnocovania kognitívnej náročnosti aplikácií ako súčasť metódy však nie je pre našu prácu reálne z dôvodu, že predpokladaný nástroj skúma hotové rozhranie a jeho vplyv na kognitívne zaťaženie.

Zaujímavé je riešenie, ktoré prezentuje práca [3], ktoré sa zameriava na vyhodnocovanie kognitívnej náročnosti úlohy s interferenciou emociálneho vplyvu. V tejto metóde sa na pozadí matematickej úlohy zobrazí iný obrázok s vopred určenou emociálnou úrovňou, na ktorý sa testovaná osoba počas riešenia úlohy bude mimovoľne pozeráť. Okrem rôznych emociálnych úrovní obrázkov na pozadí sa v metóde uvažuje aj niekoľko rôznych náročností matematickej úlohy. Tieto úrovne sa skladajú do jednotlivých stimulov v rôznych kombináciach, čím sa po meraní dilatácie pri riešení týchto úloh na dostatočne veľkej vzorke preukáže vplyv kognitívnej záťaže medzi úlohami s rôznou náročnosťou a rovnakým emociálnym vplyvom, alebo naopak, vplyv emócií pri úlohách s rovnakým kognitívnym zaťažením, ale rôznymi úrovňami predpokladaných emócií. Touto metódou vieme skutočne odfiltrovať emócie od kognitívnej záťaže, no jej využitie vo vyhodnocovaní kognitívnej náročnosti reálnych stimulov ako sú počítačové aplikácie je nereálne, pretože predpokladá vopred ohodnotenú emociálnu vplyvnosť rozhrania, ktorú samozrejme vopred nepoznáme a ani ju nevieme odhadnúť. Zároveň musíme brať do úvahy, že

väčšinou sa počítačové aplikácie skladajú z emociálne neutrálnych prvkov, a preto je v našom prípade interferencia emócií s kognitívnou záťažou ignorovateľná.

Inšpiratívna, jednoduchá a široko používaná metóda na riešenie interferencie svietivosti a kognitívnej záťaže je zobrazenie kalibračného stimulu pred zobrazením reálnej úlohy, ktorý sa od stimulu s úlohou líši len minimálne a to v detailoch ako sú čísla alebo texty substituované znakmi podobného tvaru, za účelom dodržania rovnakej svietivosti stimulu. Práca [10] tvrdí, že reflex na zmenu svietivosti trvá približne 0.25 sekundy, čo aj zodpovedá dostupným grafom sledovanej dilatácie po zmene svietivosti. Už z empirických poznatkov však vieme, že pri prechode z ostrého denného svetla do absolútnej tmy dochádza k dilatácii ešte niekoľko minút. Takáto extrémna dilatácia sa nás však pri relatívne malých zmenách svietivosti, akými sú zmeny v rozhraní aplikácií, netýka, a preto nám bohaté stačí uvažovať interval dvoch – troch sekúnd ako dostatočný na prekonanie kritickej dilatácie spôsobenej adaptáciou zreničky na zobrazený stimul.



Obr. 2: Model reakcií zreničky človeka predstavuje predpokladanú (referenčnú) šírku zreničky bez prítomnosti kognitívnej záťaže pre konkrétne úrovne svietivosti obrazovky na intervale od 0 (čierna) do 1 (biela).

Akúkoľvek ďalšiu dilatáciu po zmene kalibračného stimulu za stimul s úlohou môžeme pripisovať kognitívnej záťaži, resp. emóciám. Túto metódu využíva napríklad práca [3]. Pokiaľ by sme chceli tento prístup použiť aj pri práci s počítačovou aplikáciou, museli by sme vkladať po každej zmene rozhrania kalibračný stimul. Takéto

akcie nie je jednoduché naprogramovať do hotových testovaných riešení a keby aj bolo, nedosiahli by sme rovnaké podmienky počas testovania aké budú počas reálnej práce s aplikáciou, čo túto metódu diskvalifikuje pre takto komplexné vyhodnocovania. Práca [15] preukázala na experimente, že takýmto spôsobom dokážeme kognitívnu záťaž nielen detekovať, ale aj určiť stupne kognitívnej náročnosti jednotlivých úloh.

Riešenie v tejto zložitej situácii navrhujú autori v práci [11]. Odporúčajú vyvinúť metódu vyhodnocovania kognitívnej záťaže pomocou dilatácie zreničky s využitím referenčnej krivky – akejsi funkcie svietivosti stimulu a šírky zreničky. Návrh spočíva v kalibrácii reakcie zreničky na rôzne úrovne svietivosti stimulu, pomocou čoho by sme vedeli predpovedať aký príspevok k dilatácii zreničky po zmene stimulu spôsobuje zmena svietivosti a všetko ostatné, teda rozdiel medzi skutočnou a predpokladanou hodnotou šírky zreničky môžeme priradiť vplyvom kognitívnej záťaže, resp. psychologickým zdrojom, ak uvažujeme prítomnosť emócií.

Túto myšlienku sme hlbšie analyzovali a ilustrujeme ju na obr. 2. Ilustrácia tiež zobrazuje skutočnú šírku zreničky, počas sledovania stimulu so svietivosťou 0.8 (80 % najvyššej možnej svietivosti monitora). Rozdiel medzi skutočnou a referenčnou šírkou zreničky je kladný a predstavuje dodatočnú dilatáciu spôsobenú kognitívnou záťažou. Táto dodatočná dilatácia rozšírila zreničku o 0,4 mm.

#### 4.4 Zhrnutie

V poli výskumu dilatácie zreničky v kontexte kognitívnej záťaže sme identifikovali a preštudovali dostatok prác, vďaka ktorým môžeme deklarovat veľmi sľubné vlastnosti vplyvu kognitívneho zaťaženia na dilatáciu zreničky a teda aj identifikáciu jeho prítomnosti. Dostupné vedecké práce poskytujú veľmi dobrý prehľad k experimentálnym prístupom a vyhodnocovaniu, vďaka čomu nám z informatického pohľadu ponúkajú zaujímavé výzvy k ich implementácii. Niektoré práce sa svojím charakterom približujú k schopnosti vyhodnocovať kognitívnu záťaž tak komplexných stimulov ako sú počítačové aplikácie, no dosiaľ žiadna z nich túto vlastnosť nedosiahla.





## 5 Metóda vyhodnocovania kognitívnej záťaže

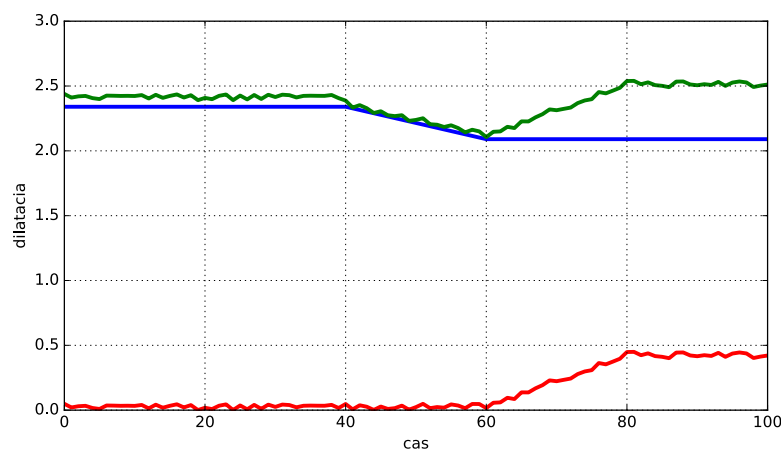
V nami navrhovanej metóde sme sa vybrali smerom vyhodnocovania kognitívnej záťaže pomocou bezprostrednej metódy, teda sledovania absolútnej dilatácie zreničky, ktorá bola ako metóda často potlačovaná menej problematickou metódou ICA. Ako už bolo spomenuté v analýze, budeme sa snažiť dokázať, že aj táto metóda skrýva potenciál v presnejšej metrike určovania kognitívnej záťaže, ako je akumulovanie výskytov náhlych dilatácií metódy ICA.

Metóda teda bude sledovať dilatáciu zreničky počas práce používateľa s aplikáciou a na základe aktuálnej šírky bude určovať mieru kognitívneho zaťaženia. V ideálnom svete by už teda samotná krivka dilatácie predstavovala funkciu zobrazeného stimulu a kognitívneho zaťaženia, kde by lokálne extrémny predstavovali oblasti s najvyšším, resp. najnižším kognitívnym zaťažením. Avšak skôr než si budeme môcť dovoliť takýto výstup, potrebujeme pozmeniť krivku dilatácie odfiltrovaním príspevku pochádzajúceho zo svietivosti stimulu. Aplikovaním tejto netriviálnej metódy v podstate naplníme ideu v závere štúdie [11], ktorá bola načrtnutá na konci predchádzajúcej kapitoly.

### 5.1 Základné predpoklady metódy

Detekcia kognitívnej záťaže si vyžaduje správne určovanie referenčných hodnôt šírky zreničky v každom okamihu práce, ktorej kognitívnu náročnosť chceme vyhodnotiť. Z tohto dôvodu musíme najskôr vyriešiť nasledujúce nutné predpoklady:

- Kalibrácia modelu reakcií zreničky človeka
  - Kalibrácia šírky zreničky pre jednotlivé úrovne svietivosti
  - Kalibrácia trvania prispôsobenia zreničky na novú úroveň svietivosti
- Schopnosť určiť aktuálne vnímané hodnoty svietivosti stimulov
  - Určenie vnímanej svietivosti farieb
  - Váhovanie intenzity svietivosti periférne vnímaných prvkov stimulu na celkovú vnímanú svietivosť



Obr. 3: Princíp detekcie kognitívnej záťaže.

Referenčné hodnoty v spojitom priebehu nazývame referenčná krivka. Po získaní referenčnej krivky vypočítame intenzitu prítomnej kognitívnej záťaže ako rozdiel medzi skutočne nameranou krivkou dilatácie zreničky a referenčnou krivkou. Tento jednoduchý princíp ilustrujeme na obr. 3 v ktorom je referenčná krivka reprezentovaná modrou farbou, skutočne nameraná šírka zreničky zelenou a detekovaná kognitívna záťaž červenou farbou. Ilustrácia odzrkadľuje situáciu pri zobrazení stimulu vyvolávajúceho okamžitú kognitívnu záťaž. Z ilustrácie je zrejmé, že v časovom intervale 0 - 40 bola zaznamenaná šírka zreničky takmer identická s predpokladanou - referenčnou. V čase 40 však došlo k zúženiu referenčnej krivky, čo je dôsledkom zobrazenia stimulu s vyššou svietivosťou. Spočiatku skutočne nameraná šírka zreničky koreluje s referenčnou v súlade s predpokladanou reakciou na zmenu svietivosti, neskôr však začne jej šírka opäť rásť v dôsledku nárastu kognitívnej záťaže vyvolanej stimulom zobrazeným v čase 40.

## 5.2 Kalibrácia modelu reakcií zreničky človeka

### 5.2.1 Funkcionalita modelu

Kalibrovaný model musí poskytovať:

- Rozsah dilatácie prislúchajúci rozsahu svietivosti monitora v mm

- Referenčnú šírku zreničky pre zadanú svietivosť z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$
- Normalizované posunutie dilatácie pre prázdnu obrazovku s modrým pozadím z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$
- Parameter `sigma` určujúci tvar normálneho rozloženia svetlocitlivých buniek v oku

### 5.2.2 Kalibrácia šírky zreničky pre jednotlivé úrovne svietivosti

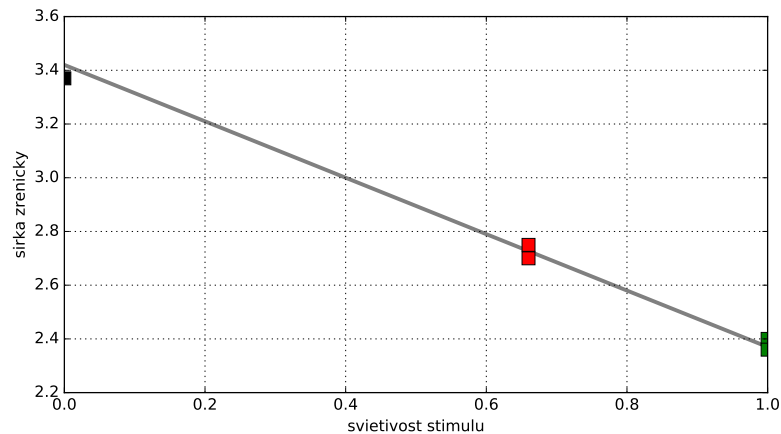
Kalibračná procedúra sa skladá zo série po sebe nasledujúcich kalibračných stimulov. Počas kalibrácie sa človek musí pozeráť do prostriedku obrazovky a byť maximálne uvoľnený, keďže natrénované šírky zreničiek považujeme za referenčné. Kalibračné stimuly musia byť prázdne obrazovky s homogénnou farbou pozadia. V záujme minimalizácie trvania kalibrácie, sme zvolili 6 stimulov v nasledujúcom poradí:

- biely (`#FFFFFF`)
- šedý (`#AAAAAA`)
- čierny (`#000000`)
- modrý (`#0000FF`)
- biely (`#FFFFFF`)
- šedý (`#AAAAAA`)

Homogénnosť obrazu eliminuje problém s určením intenzity vplyvu periférnych prvkov a tak môžeme predchádzajúcim stimulom priradiť celkovú svietivosť ako svietivosť konkrétnej farby. Tú vypočítame pre stimuly v odtieňoch sivej, ako pomer `rgb` intenzity konkrétnej farby k bielej, napríklad `#AAAAAA` má svietivosť 0,667.

Trvanie zobrazovania jednotlivých stimulov sme stanovili na 7 sekúnd, pričom prvých 5 sekúnd ignorujeme v dôsledku ustálenia dilatácie zreničky po zmene svietivosti a priemerná šírka zreničky v zvyšných dvoch sekundách predstavuje vstupnú hodnotu do kalibrácie.

Po získaní dostatočného počtu vstupných hodnôt (v našom prípade 5 stimulov), spúšťame algoritmus strojového učenia - lineárnu regresiu, ktorá vypočíta opti-



Obr. 4: Lineárna regresia v kontexte kalibrácie modelu.

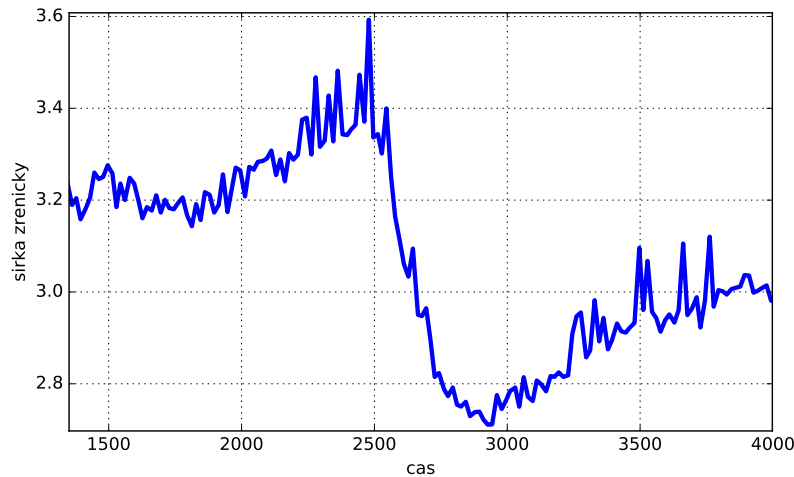
málne parametre modelu reakcií zreničky človeka, ktoré určujú lineárnu funkciu podobnú tej v obr. 4.

Parametre lineárnej funkcie svietivosti získanej v regresii nám umožňujú predpovedať šírku zreničky podľa zadanej svietivosti formulou 2, kde  $a$  predstavuje záporný sklon funkcie,  $x$  predstavuje zadanú svietivosť a  $b$  predstavuje bázovú hodnotu (referenčná hodnota pre čierny stimul s najmenšou svietivosťou).

$$referencia = ax + b \quad (2)$$

### 5.2.3 Kalibrácia trvania prispôsobenia zreničky na novú úroveň svietivosti

Zmena svietivosti stimulu môže v krátkych intervaloch prispôbovania zreničky spôsobiť falošnú detekciu kognitívnej záťaž. V obr. 5 môžeme sledovať priebeh zápornej dilatácie zreničky po zmene stimulu v čase 2500 ms z tmavšieho na svetlejší. Vidíme, že táto dilatácia rozsahu 0,6 mm prebehla v časovom úseku približne 400 ms, čo predstavuje rýchlosť dilatácie 1,5 mm/s. Keďže táto rýchlosť dilatácie závisí od množstva faktorov, je vhodné tento výpočet zisťovať pre každého človeka nad dátami z kalibračnej procedúry v časoch, keď dochádza k zmenám svietivosti kalibračných stimulov.



Obr. 5: Zobrazenie náhleho poklesu šírky zreničky po zmene svietivosti stimulu.

### 5.3 Schopnosť určiť aktuálne vnímané hodnoty svietivosti stimulov

#### 5.3.1 Určenie vnímanej svietivosti farieb

Zatiaľ čo v procedúre kalibrácie vstupujú do regresie iba stimuly zo sivého spektra, kde bolo určenie svietivosti triviálne, pri určovaní svietivosti farebných stimulov musíme rešpektovať fakt, že rôzne farby majú rôznu svietivosť. Už v analýze sme poukázali na nejednoznačnosť v určovaní svietivosti jednotlivých farieb. V experimentálnej fáze sme odhalili novú metódu, ktorou možno vypočítať svietivosť farby tak, aby korelovala so spôsobovanou dilatáciou.

Metóda sa zakladá na modifikácii formuly 3, kde  $r$ ,  $g$  a  $b$  sú intenzity jednotlivých zložiek farebného modelu  $rgb$  v intervale  $\langle 0, 1 \rangle$ .

$$svietivosť = \max(r, g, b) \quad (3)$$

Rovnica má vážne problémy s určovaním farieb s dominantným zastúpením modrej zložky. Zistili sme, že vnímaná svietivosť modrej farby je individuálna u každého človeka a v priemere je intenzita modrej farby o 20 % rozsahu dilatácie menšia ako intenzita určená formulou 3. Na ošetrenie tejto vlastnosti nestačí iba lineárne

potlačenie intenzity modrej zložky. V experimentoch sa ukázalo, že ak je farba zložená z modrej a červenej zložky, výsledné zmenšenie intenzity svietivosti farby je znížené na polovicu, teda 10 % a fuchsiová farba, ktorá takto vznikne, má intenzitu 0,9. Samostatná červená farba však vykazuje rovnakú intenzitu ako biela či zelená, preto sme boli nútení vyvinúť metódu na ošetrovanie interferencie farieb spôsobenej prítomnosťou modrej zložky.

Na základe zistenia z experimentu, že prítomnosť zelenej zložky eliminuje interferenciu modrej farby sme zredukovali počet možných prípadov vzájomnej interferencie farieb na 5, pričom sa hľadá najmenej reštriktívna podmienka, ktorá definuje jednotlivé prípady. Reštriktívnosť prípadov je usporiadaná, a preto sa vyberie prípad po nájdení prvej splnenej podmienky. To znamená, že výber piateho prípadu nastane v prípade neplatnosti všetkých štyroch predchádzajúcich. Hlavnou myšlienkou metódy je aplikovanie formuly 3 na maximálne troch intervaloch (tabuľka 1), podľa vzájomného usporiadania intenzít farieb. Algoritmus metódy pracuje s parametrami jednotlivých zložiek rgb modelu a natrénovaného posunu vnímanej intenzity modrej farby (premenná  $B\_D$ ). Výstupná ako aj prípustné vstupné hodnoty sú z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ .

Algoritmus vylepšeného určovania intenzity farieb:

```
1 #IN 1. CASE
2 if g>=b:
3     return r if r > g else g
4
5 #IN 2. CASE
6 if r > b:
7     return (r-b) + (b-g)*(1-B_D/2) + g
8
9 #IN 3. CASE
10 if r==b:
11     return (b-g)*(1-B_D/2) + g
12
13 #IN 4. CASE
14 if r>g:
15     return (b-r)*(1-B_D) + (r-g)*(1-B_D/2) + g
16
17 #IN 5. CASE
18 return (b-g)*(1-B_D) + g
```

Tabuľka 1: Ilustrácia práce algoritmu pre farbu, ktorá vyhovuje podmienke č.4.

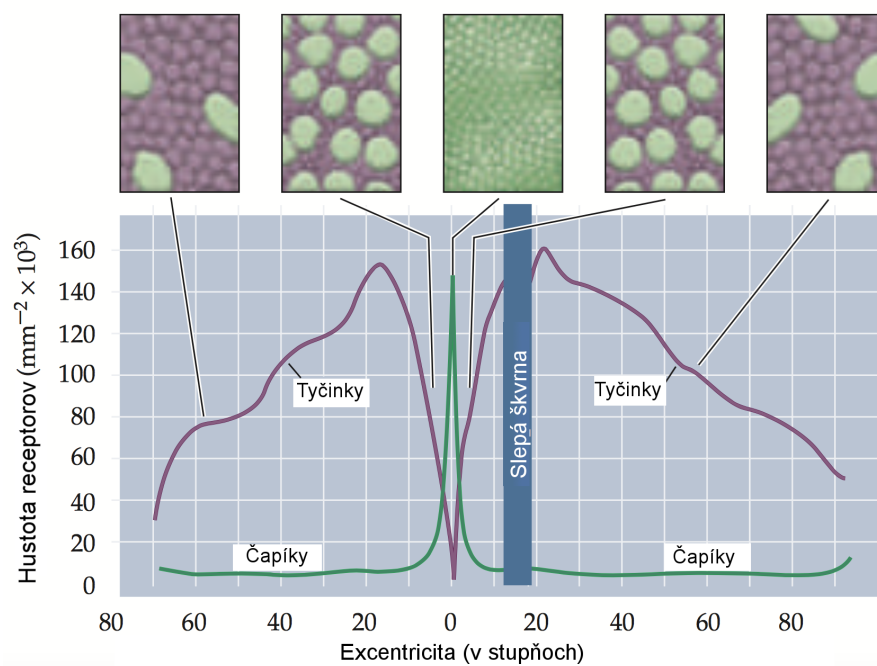
			+0
			+0
			$+0,1*(1-b\_d)$
			$+0,1*(1-b\_d)$
			$+0,1*(1-b\_d/2)$
			$+0,1*(1-b\_d/2)$
			$+0,1*(1-b\_d/2)$
			+0,1
			+0,1
			+0,1
červená zložka	zelená zložka	modrá zložka	svietivosť

### 5.3.2 Vákovanie intenzity svietivosti periférne vnímaných prvkov stimulu na celkovú vnímanú svietivosť

Poslednou prekážkou v úspešnom predpovedaní referenčnej krivky je problém nerovnomerných príspevkov jednotlivých častí rozhrania k celkovej vnímanej svietivosti. Tento problém vzniká nerovnomerným rozložením svetlocitlivých buniek na sietnici oka (obr. 6) [12]. Vďaka tomuto rozloženiu máme veľmi ostré videnie v bode, na ktorý sa priamo pozeráme, a to isté platí aj pre vnímanú svietivosť.

Z tohto dôvodu, je súčasťou modelu reakcií zreničky aj parameter sigma normálneho rozdelenia, ktoré má za úlohu simulovať rozloženie svetlocitlivých buniek v oku. Pomocou funkcií knižnice NumPy pre jazyk Python vieme získať N-rozmernú maticu hodnôt, pre ktoré platí, že majú 2D normálne rozloženie a ich celkový súčet je 1. Pokiaľ si zvolíme maticu rovnakých rozmerov ako maticu intenzít svietivosti jednotlivých častí obrazovky, (ideálne maticu rozmerov rozlíšenia obrazovky), môžeme vynásobiť každý prvok v matici intenzít s príslušným prvkom v matici normálneho rozdelenia. Výsledkom tejto operácie je matica, ktorej súčet jednotlivých prvkov je intenzita vnímanej svietivosti z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$  za predpokladu, že matica svietivostí obsahovala hodnoty z rovnakého intervalu.

Trénovanie parametra sigma, ako voliteľná súčasť kalibračnej procedúry predstavuje zobrazenie série viacerých stimulov s čiernym pozadím a bielym kruhom uprostred, do ktorého sa človek pozerá, a ktorý postupne mení svoju veľkosť. Paralelne so zmenšovaním polomeru kruhu klesá vnímaná svietivosť stimulu a úmerne



Obr. 6: Anatomické rozloženie tyčínok a čapíkov v oku. Zdroj: [12])

tomu narastá dilatácia zreničky. Funkcia vhodnosti je veľkosť chyby predpovede šírky zreničky, ktorá vznikla pri výpočte vnímanej svetivosti s použitím konkrétnej hodnoty parametra sigma. Optimálny parameter sigma, nájdeme ľubovoľným gradientným optimalizačným algoritmom, keďže funkcia vhodnosti nemá viacero lokálnych extrémov.

Musíme podotknúť, že tréning parametra sigma nie je jednoduché a z kalibračnej procedúry sme ho neskôr vyradili v záujme skrátenia trvania kalibrácie. Parameter sigma sa tiež dá približne vypočítať na základe veľkosti rozsahu zabraného zorného uhla monitorom. V našej práci sme na základe predstavenej kalibračnej metódy dospeli ku konštatne zvolenému parametru  $\sigma = 3,64$ .

Implementácia váhovania svetivosti prvkov rozhrania je dôležitá predovšetkým, ak sú tieto prvky vo vzájomnom kontraste. Obr. 7 ilustruje situáciu, kedy nemožno počítať vnímanú svetivosť stimulu bez váhovania intenzity svetivosti.





Obr. 7: Jednoduché rozhranie obsahujúce kontrastné prvky. Pri čítaní textu A predpokladáme širšiu zreničku ako pri čítaní textu B. Dôvodom je rôzna svietivosť pozadia v konkrétnych častiach rozhrania.

#### 5.4 Kroky metódy určovania kognitívnej záťaže

1. Vytvorenie snímky aktuálne zobrazenej obrazovky
2. Určenie aktuálneho bodu fixácie pohľadu
3. Získanie referenčnej hodnoty šírky zreničky na základe vytvorenej snímky obrazovky a fixácie pohľadu v nej
4. Získanie skutočne nameranej hodnoty šírky zreničky
5. Odpočítanie referenčnej hodnoty šírky zreničky od skutočnej nameranej
6. Vydelenie výsledku rozsahom dilatácie na základe svietivosti (alebo na základe kognitívnej záťaže, ak je takýto rozsah dostupný)
7. Agregácia každého výsledku z kroku 6 do spojitej funkcie
8. Identifikácia úrovni kognitívnej záťaže (podľa hodnôt v spojitej funkcii), nájdenie zaujímavých extrémov
9. Orezanie funkcie a priradenie získaných intervalov k samostatným úlohám =

určenie kognitívnej záťaže úloh

### 5.5 Realizácia metódy nástrojom na používateľské štúdie

V rámci práce sme implementovali nástroj na vyhodnocovanie experimentov založený na nami navrhnutej metóde. Program napísaný v programovacom jazyku Python v.2.7.10, je schopný hromadne vyhodnocovať ľubovoľné experimenty vykonané v rámci infraštruktúry UXR<sup>3</sup>, ktorá spravuje a umožňuje vykonávať experimenty v laboratóriách fakulty.

Pre korektné vyhodnotenie kognitívnej záťaže testovaných aplikácií si naša implementácia vyžaduje .csv súbor s dátami vyprodukovanými okulometrom, .csv súbor s udalosťami zasielanými do databázy UXR počas vykonávania experimentu a videosúbor so záznamom obrazovky počas vykonávania experimentu. Všetky tieto súbory poskytuje infraštruktúra UXR po každom úspešne vykonanom experimente pre každého participanta zvlášť. Nástroj dokáže v jednom behu vyhodnotiť ľubovoľný počet experimentov.

#### 5.5.1 Účel a funkcionálnosť nástroja

Nástroj sa môže použiť ako interaktívna aplikácia na post-experimentálne vizuálne sledovanie práce jednotlivých participantov alebo ako nástroj produkujúci .csv exporty obsahujúce najdôležitejšie informácie o kognitívnom zaťažení a iných udalostiach zaznamenaných počas experimentu, ktoré sú vhodné pre ďalšie vyhodnocovanie. Oba spôsoby použitia sa môžu efektívne skombinovať a používateľ nástroja môže počas interaktívneho módu pridávať ľubovoľné poznámky, udalosti a časové značky, ktoré sa zapíšu do exportovaného súboru a môžu byť nápomocné pri následnom vyhodnovení.

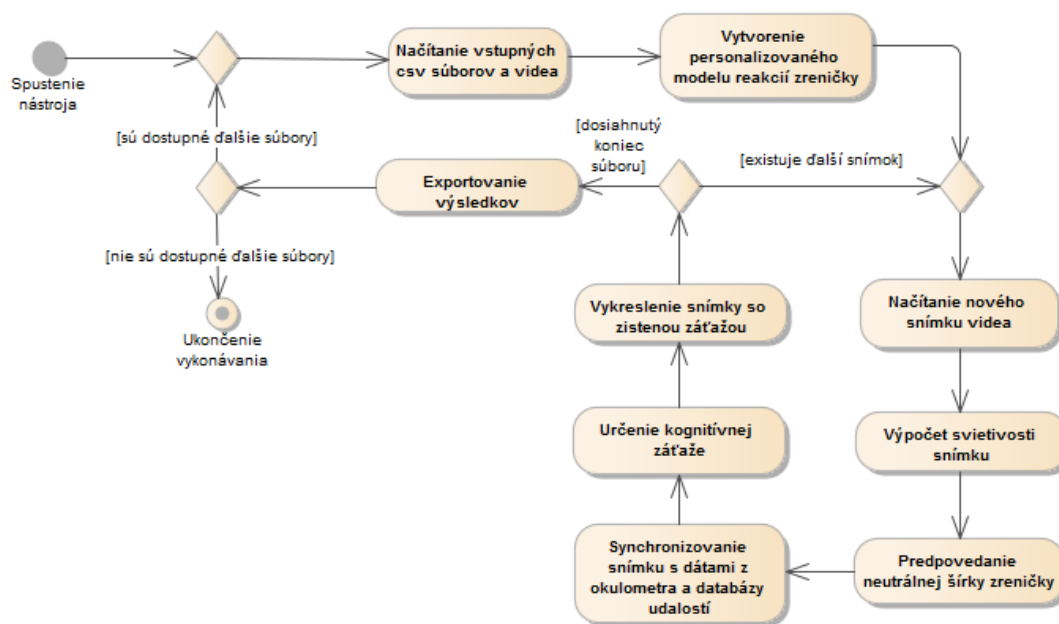
Mechanizmus manuálneho značkovania udalostí umožňuje experimentátorom doplniť udalosti chýbajúce v priloženom .csv dokumente, ktoré nemohli byť automaticky ukladané do databázy z dôvodu, že sa v experimente pracovalo s aplikáciami, ktoré nemôžeme alebo nechceme doplniť o mechanizmus automatického zasielania UXR udalostí.

---

<sup>3</sup>UXR infraštruktúra fakulty <http://ux.fiit.stuba.sk>  
<http://uxlab.fiit.stuba.sk/UxLabWebAppTest>

### 5.5.2 Základné princípy relizácie metódy

Dôležitou vlastnosťou nástroja je, že nepotrebuje žiadne dodatočné snímky obrazoviek, ktoré boli zobrazené pri vytvorení udalosti (napríklad načítanie novej úlohy s novým rozhraním), ako tomu bolo v prvých verziách nástroja. Nástroj predpokladá, že .csv súbor obsahuje udalosti z kalibračnej procedúry. Tieto udalosti spracuje a pred začatím spracovávania experimentu každého z participantov si namodeluje jeho vlastný model reakcií zreničky. S vytvoreným modelom môže nástroj začať spracovávať dáta získané počas experimentu, podľa diagramu na obr. 8.



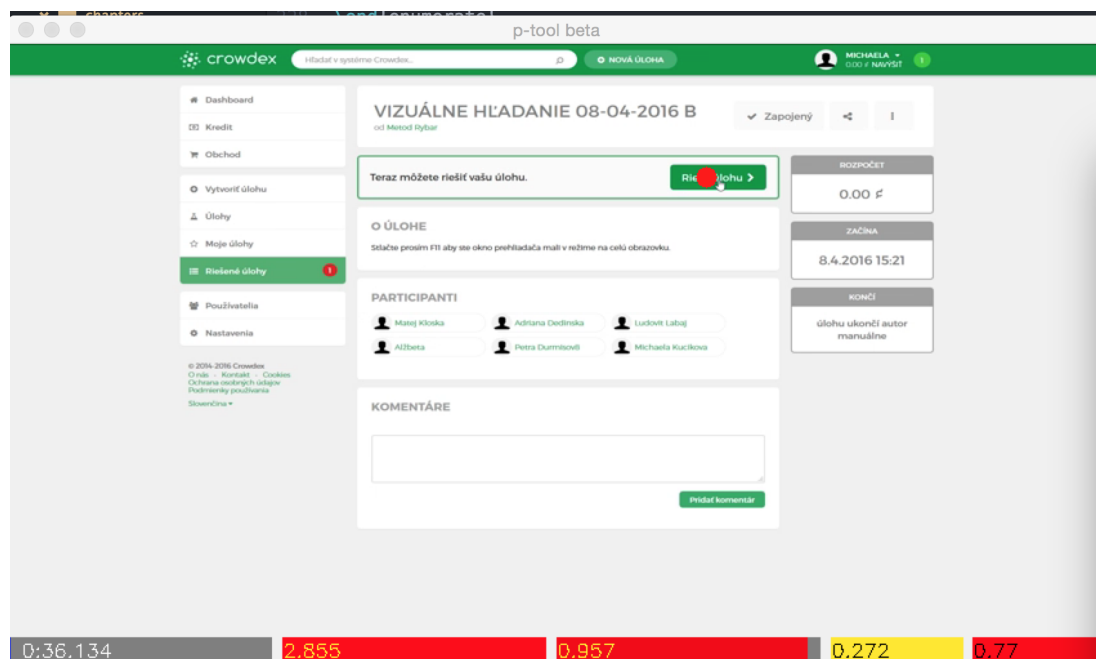
Obr. 8: Diagram aktivít základnej koncepcie spracovávania dát v experimentoch.

### 5.5.3 Ukážka práce s nástrojom

Na obr. 9 je zobrazená situácia, kedy participant dostal pokyn začať úlohu. Nástroj vykresľuje červeným kruhom zaznamenanú fixáciu pohľadu participanta, priamo na prehrávaný videozáznam. Ako je vidieť, fixácia sa nachádza na tlačidlo « začať úlohu », na ktorom sa nachádza aj kurzor myši. Nájdenie tohto elementu pravdepodobne vyvolalo u používateľa značnú kognitívnu záťaž, ktorej aktuálna veľkosť je podľa druhého poľa sprava 0,272 (27,2 % rozsahu dilatácie), pričom najvyššia

## 5 METÓDA VYHODNOCOVANIA KOGNITÍVNEJ ZÁŤAŽE

zaznamenaná kognitívna záťaž v posledných troch sekundách je podľa prvého pola sprava 0,77 (77 % rozsahu dilatácie), čo môžeme vyhodnotiť ako nadpriemerne namáhavú úlohu. Farba týchto dvoch polí odráža intenzitu kognitívnej záťaže v spektre od zelenej (malá kognitívna záťaž) cez žltú (stredná kognitívna záťaž) až po červenú, ktorá indikuje vysokú kognitívnu záťaž.



Obr. 9: Grafické rozhranie nástroja so záznamom experimentu. Význam polí v dolnej časti, zľava: čas od začiatku experimentu, aktuálna šírka zreničky, vypočítaná svietivosť aktuálnej obrazovky, aktuálne kognitívne zaťaženie, maximálne kognitívne zaťaženie v posledných troch sekundách.

Tabuľka 2: Ilustračné zobrazenie možných údajov v exportovanom súbore.

čas (ms)	udalosť	lum	záťaž	predpo. šírka zreničky	skuto. šírka zreničky	fix. (os x)	fix. (os y)
29134	spustenie	0.9546	0.54385	2.67945	3.03312	0.60221	0.1185
29200	-	0.9546	0.49657	2.67945	3.00237	-1.0	-1.0
29267	úspech	0.9546	0.45951	2.67945	2.97827	0.59594	0.11816
29334	-	0.9546	0.45458	2.67945	2.97507	0.6123	0.12298

Okrem kvalitatívneho vyhodnotenia, môže experimentátor pridávať aj udalosti v záujme kvantitatívneho vyhodnocovania. V tomto momente je celkom vhodné

zapísať udalosť spustenia úlohy, ktorú nebolo možné automaticky odoslať z testovanej aplikácie, keďže k jej zdrojovému kódu zostavovateľ experimentu nemal prístup. Túto aktivitu môžeme vyvolať pomocou stlačenia tlačidla klávesnice, pričom text udalosti, ako aj klávesu, ku ktorej sa bude viazať, vieme preddefinovať v konfiguračnom súbore. Experimentátor má rovnako možnosť zadať ľubovoľný text udalosti v konzole nástroja po stlačení klávesy R. Výstupný exportovaný súbor môže obsahovať záznamy ako v tabuľke 2.



## 6 Experimenty a overenie metódy

### 6.1 Prípravné experimenty

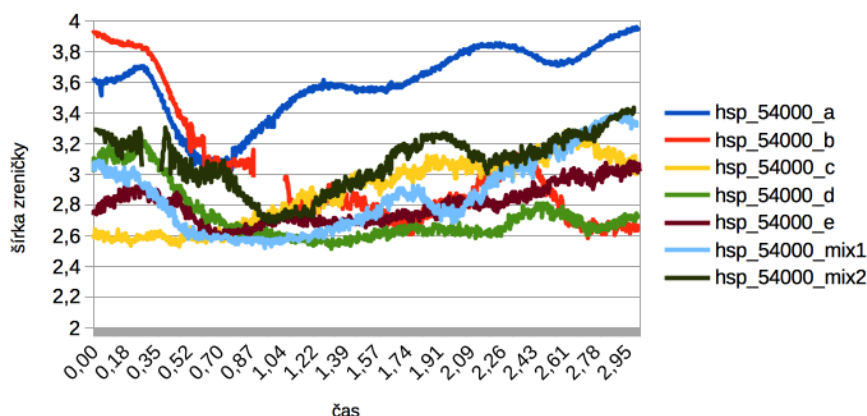
V rámci prípravných experimentov sme sa snažili nájsť odpovede na základné otázky, ktoré nám neskôr pomohli rozhodnúť sa akým smerom pripravovať zostavenie metódy určovania kognitívnej záťaže. Po preštudovaní viacerých renomovaných prác sme zistili, že oblasť v ktorej chceme overiť stanovenú hypotézu: „Sledovaním odchýlky predpovedanej dilatácie zreničky vieme vyhodnocovať kognitívnu záťaž počítačových aplikácií“, vyžaduje vytvorenie nových, dosiaľ neexistujúcich metód a techník, ktoré sa neskôr stali súčasťou našej ucelenej metódy navrhutej v predchádzajúcej kapitole. Tento proces nebol priamočiary a spočiatku sme strávili množstvo času na príprave a vykonávaní experimentov, ktoré nikam nevedli.

#### 6.1.1 Zamietnutie použitia formuly HSP

Formula na výpočet svietivosti farieb HSP (4) spomenutá v kapitole 3, v ktorej premenné  $r$ ,  $g$ ,  $b$  predstavujú intenzitu zastúpenia jednotlivých farebných zložiek modelu rgb, spočiatku ako jediná rešpektovala nevyrovnanosť vo vnímaní svietivosti rôznych farieb podľa teórie trichromatizmu [13]. Na základe toho sme sa rozhodli overiť jej použiteľnosť v predpovedaní šírky zreničky. Vytvorili sme niekoľko prázdnych stimulov s predpočítanou farbou pozadia tak, aby mali rovnakú predpokladanú svietivosť. Tieto stimuly sme následne zobrazili účastníkom a očakávali rovnakú šírku zreničky pre každú z takto určených farieb.

$$svietivosť = \sqrt{0,299r^2 + 0,587g^2 + 0,114b^2} \quad (4)$$

Už vo fáze pilotných experimentov sme odhalili veľkú variáciu medzi nameranými šírkami zreničiek pre tieto stimuly. Obr. 10 ilustruje túto variáciu na skutočných dátach. Pripomíname, že nutná podmienka použiteľnosti formuly pre predpovedanie dilatácie zreničky je aspoň približný prekryv farebných kriviek minimálne v závere časového intervalu.



Obr. 10: Porovnanie nameranej šírky zreničky pre jednotlivé farby s rovnakou svietivosťou určenou formulou HSP.

### 6.1.2 Zamietnutie prístupu ignorovania zmien vnímanej svietivosti periférnych častí

Spočiatku sme uvažovali nad myšlienkou, že vyplnenie zorného uhla monitorom je dostatočne malé na to, aby bolo nutné uvažovať váhovanie intenzity svietivosti periférne vnímaných častí stránky. Napriek teoretickým zisteniam, ktoré sme opísali v podkapitole 3.3, sme vytvorili experiment, v ktorom sme chceli zistiť skutočnú prítomnosť tohto javu. Experiment sa skladal zo série stimulov zobrazujúcich čierno-biele šachovnicové pole s čiernym štvorcem uprostred obrazovky. Priemer jednotlivých štvorcov sa postupne zmenšoval, čo spôsobovalo približovanie okolitých bielych štvorcov k bodu fixácie uprostred obrazovky. Pomer zobrazených bielych a čiernych štvorcov zostával nemenný - takže ak by táto hypotéza platila, nemenila by sa ani vnímaná svietivosť, a teda ani šírka zreničky. Už pri pilotných experimentoch sa ukázalo, že zrenička participantov sa počas procesu zmenšovania polomerov štvorcov zužovala, čo bolo následkom zvyšujúcej sa vnímanej svietivosti.

## 6.2 Hľadanie algoritmu na určenie svietivosti farieb

V záujme progresívnejšieho postupu v procese hľadania uspokojivej formuly na určovanie svietivosti farieb sme začali vykonávať experimenty, v ktorých sa participanti pozerali na prázdne obrazovky s pozadím základných rgb farieb. Základné



rgb farby sú také, ktoré ak majú nejakú zo zložiek rgb prítomnú, tak len v plnom rozsahu. Počet týchto farieb je teda  $2^3$  vrátane bielej, ktorá má prítomnú každú zo zložiek a vrátane čiernej, ktorá nemá prítomnú ani jednu zložku. Tento experiment pozostával z dvoch sérií projekcie týchto farieb, pričom prvá séria mala odlišné poradie zobrazených farieb ako druhá. Každá farba bola zobrazená po dobu siedmych sekúnd, pričom ako referenčnú zreničku pre každú farbu sme uvažovali iba priemer z posledných troch sekúnd. Prvé štyri sekundy sú ignorované v záujme dokonalého upokojenia zreničky po zmene stimulu. Priebeh takýchto experimentov je zobrazený na obr. 11.



Obr. 11: Priebeh experimentu na určenie svietivosti farieb.

Do tohto experimentu sme súhrnne zapojili približne 70 participantov, z čoho vzišlo 53 použiteľných meraní. Zvyšné merania museli byť vyradené z rôznych technických príčin ako poškodené či chýbajúce dáta, ktoré by znemožnili alebo ovplyvnili vyhodnotenie. V datasete máme nakoniec 106 referenčných meraní základných rgb farieb - každý participant sledoval farby v dvoch sériách. V tabuľke 3 prezentujeme súhrnné výsledky experimentu. Všimnime si výrazne širšiu zreničku pri modrej a fuchsiovej farbe (`#ff00ff`).

Na základe analýzy týchto meraní sme vyvinuli algoritmus na výpočet svietivosti farieb vysvetlený v podkapitole 5.3.1. Pre každého participanta sme potom na základe osobného modelu reakcií zreničky odmerali veľkosť chyby predpokladanej zreničky. Kladná chyba znamená, že algoritmus spolu s referenčným modelom

Tabuľka 3: Namerané šírky zreničiek pre základné rgb farby

farba	medián (mm)	štandardná odchýlka	0.25 kvartil	0.75 kvartil	vzoriek
#ff0000	2,60	0,34	2,40	2,79	106
#00ff00	2,62	0,36	2,43	2,82	106
#0000ff	2,83	0,41	2,58	3,10	106
#00ffff	2,56	0,36	2,39	2,76	106
#ff00ff	2,74	0,36	2,58	2,89	106
#ffff00	2,64	0,35	2,39	2,79	106
#ffffff	2,62	0,35	2,47	2,80	212
#aaaaaa	2,85	0,42	2,64	3,04	106
#000000	3,69	0,42	2,65	3,04	106

predpovedali užšiu zreničku, naopak, záporná chyba vzniká predpovedaním širšej zreničky ako skutočne nameranej. Referenčná zrenička pre modrú farbu vstupuje do algoritmu priamo a preto nieje zaradená vo vyhodnotení. Ako môžeme vidieť v tabuľke 4, chybovosť navrhnutého algoritmu je väčšinou menšia ako 5 % rozsahu dilatácie, čo považujeme za veľmi dobrý výsledok. Z výsledkov je jasné, že variabilita dilatácie zreničky je veľmi nestabilná, čo spôsobuje o niečo väčšiu štandardnú odchýlku s veľkosťou 16 % rozsahu dilatácie. Horný a dolný kvartil chyby je veľmi vyvážený, čo naznačuje, že chybovosť má normálne rozdelenie a výber mediánu ako referenčnej hodnoty je prípustný.

Tabuľka 4: Chyby (podľa rozsahu dilatácie jednotlivých participantov) predpokladaných zreničiek našou metódou.

farba	chyba	štandardná odchýlka	0.25 kvartil	0.75 kvartil	vzoriek
#ff0000	-0,02	0,19	-0,10	0,08	106
#00ff00	0,03	0,21	-0,06	0,13	106
#00ffff	-0,03	0,19	-0,09	0,05	106
#ff00ff	0,03	0,18	-0,07	0,12	106
#ffff00	0,01	0,17	-0,10	0,10	106
#ffffff	0,04	0,10	-0,03	0,08	212
#aaaaaa	-0,10	0,15	-0,16	-0,01	106
#000000	0,03	0,13	-0,04	0,10	106

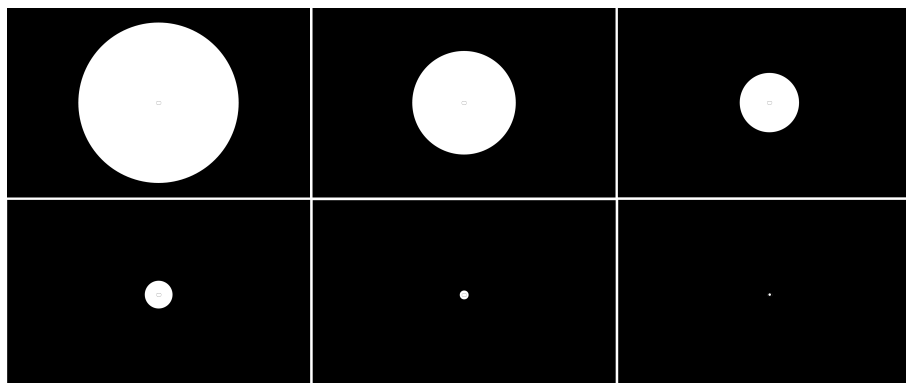
Metrika, ktorou v tomto experimente sledujeme chybovosť, je v experimentoch sledujúcich kognitívnu záťaž ukazovateľom prítomnej kognitívnej záťaže. Ak sa

pozrieme na túto metriku ako ukazovateľ kognitívnej záťaže už v tomto experimente, získame očakávaný a pre platnosť hypotézy nutný výsledok - naša metóda nedetekovala kognitívnu záťaž pri prázdnych farebných stimuloch.

Veľmi dôležitá poznámka pre budúce replikácie tohto experimentu je jeho náročnosť na zrak. Participanti deklarovali nepríjemné prepínanie medzi jednotlivými farebnými stimulmi, čo sme sa snažili kompenzovať plynulým prechodom v trvaní 0,5 s namiesto okamžitej zmeny stimulu.

### 6.3 Hľadanie optimálneho parametru sigma normálneho rozdelenia

Metódu kalibrácie optimálneho parametru sigma sme vysvetlili v rámci navrhutej metódy v podkapitole 5.3.2. Participanti podobne ako v predchádzajúcom experimente sledovali stred obrazovky a postupne sa zmenšujúci biely kruh uprostred obrazovky (pozri obr. 12).



Obr. 12: Stimuly v experimente na tréning parametru sigma normálneho rozdelenia svetlocitlivých buniek v oku.

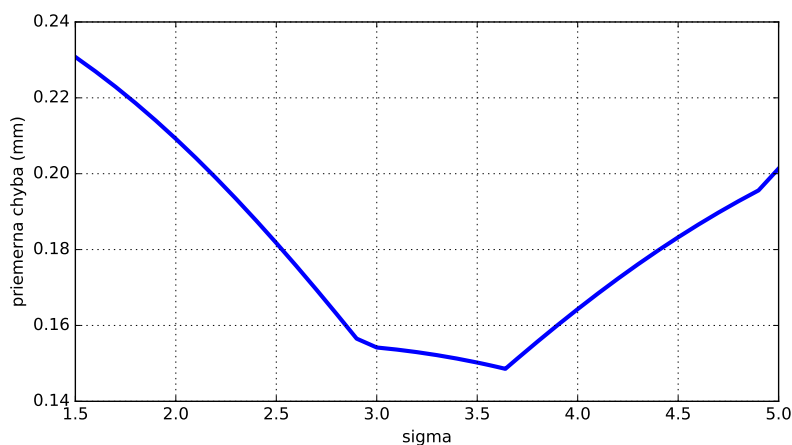
Tento experiment predchádzal experimentu na zistenie svietivosti farieb a získali sme teda 53 použiteľných meraní od rovnakých participantov. Zistili sme, že variabilita dilatácie zreničky je príliš vysoká na to, aby sme mohli spoľahlivo natréňovať jedinečný parameter sigma pre každého človeka len na základe kalibrácie s jednou sériou. Spoľahlivá kalibrácia by musela zahŕňať viac sérií, čo sme v záujme skrátenia časových nárokov na participantov zamietli.

Tabuľka 5: Medián zreničky pre jednotlivé stimuly s centralizovanými kruhmi.

polomer kruhu (px)	medián (mm)	štandardná odchýlka	0.25 kvartil	0.75 kvartil	vzoriek
1016	3,02	0,46	2,78	3,32	53
656	3,22	0,48	2,94	3,51	53
376	3,40	0,52	3,23	3,71	53
176	3,77	0,62	3,47	4,33	53
56	3,96	0,69	3,62	4,52	53
16	4,05	0,78	3,55	4,65	53

53 vzoriek však bohate stačí na tréovanie univerzálneho parametra sigma, takže sme zistili referenčnú šírku zreničky pre jednotlivé stimuly v kalibračnej procedúre. Tu sa podľa očakávania zistila postupne rozširujúca zrenička paralelne so zmenšujúcim sa polomerom bielych kruhov (pozri tabuľka 5).

Na základe týchto dát sme spustili tréovanie optimálneho parametra sigma. Parameter sigma normálneho rozdelenia v implementácii knižnice NumPy neprodukuje významne odišnejšie matice pre presnosť vyššiu ako na dve desatinné miesta. Z tohto dôvodu sme na tréovanie parametra sigma použili iba cyklické prechádzanie všetkých hodnôt parametra sigma v intervale predpokladaného globálneho minima funkcie sigmy a produkovanej chyby (obr. 13). Takto sme na základe kalibračných stimulov získali optimálnu univerzálnu sigmu (3.64), ktorú sme použili vo vyhodnocovaní ďalších experimentov.



Obr. 13: Vývoj chyby v predikovaní zreničky s rastúcim parametrom sigma.

## 6.4 Overenie funkčnosti filtrácie vplyvu svietivosti

Tretou fázou hlavnej skupiny experimentov bol experiment overenia funkčnosti filtrácie vplyvu svietivosti komplexného stimulu, teda hlavného predpokladu našej metódy detekcie kognitívnej záťaže. Participanti sa v tomto experimente pozerali na sériu obrazoviek s reálnymi rozhraniami webových aplikácií a portálov zo slovenského prostredia. Do série boli vybrané svetlé aj tmavé rozhrania, rozhrania obsahujúce obrázky či rozhrania obsahujúce kontrastné prvky (svetlý obsah, tmavé menu). Každému stimulu sme najskôr znížili rozlíšenie na 400 x 400 px. Štvorcové rozlíšenie sa dá priamo aplikovať na štvorcovú maticu váh normálneho rozloženia. Táto transformácia širokouhlého stimulu na štvorcový navyše vyvoláva rovnaký efekt, ako keby sme namiesto kruhovo orientovanej matice váhovania normálneho rozloženia použili elipsovito orientované rozloženie, o ktorom sa domnievame, že môže lepšie simulovať skutočné videnie ľudí.

Experiment sa veľmi podobá zisťovaniu svietivosti farieb, vyžaduje však namiesto výpočtu svietivosti jednej farby výpočet svietivosti pre všetkých 160000 pixelov a následne prenášobenie každej hodnoty s príslušnou váhou z matice normálneho rozdelenia. V tabuľkách 6 a 7 sa nachádzajú výsledky v rovnakom formáte ako pri experimente overovania svietivosti farieb.

Tabuľka 6: Namerané šírky zreničiek pre jednotlivé skutočné rozhrania

stimul	medián (mm)	štandardná odchýlka	0.25 kvartil	0.75 kvartil	vzoriek
1	2,90	0,43	2,70	3,12	53
2	3,05	0,38	2,78	3,20	53
3	2,80	0,37	2,67	3,01	53
4	2,83	0,37	2,67	3,10	53
5	2,86	0,34	2,64	3,04	53
6	2,96	0,39	2,70	3,14	53
7	2,84	0,40	2,61	2,94	53
8	3,39	0,52	3,12	3,69	53
9	2,87	0,38	2,70	3,10	53
10	2,87	0,39	2,65	3,06	53

Na záver vyhodnotenia tejto skupiny experimentov, vyjadrujeme spokojnosť s dosiahnutými výsledkami. Naša metóda predikcie zreničky pre komplexné stimuly

Tabuľka 7: Chyby (podľa rozsahu dilatácie jednotlivých participantov) predpokladaných zreničiek našou metódou.

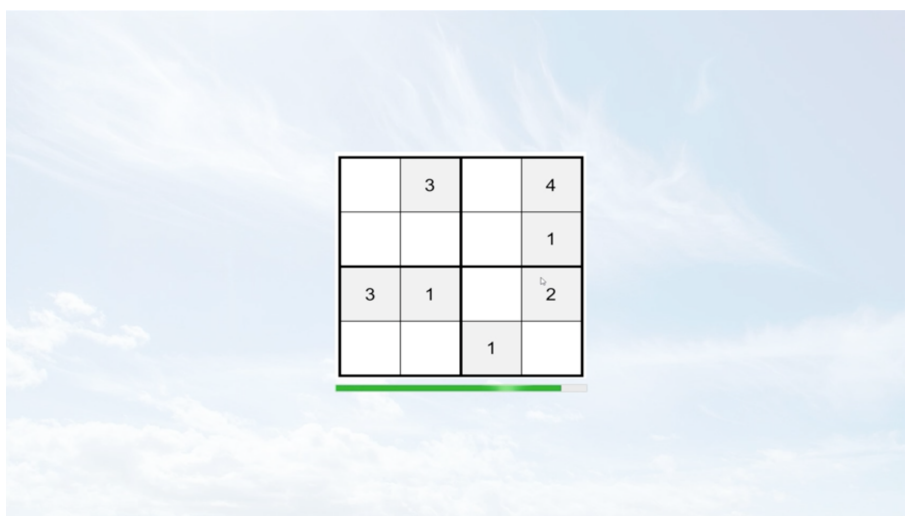
stimul	chyba	štandardná odchýlka	0.25 kvartil	0.75 kvartil	vzoriek
1	0,15	0,22	0,05	0,33	53
2	0,13	0,19	0,05	0,26	53
3	0,13	0,17	0,06	0,22	53
4	0,08	0,17	-0,01	0,23	53
5	0,11	0,15	0,00	0,19	53
6	0,10	0,18	0,03	0,19	53
7	0,06	0,13	-0,04	0,13	53
8	-0,04	0,21	-0,15	0,08	53
9	0,04	0,18	-0,05	0,12	53
10	-0,01	0,15	-0,06	0,07	53

zložená z modelu reakcií zreničky, algoritmu na výpočet svietivosti farieb a váhovania intenzity vnímanej svietivosti periférne vnímaných prvkov, dokáže predpovedať šírku zreničky aj v najhorších prípadoch s chybou 15 % rozsahu dilatácie. Priemerný rozsah dilatácie participantov dosahuje 1 mm, čo znamená, že dokážeme predpovedať šírku zreničky človeka s priemernou chybou menšou ako 0.15 mm. Kvalitu tohto výsledku umocňuje zistený fakt, že rozsahy dilatácie všetkých testovaných participantov boli v rámci tejto bakalárskej práce rôznorodé, podobne ako v práci skúmajúcej rozsahy dilatácie - [6]. Naša metóda sa teda dokáže vysporiadať aj s variabilitou tohto druhu. Rovnako treba podotknúť, že najvyššie namerané chyby sa vyskytovali predovšetkým na stimuloch zo začiatku série prezentovaných stimulov, čo môže byť dôsledkom prítomnej kognitívnej záťaže vyvolanej náhlou prítomnosťou obsahu s významom.

V budúcich replikáciách tohto experimentu navrhujeme určovať poradie zobrazovaných stimulov náhodne a rovnako nepoužiť stimuly s príliš pútavým obsahom, ktorý môže lákať pozornosť participantov a zvyšovať kognitívnu záťaž, spôsobujúcu dodatočné rozšírenie zreničky a znižujúcu presnosť vyhodnotenia.

## 6.5 Overenie schopnosti detekovať prítomnosť kognitívnej záťaže

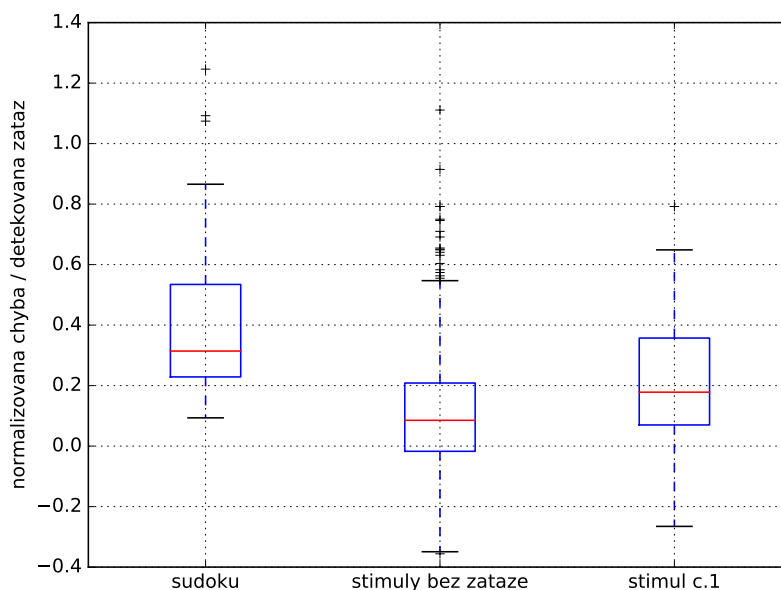
Schopnosť detekovať kognitívnu záťaž sme testovali na podmnožine participantov z predchádzajúcich experimentov (z technických príčin neboli otestovaní všetci), pričom sme získali 40 použiteľných meraní. Participantí v tomto experimente riešili zjednodušené sudoku, ktorého stimul je na obr. 14.



Obr. 14: Stimul zobrazený pri experimente detekcie kognitívnej záťaže.

V záujme udržania pohľadu participantov na zobrazený stimul sme im dali pokyn, aby si priebežné výsledky nikam nezapisovali a udržiavali iba v pamäti. Táto požiadavka ešte viac zvýšila kognitívnu záťaž úlohy. Na obr. 15 prezentujeme výsledky detekcie kognitívnej záťaže v porovnaní s celkovou chybovosťou komplexných stimulov, bez predpokladu kognitívnej záťaže a tiež v porovnaní s chybovosťou prvého stimulu, kde bola zaznamenaná najvyššia chyba.

Výsledky tohto experimentu považujeme za uspokojivé, pretože preukázali platnosť stanovenej hypotézy: „Sledovaním odchýlky predpovedanej dilatácie zreničky vieme vyhodnocovať kognitívnu záťaž počítačových aplikácií“. Odporúčaním pre budúce replikácie experimentu je vytvorenie vhodnejších referenčných stimulov so zníženým rizikom neželanej kognitívnej záťaže, ako tomu bolo pravdepodobne pri stimule č. 1 z predchádzajúceho experimentu. Najvhodnejším stimulom by mohol byť rovnaký stimul zobrazujúci sudoku, avšak s písmenami X nahradzujúcimi čísla



Obr. 15: Výsledky detekcie kognitívnej záťaže pri počítaní zjednodušeného sudoku.

definujúce úlohu z dôvodu zachovania rovnakých podmienok svietivosti.

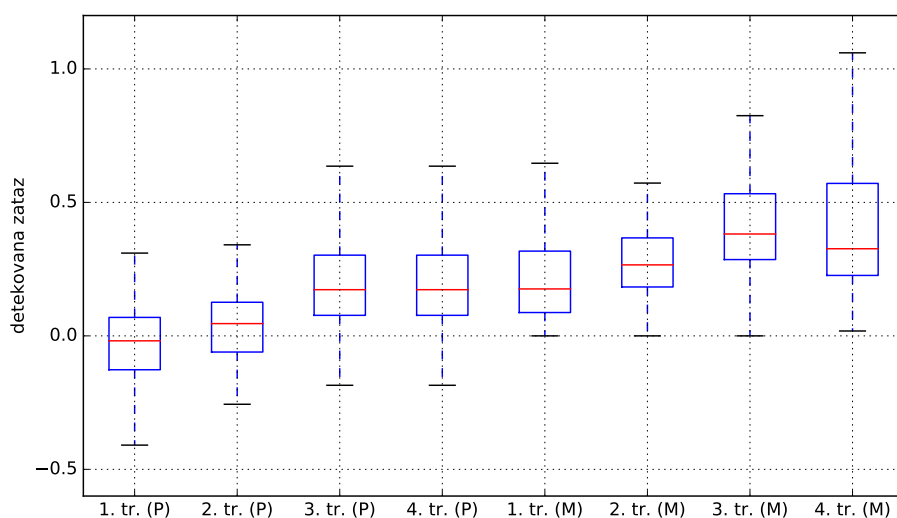
## 6.6 Overenie schopnosti klasifikovať viaceré úrovne kognitívnej záťaže

V úplnom závere práce sme sa pokúsili zistiť, či je naša metóda schopná detekovať rôzne úrovne kognitívnej záťaže a následne spätne klasifikovať vykonané úlohy do tried podľa ich náročnosti. Tento experiment sa snažil replikovať experiment vykonaný v práci [15], s rozdielmi aplikácie predikcie zreničky podľa našej metódy, zatiaľ čo v replikovanom experimente si autori predikovanú zreničku zistili pred každou úlohou zobrazením svietivostne identických stimulov. Toto zjednodušenie predstavujúce neuskutočniteľnú kalibráciu v kontexte testovania skutočných a nijak nemodifikovaných aplikácií sa pravdepodobne podpísalo na horších výsledkoch pôvodnej metódy oproti našej, keďže naša kalibrácia je síce univerzálna, ale omnoho robustnejšia a teda aj presnejšia.

20 participantov sa zúčastnilo experimentu, ktorý sa skladal zo zobrazenia 19 ma-



tematických úloh, pričom každá úloha sa skladala z postupného zobrazenia štyroch čísel, ktoré si mal participant zapamätať a nakoniec určiť ich súčet výberom jednej zo štyroch možností. Dostupné možnosti boli predpripravené tak, aby nebolo možné vybrať správnu iba počítaním súčtu posledných cifier. Úlohy sa vopred klasifikovali do štyroch tried podľa ich náročnosti. Prvá trieda obsahovala iba binárne čísla. Druhá trieda úloh obsahovala ľubovoľné jednociferné čísla, tretia dvojciferné a štvrtá trojciferné čísla. Prvé tri úlohy boli vopred určené ako tréningové, aby sa participanti oboznámili so spôsobom vykonávania úloh, čo by predstavovalo nežiadanú kognitívnu záťaž. Vo zvyšných 16 úlohách boli v neusporiadanom poradí vykonávané po štyri úlohy zo všetkých štyroch tried náročnosti. Na pozadí úloh boli navyše zobrazené jednotlivé obrazovky reálnych webových aplikácií z experimentu overovania funkčnosti filtrácie vplyvu svietivosti komplexných stimulov.



Obr. 16: Výsledky detekcie úrovni kognitívnej záťaže pre rôzne náročné úlohy. Vľavo metóda priemerov (P), vpravo metóda maxím (M).

Obrázok 16 prezentuje nameranú kognitívnu záťaž pre jednotlivé úlohy metódou priemernej identifikovanej záťaže v intervale siedmych sekúnd pred označením odpovede (vľavo), a tiež výsledky pomocou metódy maximálnej identifikovanej záťaže v rovnakom intervale (vpravo). Môžeme vidieť, že medián zreničky rastie významnejšie najmä počas prvých troch úrovní kognitívnej záťaže. Takmer žiadny rozdiel medzi treťou a štvrtou triedou napĺňa predpoklad vyslovený po zistení, že

náročnosť úlohy štvrtej triedy bola pre väčšinu participantov príliš veľká a zadané úlohy nedokázali vyriešiť, takže ich kognitívna aktivita sa po vzdaní úlohy mohla znížiť. Výsledky metódy, ktorá pracuje s maximálnou zaznamenanou kognitívnu záťažou sú dokonca nižšie pre úlohu, kde sa participant väčšinou vzdali riešenia ako pre úlohu nižšej náročnosti, ktorú vyriešili. Vypočítaná korelácia medzi náročnosťou úlohy a detekovanou kognitívnu záťažou bola v prípade metódy priemerov 0,797 a v prípade metódy maxim 0,659.

Výsledkom spätnej klasifikácie úloh podľa zistenej kognitívnej záťaže metódou priemerov, kde hranice definujúce príslušnosť k jednotlivým triedam boli dolný percentil, medián a horný percentil, bolo správne klasifikovanie úlohy v 8 zo 16 prípadov, chybná klasifikácia o jednu úroveň nastala v 7 zo 16 prípadov, jedenkrát sa klasifikátor pomýlil o dve triedy. Maximálna chyba o tri triedy nebola zaznamenaná ani v jednom z ôsmich možných prípadov. Ak pripustíme presnosť klasifikátora na presnosť +/- jedna trieda, fungoval správne pri 15 zo 16 úloh.

V závere vyhodnotenia vyjadrujeme spokojnosť s dosiahnutými výsledkami. V replikovanom experimente naša metóda dosiahla lepšie výsledky aj bez nutnosti narušenia práce kalibračnými vstupmi a vypočítaná korelácia preukázala existujúci vzťah medzi kognitívnu záťažou určenou našou metódou a náročnosťou úloh.

## 7 Zhodnotenie

Stanovenú hypotézu: „Sledovaním odchýlky predpovedanej dilatácie zreničky vieme vyhodnocovať kognitívnu záťaž počítačových aplikácií“ sme v našej práci skutočne preukázali ako platnú. Nami navrhnutá metóda predstavuje úplne nový spôsob testovania počítačových aplikácií a používateľského zážitku samotného. Z pohľadu variability výsledkov jednotlivých participantov naša metóda nijak neprekonáva existujúce prístupy vyhodnocovania náročnosti použitia počítačových aplikácií. Po zohľadnení výsledkov práce [4], kde sa preukázala aktivita očí ako najpresnejšia neintruzívna metrika kognitívnej záťaže, si však dovoľujeme tvrdiť, že by v budúcnosti mohla byť horúcim kandidátom pri výbere metódy na sumatívne testovanie počítačových aplikácií.

Z dosiahnutých výsledkov našej práce považujeme za najdôležitejšie odhalenie správania zreničky pri zobrazení jednotlivých farieb spektra rgb, metódu predikcie šírky zreničky na základe určenej svietivosti stimulu a modelu reakcií zreničky človeka, či metódu na kalibráciu parametra sigma, určujúceho normálne rozdelenie svetlocitlivých buniek v oku človeka.

Po vylepšení niektorých častí kalibrácie a experimentov ako takých, predpokladáme, že presnosť predikcie šírky zreničky jednotlivých participantov bude nižšia ako 5% vlastného rozsahu dilatácie, rovnako pre jednoduché ako aj komplexné stimuly. V záujme presnejšej kalibrácie navrhujeme v budúcnosti predĺžiť proces kalibrácie zo súčasných šiestich stimulov na dvojnásobok, teda 12 stimulov, ktorých svietivosť by sa nachádzala v svetlejšej polovici sivého spektra. Dôrazne odporúčame ponechať trvanie zobrazenia každého stimulu na minimálne 7 sekúnd. S takto dlhým intervalom zobrazovania stimulov trvá aj dvojnásobne dlhá procedúra kalibrácie menej ako dve minúty (84 sekúnd), takže by sa u participanta vzhľadom na jej krátkosť a jednoduchosť nemala objaviť nervozita ani iné nežiadúce vplyvy.

Ďalším odporúčaním je striktne náhodné usporiadanie komplexných stimulov v experimente overujúcom funkčnosť filtrácie vplyvu ich svietivosti na dilatáciu zreničky. Rovnako navrhujeme vyradiť z vyhodnotenia každý stimul, ktorý sa zobrazí v sérii tohto experimentu participantovi ako prvý, z dôvodu možnej zvýšenej kognitívnej aktivity.

V budúcnosti by sme sa chceli venovať výskumu možností detekovania kognitívnej

záťaže v podmienkach dokonalej filtrácie vplyvu svietivosti stimulu odstránením polarizačnej fólie z monitora a jej umiestnením iba pred jedno oko participanta. Takýto výskum môže vyprodukovať intruzívnu, no dokonalú metódu vhodnú na porovnanie s nami navrhnutou neintruzívnou metódou. Taktiež plánujeme zaradiť do štandardných štúdií kalibráciu našej metódy, čím by sme mohli postupne získať univerzálny dynamický model. Takýto model by mohol odpovedať na otázku variability parametra  $\sigma$  normálneho rozdelenia, ktoré definuje vplyv intenzity svietivosti periférnych fragmentov stimulov.

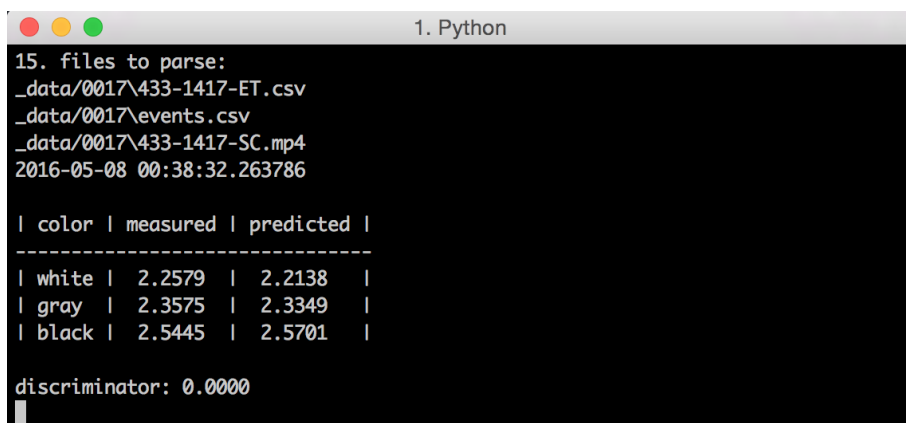
## Literatúra

- [1] Aga Bojko. *Eye tracking the user experience*. Rosenfeld Media, 2013. Chap. Eye Trackers and Other Necessary Resources, pp. 47–67.
- [2] H Bouma and LCJ Baghuis. “Hippus of the pupil: Periods of slow oscillations of unknown origin”. In: *Vision Research* 11.11 (1971), pp. 1345–1351.
- [3] Siyuan Chen and Julien Epps. “Automatic classification of eye activity for cognitive load measurement with emotion interference”. In: *Computer methods and programs in biomedicine* 110.2 (2013), pp. 111–124.
- [4] Siyuan Chen, Julien Epps, and Fang Chen. “A comparison of four methods for cognitive load measurement”. In: *Proceedings of the 23rd Australian Computer-Human Interaction Conference*. ACM. 2011, pp. 76–79.
- [5] Vera Demberg. “Pupillometry: the index of cognitive activity in a dual-task study”. In: *Proceedings of the 35th annual meeting of the cognitive science society (cogsci-13)*. URL <http://www.coli.uni-saarland.de/vera/ICApaper.pdf>. Vol. 1. 2013, pp. 2154–2159.
- [6] CJ Ellis. “The pupillary light reflex in normal subjects”. In: *British Journal of Ophthalmology* 65.11 (1981), pp. 754–759.
- [7] Karen Hollingsworth, Kevin W Bowyer, and Patrick J Flynn. “Pupil dilation degrades iris biometric performance”. In: *Computer vision and image understanding* 113.1 (2009), pp. 150–157.
- [8] Bruno Laeng, Sylvain Sirois, and Gustaf Gredebäck. “Pupillometry a window to the preconscious?” In: *Perspectives on psychological science* 7.1 (2012), pp. 18–27.
- [9] Sandra P Marshall. “The index of cognitive activity: Measuring cognitive workload”. In: *Human factors and power plants, 2002. proceedings of the 2002 IEEE 7th conference on*. IEEE. 2002, pp. 7–5.
- [10] Sebastiaan Mathôt and Stefan Van der Stigchel. “New Light on the Mind’s Eye The Pupillary Light Response as Active Vision”. In: *Current directions in psychological science* 24.5 (2015), pp. 374–378.
- [11] Marc Pomplun and Sindhura Sunkara. “Pupil dilation as an indicator of cognitive workload in human-computer interaction”. In: *Proceedings of the International Conference on HCI*. Citeseer. 2003, pp. 542–546.
- [12] D. Purves et al. “Anatomical distribution of rods and cones”. In: *Neuroscience, 3rd edition*. Sinauer Associates, 2004, pp. 244–245.

- [13] Alison K Surridge, Daniel Osorio, and Nicholas I Mundy. “Evolution and selection of trichromatic vision in primates”. In: *Trends in Ecology & Evolution* 18.4 (2003), pp. 198–205.
- [14] Barry Winn et al. “Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects”. In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 35.3 (1994), pp. 1132–1137.
- [15] Jie Xu et al. “Pupillary response based cognitive workload measurement under luminance changes”. In: *Human-Computer Interaction–INTERACT 2011*. Springer, 2011, pp. 178–185.

## A Používateľská príručka k implementovanému nástroju

1. Pracovný adresár konzoly nastavíme na adresár `experiment_parser`
2. Do adresára `_data` vložíme ľubovoľný počet trojíc súborov (video záznam, výstup okulometra, súbor s udalosťami)
3. Jednotlivé trojice súborov musia začínať rovnakým prefixom a po usporiadaní obsahu adresára podľa názvu musia byť jednotlivé trojice pri sebe, pokiaľ tomu tak nieje, upravíme prefixy
4. Program spustíme príkazom `python main.py`, interaktívny mód vyžaduje prepínač `-video`
5. Pre každú aktuálne spracovávanú trojicu súborov sa v konzole vypíše na začiatku spracovania konkrétnej trojice zistený vlastný model správania zreničky



```
15. files to parse:
_data/0017\433-1417-ET.csv
_data/0017\events.csv
_data/0017\433-1417-SC.mp4
2016-05-08 00:38:32.263786

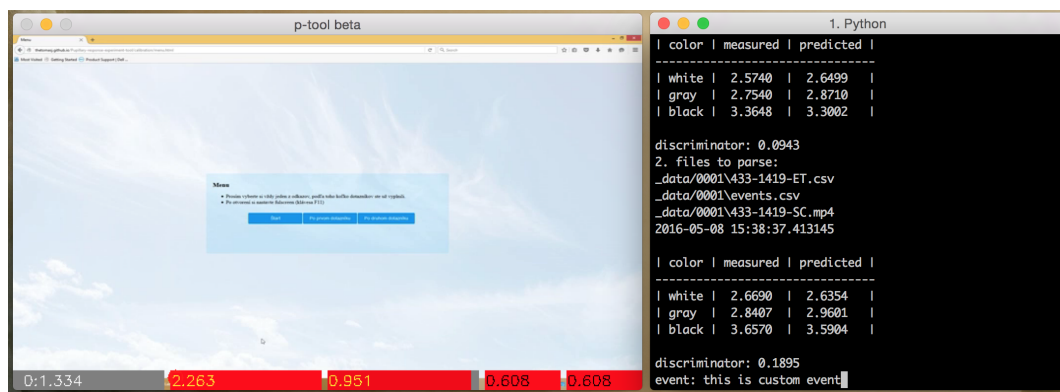
| color | measured | predicted |
-----|-----|-----|
| white | 2.2579   | 2.2138   |
| gray  | 2.3575   | 2.3349   |
| black | 2.5445   | 2.5701   |

discriminator: 0.0000
```

Obr. A.1: Konzolový výstup so základnými informáciami pre každú aktuálne spracovanú trojicu súborov

6. Pokiaľ sme program spustili s prepínačom `-video`, po vypočítaní vlastného modelu reakcií zreničky sa spustí v samostatnom okne záznam práce účastníka obohatený o nasledujúce informácie
  - Aktuálny pohľad účastníka - červený kruh v zázname

- Čas od začiatku experimentu - prvá hodnota zľava
- Aktuálna skutočne nameraná šírka zreničky - druhá hodnota zľava
- Vypočítaná vnímaná svietivosť aktuálnej obrazovky - tretia hodnota zľava
- Aktuálna nameraná kognitívna záťaž normalizovaná rozsahom dilatácie - štvrtá hodnota zľava
- Najvyššia nameraná kognitívna záťaž v posledných troch sekundách - piata hodnota zľava



Obr. A.2: Ukážka interaktívneho priebehu procesu spracovávaní s manuálnym zadávaním udalostí v konzole

7. Pokiaľ sme program spustili s prepínačom `-video`, môžeme spracovávanie záznamu práce konkrétneho účastníka korektne ukončiť stlačením klávesy Q, stlačením klávesy T pozastavíme proces spracovávaní a v konzole zadáme ľubovoľný text udalosti, stlačením kláves W, E alebo R sa okamžite zapíše udalosť preddefinovaná v súbore `config.ini`, tieto udalosti sa exportujú spolu s ostatnými udalosťami vo výstupnom súbore
8. Po korektnom ukončení spracovávaní záznamu práce účastníka, sa do adresára `_data/export` exportuje `.csv` súbor s vypočítanou kognitívnou záťažou pre jednotlivé časové momenty, spolu s ich označovaním udalosťami a ďalšími informáciami

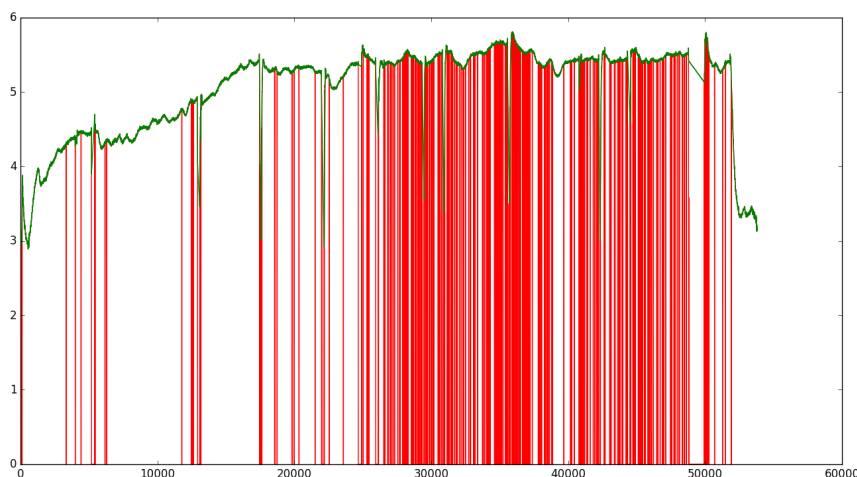


## B Vybrané ukážky zdrojových kódov

### B.1 Nástroj na spracovávanie experimentov: `experiment_parser`

#### B.1.1 Oprava dát exportovaných okulometrom

Dáta vyprodukované okulometrom často obsahujú výpadky v nameranej šírke zreničky alebo nesprávne určené šírky zreničiek, často v okolí úplných výpadkov dát. Z tohto dôvodu sme implementovali korekčnú funkciu, ktorá by sa mala volať počas kontroly chýbajúcich dát v poli nameraných hodnôt zreničiek (parameter `diameters`), pre každú nájdenú neplatnú hodnotu. Funkcia opraví hodnoty v dynamicky určenej šírke okolia výpadku.



Obr. B.1: Oprava nameranej šírky zreničky v čase (zelená krivka) v porovnaní s neopravenou nameranou šírkou zreničky (červená krivka).

```
1  # diameters: an array to change
2  # pos: index of null data
3  # margin: number of changes in valid sequences around hole /
   ↪ points inside margins will be ignored
4  # limit: optional parameter to dynamically increase margin, if
   ↪ limit of changes is overflowed
```

```

5  # divisor: divisor to changes_counter if parameter limit is set
6  ↪ and margin was increased
7  def repair(diameters, pos, margin, limit=0, divisor=1):
8      start = pos - 1
9      count_inc = margin
10     count_dec = margin
11     count_diff = 0
12
13     while count_inc > 0 and count_dec > 0:
14         if float(diameters[start]) >= float(diameters[start-1]):
15             count_inc -= 1
16         else:
17             count_dec -= 1
18             count_diff += abs(float(diameters[start]) - float(
19                 ↪ diameters[start - 1]))
20             if 0 < limit < count_diff:
21                 count_inc += 1
22                 count_dec += 1
23                 count_diff /= divisor
24             start -= 1
25             if start == 0:
26                 break
27     while diameters[pos] == "":
28         pos += 1
29
30     end = pos
31     count_inc = margin
32     count_dec = margin
33     count_diff = 0
34     while count_inc > 0 and count_dec > 0:
35         if diameters[end] == "" or diameters[end+1] == "":
36             count_inc = margin
37             count_diff = 0
38         else:
39             if float(diameters[end]) <= float(diameters[end+1]):
40                 count_inc -= 1
41             else:
42                 count_dec -= 1
43             if 0 < limit < count_diff:
44                 count_inc += 1
45                 count_dec += 1
46                 count_diff /= divisor

```

```

45
46     if end == len(diameters) - 2:
47         if diameters[end] == "":
48             diameters[end] = diameters[end + 1]
49         break
50     end += 1
51
52     interpolate(diameters, start, end)

```

### B.1.2 Funkcia na výpočet svietivosti farby

```

1 def pixel_luminosity(pixel, BLUE_DISCRIMINATOR = 0.205):
2     b = pixel[0]/255.0
3     g = pixel[1]/255.0
4     r = pixel[2]/255.0
5
6     #IN 0. CASE
7     if g>=b:
8         return r if r > g else g
9
10    #IN 1. CASE
11    if r > b:
12        return (r-b) + (b-g)*(1-BLUE_DISCRIMINATOR/2) + g
13
14    #IN 2. CASE
15    if r==b:
16        return (b-g)*(1-BLUE_DISCRIMINATOR/2) + g
17
18    #IN 3. CASE
19    if r>g:
20        return (b-r)*(1-BLUE_DISCRIMINATOR) + (r-g)*(1-
21            ↪ BLUE_DISCRIMINATOR/2) + g
22
23    #IN 4. CASE
24    return (b-g)*(1-BLUE_DISCRIMINATOR) + g

```

### B.1.3 Zjednodušená implementácia modelu reakcií zreničky človeka

```
1 class PMPR:
2     def __init__(self):
3         self.white_diameters = []
4         self.black_diameters = []
5         self.gray_diameters = []
6         self.blue_diameters = []
7         self.gradient = 0
8         self.intercept = 0
9         self.discriminator = 0
10        self.range = 1
11
12    def add_black_diameter(self, diameter):
13        self.black_diameters += [diameter]
14
15    def add_white_diameter(self, diameter):
16        self.white_diameters += [diameter]
17
18    def add_gray_diameter(self, diameter):
19        self.gray_diameters += [diameter]
20
21    def add_blue_diameter(self, diameter):
22        self.blue_diameters += [diameter]
23
24    def refresh(self):
25        x = []
26        y = []
27        for w in self.white_diameters:
28            x += [1]
29            y += [w]
30        for g in self.gray_diameters:
31            x += [0.666]
32            y += [g]
33        for b in self.black_diameters:
34            x += [0]
35            y += [b]
36        self.gradient, self.intercept, r_value, p_value, std_err =
37            ↪ st.linregress(x,y)
38        self.range = self.predict_diameter(0) - self.
39            ↪ predict_diameter(1)
40        self.refresh_discriminator()
```

```

40 def predict_diameter(self, lum):
41     return lum*self.gradient + self.intercept
42
43 def refresh_discriminator(self):
44     if(self.discriminator > 0):
45         return self.discriminator
46
47     self.discriminator = (self.blue_diameters[0] - self.
48         ↪ predict_diameter(1))/self.range
49     if self.discriminator < 0:
50         self.discriminator = 0
51     return self.discriminator

```

## B.2 Nástroj na spracovávanie exportovaných súborov našim nástrojom: exports\_analyzer

### B.2.1 Jednoduchosť načítania exportovaného súboru do samostatných kolekcí podľa typu hodnoty

```

1 def load_raw_export(file):
2     with open(file) as f:
3         data = f.read()
4
5     data = data.split('\n')
6     data = data[:len(data)-1]
7     data.remove(data[0])
8
9     times = [int(row.split(';')[0]) for row in data]
10    events = [row.split(';')[1] for row in data]
11    lumas = [float(row.split(';')[2]) for row in data]
12    efforts = [float(row.split(';')[3]) for row in data]
13    predictions = [float(row.split(';')[4]) for row in data]
14    pupils = [float(row.split(';')[5]) for row in data]
15
16    return times, events, lumas, efforts, predictions, pupils

```



# Protokol experimentu

## Kontext experimentu

**Meno a priezvisko** Mária Dragúňová, Tomáš Juhaniak, Metod Rybár

**Supervisor** Mária Bieliková

**Názov projektu** Kognitívna záťaž, vizuálne hľadanie, detekcia zavádzania

**Kľúčové slová** eyetracking, zrenička, kognitívna záťaž, detekcia zavádzania, vizuálne hľadanie, nájditeľnosť

**Stručný opis projektu** Každý z účastníkov chce prispieť k časti oblasti vedomostí s využitím eyetrackera. Mária Dragúňová pomocou ohodnotenia vizuálneho hľadania, Tomáš Juhaniak zlepšením vyhodnocovania zreničky a Metod Rybár vytvorením metrík a metódy pre automatickú detekciu zavádzania.

## Príprava experimentu

**Cieľ experimentu** Zber a vyhodnotenie dát pre jednotlivé projekty.

### Hypotézy

- zavádzanie spôsobuje rozdiely v kognitívnej záťaži
- zavádzanie spôsobuje rozdiel v reakčných časoch
- zavádzanie spôsobuje rozdiel v pohľade
- webové stránky svojou farebnosťou ovplyvňujú šírku zreničky
- vnímaná svietivosť je závislá od normálneho rozloženia váh pre jednotlivé pixely
- meraním absolútnej dilatácie zreničky vieme vyhodnocovať kognitívnu záťaž počítačových aplikácií

### Parametre experimentu

- využívanie infraštruktúry UXClass
- spojenie viacerých experimentov
- využitie systému Crowdex

**Účastníci** Účastníkmi boli študenti FIIT STU v BA.

### Sledované metriky

- zrenička
- fixácie
- sakády
- reakčný čas

### Scenár experimentu

[https://docs.google.com/document/d/1pIHg7TDKo9R-uFmaM224qwAimik\\_A7I9v9aS3ZvUU3w/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/document/d/1pIHg7TDKo9R-uFmaM224qwAimik_A7I9v9aS3ZvUU3w/edit?usp=sharing)

## **Priebeh experimentu**

**Prípravné sedenie** 19. 2. 2016 - Na prípravnom sedení sme preverili technickú funkčnosť použitých systémov a ich prepojení.

**Pilot** 25. 2. 2016 - na pilotnom sedení sme preverili scenár a jeho pochopenie účastníkmi. Zistili sme, že je pri niektorých inštrukciách problém s pochopením, tieto boli upravené. Takisto sa zistilo, že inštrukcie k dotazníkom ľudia väčšinou ignorujú, čo sme vyriešili doplňujúcou otázkou

**Sedenia** 2016.03.09 17:16:00, 2016.03.16 17:08:00, 2016.03.21 09:48:00, 2016.03.21 10:48:00, 2016.03.30 16:08:00, 2016.03.30 18:06:00, 2016.04.04 10:07:00, 2016.04.04 12:02:00, 2016.04.06 16:03:00, 2016.04.06 17:59:00, 2016.04.08 15:17:00 - Sedenia s účastníkmi prebiehali bezproblémovo. Na jednom zo sedení sa kvôli technickej chybe nahrávanie ukončilo v strede sedenia, ale experiment prebehol až do konca a dáta z neho sú použiteľné pre overenie niektorých častí, celkovo sme získali 73 aspoň čiastočne použiteľných meraní.

## **Zhodnotenie experimentu**

**Výsledky experimentu** Výsledky analýzy dát z experimentov sú dostupné v BP a DP experimentátorov. Cieľom experimentov bolo vytvoriť dataset a tento cieľ bol splnený.

**Čo sa podarilo** Podarilo sa vytvoriť dosť široký dataset pre rôzne typy úloh, nacvičili sme si spojenie viacerých experimentov a systémov do logického celku.



## D Rozšírené výsledky experimentov

### D.1 Kompletné výsledky vyhodnotenia experimentu detekcie úrovni kognitívnej záťaže

```
1 TOTAL MATH EFFORTS BASED ON 7 SEC AVERAGE
2 task: 0 defined: 3 predicted 2 >> GOOD
3 task: 1 defined: 1 predicted 1 >> PERFECT
4 task: 2 defined: 2 predicted 3 >> GOOD
5 task: 3 defined: 0 predicted 0 >> PERFECT
6 task: 4 defined: 1 predicted 2 >> GOOD
7 task: 5 defined: 3 predicted 1 >> BAD
8 task: 6 defined: 2 predicted 2 >> PERFECT
9 task: 7 defined: 0 predicted 1 >> GOOD
10 task: 8 defined: 2 predicted 2 >> PERFECT
11 task: 9 defined: 1 predicted 1 >> PERFECT
12 task: 10 defined: 3 predicted 3 >> PERFECT
13 task: 11 defined: 0 predicted 1 >> GOOD
14 task: 12 defined: 1 predicted 1 >> PERFECT
15 task: 13 defined: 0 predicted 0 >> PERFECT
16 task: 14 defined: 3 predicted 2 >> GOOD
17 task: 15 defined: 2 predicted 1 >> GOOD
18
19 4 class clasification:
20 perfect: 8/16
21 1 miss: 7/16
22 2 miss: 1/16
23 3 miss: 0/16
24
25 precision: 1.000
26 recall:      0.750
27 accuracy:   0.833
28
29 one class tolerance:
30 good: 15/16
31 bad: 1/16
32
33 correlation: 0.797
34 correlation of clasification: 0.680
35
36 TOTAL MATH EFFORTS BASED ON 7 SEC PEAKS
```

```
37 task: 0 defined: 3 predicted 2 >> GOOD
38 task: 1 defined: 1 predicted 2 >> GOOD
39 task: 2 defined: 2 predicted 3 >> GOOD
40 task: 3 defined: 0 predicted 0 >> PERFECT
41 task: 4 defined: 1 predicted 1 >> PERFECT
42 task: 5 defined: 3 predicted 1 >> BAD
43 task: 6 defined: 2 predicted 2 >> PERFECT
44 task: 7 defined: 0 predicted 1 >> GOOD
45 task: 8 defined: 2 predicted 2 >> PERFECT
46 task: 9 defined: 1 predicted 1 >> PERFECT
47 task: 10 defined: 3 predicted 2 >> GOOD
48 task: 11 defined: 0 predicted 1 >> GOOD
49 task: 12 defined: 1 predicted 1 >> PERFECT
50 task: 13 defined: 0 predicted 0 >> PERFECT
51 task: 14 defined: 3 predicted 2 >> GOOD
52 task: 15 defined: 2 predicted 1 >> GOOD
53
54 4 class clasification:
55 perfect: 7/16
56 1 miss: 8/16
57 2 miss: 1/16
58 3 miss: 0/16
59
60 precision: 1.000
61 recall:      0.750
62 accuracy:   0.833
63
64 one class tolerance:
65 good: 15/16
66 bad:  1/16
67
68 correlation: 0.659
69 correlation of clasification: 0.645
```

## D.2 Výsledky vyhodnotenia experimentu predpovedania šírky zreničky pre komplexné stimuly

### D.2.1 Použitie formuly $\max(r, g, b)$ bez úprav

	stimul	median	std	q1	q2	samples
1						
2	-----					
3	screen1:	0.157	0.223	0.049	0.336	53
4	screen2:	0.131	0.189	0.056	0.260	53
5	screen3:	0.125	0.171	0.056	0.219	53
6	screen4:	0.075	0.171	-0.010	0.230	53
7	screen5:	0.117	0.146	0.014	0.201	53
8	screen6:	0.097	0.178	0.031	0.188	53
9	screen7:	0.060	0.131	-0.038	0.130	53
10	screen8:	-0.035	0.211	-0.150	0.084	53
11	screen9:	0.040	0.178	-0.043	0.121	53
12	screen10:	0.008	0.154	-0.044	0.087	53

### D.2.2 Použitie formuly $\max(r, g, b)$ s univerzálnym posunutím dilatácie modrej farby

	stimul	median	std	q1	q2	samples
1						
2	-----					
3	screen1:	0.154	0.223	0.046	0.333	53
4	screen2:	0.129	0.189	0.054	0.259	53
5	screen3:	0.125	0.171	0.056	0.219	53
6	screen4:	0.075	0.171	-0.010	0.230	53
7	screen5:	0.106	0.146	0.003	0.190	53
8	screen6:	0.095	0.178	0.029	0.185	53
9	screen7:	0.058	0.131	-0.041	0.128	53
10	screen8:	-0.035	0.211	-0.150	0.084	53
11	screen9:	0.037	0.178	-0.047	0.117	53
12	screen10:	-0.009	0.154	-0.061	0.071	53

### D.2.3 Použitie formuly $\max(r, g, b)$ s personalizovaným posunutím dilatácie modrej farby

	stimul	median	std	q1	q2	samples
1						
2	-----					
3	screen1:	0.156	0.223	0.049	0.335	53
4	screen2:	0.129	0.189	0.055	0.260	53
5	screen3:	0.125	0.171	0.056	0.219	53
6	screen4:	0.075	0.171	-0.010	0.230	53
7	screen5:	0.103	0.146	0.003	0.193	53
8	screen6:	0.095	0.178	0.030	0.185	53
9	screen7:	0.056	0.131	-0.038	0.127	53
10	screen8:	-0.036	0.211	-0.150	0.084	53
11	screen9:	0.033	0.178	-0.049	0.119	53
12	screen10:	-0.012	0.151	-0.064	0.078	53

### D.2.4 Súčet chýb v predpovedaní zreničky v experimente optimalizácie parametra sigma

1	1.5	:	1.38464720961
2	1.6	:	1.36180806095
3	1.7	:	1.33742456434
4	1.8	:	1.31151118623
5	1.9	:	1.28409081427
6	2.0	:	1.25519556987
7	2.1	:	1.22486747092
8	2.2	:	1.19315890807
9	2.3	:	1.16013290157
10	2.4	:	1.12586311125
11	2.5	:	1.09043358033
12	2.6	:	1.05393820377
13	2.7	:	1.01647992325
14	2.8	:	0.978169663056
15	2.9	:	0.939125033748
16	3.0	:	0.92512795624
17	3.1	:	0.921798291053
18	3.2	:	0.917764918436
19	3.3	:	0.913010283206
20	3.4	:	0.907523493561
21	3.5	:	0.901300453108

```

22 3.51 : 0.900637700353
23 3.52 : 0.899967612778
24 3.53 : 0.899290197416
25 3.54 : 0.898605461957
26 3.55 : 0.897913414746
27 3.56 : 0.897214064781
28 3.57 : 0.89650742171
29 3.58 : 0.895793495826
30 3.59 : 0.895072298064
31 3.6 : 0.89434384
32 3.61 : 0.893608133847
33 3.62 : 0.892865192448
34 3.63 : 0.892115029276
35 3.64 : 0.891357658429
36 3.65 : 0.89405730276
37 3.66 : 0.896792286405
38 3.67 : 0.899521384447
39 3.68 : 0.902244517038
40 3.69 : 0.904961605184
41 3.7 : 0.907672570753
42 3.8 : 0.934428920848
43 3.9 : 0.96049363673
44 4.0 : 0.985803426737
45 4.1 : 1.01030426126
46 4.2 : 1.03395135676
47 4.3 : 1.05670897932
48 4.4 : 1.07855009381
49 4.5 : 1.09945588708
50 4.6 : 1.11941519471
51 4.7 : 1.13842385972
52 4.8 : 1.15648405
53 4.9 : 1.1736035582
54 5.0 : 1.20813604644

```

### D.2.5 Kompletné výsledky nameraných zreničiek podľa jednotlivých stimulov

1	stimul	median	std	q1	q2	samples
2	-----					
3	red:	2.597	0.348	2.400	2.792	106
4	green:	2.623	0.364	2.429	2.827	106

5	blue:	2.829	0.412	2.579	3.107	106
6	yellow:	2.644	0.354	2.388	2.792	106
7	fuchsia:	2.742	0.359	2.583	2.898	106
8	aqua:	2.563	0.359	2.390	2.758	106
9	white:	2.625	0.348	2.473	2.805	212
10	black:	3.691	0.585	3.430	4.183	106
11	gray:	2.849	0.422	2.646	3.044	106
12	-----					
13	gauss 1016px:	3.020	0.457	2.772	3.320	53
14	gauss_656px:	3.227	0.480	2.942	3.505	53
15	gauss_376px:	3.397	0.521	3.233	3.707	53
16	gauss_176px:	3.770	0.615	3.470	4.330	53
17	gauss_56px:	3.959	0.690	3.626	4.520	53
18	gauss_16px:	4.049	0.775	3.548	4.647	53
19	-----					
20	sudoku:	2.890	0.370	2.703	3.103	40
21	zataz:	0.251	0.285	0.172	0.474	40
22	-----					
23	screen1:	2.909	0.431	2.696	3.121	53
24	screen2:	3.049	0.384	2.775	3.201	53
25	screen3:	2.803	0.367	2.667	3.015	53
26	screen4:	2.831	0.374	2.668	3.101	53
27	screen5:	2.858	0.347	2.641	3.036	53
28	screen6:	2.952	0.388	2.695	3.143	53
29	screen7:	2.843	0.403	2.611	2.942	53
30	screen8:	3.392	0.524	3.121	3.693	53
31	screen9:	2.871	0.379	2.696	3.102	53
32	screen10:	2.872	0.390	2.648	3.057	53

## E Obsah priloženého média

### 1. `experiment_parser`

adresár s implementovanou aplikáciou na detekciu kognitívnej záťaže v experimentoch, interaktívne sledovanie záznamu experimentu a následný export

- zdrojové súbory `.py`
- konfiguračný súbor `config.ini`
- adresár `_data` so vzorovými dátami pre korektné spustenie aplikácie

### 2. `exports_analyzer`

adresár s implementovaným skriptom na analýzu súborov exportovaných aplikáciou `experiment_parser`

### 3. `screen_based_parser`

adresár s optimalizovanou verziou aplikácie na detekciu kognitívnej záťaže pre niektoré vykonané experimenty, so spracovávaním snímok obrazovky pre konkrétne udalosti namiesto spracovávania videa

### 4. `calibration_package`

adresár s webovou stránkou obsahujúcou kalibračné stimuly spolu so súborami skutočného experimentu

### 5. text bakalárskej práce vo formáte `pdf`

### 6. samostatný súbor s obsahom priloženého média vo formáte `pdf`

