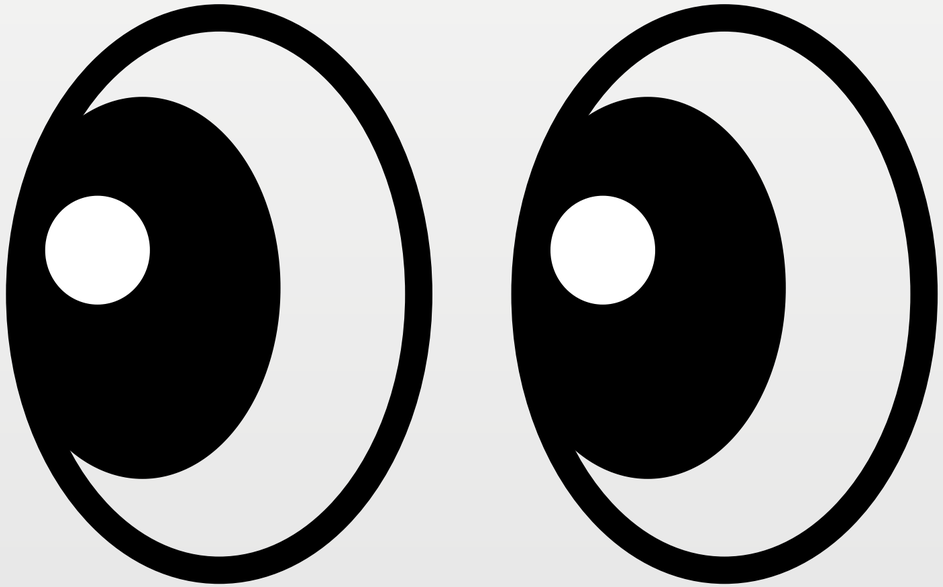
Eye-tracking v psychologii
Analýza dat



LUKÁŠ HEJTMÁNEK

Eye-tracking

Co to je

Eye-tracking je technologie, která sleduje a analyzuje pohyby očí.

Měření pohybu a pozice očí v reálném čase — objektivní metoda studia vizuální pozornosti

Eye-tracking umožňuje zaznamenávat kam a jak dlouho se člověk dívá. Pohyby očí jsou do značné míry automatické a neovlivněné vědomou kontrolou.

Psychologie

Porozumění kognitivním procesům. Klinická psychologie, kognice atd.

Marketing

Analyzování reakcí spotřebitelů na reklamy a produkty.

UX/UI

Design rozhraní webů a her

Vzdělávání

Zhodnocení pozornosti studentů během výuky. Návštěvníků galerie či muzea. Výzkum čtení, porozumění, dyslexie atd.

Biofyzikální paradigma

"Pohyby očí jsou oknem do kognitivních procesů — kde se díváme odráží, co zpracováváme."
— Rayner (2015), Current Directions in Psychological Science

Overt: Oči se přesouvají k místu pozornosti — převládající mód (~95% času)

Covert: Pozornost bez pohybu očí — vyžaduje úsilí, vzácné

→ Fixace spolehlivě predikuje locus pozornosti

Základní paradigma

Kam se díváme ≈ Co kognitivně zpracováváme

Rayner (1998): Přímá vazba mezi okulomotorikou a pozorností

Pupilární dilatace (za stálého osvětlení) odráží aktivaci LC-NE systému — marker mentálního úsilí a arousal.

Délka fixací přímo řízena lexikálním/lingvistickým zpracováním — ne pouze motorickou kontrolou

Automatický, neovlivněný vědomou kontrolou signál → Objektivnější než self-report

Eye-tracking

Klinika

- Autism: Redukovaná preference pro obličeje, atypické scanpathy
- ADHD: Kratší fixace, více sakád, nestabilní pohled
- Anxiety: Vigilance-avoidance pattern pro hrozby
- Depression: Bias k negativním stimulům
- Schizophrenia: Abnormální smooth pursuit

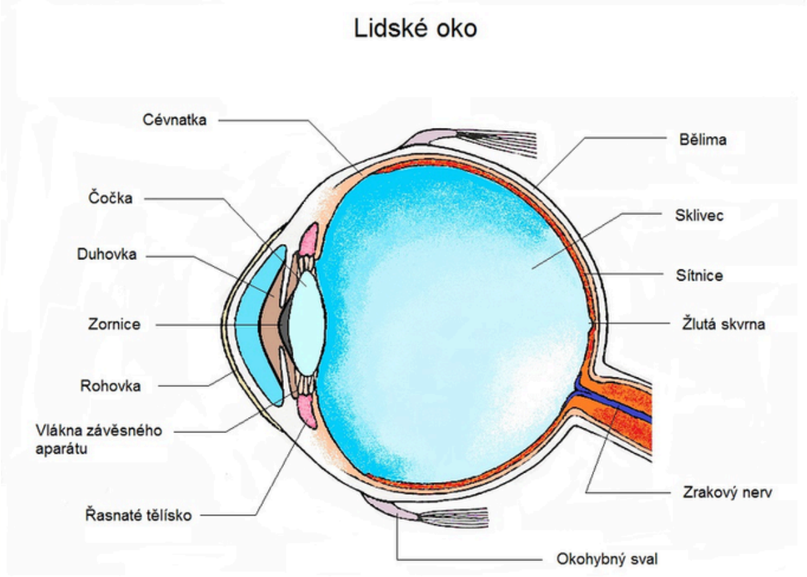
Kognitivní psychologie

- Čtení: Regrese, přeskakování slov, word frequency efekty
- Vizuální vyhledávání: Pop-out vs. conjunction search
- Rozhodování: Information sampling, srovnávání alternativ
- Paměť: Preferenční pohled na nové vs. známé

Vývojová psychologie

- Infant cognition: Preferenční pohled paradigma
- Theory of mind: Anticipatory looking

Anatomie oka



Retina/Sítníce

Část oka zachycující světlo a přeměňující ho na nervové vzruchy (čípky + tyčinky)

Fovea

oblast nejostřejšího vidění na sítnici (2° zorného pole)

Zornice/Pupila/Zornička

reaguje na světlo (pupilometrie) - Svaly v duhovce automaticky mění její velikost podle intenzity světla. pohybuje se při sledování objektu

Rohovka

odráží IR světlo pro tracking

Oční pohyby

Fixace

Stabilní pohled na jednom místě
100-500 ms (definovatelné)
U čtení např. 200ms

Zpracování informace probíhá během fixací. Delší fixace = vyšší kognitivní zátěž nebo obtížnost zpracování.

Obsahová slova (~85% fixováno) vs. funkční slova (~35% fixováno)

Sakády

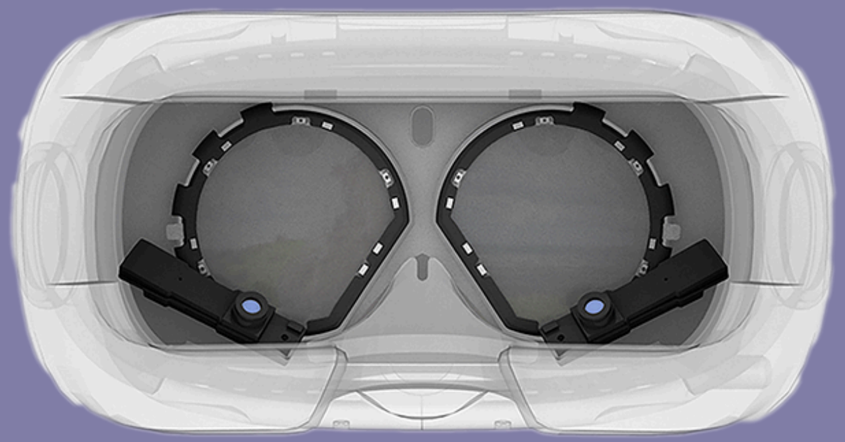
Rychlé přesuny mezi fixacemi

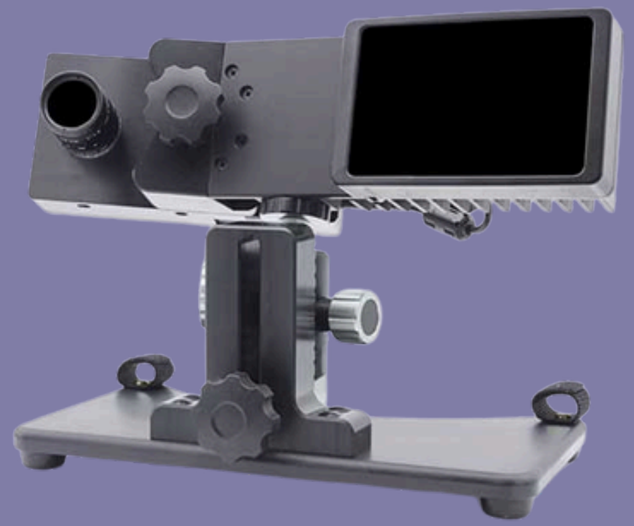
20-200ms, rychlost 300–500°/s

Během sakád **nevidíme** — vizuální zpracování je potlačeno. Mozek "vyplní" chybějící informaci.

U sakád můžeme měřit
Amplituda (2–7° typicky) · **Latence** (plánování) · Rychlost

Eye-trackery



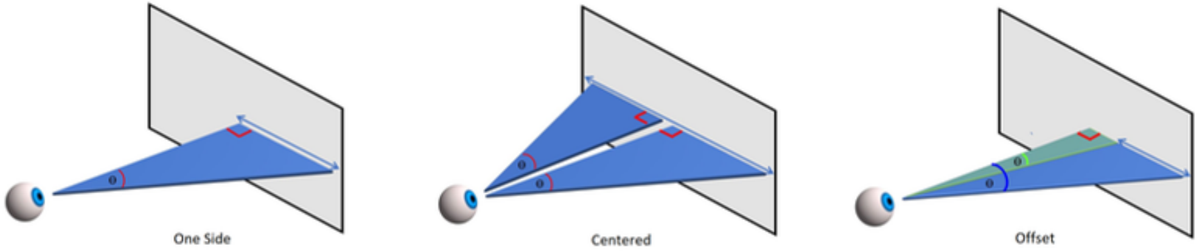


Lukáš Hejtmánek

Fakulta humanitních studií

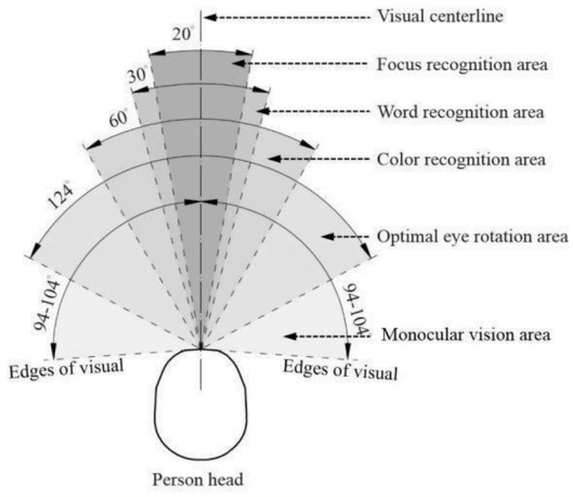
Eye-tracking

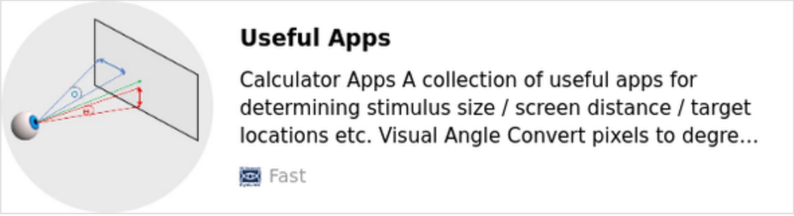
Vizuální úhel

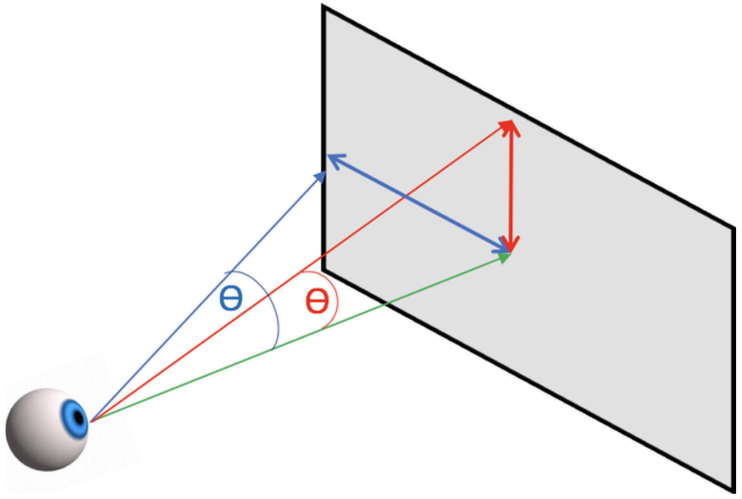


Sledovaný pohyb nezávisí jen na velikosti objektu, ale i na vzdálenosti od něj

Analýzy často mohou pracovat s konceptem úhlu, spíše než vzdálenosti







Eye-tracking

Metriky eye-trackeru

Rychlost

- Jak rychlé změny dokáže eyetracker zaznamenat
  Typicky determinované v Hertzích

Přesnost

- Jak malé stimuly zvládne eyetracker měřit
  Typicky ve vizuálních úhlech
  0.3 - 5°

Eye-tracking

Jak to funguje

PUPIL-CORNEAL REFLECTION

- Infračervené světlo osvětluje oko a vytváří odraz na rohovce. Kamera sleduje polohu zornice relativně k tomuto lesklému odrazu — výpočet směru pohledu.

VS

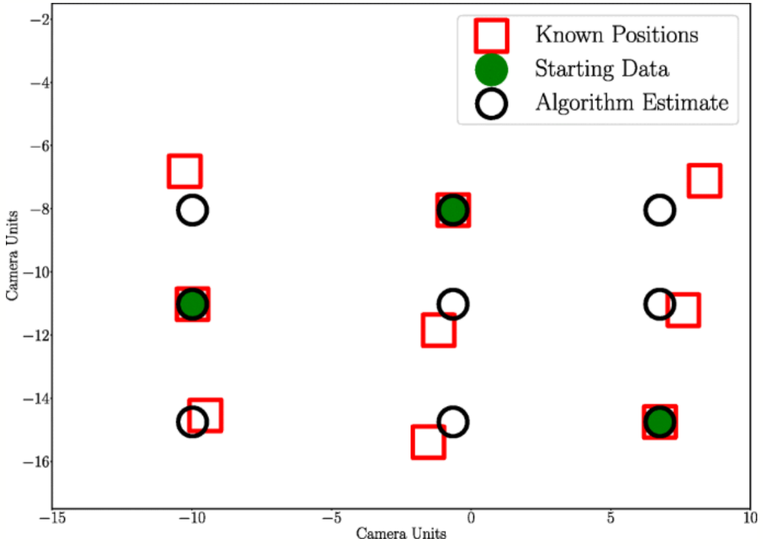
FACE-TRACKING

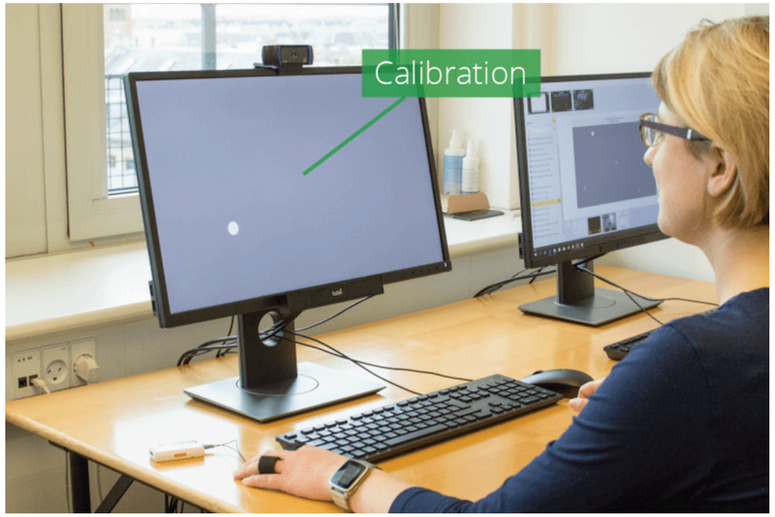
- Zachycení a modelování obličeje a tváře a algoritmické modelování poshledu na základě pozice očí

Kalibrace

Proces mapování pozice zornice na souřadnice na obrazovce. Účastník sleduje sérii bodů, systém se učí individuální charakteristiky očí.

5-bodová: Rychlá, základní přesnost (0.5-1°)
9-bodová: Standardní, dobrá přesnost (0.3-0.5°)
13-bodová: Vysoká přesnost pro výzkum (pod 0.3°)





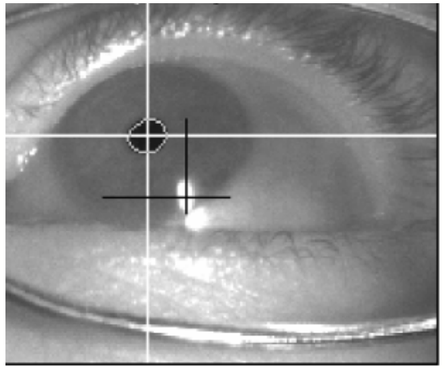
Jedinečnost
Každé oko má unikátní tvar a reflexní vlastnosti

Brýle
Brýle mění lom světla či zobrazení

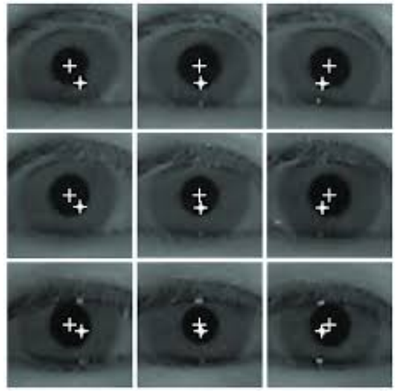
Vzdálenost
Vzdálenost od monitoru ovlivňuje výpočet modelu

Eye-tracking

Jak to funguje



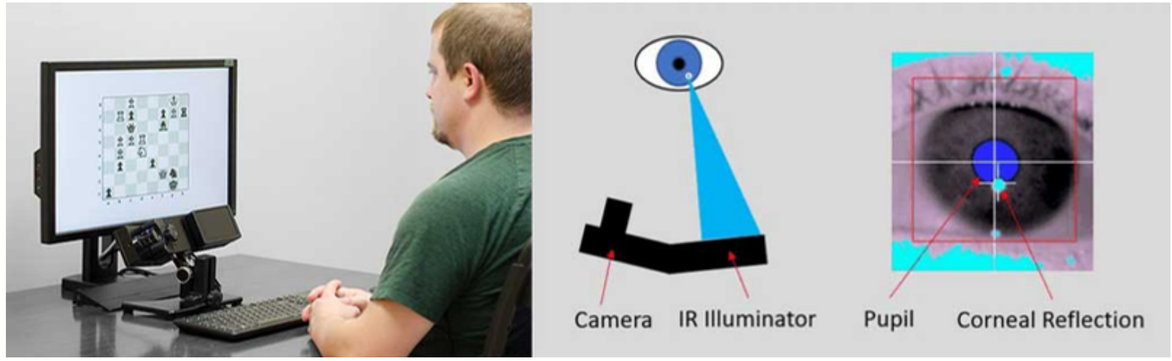
Eye image with features

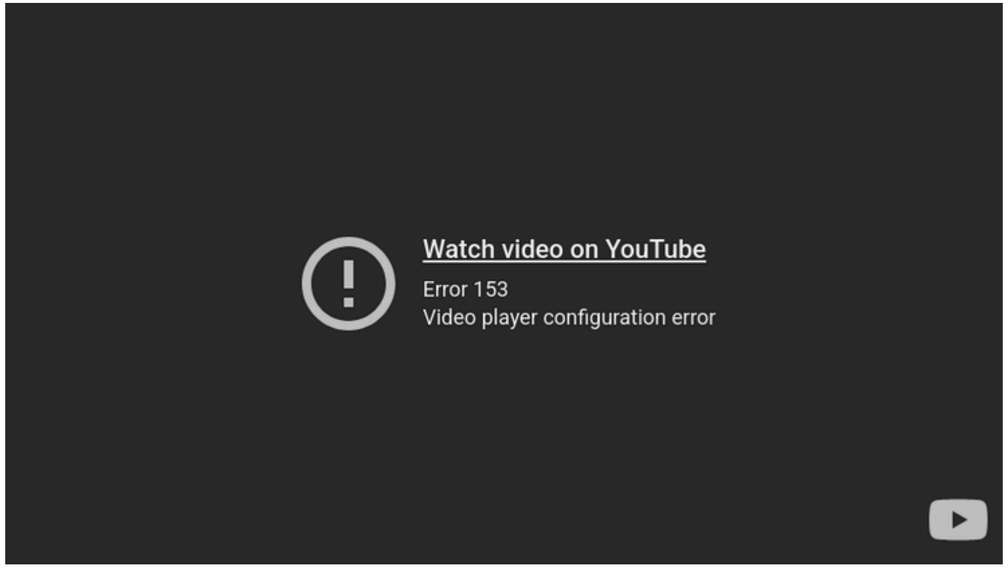


PUPIL-CORNEAL REFLECTION

- Infračervené světlo osvětluje oko a vytváří odraz na rohovce. Kamera sleduje polohu zornice relativně k tomuto odrazu — výpočet směru pohledu.

Přesnost: 0.25-0.5°
Rychlost: 250 - 2000 Hz





Custom made eyetracker

Eye-tracking

Camera-based

- Zachycení a modelování obličeje a tváře a algoritmické modelování poshledu na základě pozice očí

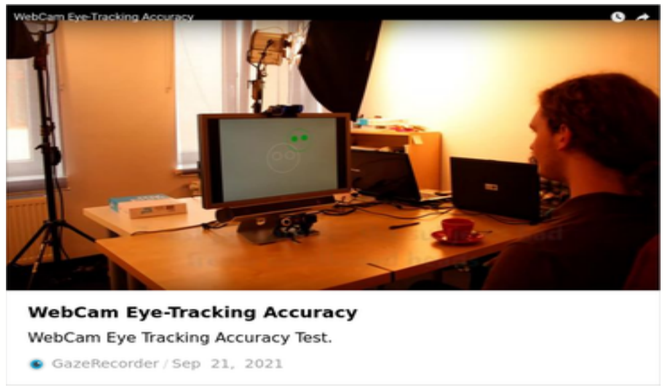
  Čistě softwarové řešení!

Přesnost
2-5°

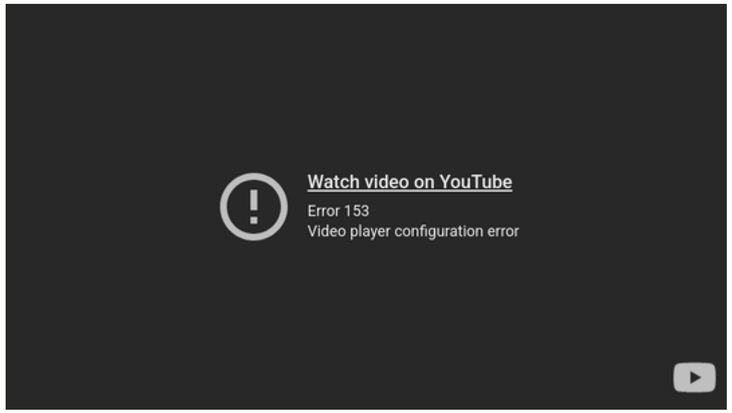
Nefunguje ve tmě či špatném osvětlení

Rychlost
30-60 Hz

Nízká přesnost i rychlost



https://webgazer.cs.brown.edu



Data a metriky

Area of interest (AOI)

AOI = vymezená oblast ve stimulu pro kvantitativní analýzu fixačního chování. Umožňuje statisticky testovat hypotézy o vizuální pozornosti.

Statické

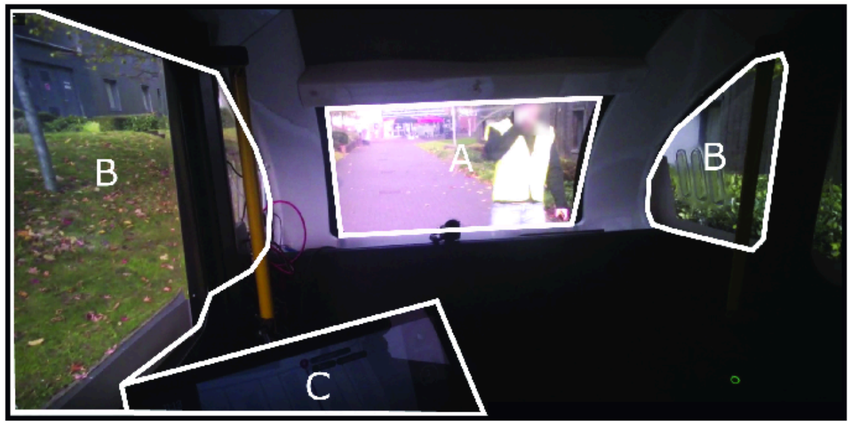
Fixní regiony na obrázku/obrazovce (logo, tlačítko, obličej)

Dynamické

Pohybující se objekty ve videu (postava, předmět)

Sémantické

Významové celky (nadpis, menu, obsah, reklama)



Fixace (typicky vždy v kontextu AOI)

Mean Fixation Duration

Průměrná délka fixací, typicky200–400 ms
↑ Delší = vyšší kognitivní zátěž

First Fixation Duration

Délka první fixace na AOI
Měří: Early processing

Time to First Fixation

Latence prvního pohledu na AOI
Měří: Attentional capture
↓ Kratší = vyšší salience

Fixation Count

Počet fixací na AOI
↑ Více = větší zájem/složitost

Dwell Time

Celkový čas strávený v AOI
Agregovaná míra pozornosti

Revisits

Počet návratů do AOI
Měří: Reprocessing
↑ Více = obtížnost/nejasnost

Sakády

AMPLITUDA

Vzdálenost přesunu (°) - typicky 2-7

Dlouhé → exploratorní vyhledávání
Krátké → cílené zpřesňování

Dlouhé sakádové sekvence vykazují předplánované trasy; delší latence první sakády při plánování 2+ kroků dopředu

RYCHLOST (VELOCITY)

Maximální rychlost pohybu typicky 300-500

Pomalejší → vyšší nejistota
Stabilní mezi lidmi (main sequence)

Main sequence validation

Stabilní vztah mezi amplitudou a rychlostí.
Větší sakády = vyšší maximální rychlost. Tato závislost je konzistentní napříč jedinci a využívá se pro validaci kvality dat.

Proces zpracování

RAW DATA
x, y, timestamp
→
FILTERING
noise removal
→
DETECTION
fixace, sakády
→
AOI
mapping
→
METRICS
analýza

Eye-tracking

Raw-gaze

60 Hz = 600 vzorků za 10 sekund · typicky ~100 KB na osobu/trial

SUROVÁ DATA (RAW GAZE)

x,y - pozice pohledu (různé metriky)
timestamp - typicky čas od začátku experimentu

- confidence (u některých eyetrackerů i informace o "jistotě" měření)

Pupilometrie

Diameter: Velikost v mm nebo px
Baseline: Referenční hodnota
Validita/Confidence: Kvalita měření (0-1)

timestamp	x_left	y_left	x_right	y_right
1000	512.3	384.1	510.8	385.2
1016	513.1	383.8	511.2	384.9

Preprocessing

Mrkání

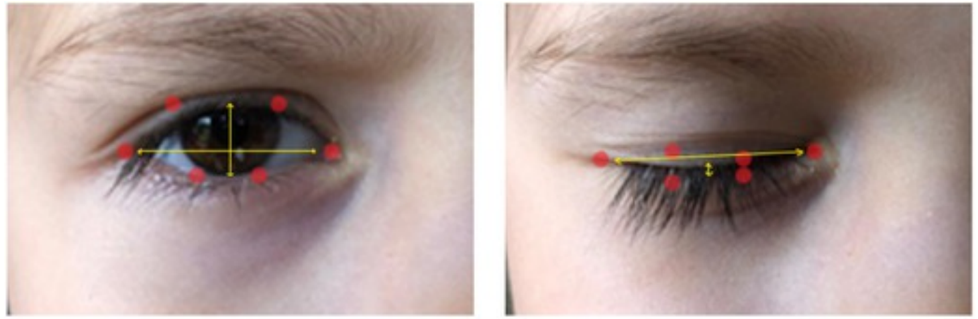
100–400 ms bez dat (10–15% záznamu).
Identifikace pomocí pupilárních dat nebo velocity threshold.

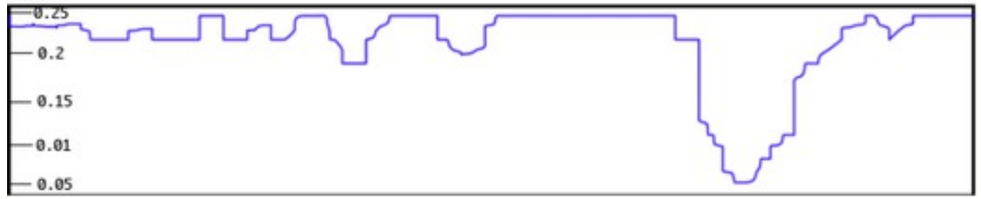
Chybějící data

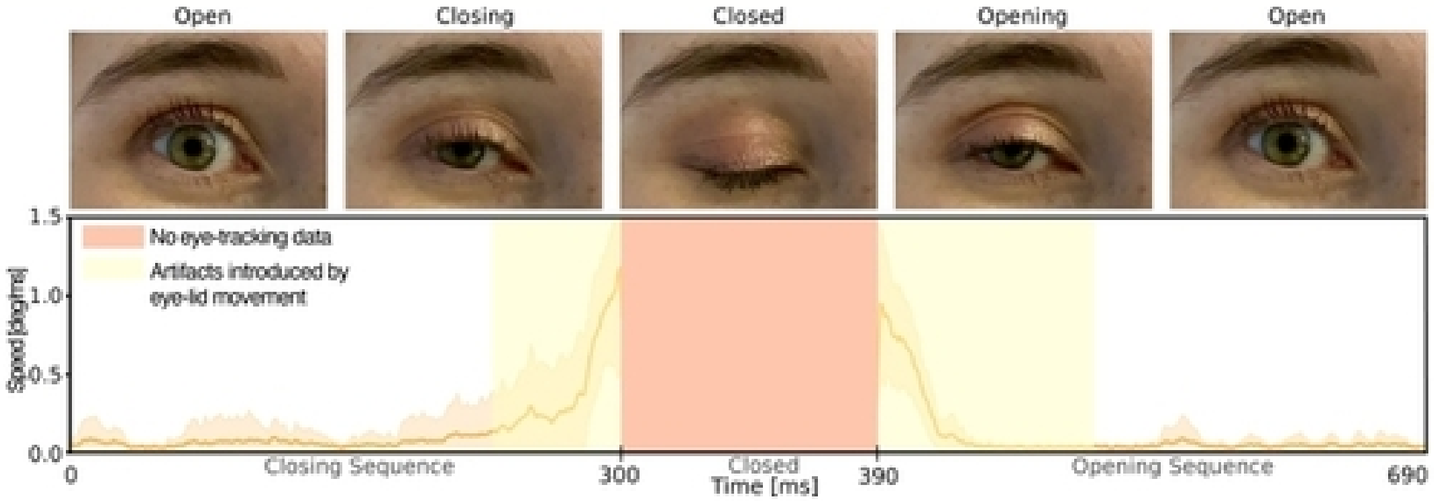
Interpolace: lineární, cubic spline.

Cleaning

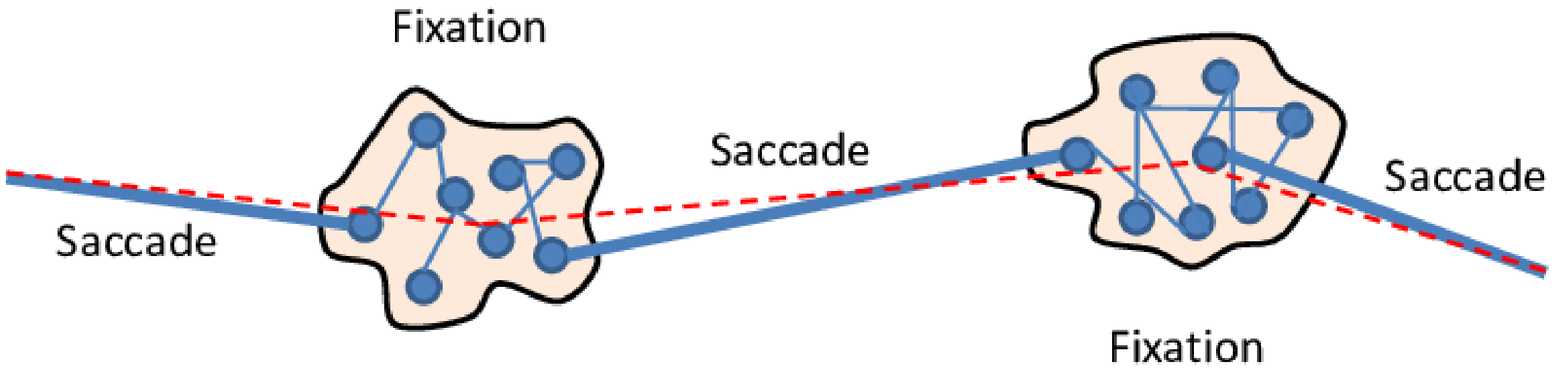
Rychlé změny >2mm/s, outliers mimo obrazovku, low confidence samples. Filtrování: Butterworth, Savitzky-Golay, median filter.

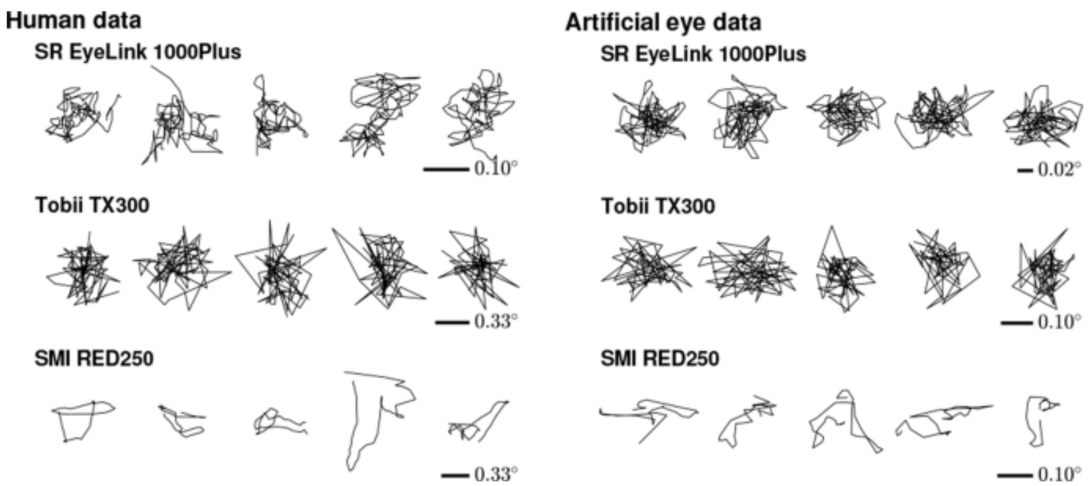






Výpočet fixací a sakád





I-VT algoritmus

Velocity threshold (30°/s)

I-DT algoritmus

Dispersion threshold (0.5-1°)

Spojení blízkých fixací (pod 0.5°)

Minimální fixace

Typicky 60-100ms

SCANPATH

Fixační sekvence

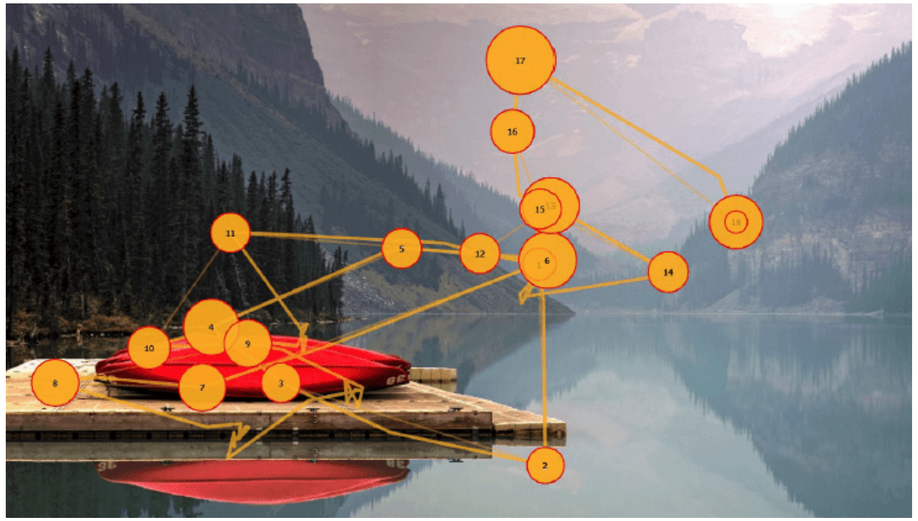
Scanpath = temporální sekvence fixací a sakád jednoho participanta. Odhaluje viewing strategie. Zachovává časový průběh na rozdíl od agregovaných metrik.

String Edit Distance (Levenshtein)
Konverze AOI sekvence na string (A-B-A-C), výpočet edit distance mezi participanty

MultiMatch Algorithm
Porovnává 5 dimenzí: shape, direction, length, position, duration jako vektory

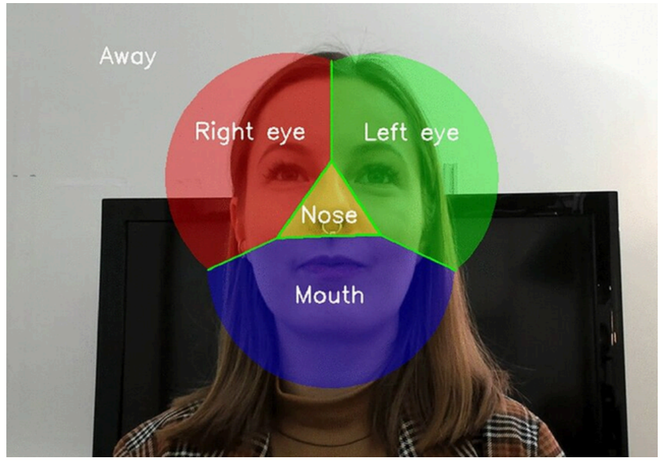
Experti vs. novici v radiologii, kolonoskopii — odlišná geometrie scanpathu a clustering fixací
Porovnání jak různí lidé mentálně manipulují vizuální úlohy (mental rotation)

Těžko agregovatelné napříč participanty. Individuální variabilita je vysoká.



Transition Matrices

Hybridní přístup analýzy mezi scanpath a fixacemi



Pravděpodobnost přechodu mezi AOI

Transition matrix = čtvercová matice kde řádky = "FROM" AOI, sloupce = "TO" AOI. Buňky obsahují frekvenci nebo pravděpodobnost přechodů pohledu.

Logo → Menu: 65% | Logo → Content: 25%
Menu → Content: 70% | Content → CTA: 75%

	Left Eye	Right Eye	Away
Left Eye	0	0.5	0.2
Right Eye	0.4	0	0.1
Away	0.3	0.35	0

Využití

Fixace redukují na overall
co když uživatel vždy koukne na “help” poté, co kouknul na konkrétní informaci
Price → Reviews: 80% vs. Price → Description: 20%

Pupilometrie

Měření kognitivní zátěže (cognitive load), Arousal a emoční reakce, Překvapení, novelty detection, Decision making, uncertainty

OVERALL PUPIL SIZE

Tonická odpověď na zátěž; citlivé na osvětlení

Arousal

Celková velikost roste s obtížností: 1-back < 2-back < 3-back

INDEX OF COGNITIVE ACTIVITY (ICA)

Rychlé pupilární oscilace (~200ms); méně citlivé na světlo

Normalizace a baseline correction

Luminance confound
Individuální rozdíly
Drugs/caffeine

Vizualizace

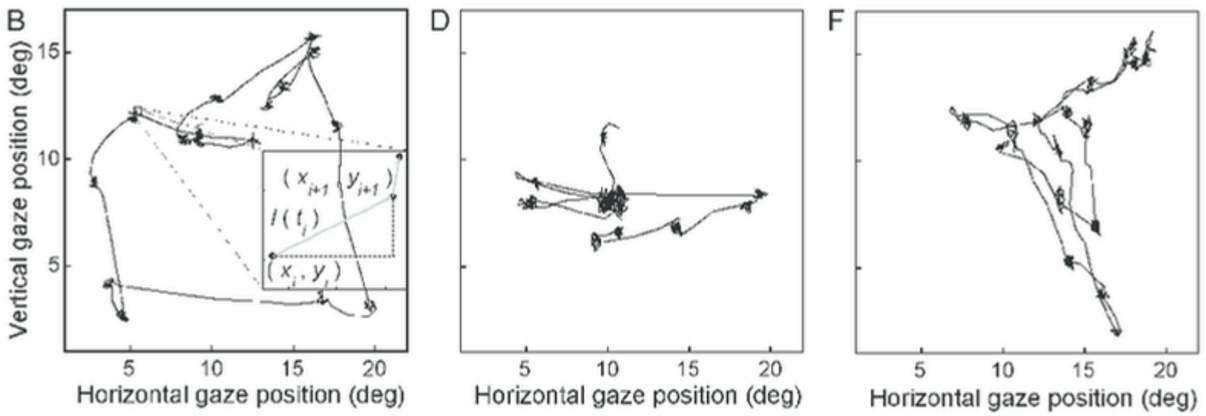
Lukáš Hejtmánek

Fakulta humanitních studií

Gaze Plot / Scanpath

Vizualizace individuální trajektorie pohledu.

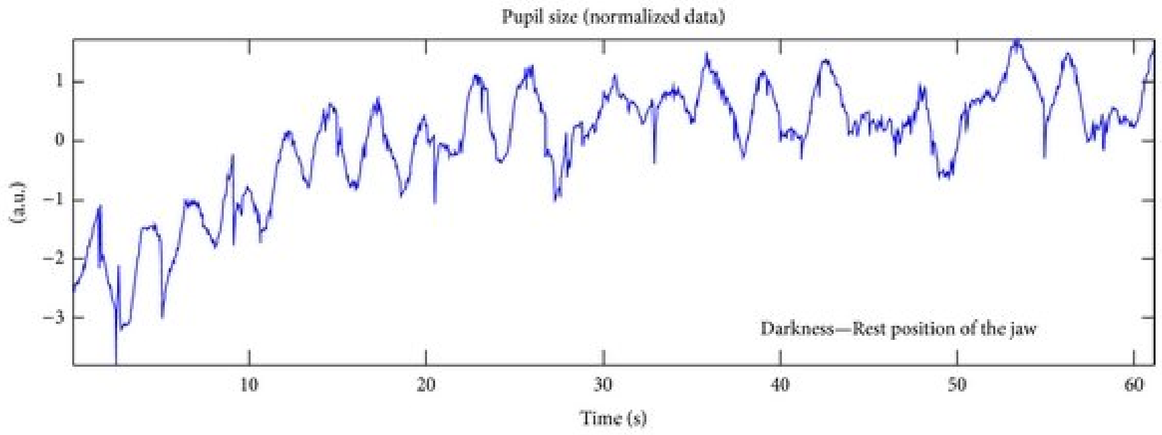
- Kruhy: Fixace (velikost = délka)
- Čáry: Sakády (spojení fixací)
- Čísla: Pořadí fixací
- Barva: Může kódovat čas nebo AOI

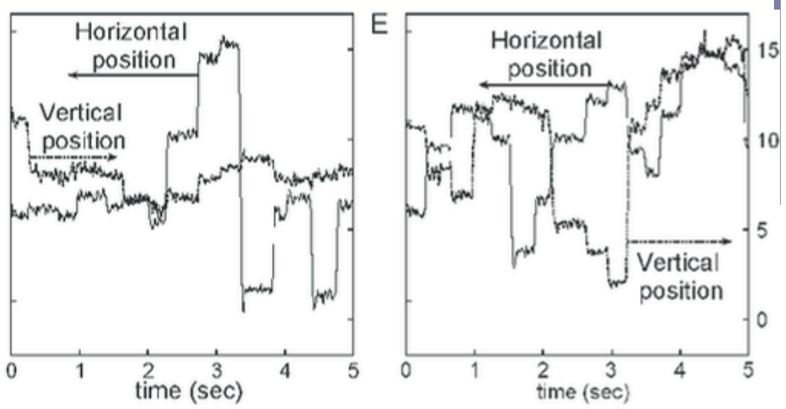


Timeseries

Průběh hodnoty v čase: Typicky velikost zornice, ale i X a Y osa (primárně pro kontrolu)

- X-osa: Čas od onset stimulu
- Y-osa: Pupil diameter (mm nebo % baseline) / X pozice / Y pozice
- Bands: SE/CI pro skupinová data
- Events: Vertikální čáry pro stimuly





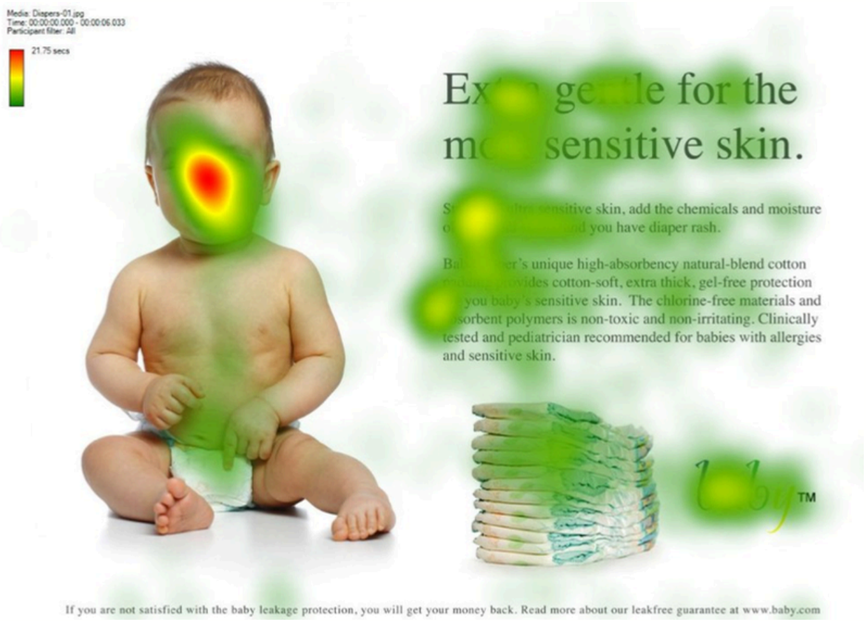
Heatmapy

Heatmapa = 2D vizualizace agregovaných fixací více participantů. Barevná škála reprezentuje intenzitu pozornosti. Intuitivní, ale může být zavádějící.

Kernel Density Estimation (KDE)
Gaussian kernel na každou fixaci, sumace překryvů

Binning
Diskrétní grid, počet fixací v každé buňce

Weighting
Váhování délkou fixace (dwell-weighted)



Neukazuje

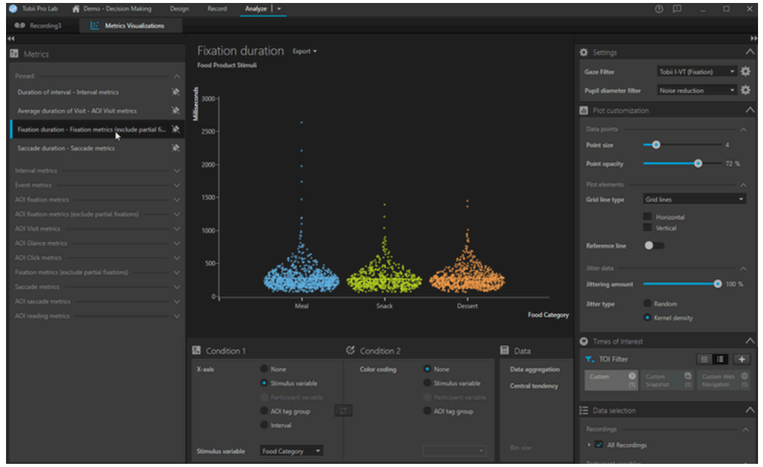
- Časové pořadí: Nelze určit, kam se díval DŘÍVE
- Individuální rozdíly: Typicky agregace přes participanty
- Sakády: Pouze fixace, ne pohyby mezi nimi
- Kontext: Proč se tam díval (intention)

Analýza a software

Proprietární Software

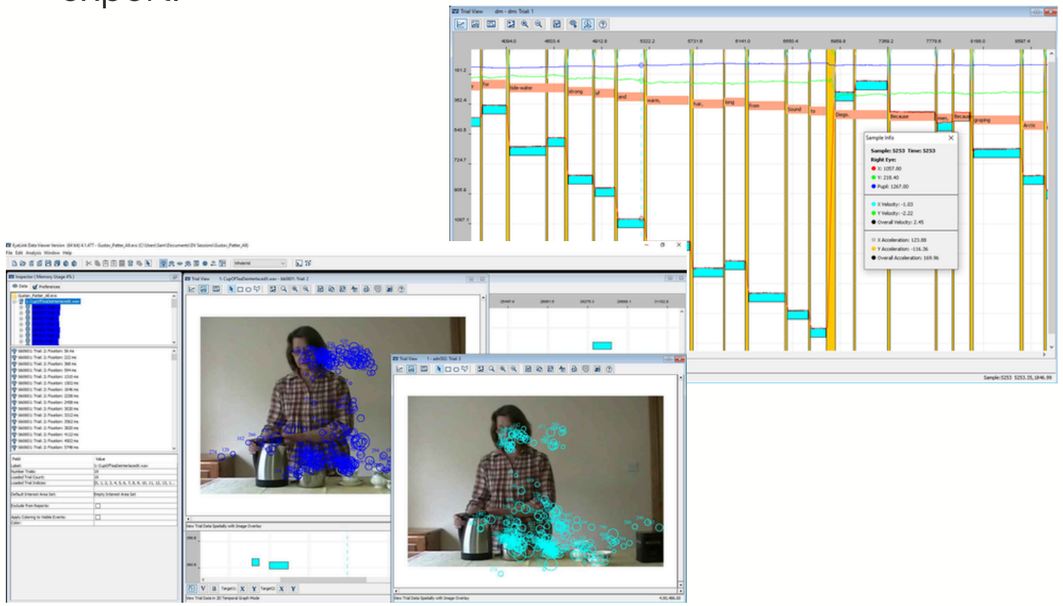
Tobii Pro Lab

Kompletní řešení pro Tobii eye-trackery. Design experimentu, sběr dat, základní analýza.



SR Research Data Viewer

Pro EyeLink systémy. Pokročilá vizualizace, AOI analýza, export.



Open Source Software

- **OGAMA**

  Open Gaze And Mouse Analyzer. Windows, C#.
  Heatmapy, scanpaths, statistiky.

- **Pupil Labs Software**

  Pupil Capture + Player. Python API, real-time processing

  Nyní přechod na NEON, starší modely hůře podporované

  pracuje pouze s Pupil Labs daty

Version 5.1 (30.03.2021)

List of changes (modifications and bug fixes)

This release was published on 30.03.2021 and removes the flash player dependencies, so ogama can be installed and run on recent systems. There was no work on other parts of the code so its basically the same as

Getting Started

Welcome to Pupil Core! The first thing you need to do is download the latest Pupil Core software.

Download Pupil Core Bundles

Follow the steps below to get up and running and become familiar with the workflow.

On this page

1. Put on Pupil Core
2. Launch Pupil Capture
3. Check Pupil Detection
4. Calibration
5. Start Recording
6. Locate Saved Recording
7. Visualize in Pupil Player
8. Export Data

R + Python packages

eyetrackingR

VWP analýza, time-course, growth curve analysis, bootstrapping.

eyetools

Základní analýzy, detekce fixací, interpolace

PyGaze

Python knihovna. Sběr dat i analýza. Podpora více eye-trackerů.

Děkuji za pozornost