

EYE-TRACKING

(nejen) v kognitivní kartografii

PRAKTICKÝ PRŮVODCE TVORBOU A VYHODNOCENÍM EXPERIMENTU

Stanislav Popelka

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra geoinformatiky



Univerzita Palackého
v Olomouci

EYE-TRACKING (NEJEN) V KOGNITIVNÍ KARTOGRAFII

Praktický průvodce tvorbou
a vyhodnocením experimentu

Stanislav Popelka

Olomouc 2018

KATALOGIZACE V KNIZE – NÁRODNÍ KNIHOVNA ČR

Popelka, Stanislav

Eye-tracking (nejen) v kognitivní kartografii : praktický průvodce tvorbou

a vyhodnocením experimentu / Stanislav Popelka. -- 1. vydání. -- Olomouc :

Univerzita Palackého v Olomouci pro Katedru geoinformatiky, 2018. -- 1 online zdroj

Anglické resumé

Nad názvem: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta,

Katedra geoinformatiky

ISBN 978-80-244-5314-9 (online; pdf)

612.846:53.08 * 612.846 * 528.9:165.194 * 001.891.5 * 159.931 * 004.62 *
(048.8)

- sledování pohybu očí

- pohyby očí

- kognitivní kartografie

- vědecké pokusy

- vizuální vnímání

- zpracování dat

- monografie

528 - Geodézie. Kartografie [7]

Mgr. Stanislav Popelka, Ph.D.

EYE-TRACKING (NEJEN) V KOGNITIVNÍ KARTOGRAFII Praktický průvodce tvorbou a vyhodnocením experimentu

Oponenti: doc. PaedDr. Jana Škrabánková, Ph.D., Ostravská univerzita

Mgr. Bc. Zdeněk Stachoň, Ph.D., Masarykova univerzita

Výkonný redaktor: prof. RNDr. Karel Lemr, Ph.D.

Odpovědná redaktorka: Mgr. Lucie Loutocká

Technická redakce a návrh obálky: Mgr. Stanislav Popelka, Ph.D., PřF UP

Foto na obálce: Mgr. Bohumil Ptáček

Vydala: Univerzita Palackého v Olomouci, Křížkovského 8, 771 47 Olomouc
pro Katedru geoinformatiky jako její 77. publikaci

Publikace z produkce Univerzity Palackého v Olomouci je možno zakoupit
prostřednictvím e-shopu na www.vydavatelstviupol.cz

*Publikace vznikla s podporou projektu Grantové agentury České republiky
18-05432S Prostorová syntéza založená na metodách geocomputation.*

1. vydání

Olomouc 2018

© Stanislav Popelka, 2018

© Univerzita Palackého v Olomouci, 2018

DOI: 10.5507/prf.18.24453132

ISBN 978-80-244-5313-2 (print)

ISBN 978-80-244-5314-9 (online: PDF)

OBSAH

ÚVOD.....	5
1 EYE-TRACKING	7
1.1 Charakteristika lidského oka	7
1.2 Pohyby očí – fixace a sakády.....	11
1.3 Vývoj metod sledování pohybu očí	13
2 VYUŽITÍ EYE-TRACKINGU	23
2.1 Interaktivní využití eye-trackingu	24
2.2 Diagnostické využití eye-trackingu.....	25
3 KOGNITIVNÍ KARTOGRAFIE.....	39
3.1 Východiska kognitivní kartografie	39
3.2 Historie a současnost kognitivní kartografie.....	41
3.3 Metody kognitivní kartografie	43
3.4 Eye-tracking v kartografii	52
3.5 Kombinace kognitivní kartografie a psychologie.....	66
4 EYE-TRACKING LABORATOŘ A EYE-TRACKERY	81
4.1 Vybavení eye-tracking laboratoře	82
4.2 SMI RED 250	82
4.3 GazePoint.....	88
4.4 EyeTribe	91
4.5 Porovnání přesnosti SMI a EyeTribe.....	93
5 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU A ZÁZNAM DAT.....	99
5.1 Typy proměnných	100
5.2 Design experimentu	104
5.3 Respondenti a jejich počet.....	112
5.4 Příprava stimulů	128
5.5 Tvorba experimentu.....	129
5.6 Záznam dat.....	136

6 PRE-PROCESSING DAT.....	139
6.1 Převod dat ze SMI do OGAMA	139
6.2 Převod dat z GazePoint do OGAMA	142
6.3 Detekce fixací a sakád	143
6.4 Čištění dat	151
6.5 Segmentace záznamu obrazovky	156
7 ZPRACOVÁNÍ DAT	161
7.1 Vizualizace trajektorií	161
7.2 Attention mapy	164
7.3 AOI	168
7.4 Scanpath comparison – ScanGraph	174
7.5 GIS analýzy pomocí V-Analytics	185
7.6 Manuální analýza dat.....	192
7.7 Analýza 3D dat	194
7.8 Statistická analýza eye-tracking dat	200
7.9 Volba metody analýzy ET dat	218
8 SHRNU TÍ	225
SUMMARY	227
REFERENCE	229

ÚVOD

Informace o okolním prostoru lidé vnímají především pomocí zraku. Stejně tak pro čtení map je využíván zrak. Eye-tracking je technologie, která umožňuje zaznamenat pohyb očí jedince, a nabízí tak bohatý zdroj informací o tom, kam, kdy, na jak dlouho a v jakém pořadí se daný jedinec díval. Jak uvádí jeden z prvních výzkumníků využívajících sledování pohybu očí v kartografii George Jenks, eye-tracking umožňuje „dostat se do hlavy čtenáře mapy“.

První kartografické studie probíhaly tak, že se respondentovi jednoduše ukázala mapa a zjišťovalo se, kam se dívá. V této „dřevní době“ eye-trackingu byla obsluha zařízení, a zejména analýza naměřených dat, velmi složitá a časově náročná, takže se výzkumník soustředil spíše na to, aby zařízení něco naměřilo, než na vlastní výsledky studií.

V posledních deseti letech počet eye-tracking studií dramaticky vzrostl a povědomí o eye-trackingu pomalu proniká i mezi širokou veřejnost. Svědčit o tom může například to, že v minulých letech Facebook (potažmo Oculus) koupil společnost EyeTribe zabývající se výrobou low-cost eye-trackerů a že Apple převzal společnost SMI, což byl do té doby jeden ze dvou největších výrobců eye-trackerů na světě.

Obsluha zařízení dnes již není tak složitá a zdlouhavá jako dříve a rovněž lze sehnat eye-tracker za dostupnou cenu. Navzdory tomu spousta studií stále probíhá stejně živelně. Výzkumník posadí respondenta před eye-tracker, ukáže mu mapu a čeká, co se stane. Tento trend je možné pozorovat zejména těsně po nákupu zařízení, kdy je výzkumník plný nadšení a očekávání a už už by chtěl mít nějaké hezké výsledky. Stejně tomu bylo i v mém případě. Na Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci jsme zakoupili eye-tracker v červnu roku 2011. Vzpomínám si, jak nadšený jsem byl z prvních obrázků zachycujících pohyby pohledu respondenta a těšil se, jak se o tom budou krásně psát články. K prvním rozumným výsledkům však vedla trnitá cesta. Postupně jsem se musel naučit spoustu věcí o tom, jak eye-trackery fungují, jak sestavit experiment, jak analyzovat výsledky

a odvozovat z nich závěry. Tato publikace by měla posloužit k tomu, aby cesta dalších výzkumníků za výsledky byla pohodlnější, rychlejší a méně trnitá.

První kapitola popisuje, jak technologie eye-tracking funguje. Ve druhé kapitole je stručně shrnuto využití eye-trackingu v různých oblastech lidské činnosti. Třetí kapitola popisuje kognitivní kartografii. Čtvrtá kapitola je zaměřena více prakticky. Jsou v ní popsány tři eye-tracking systémy – SMI RED 250, Gazepoint a EyeTribe v kombinaci s aplikací OGAMA. Po přečtení této kapitoly by měl být čtenář schopen tato zařízení zapojit a nastavit tak, aby mohl začít nahrávat data. Před vlastním záznamem pohybu očí je však důležité rozmyslet si design experimentu a to, jak budou stimuly respondentům prezentovány. Tomu se věnuje pátá kapitola. Šestá kapitola je pak zaměřena na pre-processing dat, který obsahuje identifikaci fixací a sakád a také čištění dat a hledání chyb v datech. Poslední, sedmá kapitola popisuje několik metod analýzy a vizualizace eye-tracking dat, a to včetně statistické analýzy a doporučení pro výběr vhodné metody.

Přestože se v názvu knihy objevuje kognitivní kartografie, lze většinu rad a doporučení v této knize obsažených využít i v jiných oblastech výzkumu.

Standa Popelka

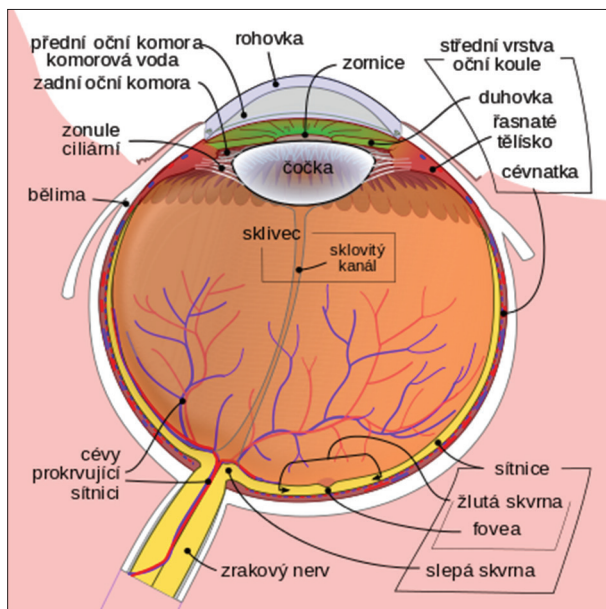
1 EYE-TRACKING

Pro sledování pohybu očí neboli eye-tracking je nutné nejprve znát několik informací o tom, jak vlastně lidský zrak funguje a jaké pohyby očí vykonávají.

1.1 Charakteristika lidského oka

Zrak je u lidí nejsilnější a nejvíce využívaný smysl. Obě oči poskytují zhruba eliptický obraz prostoru o úhlovém rozpětí přibližně 200° na šířku a 130° na výšku (Biedert a kol., 2010). Struktura lidského oka je uzpůsobena potřebě promítnout paprsek světla na sítnici. Oko propouští světlo skrz zornici, následně je obraz převrácen a zaostřen na zadní stranu oční bulvy – sítnici. Světlo dopadající na sítnici pak způsobuje chemické přeměny ve světločivých buňkách. Těmi jsou tyčinky a čípky, které přemění dopadající světlo v elektrické impulzy, které jsou pomocí očního nervu přeneseny do mozku.

Oční bulbus má přibližně kulovitý tvar o průměru asi 23 mm. V oční štěrbině mezi otevřenými víčky je viditelný pouze menší, přední úsek oční koule, zatímco větší, zadní část je uložena v hloubi očnice. Oční koule obsahuje přední pól, který odpovídá vrcholu rohovky, a zadní pól. Oba póly spojuje oční (geometrická) osa. Tato geometrická osa není totožná se zornou (vizuální) osou oka spojující optický střed oka se žlutou skvrnou. Geometrická a vizuální osa spolu svírají úhel asi 5°. Oční koule je tvořena stěnou oční koule a obsahem oční koule. Stěna oční koule se skládá ze zevní vazivové vrstvy (bělima a rohovka), prostřední vrstvy (cévnatka, řasnaté tělísko, duhovka) a vnitřní vrstvy (sítnice). Obsah oční koule představují průhledné a číré struktury, které propouštějí světelné paprsky a soustřeďují je (lámou) tak, že dopadají na sítnici. Jsou to optická prostředí oka a tvoří je čočka, sklívec a přední a zadní oční komora (Synek a Skorovská, 2014). Struktura lidského oka je znázorněna na obrázku 1. Na následujících stranách budou popsány jednotlivé části oka a jejich význam při eye-trackingu.



Obr. 1 Struktura lidského oka¹

Bělima (sclera) je pevná, tuhá vazivová blána, která zaujímá zadních pět šestin oční koule. Je ochranným obalem pro hlubší oddíly oční koule a představuje pevnou oporu pro připojující se šlachy okohybných svalů. Na přední straně bělimy je velký otvor (o průměru asi 12 mm), do jehož okraje (limbus sclerae) je vsazen lehce zkosený okraj rohovky (limbus corneae) (Synek a Skorovská, 2014).

Rohovka (cornea) překlenuje a uzavírá kruhový otvor o průměru asi 12 mm v předním okraji bělimy. Má tvar segmentu koule, který se vyklenuje dopředu. Rohovka představuje vstupní oddíl optického prostředí oka a z hlediska indexu lomivosti světla je jeho nejvýznamnější součástí (Synek a Skorovská, 2014).

Cévnatka (choroidea) představuje nejzrůsáhlejší část prostřední vrstvy stěny oční koule, protože zaujímá její zadní dvě třetiny. Má podobu tenké černohnědé blány bohaté na cévy, která se povrchovou stranou přikládá k bělimě. Dutinová strana cévnatky je hladká a naléhá na ni sítnice. Cévnatka tak představuje tmavou komoru pro optickou vrstvu sítnice a navíc jsou z kapilární sítě vyživovány pigmentové buňky sítnice, tedy čípky a tyčinky. Vzadu v cévnatce je otvor, kterým prostupují vlákna zrakového nervu, sítnicová tepna a žíla (Synek a Skorovská, 2014).

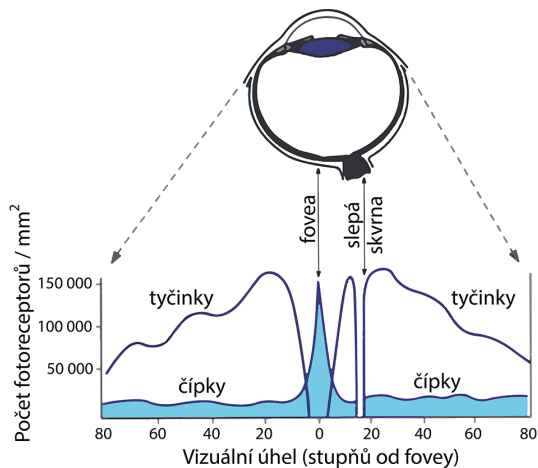
1 <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7219151>

Řasnaté těleso (corpus ciliare) má tvar zřaseného prstence, který je přiložen na vnitřní stranu bělimy. Na řezu má tvar trojúhelníku. Zadní okraj řasnatého tělesa se ztenčuje a plynule přechází do cévnatky. Směrem dopředu se řasnaté těleso ztlušťuje a spojuje se s duhovkou. Podkladem řasnatého tělesa je vazivové stroma, v němž jsou uloženy četné hladké svalové buňky tvořící musculus ciliaris. Musculus ciliaris tvoří prstenčitý svěrač, který svou kontrakcí uvolňuje závěsný aparát čočky. Ta svou pružností mění tvar a optickou mohutnost, a tím umožňuje akomodaci čočky (Synek a Skorovská, 2014).

Duhovka (iris) tvoří nejvíce dopředu vysunutou část prostřední vrstvy oční stěny. Má tvar mezikruží s centrálně uloženým otvorem zvaným zornice neboli panenka (pupilla). Přední plocha duhovky je podle množství pigmentu individuálně různě zbarvená a podmiňuje barvu očí. Duhovka plní v oku úlohu světelné clony. Podle momentálního množství světla si sítnice prostřednictvím pupilárního reflexu mění své osvětlení tak, aby dosahovalo optimálních hodnot (Synek a Skorovská, 2014).

Sítnice (retina) tvoří vnitřní vrstvu oka a je dělena na dva stavebně i funkčně odlišné oddíly – optickou a slepou část sítnice. Optická část sítnice je funkčně nejvýznamnější vrstvou stěny oční koule. Na očním pozadí se rozlišuje několik útvarů. U zadního pólu oka leží žlutá skvrna kruhovitě až eliptického tvaru o průměru asi 3 mm. V jejím středu je prohlubeň, která se nazývá fovea centralis. Toto místo leží ve vrcholu optické osy oka a představuje místo nejostřejšího vidění, protože se do něj promítá centrální paprsek. V oblasti žluté skvrny jsou nakupeny jen čípky, které zde mají největší hustotu. Ve vzdálenosti asi čtyř milimetrů od žluté skvrny se vyklenuje bělavé políčko, kterým odstupuje z oční koule zrakový nerv. Toto políčko má tvar kruhu o průměru asi 1,5 mm a neobsahuje žádné světločivé elementy. Představuje tedy fyziologickou slepou skvrnu.

Zevní vrstva sítnice spolu s pigmentovou vrstvou cévnatky působí jako světelná izolační vrstva, která pohlcuje dopadající světelné paprsky a zabráňuje jejich odrazu uvnitř oka („černá komora“). Vnitřní vrstva obsahuje vlastní primární smyslové buňky (fotoreceptory) a neurony, které sbírají informace z fotoreceptorů a odvádějí je prostřednictvím zrakového nervu z oka do mozku. Smyslové buňky se v sítnici vyskytují ve dvojí podobě: tyčinky (bacilli) a čípky (coni). Tyčinky registrují množství dopadajícího světla a představují většinu smyslových buněk sítnice – jejich celkový počet je asi 130 milionů. Čípky slouží k vnímání barev a je jich jen okolo sedmi milionů (Synek a Skorovská, 2014). Čípky jsou hojně zastoupeny především v oblasti fovey, která nepokrývá ani 2 % zorného pole. Z toho důvodu lidské oko vidí ostře pouze velmi malou část zorného pole. Hustota fotoreceptorů (tyčinek a čípků) na sítnici je znázorněna na obrázku 2.



Obr. 2 Hustota tyčinek a čípků na sítnici lidského oka (upraveno dle Snowden a kol., 2012)

Fovea je ohraničena parafoveálním pásem a vnější perifoveální oblastí (Iwasaki a Inomata, 1986). Vnímání obrazu těmito částmi sítnice se nazývá periferní vidění, které je v porovnání s foveálním viděním rozmazané.

Obsah oční koule tvoří čočka, sklivce a obsah přední a zadní oční komory vyplněné komorovým mokem.

Čočka (lens) má tvar bikonvexní spojné čočky o průměru mezi 9 a 10 mm. Na čočku jsou připojena vlákna závěsného aparátu, kterými se na čočku přenášejí účinky ciliárního svalu. Při pohledu do dálky jsou vlákna řasnatého tělíska napjatá, díky čemuž je čočka zploštělá a má nízkou optickou mohutnost. Při pohledu na blízko se stáhnou ciliární svaly, ciliární aparát se poněkud posune a ochabí svůj tah na čočku. Tím se čočka vyklene (akomoduje) a zvýší svou optickou mohutnost (Synek a Skorovská, 2014).

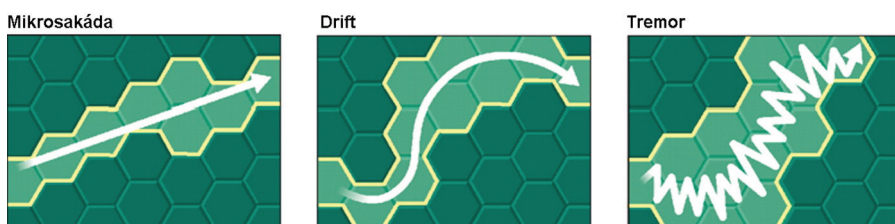
Sklivec (corpus vitreum) je měkká huspeninová a průhledná hmota vyplňující sklivcovou komoru. Na přední ploše sklivce je prohloubená jamka, do které je vsazena zadní plocha čočky. Během vývoje probíhá sklivcem k vyvíjející se čočce větev tepny, která však ještě před narozením mizí a ve sklivci po ní zůstává sklovitý kanál nebo jeho úseky (Synek a Skorovská, 2014).

Oční komory (camerae bulbi) jsou dva šterbinové otvory mezi zadní plochou rohovky a přední plochou čočky, jejím závěsným aparátem a řasnatým tělesem. Obě komory jsou vyplněné komorovým mokem, který ze zadní komory proniká přes zornici do přední, odkud je dále odváděn do tzv. Schlemmova kanálu. Při poruše odtoku komorového moku do žilního systému se zvyšuje nitrooční tlak a vzniká tzv. zelený zákal (Synek a Skorovská, 2014).

Pro sledování pohybu očí je klíčové, že více než 40 % lidského mozku zpracovává informace z oblasti pokrývající méně než 5 % zorného pole (Hoffman, 2000; Ware, 2010). Z toho důvodu se oči neustále pohybují tak, aby předměty zájmu byly zobrazeny v oblasti největšího vizuálního rozlišení, tedy fovey. Oční pohyby jsou detailně popsány v následující kapitole.

1.2 Pohyby očí – fixace a sakády

Jeden z nejdůležitějších pohybů očí není ve své podstatě pohyb. Jedná se spíše o schopnost udržet oko zaměřené na určitý bod. Tento pohyb oka se označuje jako fixace a dle Holmqvista a kol. (2011) trvá od několika desítek milisekund až po několik sekund. Vizuální vjem se skládá z řady fixací zaměřených na jednotlivé prvky sledované scény. Označení „fixace“ však není úplně přesné, protože oko nikdy není úplně pevně fixováno. Během fixací provádí tři druhy takzvaných mikropohybů. Těmi jsou tremor, mikrosakády a drift (obr. 3).

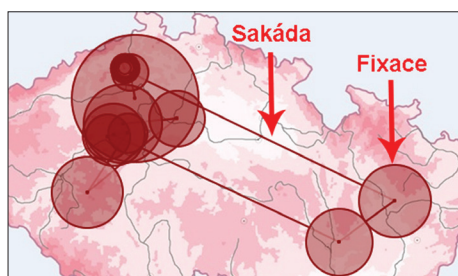


Obr. 3 Mikropohyby probíhající během fixací (Martinez-Conde a Macknik, 2008)

Tremor neboli třes je drobný pohyb s frekvencí okolo 90 Hz, jehož přesný funkční význam není dosud znám. Je však možné, že je způsoben nepřesnou kontrolou okohybných svalů. Jako drift jsou označovány pomalé klouzavé pohyby, které posouvají oko mimo střed fixace. Za 200 ms se osa pohledu může vychýlit až o 6 úhlových minut, a tím pádem se obraz na sítnici posune v rozsahu 10–15 čípků (Synek a Skorovská, 2014). Role mikrosakád spočívá ve vrácení oka zpět do středu fixace. Funkcí těchto pohybů je zabránit efektu saturace receptorů na sítnici, který by vedl ke slábnutí vidění. Lidé si těchto drobných pohybů nejsou vědomi (Biedert a kol., 2010). Mikropohyby probíhající během fixací je možné zaznamenat pouze s využitím vysokofrekvenčních eye-trackerů a jejich studiem se zabývá neurologie. Lze je využít například v klinických studiích zabývajících se autismem (van der Geest a kol., 2001). Pro kartografický výzkum však jejich studium nemá žádný význam, proto jsou analyzovány pouze fixace jako celek.

Pro přesun z jedné fixace na další provádějí oči rychlé balistické pohyby označované jako **sakády**. Sakády představují nejrychlejší pohyb části lidského těla. Rotační rychlost velkých sakád dosahuje až 500°/s a dle

Holmqvista a kol. (2011) je běžná délka sakád 30–80 ms. Během sakád lidský mozek nevnímá téměř žádné vizuální vjemy. Tento fakt není způsoben pouze rozmazáním vnímaného obrazu, ale také nervovým procesem označovaným jako sakadické potlačení neboli saccadic suppression (Hammoud a Mulligan, 2008). Díky tomu například není možné vidět pohyb vlastních očí v zrcadle. Sakády jsou běžně znázorňovány jako přímé spojnice mezi fixacemi (viz obr. 4). Jen zřídka je však průběh sakád opravdu přímý. Ve skutečnosti mohou sakády nabývat mnoha různých tvarů a zakřivení. Velká část sakád navíc neskončí přesně v cíli (ve středu následující fixace), ale pohyb oka se před zastavením rozkolísá. Tento postsakadický pohyb bývá označován jako glisáda. Běžně oko provede 3–4 sakády za sekundu, což znamená, že za den jich vykoná 200 000. Člověk, který se dožije 80 let, tedy za svůj život vykoná téměř šest milionů sakád (Bojko, 2013).



Obr. 4 Znázornění nejdůležitějších pohybů oka – fixací a sakád. Fixace jsou zobrazeny jako kruhy, jejichž velikost odpovídá délce fixace. Linie reprezentují sakády.

Mezi další pohyby oka patří například smooth pursuit neboli sledovací pohyb, což je pohyb, který oči vykonávají při sledování pomalu se pohybujícího objektu. Příkladem může být například pozorování letadla letícího na obloze. Jestliže se předmět pohybuje rychlostí menší než 20–30°/s, dokáže jej fovea přesně sledovat. Začátek pohybů je opožděn asi o 150 ms. Opoždění za pohybujícím se předmětem je vyrovnáváno korekčními sakádami (Synek a Skorovská, 2014). Sakády a smooth pursuit jsou zcela rozdílné pohyby a řídí je rozdílné části mozku. Na rozdíl od sakád vyžaduje smooth pursuit objekt ke sledování a nelze jej vykonávat ve tmě či před holou zdí. Tabulka 1 znázorňuje typické hodnoty délky trvání, amplitudy a rychlosti nejběžnějších pohybů oka. Hodnoty jsou převzaty z publikace Holmqvista a kol. (2011) a mohou se lišit od hodnot udávaných jinými autory. Například Duchowski (2007) uvádí délku sakád 10–100 ms.

Tab. 1 Typické parametry vybraných pohybů očí (upraveno dle Holmqvist a kol., 2011)

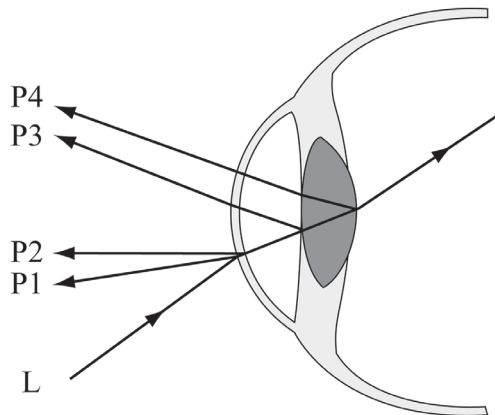
Pohyb oka	Délka (ms)	Amplituda	Rychlost
Fixace	200–300	–	–
Sakáda	30–80	4–20°	30–500°/s
Glisáda	10–40	0,5–2°	20–140°/s
Smooth pursuit	–	–	10–30°/s
Mikrosakáda	10–30	10–40°	15–50°/s
Tremor	–	< 1°	20'/s (max)
Drift	200–1000	1–60'	6–25'/s

V kartografickém výzkumu jsou tedy v naprosté většině případů sledovány pouze fixace a sakády. K jejich identifikaci slouží řada algoritmů (viz kapitola 6.3). Na základě eye-tracking metrik, tedy číselných charakteristik fixací a sakád, se určuje vztah pozorovatele vůči sledovanému obrazu, obtížnost podávané informace, pozornost respondenta a další parametry čtení obrazu (viz kapitola 7.8).

1.3 Vývoj metod sledování pohybu očí

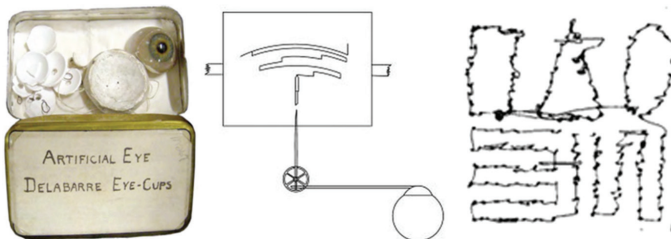
Zájem o lidský zrak a to, jak funguje, je možné pozorovat již ve čtvrtém století před našim letopočtem, kdy si Aristoteles všiml toho, že se obě oči pohybují společně a že například není možné, aby se jedno oko dívalo doleva a druhé doprava. Aristoteles tak došel k závěru, že obě oči je třeba vnímat jako společnou jednotku. O téměř pět set let později se stejnou problematikou zabýval také Ptolemaios, který dokonce prováděl experimentální studie zaměřené na binokulární vidění (Wade, 2010).

O mnoho let později, v devatenáctém století, se problematikou lidského zraku a vidění začal zabývat český fyziolog, anatom a biolog Jan Evangelista Purkyně. Ten je v oblasti sledování pohybu očí velmi známý zejména díky svým popisům obrazů odrážejících se od povrchu oka (tzv. Purkyňovy obrázky / Purkinje images), které mohou být použity pro přesný záznam polohy oka. Existují čtyři viditelné Purkyňovy obrázky (obr. 5). První Purkyňův obrázek (P1) představuje odraz od vnější strany rohovky. Druhý (P2) je odrazem od její vnitřní strany. Třetí (P3) je odrazem od přední strany čočky a poslední (P4) je odrazem od její zadní strany (Glenstrup a Engell-Nielsen, 1995).



Obr. 5 Čtyři Purkyňovy obrázky, odrazy světelného paprsku (L) na různých částech oka: P1 od vnější strany rohovky, P2 od vnitřní strany rohovky, P3 od přední strany čočky a P4 od zadní strany rohovky

To, že se oči nepohybují plynule, popsal poprvé francouzský vědec Émile Javal, který založil a vedl oftalmologickou laboratoř na pařížské Sorbonně. Na konci 19. století poprvé popsal takzvané sakády, které pojmenoval podle rychlého pohybu koně při drezúře. Javal ve své studii (1878) rovněž sestrojil zařízení pro záznam pohybu očí, které využívalo odraz zrcátka připevněného na oko zaznamenávaný na fotografickou desku. Na Javala navázal Delabarre (1898), jenž místo zrcátka na oko připevnil sádrovou misku, ke které byl připevněn drátek (obr. 6). Oční pohyby byly poté zaznamenávány pomocí kymografu. Delabarre ve své práci uvádí, že toto zařízení bylo velice přesné při pomalých pohybech očí. Při (přirozenějších) rychlejších pohybech však docházelo k problémům a oční pohyby se nedařilo interpretovat. Jelikož byla tato procedura bolestivá, používal Delabarre ke znecitlivění oka roztok kokainu.



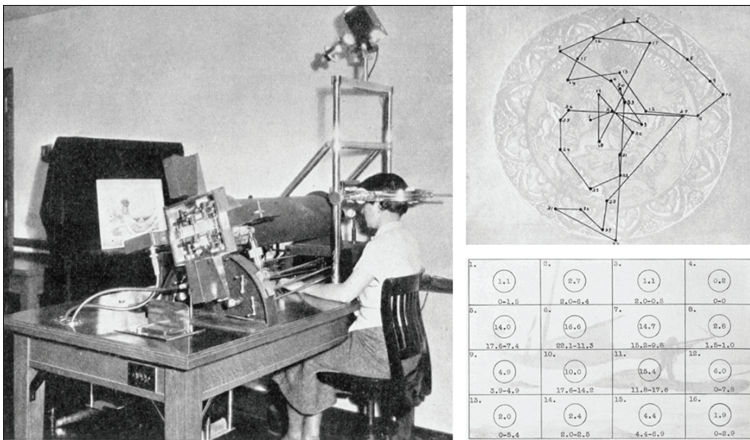
Obr. 6 Sádrové misky (vlevo), ke kterým Delabarre (1898) připevnil drát a pomocí systému převodů (uprostřed) získal záznam pohybu očí (vpravo).

S počátkem 20. století došlo k rychlému nárůstu technologií pro sledování pohybu očí. Pákový přístroj Delabarra byl omezený jeho mechanickými vlastnostmi. Z toho důvodu vznikly nové metody, u kterých nebylo nutné přímé připojení oka a záznamového povrchu. První experimenty s těmito primitivními eye-trackery byly zaměřeny na oblast čtení textu či jednoduchých geometrických obrazců.

Dodge a Cline (1901) později vyvinuli fotografický přístroj, který nevyžadoval žádné uchycení na oko a byl pro účastníky výrazně pohodlnější. Po vzniku tohoto zařízení následovala revoluce ve výzkumu pohybů očí a nárůst počtu experimentů v této oblasti. Dodge a Cline ovšem nebyli jediní a nárůst počtu zařízení pro sledování pohybu očí na začátku 20. století šel ruku v ruce s rychlým vývojem teorií o vazbě mezi pohyby očí (fixace a sakády) a percepcí a kognicí.

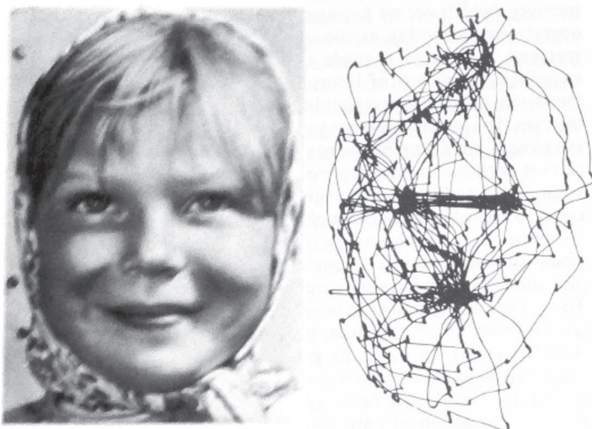
Tyto nové technologie umožnily zjistit, na která konkrétní místa se testovaný subjekt zaměřoval, což později ve 20. století zaujalo bezkonkurenční význam jak v oblasti eye-trackingu, tak ve výzkumu pozornosti. Klíčovou osobností při vzniku této oblasti výzkumu byl Guy Buswell, působící na univerzitě v Chicagu. Jeho nejvýznamnější prací byla monografie „How People Look at Pictures“ (Buswell, 1935). Obsahuje údaje o pohybu očí zaznamenané od celkem 200 respondentů, přičemž každý z nich prohlížel více obrázků. Celkem tedy zaznamenaná data obsahovala více než 2000 záznamů pohybu očí a byla zaznamenaná na 5,5 km filmového pásu. Takto rozsáhlý objem naměřených dat je působivý i z hlediska současných standardů, natož při práci s tehdejší technologií, kdy bylo nutné manuálně transformovat horizontální a vertikální polohu oka. Tato práce byla první, která systematicky zkoumala pohyby očí respondentů při prohlížení složitějších stimulů, než jsou texty či jednoduché geometrické obrazce, a představovala něco revolučního v oblasti eye-trackingu (obr. 7). Buswellova monografie obsahuje širokou škálu metod analýzy dat naměřených při prohlížení obrázků, včetně některých překvapivě moderních. Buswell například studoval celkovou distribuci fixací na obrázcích; porovnával několik prvních fixací na obraze s několika posledními; porovnával různé respondenty při sledování stejného stimulu či se zaměřil na vliv zadaných úkolů na zaznamenanou trajektorii. Součástí monografie jsou dokonce i první „heat mapy“, tedy mapy hustoty fixací v jednotlivých částech obrazů, a vymezení „oblastí zájmu“ (Wade, 2010). Buswellovu monografii je tedy právem možné považovat za základ dnešního eye-tracking výzkumu.

Podobnou problematikou jako Buswell se v Moskvě zabýval Alfred Yarbus ve svém výzkumu v padesátých a šedesátých letech 20. století (přeloženo do angličtiny jako Yarbus, 1967). V této práci Yarbus provedl experiment, kdy stejný obraz zobrazil respondentům sedmkrát za sebou, ale pokaždé doplněný jinou otázkou.



Obr. 7 Eye-tracking zařízení použité v roce 1935 Buswellem (vlevo) a výstupy z jeho měření (vpravo)

Tento experiment potvrdil Buswellovo dřívější pozorování, že úkoly dané respondentovi mohou radikálně změnit místa, na která respondent fixuje. Yarbusova práce se stala klasickým dílem v oblasti eye-trackingu a je často uváděna jako jednoznačná demonstrace toho, že „high-level“ faktory (dané úkolem) mohou zastínit jakékoliv „low-level“ faktory (dané stimulem). Kromě toho se poprvé ukázalo, že při pozorování lidského obličeje dochází k fixacím na oči a pusu a ke vzniku trojúhelníku, jak je to patrné z obrázku 8 (Wade, 2010).



Obr. 8 Zobrazení trajektorie pohybu oka zaznamenané během prohlížení obrazu „Dívka od Volhy“. Jasně patrné je umístění fixací v oblasti očí a pusu tvořící trojúhelník (Yarbus, 1967).

Objektivní eye-trackery vyvinuté koncem 19. a začátkem 20. století umožnily zjištění zásadních nových poznatků o skutečné povaze pohybů očí. Pohyby očí nebyly tak hladké a nepřetržité, jak se subjektivně zdálo. Technologický pokrok umožnil řešit nové otázky a identifikoval nové a nečekané otázky v psychologii a fyziologii pohybů očí a jejich vztahu ke kognici.

V 70. letech 20. století se většina prací zaměřila na technická vylepšení eye-trackerů, která měla za cíl především zvýšení jejich přesnosti (Mohamed a kol., 2007). Vzniklo několik velice přesných technik měření pohybu očí, přičemž například metoda Dual Purkinje Image Tracker nebyla doposud z hlediska přesnosti měření překonána.

Obecně existují dva typy technik sledování pohybu oka: ty, které měří polohu oka vzhledem k hlavě, a ty, které měří orientaci oka v prostoru, neboli „Point of Regard“ (Young a Sheena, 1975).

Duchowski (2007) definuje čtyři následující techniky sledování pohybu očí:

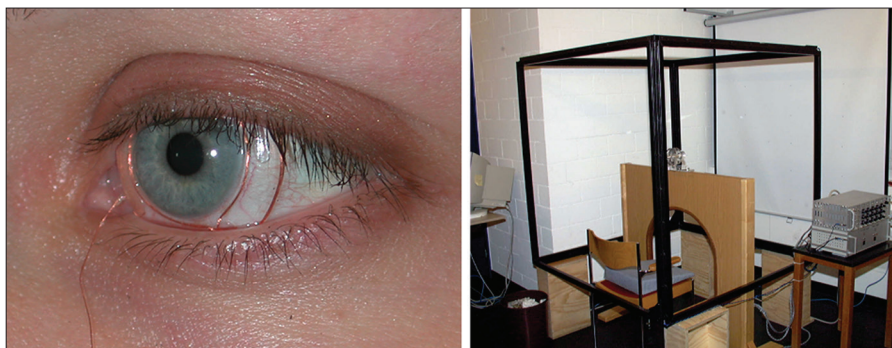
- Elektro-OculoGraphy (EOG),
- Scleral contact lens (kontaktní čočky),
- Photo-OculoGraphy (POG) a Video-OculoGraphy (VOG),
- Pupil and Corneal Reflexion Tracking.

Princip **elektrookulografie** (EOG) spočívá v měření rozdílů elektrického odporu kůže pomocí elektrod umístěných kolem očí. Zaznamenáváním poměrně malých rozdílů v kožním odporu byl vypočítán pohyb očí (obr. 9). Jednou z výhod EOG je možnost měřit i pohyb zavřených očí. Toho se využívá například v klinických studiích zaměřených na oční pohyby během spánku. Tato technika měří polohu očí vůči hlavě, proto ji nelze využít ke zjišťování směru pohledu (Point of Regard), pokud není současně měřena pozice hlavy (pomocí head-trackeru). V polovině sedmdesátých let 20. století bylo EOG nejpoužívanější technikou eye-trackingu (Young a Sheena, 1975), ale ze čtyř výše zmíněných technik je nejméně přesná (Yarbus a kol., 1967).



Obr. 9 Ukázka okulografie využívající elektrod kolem očí (Larson a kol., 2017)

Naopak jednou z nejpřesnějších technik měření pohybu očí je použití mechanického nebo optického referenčního objektu namontovaného na **kontaktní čočku**, který je pak umístěn přímo na oku. První zařízení tohoto typu (využívané například Delabarrem) využívala sádrové misky fyzicky propojené se záznamovým perem například pomocí drátu. Tato technika se později vyvinula a začaly být používány moderní kontaktní čočky umístěné na rohovce a bělimě. Na tuto čočku byla umístěna řada optických či mechanických zařízení, například obsahujících fosfor nebo drátěnou cívku. Poloha a orientace této cívky (a tím pádem i oka) se vypočítala pomocí měření změn proudů indukovaných třemi navzájem kolmými zdroji magnetického pole (obr. 10) (Hammoud a Mulligan, 2008). Vložení čočky do oka vyžaduje péči a cvičení a její použití je pro respondenta nepohodlné. I tato technika měří polohu oka vzhledem k hlavě.



Obr. 10 Kontaktní čočka obsahující drátěnou cívku (vlevo) a externí rám pro měření změn magnetického pole (vpravo)²

Další z technik měření pohybu očí je **foto- nebo videookulografie**, jež spočívají v měření pozice rozlišitelných částí oka. Používá se zejména detekce tvaru zornice, pozice limbu (hranice mezi rohovkou a bělimou) a korneálního odrazu (odrazu blízko umístěného (infračerveného) světelného zdroje od rohovky).

Interpretace pohybů očí poskytovaných těmito technikami může nebo nemusí být prováděna automaticky a může zahrnovat i prostou vizuální kontrolu očních pohybů (obvykle z videozáznamu). Manuální procházení videozáznamů je ale extrémně zdlouhavé, náchylné k chybám a je omezeno vzorkovací frekvencí videozařízení. Některé z těchto metod vyžadují, aby byla hlava pevně upevněna pomocí opěrky hlavy nebo pomocí zubů (pomocí tzv. bite-baru) (Young a Sheena, 1975).

² http://work.thaslwanter.at/Kinematics/html/03_RotMats.html

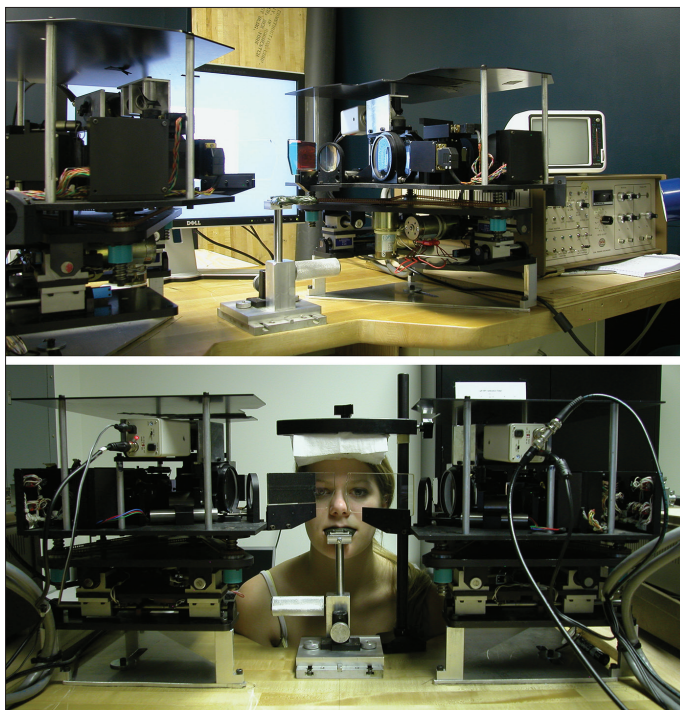
Automatické sledování limbu často zahrnuje použití infračervených fotodiód namontovaných na rámu okolo oka (obr. 11). Výhoda sledování limbu spočívá v tom, že na rozdíl od zornice není velikost limbu ovlivněna různými světelnými podmínkami. Naopak nevýhodou je časté překrytí limbu očními víčky.



Obr. 11 Limbus tracker³

Z hlediska prostorové přesnosti i frekvence záznamu je dosud nepřekonanou technikou měření dvou Purkyňových obrázků využívané zařízením **Dual Purkinje Image** (DPI) tracker. Toto zařízení (Crane a Steele, 1985) využívá prvního a čtvrtého Purkyňova obrázku, tedy odrazů světelného paprsku od vnější strany rohovky a vnitřní strany čočky. Ke sledování těchto dvou odrazů používá zařízení systému zrcadel a velmi rychlých optických serv. Problematické je zejména to, že čtvrtý Purkyňův obrázek je asi 400× slabší než první. Díky své vysoké přesnosti se DPI tracker využívá jako referenční při porovnávání přesnosti eye-trackerů. I při používání DPI trackeru je však nezbytná fixace hlavy a v ideálním případě i zubů. Dual Purkinje Image tracker od společnosti Fourward Technologies je znázorněn na obrázku 12. V dolní části je poté znázorněna fixace hlavy.

3 <http://slideplayer.com/slide/5952194/>

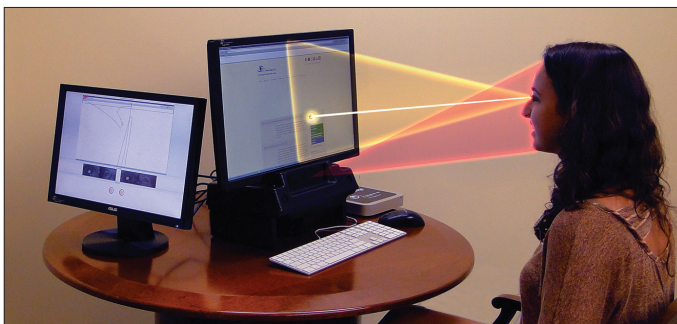


Obr. 12 Dual Purkinje Image tracker (nahore)
a nezbytná fixace hlavy při jeho používání (dole)⁴

Ačkoliv jsou výše uvedené techniky obecně vhodné pro měření pohybů očí, neposkytují Point of Regard, tedy směr pohledu. Pro jeho zjištění musí být hlava zafixována tak, aby se shodovala poloha oka vzhledem k hlavě se směrem pohledu.

Pro zjištění směru pohledu je nezbytné měření několika charakteristik očí zároveň tak, aby se odlišil pohyb hlavy od otáčení očí. Takovými charakteristikami očí jsou nejčastěji pozice středu zornice a infračerveného odrazu od rohovky. Tyto dvě charakteristiky využívá v dnešní době nejčastěji aplikovaná technika sledování pohybu očí **Pupil and Corneal Reflexion Tracking**. Její princip spočívá v detekci středu zornice a korneálního (kornea = rohovka) odrazu přímého paprsku infračerveného světla. Jak už bylo uvedeno výše, existují celkem čtyři Purkyňovy obrázky. Korneální odraz je pouze jiné označení pro první Purkyňův obrázek, který je nejčastěji využíván pro měření pozice pohledu. Vzájemná poloha středu zornice a korneálního odrazu se při otáčení očí mění, ale při menších pohybech hlavy zůstává relativně konstantní.

4 <http://twiki.cis.rit.edu/twiki/bin/view/MVRL/DualPurkinjeImageTracker>



Obr. 13 Eye-tracker umístěný pod monitorem⁵

Eye-tracker je nejčastěji umístěn pod monitorem, na kterém je zobrazen studovaný obraz neboli stimulus (obr. 13). Součástí tohoto zařízení je jedno nebo více infračervených světel, které svítí směrem na uživatele. Zařízení také obsahuje kameru, která snímá oči respondenta. Ta na základě rozpoznávání obrazu nalezne střed zornice a korneální odraz infračerveného světla (obr. 14). Ze vzájemné polohy těchto dvou bodů zařízení vypočítá směr pohledu (Point of Regard).



Obr. 14 Snímek z kamery umístěné na eye-trackeru. Bílým křížem je označen střed zornice, černým korneální odraz.

Mnoho informací o základních mechanismech lze shromáždit z reakcí v kontrolovaných laboratorních studiích, ale již od počátku eye-tracking výzkumu existoval velký zájem o studium chování respondentů v reálném prostředí. Dnes již existuje mnoho mobilních systémů umožňujících sledování pohybu očí přímo v reálném prostředí. Tyto eye-trackery rovněž využívají Pupil and Corneal Reflexion tracking a respondent je má umístěné přímo na hlavě jako brýle nebo jsou eye-trackery namontované na nejrůznější přilby (obr. 15).

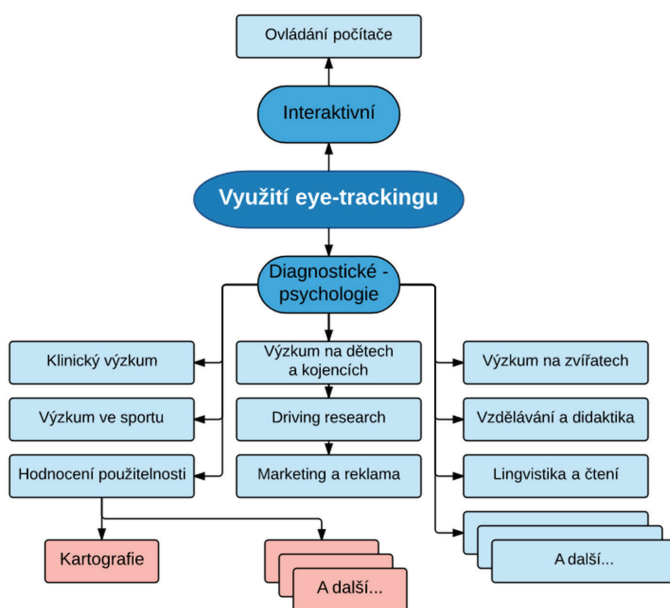
5 <http://eyegaze.com/wp-content/uploads/Study-active-checking-more.jpg>



Obr. 15 Mobilní eye-trackery od společností SR research (vlevo),
Ergoneers (uprostřed) a Tobii (vpravo)

2 VYUŽITÍ EYE-TRACKINGU

Eye-tracking je využíván v mnoha oblastech lidské činnosti. V této publikaci není možné obsáhnout celé spektrum využití sledování pohybu očí, a ani to není jejím cílem. Tato kapitola tedy slouží pouze jako velmi neúplný přehled širě využití eye-trackingu. Duchowski (2007) rozděluje využití eye-trackingu do dvou základních kategorií. Jedná se o interaktivní využití, kdy eye-tracker slouží k ovládnání počítače, a diagnostické využití, kdy jsou pohyby očí zaznamenávány pro odhalení toho, které části stimulů upoutaly respondentovu pozornost. Oblasti využití eye-trackingu popsané v této knize jsou znázorněny na obrázku 16.



Obr. 16 Schéma využití eye-trackingu

2.1 Interaktivní využití eye-trackingu

Eye-tracking lze využít pro ovládání počítače. Pohled tak nahrazuje nebo doplňuje běžné periferie, jako je klávesnice nebo myš. S eye-trackerem dokonce experimentoval i známý teoretický fyzik Stephen Hawking.⁶ Eye-tracking jako doplněk běžných periférií je již dnes instalován do výkonných herních notebooků.⁷

Eye-tracker však může klávesnici a myš úplně nahradit. Tento přístup najde své využití především u kvadruplegiků, kteří nemají možnost jiným způsobem počítač ovládat. Nevýhodou tohoto přístupu je zejména to, že lidé běžně využívají zrak pro získání informací o okolí. To způsobuje problémy v případě, že má zrak sloužit jak pro získání informací, tak pro ovládání. Tento problém bývá označován jako Midasův dotyk dle starověké pověsti o králi Midasovi, který proměnil ve zlato vše, čeho se dotkl. Uživatel se například soustředí (fixuje) na určité místo, protože ho zaujalo, a chce si jej prohlédnout. Systém ale tuto fixaci vyhodnotí jako interakci (klik).

Zaměření se na určitý objekt pomocí zraku je velmi jednoduché, intuitivní a není třeba žádného tréninku. Nicméně v případě postižených lidí toto nemusí platit. Těžce postižení od narození nejsou zvyklí cokoli fyzicky ovládat. Prosté naučení se ovládání kurzoru pomocí pohledu tak může těmto uživatelům trvat od několika minut až po několik měsíců (Gips a kol., 1996).

Většina eye-tracking systémů určených pro psaní textu využívá virtuální klávesnici umístěnou na obrazovce. Psaní na takové virtuální klávesnici se skládá ze tří fází (Majaranta a Rähkä, 2002). V první z nich se uživatel zaměří na určité písmeno (focus). Druhou fází je odezva (feedback), která je pro postižené uživatele velmi důležitá. Protože v dosavadním životě nebyli schopni fyzicky manipulovat s objekty, je nutné, aby se vybrané písmeno vizuálně označilo, případně bylo toto označení doprovázeno akustickým signálem. Ve třetí fázi dochází k potvrzení výběru (selection), a tím pádem k interakci, tedy napsání daného písmena. Tato selekce nejčastěji probíhá pomocí Dwell time, tedy fixací na dané klávese o předem stanovené délce (většinou 600–1000 ms). Kromě Dwell time je možné využívat například mrknutí (Rasmusson a kol., 1999), stisknutí tlačítka, pohyb hlavy (Beukelman a Mirenda, 2005) či předem nastavená gesta očí (například pohled doleva).

Rozložení virtuálních klávesnic je ve většině případů odlišné od klasického QWERTY. Uživatelé se například mohou lépe orientovat v klávesnici seřazené dle abecedy. Ward a MacKey (2002) vytvořili nástroj Dasher,⁸ sloužící k psaní textu pohledem. Namísto klasického rozložení kláves jsou jednotlivá písmena zobrazována tak, jak je znázorněno na obrázku 17.

6 <http://www.hawking.org.uk/the-computer.html>

7 <https://tobiigaming.com/alienware17-eye-tracking-how-to/>

8 <http://www.inference.org.uk/dasher/>