

Paweł Soluch, Adam Tarnowski

O metodologii badań eyetrackingowych

Lingwistyka Stosowana / Applied Linguistics / Angewandte Linguistik nr 7,
115-134

2013

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach
dozwolonego użytku.

Paweł SOLUCH

Neuro Device

Adam TARNOWSKI

Uniwersytet Warszawski

O metodologii badań eyetrackingowych

Abstract:

On Eye-Tracking Methodology

This article gives a complex overview of the topic of eyeball movements which can be described as the commonest potentially intentional human behaviour. The observations of intentional human behaviour have been carried out by scholars for centuries, yet nowadays due to the technological development it is possible to introduce far more accurate and advanced eye-tracking devices. The paper describes thoroughly the perception process, differentiates types of eye movements, then moves on to the mechanisms that ensure the stability of perception and comments on modern methods of measurement of eyeball movement. The article underlines that eye-trackers have already been applied to various areas of life and science, such as linguistics, psychology and law, just to name a few. The current studies in the field of eye-tracking concentrate mostly on the cognitive processes behind the eye movement. Eye-tracking research has been experiencing a growing interest, yet the topic demands even more attention and exploration as a vast and fertile branch of knowledge.

Kiedy ponad sto lat temu zainteresowano się uwagą wzrokową, w jej badaniach posiłkowano się każdą z możliwych, jak na tamte czasy, technologii. Była to obserwacja oczu czy introspekcja – mało precyzyjne metody rejestracji częściowo automatycznych procesów, jakimi są ruchy oczu. Używano systemu lusterek do prowadzenia obserwacji podczas czytania, szkieł powiększających czy nawet teleskopu (B. Erdmann, R. Dodge 1898, S.N. Newhall 1928, K. N. Ogle i in. 1949). Ekstremalnym przykładem jest mocowanie do oczu odbłaskowych elementów i rejestracja odbicia światła na taśmie światłoczułej (N. Wade, B. W. Tatler 2005). Badania – być może w związku ze wspomnianymi powyżej ograniczeniami – skupiały się na ruchach jako takich, a nie na fiksacjach. Techniki pomiaru rozwijały się w stronę rejestracji wszystkich typów ruchu gałki ocznej. W niniejszym artykule zaprezentujemy metodologię badań okulograficznych, techniki oraz tematykę, w której używane są obecnie eyetrackery.

Rozpoczynając przygodę z eyetrackingiem, należy zdać sobie sprawę z kilku istotnych praw rządzących układem wzrokowym ludzi – cech, które powinny być

brane zawsze pod uwagę, kiedy przygotowujemy eksperyment czy siadamy do analizy wyników badań okulograficznych. Prawa te prowadzą do zrozumienia, czym tak naprawdę jest eyetracking. W tej części chcielibyśmy się właśnie skupić nad samą istotą badań ruchów oka oraz charakterystyką gałki ocznej i układu wzrokowego. Uważamy, że okulografia jako metoda może być niezwykle interesująca dla badaczy z kilku powodów. Po pierwsze, ruch oka jest prawdopodobnie najczęstszym potencjalnie intencjonalnym zachowaniem człowieka – zachodzi średnio trzy razy na sekundę. Po drugie, wskazuje precyzyjnie, jaka informacja jest w danej chwili odbierana przez badanego. Po trzecie wreszcie, kontrola ruchów oka stanowi wręcz modelowy przykład interakcji i „współpracy” mechanizmów automatycznych i kontrolowanych zarówno w aspekcie percepcji, jak i działania.

Człowiek spostrzega precyzyjnie jedynie 1,5 stopnia pola widzenia. Odpowiada to w przybliżeniu szerokości jednego wyrazu w czytanim tekście. Wyodrębnienie kilku obszarów widzenia, centralnej, okołoplamkowej i obwodowej części pola widzenia jest bardzo użyteczne, gdyż każdy z nich odpowiada za odbiór różnej informacji wzrokowej (S.P. Liversedge, J.M. Findlay 2000). Centralna, okołoplamkowa i obwodowa części pola widzenia są odpowiedzialne za odbieranie precyzyjnej informacji o otoczeniu i identyfikację obiektów. Obwodowa część pola widzenia jest związana ze spostrzeganiem i oceną nowych obiektów, orientacją w przestrzeni i układem równowagi. Za podziałem tym idzie również występowanie różnic w budowie siatkówki, zaangażowanie niejednorodnych struktur mózgowych w przetwarzanie konkretnych informacji z tych obszarów, jak i istnienie odmiennych mechanizmów sterujących.

Aby przestrzeń przed nami mogła być wyraźnie spostrzegana, układ wzrokowy posiłkuje się procesami poznawczymi. System uwagi poddaje nieustannej analizie całe pole widzenia i średnio trzykrotnie w ciągu sekundy decyduje o wyborze obiektu, skierowaniu na niego wzroku, koordynuje czasowo i określa parametry przestrzenne ruchu. Dlatego właśnie ruchy oka mają duże znaczenie dla zrozumienia ludzkiej percepcji. Niepatologiczne ruchy oka możemy podzielić na ruchy konwergencyjne, tremor – delikatne drżenie oka, dryft, mikrosakady, odruch optokinetyczny, ruchy śledzenia i ruchy skokowe (sakady). Poza powyższymi, wyróżniamy jeszcze fiksacje, często traktowane jako odrębny mechanizm fizjologiczny, a w rzeczywistości zbudowane z drobnych ruchów nazywanych wewnątrzfiksacyjnymi, tj. tremoru, mikrosakad i dryftu. Mimo, że jak wynika z fizjologii, fiksacje są w rzeczywistości również ruchami, to są one interpretowane jako skupienia wzroku na konkretnym fragmencie obrazu (proces z natury statyczny) i jest to jak najbardziej uzasadnione, gdyż drobne ruchy służą poszerzeniu pola precyzyjnego widzenia – jest to jeden z mechanizmów kompensacyjnych.

Tremor oka to ruch o częstotliwości około 90 Hz i ze względu na krytyczną częstotliwość migotania, wynoszącą zależnie od stanu psychofizycznego 25–50 Hz,

nie jest subiektywnie spostrzegany. Krytyczna częstotliwość migotania powoduje zlewanie się obrazów zmieniających się z większą niż 50 Hz częstotliwością. Rola tremoru nie jest jasna, ciekawostką jest, że jest on realizowany osobno przez każde oko. Niektórzy badacze wiążą go z nieustannym aktywowaniem neuronów wzrokowych (S.S. Martinez-Conde i in. 2004). Inni piszą, że może wynikać z nieprecyzyjności kontroli oka przez mięśnie (K. Holmqvist i in. 2011).

Dryft jest powolnym ruchem oka przemieszczającym się w kierunku odśrodkowym od punktu fiksacji. Jego rolą jest zapobieganie zmniejszaniu się czułości receptora (adaptacji) pod wpływem jednostajnego bodźca (W. Budohowska, A. Grabowska 1995). Ponadto kompensuje cienie naczyń krwionośnych w obrębie gałki ocznej, przez to eliminując zaburzenia widzenia (R. Sekule, R. Blake 1994). Rola dryftu, podobnie jak i tremoru, nie jest jeszcze do końca wyjaśniona. Eksperymentalne zniesienie drobnych ruchów prowadziło do utraty widzenia (R. Sekule, R. Blake 1994, W. Budohowska, A. Grabowska 1995). Zdaniem S. Martinez-Conde i in. (2004), dryft może kompensować niestabilności systemu wzrokowego, prowadząc do utraty ostrości widzenia poprzez korekcję punktu fiksacji.

Mikrosakady, czyli drobne szybkie ruchy o charakterze skokowym, są mechanizmem pozwalającym powrócić wzrokiem do punktu fiksacji (funkcja korekcji wynikająca z drobnych ruchów oka). Z powodu drobnych niestabilności systemu wzrokowego niezbędny dla prawidłowego widzenia jest mechanizm pozwalający na ponowną koncentrację wzroku na obserwowanym obiekcie. Istnieją również doniesienia wskazujące, że mikrosakady mają znaczenie przy spostrzeganiu odcieni kolorów (S. Martinez-Conde i in. 2004).

Innym rodzajem ruchu są ruchy konwergencyjne. Jest to zjawisko dotyczące obu gałek ocznych jednocześnie, które dzięki skurczowi mięśni okoruchowych nakierowują oś wzrokową na jeden punkt (ruch ku linii pośrodkowej przedniej). Celem tego ruchu jest „nakierowanie” obrazu obserwowanego przedmiotu na dołek centralny. Mechanizm ten wykorzystywany jest przez układ nerwowy do oceny głębi i jest to jedyny wskaźnik o charakterze bezwzględny. Z uwagi na bardzo małe różnice kątowe dzielące spostrzegane obiekty, które znajdują się w większym dystansie, system ten spełnia swoją rolę w patrzeniu na odległość maksymalnie do 5 metrów (V.E. Cavallo, A.S. Cohen 2001). Choć oddalenie obiektu od oka wiąże się również ze zmianą akomodacji (dostosowaniem ogniskowej soczewki w celu uzyskania ostrego obrazu), szereg badań wykazało, iż jedynie konwergencja stanowi wskazówkę do oceny odległości (M.W. Levine 2000).

Kolejnym typem ruchów są skokowe ruchy oka. Wykonywane są średnio trzykrotnie w ciągu sekundy i jest to związane z ilością czasu potrzebnego na rozpoznanie obiektu w punkcie fiksacji oraz na zaplanowanie następnego ruchu. Przeprowadzono szereg eksperymentów, w których czas pomiędzy dwoma kolej-

nymi skokowymi ruchami oka zredukowano do ok. 70 milisekund. Warunkiem osiągnięcia tego wyniku było wcześniejsze zaplanowanie całej sekwencji ruchów oka (E.M. van Loon i in. 2002). Ruchy skokowe sterowane są procesami zachodzącymi w kilku strukturach układu nerwowego (por. M.I. Posner, M.E. Raichle 1993). Elementem pierwszym tego procesu jest przeniesienie uwagi. Oznacza to, iż dotychczas analizowany fragment pola widzenia przestał posiadać najwyższy priorytet, a jego miejsce zajął kolejny. Decyzja o zmianie punktu skupienia uwagi podejmowana jest przez struktury kory ciemieniowej (Ch.M. Thiel i in. 2004). Jednak takie odangażowanie uwagi może zostać również pominięte – czasami ruch oka realizowany jest bez zaangażowania uwagi wzrokowej (B. Fisher, H. Weber 1993, T. Marek, M. Fąfrowicz 1995, J. Pratt i in. 2006). Struktury płata czołowego z kolei odpowiedzialne są za ustalenie momentu ruchu oka, programowanie i kontrolowanie jego kierunku. Niespodziewane i szybkie pojawienie się w polu widzenia nowego bodźca aktywuje z kolei struktury styku skroniowo-ciemieniowo-potylicznego w półkuli prawej. Za integrację informacji z opisanych wyżej obszarów odpowiadają wzgórki górne blaszki czworaczej i są określane mianem ostatecznego centrum ruchu oka (S.P. Liversedge, J.M. Findlay 2000). Struktury te przekazują informacje do pnia mózgu, który z kolei koordynuje mięśnie kierujące gałką oczną (T. Marek, M. Fąfrowicz 1995). Istotnym zjawiskiem następującym po wykonaniu ruchu jest hamowanie powrotu uwagi. Mechanizm ten ma za zadanie zatrzymanie powrotu wzroku w miejsce uprzedniej fiksacji, a tym samym ułatwienie szerszej eksploracji pola widzenia. Wyniki szeregu badań wskazują na jego związek z obszarami wzrokowymi kory potylicznej oraz z korą płatów skroniowych i ciemieniowych (A.R. Mayer i in. 2004).

W zależności od czasu wykonania ruchów oka wyróżnia się ruchy skokowe wolne, szybkie oraz ekspresowe (B. Fischer, B. Breitmeyer 1986, B. Fischer i in. 1995, T. Marek, M. Fąfrowicz 1995). Istotą tego podziału nie jest jedynie aspekt ilościowy, ale różnica mechanizmów leżących u ich podłoża. Ruchy wolne zachodzą w czasie ponad 200 ms od ekspozycji bodźca. Ruch tego typu angażuje wszystkie struktury funkcjonalne, a zatem odrywanie uwagi od dotychczas analizowanego obiektu, decyzję o ruchu oka, wyliczenie parametrów ruchu oraz jego wykonanie. Mówiąc o decyzji, naturalnie należy rozumieć jedynie zaangażowanie ośrodka, który ma potencjalną (rzadko wykorzystywaną) możliwość intencjonalnego zablokowania ruchu oka. Ruchy szybkie mają miejsce wówczas, kiedy uwaga jest odangażowana. Oznacza to, że podmiot nie przetwarza aktualnie informacji z punktu fiksacji. Pozostałe struktury są nadal zaangażowane, zatem istnieje możliwość blokady ruchu. Czas reakcji tego typu ruchu jest krótszy i mieści się w granicach 140–200 milisekund. Ruchy w pełni odruchowe (które wymagają jedynie lokalizacji nowego obiektu, wyliczenia parametrów i wykonania ruchu) nazywane są ruchami ekspresowymi. Ich czas reakcji wynosi 70–140 milisekund. Jeśli ruch oka obserwowany jest w czasie krótszym niż 70 ms traktowany jest jako

przedwczesny, ponieważ nie ma możliwości przewodzenia impulsu nerwowego przez wszystkie ośrodki w tak krótkim czasie.

Wśród intencjonalnych ruchów skokowych oka wyróżniamy sakady oraz ruchy śledzące (ruchy podążania). Ruchy te decydują o aktywnym poszukiwaniu nowej informacji. Sakady są postrzegane jako najszybsze ruchy jakie może wykonać nasze ciało i zwykle trwają nie dłużej niż 80 ms. Sakady zwykle występują pomiędzy jednym a drugim punktem fiksacji, jednak czasem mogą tworzyć krzywą (ścieżkę). Ruchy podążania mają podobną charakterystykę jak sakady. Warunkiem wystąpienia ruchów śledzących jest pojawienie się w polu widzenia poruszającego się obiektu. Sakady mogą występować podczas obserwowania np. białej kartki papieru (bez udziału bodźca).

Ruchy śledzące to podążanie za zmieniającym swoje położenie obserwowanym obiektem przy względnie nieruchomej głowie. Jak wykazał J. Ross i in. (1997) ośrodki mózgowie odpowiedzialne za podjęcie i utrzymywanie ruchów śledzących blokują działanie ruchów sakadycznych. W naturalnych warunkach śledzenie obiektu wiąże się również z ruchem głowy, a niekiedy również z sakadami korekcyjnymi. Ruchy te współdziałają ze sobą, toteż ich mechanizmy są dość złożone (K. Srihasam i in. 2007). Mimo, że tradycyjnie procesy uwagi wzrokowej wiązane były głównie z mechanizmami skokowych ruchów oka, to coraz częściej wskazuje się na rolę mechanizmów uwagowych w ruchach śledzących (B. Khurana, E. Kowler 1987). S.B. Hutton i D. Tegally (2005) wykazali obniżenie szybkości i precyzji przestrzennej ruchów śledzących, spowodowane wykonywaniem dodatkowych zadań wymagających uwagi. Zdaniem autorów, ten typ ruchów nie jest zależny jedynie od prostych mechanizmów nerwowych, ale podobnie jak w przypadku ruchów skokowych wynikają ze złożonych procesów systemu poznawczego.

Poza czystymi ruchami oka, w procesach postrzegania ważną rolę odgrywają również mechanizmy zabezpieczające stałość spostrzegania. Bez nich świadoma percepcja przy ciągłym poruszaniu się ciała względem oglądanych obiektów byłaby najprawdopodobniej niemożliwa z uwagi na konieczność rozpoznawania na nowo obrazu po każdym poruszeniu. Jednym z mechanizmów jest odruch optokinetyczny, który kompensuje ruchy głowy, w celu utrzymania fiksacji na wybranym obiekcie. Kolejnym mechanizmem jest supresja sakadyczna. Zjawisko to polega na blokowaniu pewnych partii neuronów w obrębie wzgórka górnego blaszki czworaczej, odpowiedzialnych za widzenie przez inne partie, które są odpowiedzialne za skokowy ruch oka (P.H. Lee et al. 2007). Ma ono przeciwdziałać zaburzeniom spostrzegania, jakie mogłoby wywołać szybkie przemieszczanie się obrazu (kilka razy na sekundę). Oznacza to, że supresja sakadyczna wiąże się z niewidzeniem części obrazu, nad którym przechodzi sakada. Typowa pre-sakadyczna supresja powoduje niewidzenie w ciągu 30–40 ms poprzedzających start sakady, a post-sakadyczna supresja „zabiera” 100–120 ms postrzegania obrazu.

Idąc dalej, można wnioskować, że człowiek nie widzi również przez część czasu, w którym występuje fiksacja, co należy brać pod uwagę w precyzyjnym określaniu czasu fiksacji, a dokładniej mówiąc, aktywnego skupiania wzroku (K. Holmqvist 2011). Integracja transsakadyczna jest obecnie najslabiej poznanym procesem zabezpieczającym stałość spostrzegania. Za integrację na poziomie mózgowym odpowiada kora wzrokowa (J.M. Findlay, I.D. Gilchrist 2003). Mechanizm ten ma ogromne znaczenie z uwagi na to, iż każdy skokowy ruch oka zmienia zasadniczo obraz świata zewnętrznego rzutowany na naszą siatkówkę, a przez to system wzrokowy musi niejako ponownie przeprowadzić analizę poszczególnych obiektów i ich cech. Dzięki integracji, wykonanie skokowego ruchu oka nie zaburza widzenia elementów obrazu, co aktualnie jest eksplorowane w poszukiwaniu granicy tego procesu kompensacyjnego (S. Prime et al. 2004, 2007). Badania D. Melchera (2005) wykazały, że integracja transsakadyczna wynika z korowej reprezentacji przestrzeni, a nie samego obrazu siatkówkowego. Istotną składową mechanizmu integracji transsakadycznej jest przy tym nie tylko analiza obrazu po wykonaniu sakady, ale przede wszystkim analiza obrazu poprzedniego (D.A. Gajewski, J.M. Henderson 2005). Pomimo że wykazano, iż integracja transsakadyczna nie jest związana z pamięcią ikonyczną, wiele nowych danych (J.M. Findlay, I.D. Gilchrist 2003, D. Melcher 2009) wskazuje na zaangażowanie procesów uwagi i aktywnego przetwarzania obrazu. Badania dotyczące integracji transsakadycznej są obecnie jednym z najczęściej eksplorowanych problemów w psychologii spostrzegania (głównie wykorzystuje się w tych badaniach neuroobrazowanie). Wyjaśnienie tego mechanizmu wymaga podejścia do spostrzegania wzrokowego jako do aktywnego sposobu poszukiwania informacji, a nie jedynie jako do biernego odzwierciedlenia otaczającego świata.

Mimo że jeszcze 15–20 lat temu ruchy oka były częściej utożsamiane z częścią fizjologią niż wyższymi czynnościami psychicznymi, aktualnie eyetracking jest traktowany jako precyzyjne odzwierciedlenie interakcji między procesami poznawczymi a bodźcami zewnętrznymi o charakterze wzrokowym. Idąc dalej tym torem, niektórzy z badaczy uważają, że eyetracking jest oknem do umysłu, myśli i uczucia (L. Holm 2007, P.W. Glimcher 2003), a bezpośrednim odzwierciedleniem tego nurtu jest książka wydana w 2007 roku pod redakcją R. van Gompel i in. pt. *Eye movements: A window to mind and brain*. Oczywiście, znacznie wcześniej formułowano już hipotezy takie, jak np. *The Eye-Mind Hypothesis* (M.A. Just, P.A. Carpenter 1980), które w późniejszym czasie były chociaż częściowo podważane (J.R. Andersson 2004). Prowadzono również liczne badania potwierdzające istnienie neurofizjologicznego mostu pomiędzy ruchem gałek ocznych a funkcjami poznawczymi. Jednym z nich jest eksperyment oparty na zadaniu antysakadycznym, testującym procesy uwagi, pamięci i podejmowania decyzji (S. Everling, B. Fischer 1998, D.S. Zee, A. G. Lasker, 2004). Jednak należy pamiętać, że nadal nie potrafimy wnioskować na temat konkretnych proce-

sów poznawczych, tylko na podstawie spostrzegania wzrokowego. Mówi się, że analizy wyników badań nad ruchem oka jako odpowiedź na sytuację bodźcową są dlatego nietrafne, że nie bierze się w nich pod uwagę złożoności reakcji człowieka, skojarzeń i kategoryzacji postrzeganych obiektów.

Wraz z rosnącą popularnością eyetrackingu oraz ewolucją w dziedzinie elektroniki i technologii informatycznych rozwijały się metody pomiaru ruchu gałki ocznej. Aktualnie używane metody to elektrookulografia, videookulografia oraz metoda indukcyjna. Pojawiają się również próby wykorzystania videokamer komputerowych, jednak precyzja takiego pomiaru ogranicza go jedynie do ruchu mogącego sterować wskaźnikiem myszy, czy pisaniem na wirtualnej klawiaturze.

Niegdyś najpopularniejsza – elektrookulografia – jest metodą wykorzystującą rejestrację różnicy potencjału pomiędzy rogówką a siatkówką. Rozmieszczone wokół oka elektrody, na podstawie zarejestrowanych napięć pozwalają na określenie ruchów oka w obu płaszczyznach (horyzontalnej i wertykalnej). Metoda ta jest stosunkowo tania i odznacza się wysoką prędkością rejestracji ruchów, ma jednak szereg ograniczeń. Pierwszym z nich jest problem z adaptacją do zmieniających warunków oświetlenia, ponadto procesy fizjologiczne zachodzące w skórze i w oku mogą być źródłem artefaktów czy zniekształceń wyniku. Mimo iż nominalnie dokładność pomiaru elektrookulografii jest dość dobra (ok. 1 stopnia) to nadaje się ona głównie do mierzenia dużych sakad. Jeszcze jednym z ograniczeń jest konieczność dobrego kontaktu elektrod ze skórą (jak najniższej impedancji), który może być trudny do utrzymania w czasie dłuższych rejestracji.

Najbardziej inwazyjną dotychczas stosowaną techniką jest metoda polegająca na implementacji na gałkę oczną mechanicznego lub optycznego punktu odniesienia. Umożliwia bardzo precyzyjną rejestrację (w metodzie indukcyjnej z dokładnością około 5–10 sekund kątowych), lecz ze względu na inwazyjność – konieczność wprowadzania do oka ciała obcego – jest źródłem dyskomfortu, a eksperyment powinien być jak najkrótszy (najczęściej nie dłuższy niż 30 min) (L.R. Young, D. Sheena 1975). Jedną z najbardziej popularnych jest implementacja cewki indukcyjnej umieszczonej w specjalnej soczewce kontaktowej i pomiar ruchu w polu elektromagnetycznym.

Foto- i videookulografia to obecnie najczęściej stosowana technika pomiaru ruchu oka, dlatego w niniejszym artykule skupimy się głównie na niej. W ramach tej metody na oko lub oczy skierowana jest kamera lub aparat, rejestrujące konkretne elementy gałki ocznej w trakcie ruchu (źrenicę, odbicie rogówkowe, rąbek rogówki, itp.). Oko posiada wiele punktów odniesienia, które mogą zostać wykorzystane. Dla zwiększenia precyzji pomiaru używane jest również dodatkowe źródło światła oświetlające oko. Metoda ta daje wyniki z dobrą rozdzielczością czasową oraz przestrzenną. Technika taką po raz pierwszy użyto w tzw. *fotochromografie Dodge'a* około 1903 roku. Pierwotnie wykorzystywano w tym celu

światło widzialne, jednak konieczność stosowania bardzo silnego oświetlenia była obciążająca dla badanego i powodowała liczne artefakty. Wykorzystywano także ultrafiolet, jednak stosunkowo rzadko. Aktualnie producenci eyetrackerów posiłkują się promieniami podczerwonymi. Pierwsza metoda z tej grupy (tzw. *Limbus Tracker*) wykorzystuje fakt, iż twardówka odbija więcej światła niż rogówka. Kierując zatem na oko wiązkę promieni podczerwonych i analizując ilość odbitego światła, można określić położenie gałki ocznej. Możliwa jest rejestracja nawet w zupełnej ciemności. Problemem są mrugnięcia, które mogą powodować artefakty poprzez przysłonienie oka powieką, a także małe przesunięcia oczu w kierunku środka głowy, a tym samym zmianę odbicia światła. Videookulografia jest obecnie używana w trzech formach aparatów – eyetrackera nagłownego (Head-Mounted Eyetracking) o prędkości nawet do 360 Hz jednoocznie (H6, ASL), systemu zdalnego (Remote Eyetracking), mającego aktualnie prędkość nawet do 500 Hz obuocznie (RED500, SensoMotoric Instruments) oraz ultraszybkiego eyetrackera, wymagającego stabilizacji głowy, ale umożliwiającego pomiar z prędkością nawet do 2000 Hz jednoocznie (EyeLink 1000, SR Research). Eyetrackery nagłowne, w związku z ich stałym położeniem w stosunku do oczu badanego, eliminują artefakty mogące wystąpić na skutek ruszania głową i są także dobrym rozwiązaniem dla „uwolnienia” środowiska eksperymentalnego od zależności badany-monitor. Dlatego ten typ aparatury pełni często rolę systemu mobilnego. Kamera oraz źródło światła podczerwonego umieszczane są przed okiem badanego lekko nad lub poniżej gałki ocznej. W większości tego typu eyetrackerów znajduje się również tzw. kamera sceny, rejestrująca w trakcie eksperymentu przestrzeń przed badanym. Materiał video z tej kamery jest wykorzystywany podczas analizy (stanowi obraz referencyjny do wizualizacji wyników). Kamery sceny do 2011 wykorzystywały maksymalnie rozdzielczość wynoszącą 640x480, jednak w 2011 roku pojawił się pierwszy komercyjny eyetracker nagłowny z kamerą sceny nagrywającą obraz video z rozdzielczością 1280x960. Każdy, kto analizował kiedykolwiek materiał z eyetrackera nagłownego, doceni na pewno ten skok technologiczny. Od kilku lat dzięki postępowi technicznemu i miniaturyzacji elektroniki na rynku dostępne są okulary, w które wbudowany jest system eyetrackingowy połączony z małym rejestratorem lub laptopem. Prędkość tych systemów jest póki co niska, jednak producenci pracują nad jej zwiększeniem. W 2011 roku powstały dwa ciekawe systemy w okularach produkcji Tobii oraz SensoMotoric Instruments (SMI). Są one interesujące z kilku powodów – Tobii opracował specjalny system markerów aktywnych, które po umieszczeniu w środowisku badania komunikują się z eyetrackerem podczas eksperymentu. Dzięki temu w trakcie analizy możliwe jest automatyczne śledzenie rejonów zainteresowania. Okulary Tobii badają jedno oko i pracują z prędkością 30 Hz. W momencie pisania niniejszego artykułu nie znaleźliśmy informacji o precyzji pomiaru. SMI z kolei opracował oprogramowanie do semi-automatycznej agregacji danych i wyznacza-

nia dynamicznych rejonów zainteresowania bez stosowania markerów, a funkcjonalnie istotną cechą jest posiadanie pomiaru binokularnego pozwalającego skompensować błąd paralaksy. Okulary SMI działają w prędkości 30 Hz na każde oko z maksymalnym odchyleniem pomiaru wynoszącym $0,5^\circ$ a rozdzielczością przestrzenną $0,1^\circ$. Eyetrackery zdalne wykorzystują kamery i diody podczerwone znajdujące się zazwyczaj powyżej lub poniżej źródła bodźca (najczęściej jest nim monitor komputerowy, do którego przytwierdzony jest interfejs eyetrackingowy). Większość producentów umożliwia użycie tego eyetrackera również z innymi źródłami bodźców, np. ekranu projektora czy telewizora przy pomocy specjalnej nóżki do interfejsu. Eyetrackery zdalne są wrażliwe na ruchy głowy i w przypadku niesubordynacji osoby badanej wymagają wykonywania kalibracji co kilkanaście minut. Jednak ostatecznie są one najwygodniejszymi i najprostszymi w obsłudze urządzeniami. Eyetrackery zdalne pracują w prędkości od 30 Hz do 500 Hz, używając technik jedno- i/lub dwuocznego pomiaru. Rozdzielczość przestrzenna podawana przez producentów mieści się w przedziale od $0,1^\circ$ do ponad 1° . Ostatnia grupa eyetrackerów – urządzenia ultraszybkie posiadają interfejs eyetrackingowy, umieszczony przy źródle bodźca lub blisko oczu badanego. Wymagają również użycia specjalnego stelaża (*tower-mounted*), w którym unieruchamiana jest głowa badanego. Dzięki zastosowaniu tego elementu eliminowane są ruchy głowy, a tym samym artefakty z nimi związane. Mimo że teoretycznie do rejestracji mikrosakad można używać systemów o prędkości powyżej 200 Hz, to w praktyce tego typu eksperymenty prowadzi się właśnie w systemach ultraszybkich (S. Martinez-Conde 2009).

Warto wspomnieć również, że wraz ze wzrostem zainteresowania badaniami funkcjonalnymi mózgu (fMRI) na rynku pojawia się coraz więcej urządzeń badających ruchy oczu, a mogących pracować w polu magnetycznym. Videookulografy z możliwością rejestracji bodźca oraz nałożenia na ten obraz ruchów oczu są nadal dosyć wolne (większość z nich rejestruje obraz z prędkością 50 Hz–60 Hz). Ich precyzja jest różna w zależności od typu eyetrackera i od producenta.

Mamy świadomość wielu uproszczeń użytych w tym artykule, dlatego czytelnika chcącego zgłębić wiedzę o technologii wykorzystywanej do badań okulograficznych odsyłamy do R. Dodge'a (1916), opisującego ówczesne narzędzia L.R. Younga i D. Sheena'a (1975), Carpenter (1988) czy współczesnych publikacji, jak na przykład Duchowskiego (2006), K. Holmqvista i in. (2011) oraz niezwykle ciekawego przeglądu historii badań eyetrackingowych autorstwa N. Wade'a i B.W. Tatlera (2005).

Podczas przygotowywania się do badań okulograficznych nie tylko musimy wybrać narzędzie, ale również dobrać do tego odpowiednie pomieszczenie i mieć świadomość, jakie czynniki mogą wpłynąć na jakość wyników. Nie ma oczywiście jednego prawidłowego rozwiązania. Warunki badania różnią się w zależności od typu eksperymentu – czy będzie on realizowany poza laboratorium z użyciem

eyetrackingu mobilnego czy w pomieszczeniach specjalnie do tego przygotowanych, wtedy zazwyczaj w użyciu eyetrackerów zdalnych i ultraszybkich (łącznie nazywanych przez niektórych badaczy eyetrackerami typu table-mounted).

W pierwszym wariancie otrzymujemy możliwość odwzorowania (lub wykozystania) warunków naturalnych (lub zbliżonych do naturalnych), co w ostatnich latach zyskuje na wadze. Jednocześnie, w tego typu badaniu utrudnione jest kontrolowanie warunków eksperymentu, które mogą wpłynąć na jego wynik. Jednak odkąd badacze mają do dyspozycji nowoczesne systemy mobilne, coraz częściej możemy czytać o projektach realizowanych przy udziale sportowców, badaniach ergonomii stanowisk pracy, bezpieczeństwa drogowego, itd. Koszty związane z występowaniem dystraktorów czy niepełnym kontrolowaniem warunków badania są niwelowane zyskiem, jakim jest naturalność eksperymentu. W tego typu projektach nie możemy (albo przynajmniej jest to bardzo utrudnione) stworzyć powtarzalnych warunków testowania. Czynnikiem ten jest istotny w momencie, kiedy w planie mamy wykonanie analiz grupowych pełnego wyniku badania, gdyż może się to okazać niemożliwe. Kolejnym ważnym elementem są warunki panujące na zewnątrz budynków – w sposób szczególnie dystraktorem dla badań eyetrackingowych jest silne słońce, gdyż natężenie światła podczerwonego w takich warunkach może znacznie przewyższać natężenie światła emitowanego przez eyetracker. W takich warunkach badający nie otrzyma żadnego wyniku pomiaru, gdyż analiza odbicia rogówkowego nie będzie możliwa do przeprowadzenia.

W badaniach prowadzonych w laboratorium warunki i czynniki zakłócające mogą różnić się w zależności od tego, czy eyetracking ma być jedyną używaną przez nas metodą, czy tylko elementem całego eksperymentu, czy badanie jest przeprowadzane przed monitorem, czy jest to na przykład badanie w symulatorze lotu. We wszystkich konfiguracjach, ważnym czynnikiem jest oddzielenie operatora badania od pomieszczenia, w którym prowadzony jest test. Wielokrotnie zauważaliśmy wpływ obecności przy badanych innych osób na jakość kalibracji, a później wyników. Oczywiście w badaniach typu *usability* często spotyka się sytuację, w której eksperymentator siedzi przy osobie badanej, jednak jest to uwarunkowane metodologią badania. Najczęściej laboratoria projektuje się tak, aby pokój kontrolny i pomieszczenie do prowadzenia badań były oddzielone ścianą, z zachowaniem względnej dźwiękoszczelności tego drugiego. Do wglądu w sytuację badania stosowane są od lat lustra weneckie oraz system audio do komunikacji pomiędzy pokojami. Ekran eyetrackera klonuje się na zewnętrznym monitorze, który stoi w pokoju kontrolnym. Ze względu na rozwój technologii video, laboratoria zaczynają używać kamer wysokiej rozdzielczości, które dają szerszy wachlarz możliwości niż lustro oraz spełniają jednocześnie funkcję rejestracji badanego i sytuacji badania. Kamery są sprawdzonym narzędziem również w sytuacji, kiedy w ramach jednego laboratorium dostępnych jest kilka pomieszczeń do wykonywania badań jednocześnie,

z jednym pokojem kontrolnym. Ponieważ większość używanych współcześnie eyetrackerów to urządzenia wykorzystujące światło podczerwone, należy zwrócić uwagę na to, aby ograniczyć dostęp światła słonecznego, szczególnie jeżeli jego promienie miałyby padać bezpośrednio na eyetracker czy twarz badanego. Zalecanym oświetleniem są lampy fluorescencyjne (światłówki) ze względu na minimalną ilość światła podczerwonego, jaką emitują oraz ich częstotliwość pracy. Przy videokulografii należy unikać też zupełnie ciemnych pomieszczeń, gdyż w takich warunkach źrenica jest na tyle duża, że urządzenia mają problem z identyfikacją jej położenia. Warto zadbać również o stabilne biurko, na którym zostanie postawiony eyetracker oraz ustawienie myszki i klawiatury na niezależnej powierzchni, aby ograniczyć możliwe ruchy eyetrackera wywołane wibracjami.

Niezależnie od tego, czy używamy systemu nagłownego czy stacjonarnego podczas badania możemy spotkać się jeszcze z kilkoma innymi czynnikami, które niekontrolowane mogą uniemożliwić pomiar lub zaburzyć wynik badania. K. Holmqvist i in. (2011) zebrał je w cztery grupy – 1. zakrycie zbyt dużej powierzchni gałki ocznej, fizjologicznie spowodowane opadającą powieką a funkcjonalnie np. śmiechem; 2. zakłócenia związane z makijażem, szczególnie tuszem na rzęsach, okularami, soczewkami kontaktowymi czy suchymi oczami; 3. zniekształcenia wynikające z noszenia okularów dwuogniskowych; 4. zgubienie obrazu oka wywołane ruchami głowy.

Mimo że za ruchem oka ostatecznie kryją się procesy mózgowy, to na poziomie wykonawczym stoją za nim czyste reakcje fizjologiczne. Gałki oczne poruszane są sześcioma mięśniami zewnątrzgałkowymi, które są grupowo uruchamiane w każdym ruchu oka. Sterują nimi trzy nerwy czaszkowe, których jądra mają połączenie z kolejnymi, innymi nerwami. Ponadto do oka dochodzi nerw wzrokowy, stanowiący część drogi wzrokowej, którą sygnały elektryczne docierają do korowych ośrodków wzrokowych. Bodźce wzrokowe, aby zostały zarejestrowane przez mózg, muszą przejść drogę, poczynając od źrenicy, przechodząc przez soczewkę, by na końcu jako odwrócony obraz pobudzić czopki i pręciki wyścielające siatkówkę. Komórki światłoczułe na siatkówce mają za zadanie przetworzenie postrzeganego obrazu na sygnał elektryczny. Najlepszą rozdzielczością rejestracji obrazu charakteryzuje się dołek środkowy siatkówki oka, leżący dokładnie w osi poziomej oka, obejmujący mniej niż 2° pola widzenia. Element obrazu, na którym skupiamy wzrok jest rzutowany właśnie na tę część siatkówki, stąd też człowiek ma tak mały zakres precyzyjnego widzenia. Z faktem tym wiąże się konieczność rejestracji środka źrenicy do oceny punktu fiksacji. Dodatkowo bardzo ważnym komponentem dla określenia pozycji oka jest rogówka, a dokładniej odbicie rogówkowe. Współczesne systemy eyetrackingowe oparte na technologii video wykorzystują źródło światła podczerwonego i rejestrują jego odbicie na rogówce i/lub na soczewce wg teorii obrazów Pur-

kinjego, gdyż obecnie rejestracja wszystkich obrazów Purkinjego nie jest trudna. Obrazy są odbiciem światła na elementach struktury oka. Istnieją co najmniej cztery takie odbicia. Pierwszy obraz Purkinjego (P1) jest odbiciem od zewnętrznej powierzchni rogówki. Drugi (P2) odbiciem od wewnętrznej powierzchni rogówki. Trzeci (P3) od przedniej powierzchni soczewki i ostatni (P4) jest odbiciem od tylnej powierzchni soczewki. Określenie pozycji odbicia względem środka źrenicy precyzuje rejestrację ruchu oka.

Aby sobie uświadomić, jak złożonym procesem jest sterowanie układem wzrokowym, należy wiedzieć, że za procesy postrzegania wzrokowego odpowiada duża część mózgowia. Zaangażowane w nie są m.in. ośrodek skojarzonego spojrzenia w bok (inaczej czołowe pole okoruchowe), znajdujący się w korze przedruchowej w obrębie zakrętu czołowego środkowego i bocznej części bruzdy przedśrodkowej (struktura kontrolująca ruchy sakadyczne, ale również wiązana z fiksacjami), pęczek podłużny przyśrodkowy (jako struktura łącząca jądra nerwów okoruchowych), jądra przedsionkowe i twór siatkowaty (ośrodki wzrokowe śródmózgowia i mostu zapewniające m.in. poprawność działania układu wzrokowego przy ruchach głową, nadzorujące ruchy wergencyjne, itd.), tylne pole okoruchowe znajdujące się w obrębie kory płata ciemieniowego (źródło sakad odruchowych), okolica grzbietowo-boczna kory przedczołowej (dowolna kontrola sakad). Struktura ta jest ważną składową procesów decyzyjnych różnicujących elementy pola spostrzeżeniowego, na te, które należy i na te, na które nie należy (lub nie warto) reagować w danej sytuacji (M. Leśniak 2008). Korowa kontrola bardziej złożonych dowolnych ruchów sakadycznych wymaga zaangażowania dodatkowych struktur, jak np. dodatkowe pole ruchowe odpowiedzialne za uczenie się sekwencji sakad, ale również za ruchy fiksacyjne (R.J. Leigh, D.S. Zee 2006). Jądra podstawy z kolei są zaangażowane w kontrolę ośrodków pniowych a przez to odgrywają rolę intencjonalnego hamowania i pobudzania ruchu gałek ocznych. Styk skroniowo-ciemieniowo-potyliczny jest utożsamiany z kolei z kontrolowaniem ruchów podążania. Zainteresowanych anatomią funkcjonalną mózgu w zakresie tego tematu odsyłamy do publikacji: G. Avanzini, F. Villani 1994, N. Carter, D.S. Zee 1997, O. Coubar d i in. 2003, Martin 2003, R.J. Leigh, D.S. Zee 2006, M. Leśniak 2008.

Wiadomości umieszczone dotychczas w tym artykule pokazują, jak bardzo skomplikowane procesy stoją za ruchami oczu i ich badaniem. Mimo to, do dziś okulografia wkroczyła już prawdopodobnie do większości dziedzin życia i nauki. Eyetrackery latały w misjach NASA, ale również z pilotami samolotów pasażerskich i wojskowych. Osoby niepełnosprawne posługują się eyetrackerami w komunikacji z otoczeniem czy w obsłudze komputera. Badania nad procesami, które stoją za ruchem oczu, przeprowadzono dotychczas na zwierzętach i ludziach z każdej grupy wiekowej. Okulografy używane są w lingwistyce, ale również psychologii, neurologii czy prawie. A duża część aktualnych badań rozstrzyga, która

forma reklamy jest bardziej czytelna i chwytliwa oraz czy strony internetowe posiadają użyteczne projekty graficzne i funkcjonalne. W tej części skupimy się na przeglądzie badań z wykorzystaniem systemu eyetrackingowego.

Jak w wielu dziedzinach badań behawioralnych, także i w przypadku badań nad ruchami oka trudno jest określić ich początek. N. Wade i B.W. Tatler (2005), którzy poszukiwali pierwszych wzmianek o badaniach oczu w dostępnej im literaturze, udowodnili, że ruchy oka ciekawiły badaczy od zarania dziejów. Według ich informacji, pierwsze wzmianki o ruchach oczu pojawiły się w pracy Du Laurensa w 1596 roku. Jak podają autorzy, to monografia Johannesa Müllera, opublikowana w 1826 roku, jako pierwsza opisywała regularne badania okulograficzne. Za drugiego ojca badań nad ruchami oka, jak piszą N. Wade i B.W. Tatler, uważa się Charlesa Bella, który w swojej pracy z 1823 roku przedstawił wyniki badań nad czynnymi i biernymi ruchami oczu w reakcji na bodźce wzrokowe oraz zwrócił uwagę na propriocepcję (wtedy określoną przez niego mianem *muscle sense*) (za: N. Wade, R.B. Tatler 2005). Nie można również zapominać o pracy Jana Ewangelisty Purkiniego, mimo że jego prace dotyczyły szerszej tematyki i głównie fizjologii. Wszystkie prace napisane przed wymienionymi powyżej i wiele opublikowanych po nich koncentrowały się bardziej na optyce, fizjologii i budowie oka oraz mięśni okoruchowych, czyli fizycznych aspektach ruchu gałki ocznej, niż na procesach poznawczych, które stoją za tym ruchem.

Współcześnie prowadzone badania koncentrują się najczęściej na relacji oko-mózg, czy bardziej szczegółowo – na procesach poznawczych stojących za ruchem oka, rejestrując przy tym liczbę fiksacji, długość fiksacji, sakady i ścieżki ruchu gałki ocznej, ale przy wykorzystaniu najnowszych technologii korelują również te wyniki z czasami reakcji, „trafieniami” w cel czy popełnionymi błędami. Wcześniej wykonywane były jedynie pojedyncze eksperymenty tego typu, co trafnie opisuje K. Rayner (1998). K. Rayner dzieli dotychczasowy dorobek okulografii w psychologii eksperymentalnej na trzy fazy. Pierwszą fazę rozpoczął Javal, prowadząc badania nad spostrzeganiem tekstu od 1879 do mniej więcej roku 1920 (por. K. Rayner 1998). Drugą fazę, w której początkowo eksplorowano dalej tą tematykę. Jej dalsza część, mniej więcej od lat 50-tych, odznacza się niewielką ilością badań. Jednymi z ważniejszych badań tej fazy były pomiary ruchów oka wykonywane przez Buswella (K. Rayner 1998). Pokazał on 55 dzieł sztuki 200 osobom badanym, manipulując podawaną im instrukcją. We wnioskach stwierdził, że „ruchy gałek ocznych są nieświadomie dostosowywane do wymogów procesów uwagi” (A. Duchowski 2007). Podobne badania, w drugiej fazie badań eyetrackingowych wg K. Raynera, powtórzył A.L. Yarbus (1967). Odniósł się w nich do procesów wzrokowych podczas oglądania bodźców prostych i złożonych (w tym tekstów), obiektów w ruchu czy iluzji optycznych. A.L. Yarbus wskazywał na istnienie powtarzalnego komponentu procesów postrzegania oglądanego obrazu, biorąc pod uwagę również takie procesy, jak:

wzrokowa ocena proporcji, szacowanie długości, porównanie obszarów, itd. Dowiódł, że ludzkie oczy dobrowolnie i mimowolnie skupiają się na tych elementach obiektu czy obiektach, które mogą posiadać istotne informacje, niezbędne do wykonania zadania. Można twierdzić (za A.L. Yarbusem), że długość skupienia wzroku na konkretnym fragmencie obrazu świadczy o wadze i istotności informacji znajdujących się w nim. Kolejność i czas trwania poszczególnych fiksacji może pomóc w określeniu procesów myślowych (analizy).

Trzecia faza – najbardziej efektywna rozpoczyna się w połowie lat 70-tych. Renesans badań eyetrackingowych zapoczątkowało wprowadzenie nowych technologii do pomiaru ruchu gałki ocznej – precyzyjniejszych i prostszych w użyciu, a ich rozwój umożliwiło wprowadzenie komputerów pozwalających na efektywniejsze gromadzenie danych czy szybsze prowadzenie analiz.

Jednym z najczęściej podejmowanych tematów stały się procesy postrzegania wzrokowego, a ściślej mówiąc uwaga wzrokowa. W drodze eksperymentów, w których przyglądano się tym procesom, zauważono kilka istotnych mechanizmów. Jednym z nich jest supresja sakadyczna, o której pisaliśmy już wcześniej. Warto jeszcze raz wspomnieć, że zjawisko to polega na zmniejszeniu czułości układu wzrokowego na bodźce podczas wykonywania szybkich ruchów oka. Innym mechanizmem jest względnie porównywalny czas fiksacji czy długość sakady dla określonego typu postrzeganego bodźca. Dla cichego czytania, przeszukiwania wzrokowego czy np. pisania długość sakad waha się od 1° do nawet 5° , podobnie jest ze średnim czasem fiksacji – jest on różny, jednak w wielu badaniach, dla konkretnego bodźca taki sam (por. S. Abrams i in. 1989, S. Abrams, B. Zuber 1972). Oczywiście na długość sakad czy czas fiksacji wpływa znacznie więcej czynników niż tylko typ bodźca i mogą to być czysto fizjologiczne mechanizmy, ale również procesy poznawcze (np. odwoływanie się do magazynów pamięci, uwaga, itd.). Kolejnym mechanizmem wspierającym twierdzenie o silnym powiązaniu ruchów oka z procesami wykonawczymi jest latencja ruchów sakadycznych, czyli czas od pojawienia się bodźca do zainicjowania ruchu oka. Zazwyczaj czas latencji wynosi więcej niż 150 ms, nawet w sytuacji, gdy mamy do czynienia z tak wydawałoby się automatycznymi procesami, jak czytanie tekstu. W ciągu kilkudziesięciu lat badań nad latencją sakad określono kilka istotnych faktów (za: K. Rayner, 1998). Między innymi odkryto istnienie niezależnych procesów decyzyjnych odpowiedzialnych za programowanie ruchów oka. Dowiedziono również, że procesy poznawcze mogą wpływać na wydłużenie latencji (H. Deubel 1995). Odnotowano korelację między długością latencji a precyzyjnym zlokalizowaniem celu, na który kierowany jest wzrok (R.J.K. Jacobs 1987, T.A. Nazir, A.M. Jacobs 1991). Zweryfikowano, że podawanie instrukcji o zwiększeniu uwagi w trakcie wykonywania zadania również wpływa na wydłużenie latencji (C. Cofce, J.K. O'Regan 1987, E. Kowler, E. Blaser 1995). Z kolei zniknięcie celu przed przeniesieniem na niego uwagi skraca latencję

(M.E. Cohen, L.E. Ross 1977, A. Kingstone, R.M. Klein 1993, S.M. Ross, L.E. Ross 1980, 1981).

W świecie badań okulograficznych wiele uwagi poświęca się procesom czytania. Jedną z najczęściej cytowanych publikacji w okulografii jest zbiór teorii i przegląd badań właśnie z zakresu tej tematyki opracowany przez K. Raynera (1998). Bez przesady można powiedzieć, że ruchy oka bezpośrednio odzwierciedlają procesy przetwarzania językowego. Największe zainteresowanie w tej dziedzinie budzi chęć zrozumienia relacji pomiędzy zrozumieniem tekstu a ruchem gałki ocznej. Wiele badań, jeśli nie wszystkie, udowodniły, że zrozumienie czytanego zdania jest niemal natychmiastowe, jednak cały czas nie znamy poszczególnych składowych koordynujących ten proces. Dotąd powstało co najmniej kilka modeli ruchów oka w procesie czytania. W celu poznania jednego z najbardziej popularnych i wyczerpujących odsyłamy do publikacji na temat modelu E-Z Reader autorstwa E. D. Reichle'a, A. Pollatseka, D.I. Fishera i K. Raynera (por. E.D. Reichle i in. 1998).

Z badań nad procesami czytania wyłania się kilka ważnych mechanizmów. Jednym z najważniejszych jest długość fiksacji na słowie (i często zależne od tego mechanizmu skrócenie sakad). Głośne czytanie czy słuchanie z koncentracją na słuchanym tekście generują dłuższe fiksacje na słowach niż czytanie w myślach. M.A. Just i P.A. Carpenter (1980) zanotowali dłuższe fiksacje na słowach rzadziej występujących w języku niż na słowach występujących z większą częstością. Dalsze badania nad tym zjawiskiem pokazały, że efekt ten słabnie wraz ze wzrostem częstotliwości występowania tego słowa w krótkim fragmencie tekstu i tak przy natrafieniu na to samo rzadkie słowo za trzecim razem nie ma już różnicy w długości fiksacji pomiędzy tym słowem a słowami często występującymi w języku (Ch. Clifton i in. 2007). Efekt ten zauważalny jest również przy słowach częstych, jednak nie jest on aż tak silny. Podobna zasada obowiązuje dla znajomości pojęć – im słowo jest bardziej zrozumiałe dla czytelnika, tym fiksacja na nim jest krótsza (R. Chaffin i in. 2001). Na długość fiksacji na słowie wpływa również przewidywalność słowa, wynikająca z kontekstu słów poprzedzających. Taki efekt został opisany przez S.F. Ehrlicha i K. Raynera (1981), a następne badania przyniosły kolejny wniosek, że słowa bardziej przewidywalne są częściej omijane podczas procesu czytania (K. Rayner, A.D. Well 1996). Z powyższymi czynnikami bezpośrednio wiąże się również efekt wywołany przetwarzaniem słowa ze względu na wiek, w którym nauczyliśmy się tego słowa. Im później nauczyliśmy się danego słowa, tym wolniej będziemy je przetwarzać, a tym samym fiksacja na tym słowie będzie dłuższa (B.J. Juhasz 2005). Podobnie jest ze złożonością słowa – im więcej morfemów ono zawiera, tym dłużej jest rejestrowane przez układ wzrokowy (J. Hyönä, A. Pollatsek 1998). Zainteresowanych tym tematem czytelników odsyłamy do książki pod redakcją K. Raynera (1992), książki pod redakcją R.P.G. van Gompela i in. (2007) oraz pod redakcją S. Gruczy, M. Płużyczki i J. Zajęc (2013).

Podobnie często można odnaleźć w literaturze tematu eksperymenty dotyczące postrzegania sceny. O ile pewne modele postrzegania wzrokowego podczas czytania są już nam znane, o tyle nie ma takich opracowań dla strategii procesów postrzegania sceny. Ścieżki wzroku przy czytaniu są ściśle określone, w przypadku postrzegania sceny, ścieżki mogą być różne nawet dla dokładnie tego samego lub podobnego obrazu. Czynnikiem wpływającym na proces postrzegania obrazu jest chociażby zmiana zadania. Istnieje za to szereg określonych zależności czy reguł. Tak jak już wcześniej pisano, wielu badaczy (pierwszy prawdopodobnie A.L. Yarbus 1967) dowiodło, że fiksacje na elemencie obrazu są ściśle związane z wykonywanym zadaniem i najczęściej wynikają z potrzeby zdobycia informacji, jaką niesie za sobą ten element. Kolejnym faktem płynącym z badań jest to, że zrozumienie obrazu poprawia się wraz z ilością fiksacji wykonanych na nim (G.R. Loftus 1981). Prawdopodobnie podstawowe informacje o scenie są rejestrowane i przetwarzane na podstawie pierwszej fiksacji, jednak jest to wiedza mało precyzyjna, biorąc pod uwagę ograniczenia wynikające z fizjologii widzenia (ostre widzenie tylko w małym obszarze wokół punktu fiksacji) (por. K. Rayner, A. Pollatsek 1992). Jeżeli dany element obrazu jest ważny, możemy być pewni, że w drodze procesu postrzegania obrazu fiksacje zostaną przeniesione właśnie na ten element. Z punktu widzenia analizy procesów spostrzegania sceny niezwykle ważne są nie tylko ilość fiksacji i ich długość, ale też ich kolejność. W wielu badaniach zauważono podobieństwo efektu długości fiksacji na elemencie do długości fiksacji na słowie. Element, który kontekstualnie pasuje do obrazu oraz jest zrozumiały, skraca czas fiksacji (J.M. Henderson, A. Hollingworth 1998, K. Rayner 1998).

Dosyć dynamicznie rozwija się również dziedzina badań marketingowych i testów użyteczności stron internetowych, jednak w znakomitej części firmy nie są zainteresowane publikacją wyników ani opisywaniem metodologii jakie stosują. Jednym z nielicznych opracowań dostępnych dla czytelnika jest opublikowana na stronach internetowych firmy Nielsen Norman Group praca opisująca metodologię badań *usability* z wykorzystaniem *eyetrackingu* (K. Pernice, J. Nielsen 2009). W wykorzystywaniu *eyetrackingu* do badaniach marketingowych widzi się przede wszystkim wartość identyfikacji obszarów uwagi – elementów przyciągających uwagę potencjalnego klienta, czytelność przekazu reklamowego, zauważalność marki w materiałach marketingowych czy opakowaniach produktów, itd. Badania tego typu wykonuje się w laboratoriach z wykorzystaniem monitora, telewizora czy projektora, ale najwyższą wartość posiadają badania prowadzone w środowisku naturalnym – w przestrzeni usługowej czy na ulicy.

Tak jak już wspomniano w tym artykule wielokrotnie – badania *eyetrackingowe* od dłuższego czasu (przynajmniej od lat 80. XX wieku) przechodzą renesans. Jest to obecnie tak szeroki temat, że ani jeden rozdział, ani też jedna obszerna książka nie będzie wystarczająco rozbudowana, aby móc poznać wszystkie jego

tajniki. Z uwagi na to, staraliśmy się przy każdym ważniejszym fragmencie wskazywać na literaturę rozszerzającą zawarte w tym artykule informacje. Czytelnika zainteresowanego tematyką eyetrackingu odsyłamy do tych pozycji, a przy tym życzymy eksplorowania tej dziedziny z podobną do naszej pasją.

BIBLIOGRAFIA

- ABRAMS, S./ B. ZUBEL (1972), *Some temporal characteristics of information processing during reading*, (w:) Reading Research Quarterly 12. 41–51.
- ABRAMS, R./ D.E. MEYER/ S. KORNBUM (1989), *Speed and accuracy of saccadic eye movements: Characteristics of impulse variability in the oculomotor system*, (w:) Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance 15. 529–543.
- ANDERSON, J.R./ D. BOTHELL/ S. DOUGLASS (2004), *Eye Movements Do Not Reflect Retrieval Processes. Limits of the Eye–Mind Hypothesis*, (w:) Psychological Science 15(4). 225–231.
- AVANZINI, G./ F. VILLANI (1994), *Ocular movements*, (w:) Current Opinion in Neurology 7. 74–80.
- BECKER, W./ S. RAAB/ R. JURGENS (2002), *Circular vection during voluntary suppression of optokinetic reflex*, (w:) Experimental Brain Research 144. 554–557.
- BUDOHOSKA, W./ A. GRABOWSKA (1995), *Procesy percepcji*, (w:) T. Tomaszewski (red.), Psychologia ogólna. Warszawa. 9–90.
- CARPENTER, R.H.S. (1998), *Movements of the Eyes*. London.
- CARTER, N./ D.S. ZEE (1997), *The anatomical localization of saccades using functional imaging studies and transcranial magnetic stimulation*, (w:) Current Opinion in Neurology 10. 10–17.
- CAVALLO, V.E./ A.S. COHEN (2001), *Perception*, (w:) P.E. Baronet (red.), Traffic Psychology Today. Dordrecht.
- CHAFFIN, R./ R.K. MORRIS/ R.E. PORLY (2001), *Learning new word meanings from context: A study of eye movements*, (w:) Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition 27. 225–235.
- CLIFTON, Ch./ A. STAUB/ K. RAYNER (2007), *Eye Movements In Reading Words And Sentences*, (w:) R.P.G. Van Gompel/ M.H. Fischer/ W.S. Murray/ R.L. Hill (red.), Eye Movements: A Window on Mind and Brain. Elsevier. 341–372.
- COËFFE, C./ J.K. O'REGAN (1987), *Reducing the influence of nontarget stimuli on saccade accuracy: Predictability and latency effects*, (w:) Vision Research 27. 227–240.
- COHEN, M.E./ L.E. ROSS (1977), *Saccade latency in children and adults: Effects of warning interval and target eccentricity*, (w:) Journal of Experimental Child Psychology 23. 539–549.
- COUBARD, O./ Z. KAPOULA/ R. MURI/ S. RIVAUD-PECHOUX (2003), *Effects of TMS over right prefrontal cortex on latency of saccades and convergence*, (w:) Investigative Ophthalmology & Visual Science 44. 600–609.
- DEUBEL, H. (1995), *Separate adaptive mechanisms for the control of reactive and volitional saccadic eye movements*, (w:) Vision Research 35. 3529–3540.
- DODGE, R. (1916), *Visual motor functions*, (w:) Psychological Bulletin 13. 421–427.
- DUCHOWSKI, A.T. (2007), *Eye Tracking Methodology. Theory and Practice*. London.
- EHRlich, S.F./ K. RAYNER (1981), *Contextual effects on word perception and eye movements during reading*, (w:) Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior 20. 641–655.
- ERDMANN, B./ R. DODGE (1898), *Psychologische Untersuchung über das Lesen auf experimenteller Grundlage*. Halle.

- EVERLING, S./ B. FISCHER (1998), *The antisaccade a review of basic research and clinical studies*, (w:) *Neuropsychologia* 36(9). 885–899.
- FINDLAY, J.M./ I.D. GILCHRIST (2003), *Active Vision: The Psychology of Looking and Poring*. Oxford.
- FISCHER, B./ B. BREITMEYER (1987), *Mechanisms of visual attention revealed by saccadic eye movements*, (w:) *Neuropsychologia* 25.73–83.
- FISCHER, B./ H. WEBER (1993), *Express saccades and visual attention*, (w:) *Behavioral and Brain Sciences* 16. 553–610.
- FISCHER, B./ S. GEZECK/ W. HUBER (1995), *The three loop model: a neural network for the generation of saccadic reaction times*, (w:) *Biological Cybernetics* 72. 185–196.
- GAJEWSKI, D.A./ J.M. HENDERSON (2005), *The role of saccade targeting and in the trans-saccadic integration of object types and tokens*, (w:) *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 31. 820–830.
- GILCHRIST, I.D./ C.A. HEYWOOD/ J.M. FINDLAY (2003), *Visual sensitivity in search tasks depends on the response requirement*, (w:) *Spatial Vision* 16. 277–293.
- GLIMCHER, P.W. (2003), *The neurobiology of visual–saccadic decision making*, (w:) *Annual Review of Neuroscience* 26. 133–179.
- Van GOMPEL, R.P.G./ M.H. FISCHER/ W.S. MURRAY/ R.L. HILL (2007), *Eye Movements: A Window on Mind and Brain*. Elsevier.
- GRUCZA, S./ M. PŁUŻYCZKA/ J. ZAJĄC (red.) (2013), *Translation Studies and Eye–Tracking Analysis*. Frankfurt/ M.
- HENDERSON, J.M./ A. HOLLINGWORTH (1998), *Eye Movements During Scene Viewing: An Overview*, (w:) G. Underwood (red.), *Eye Guidance in Reading and Scene Perception*. Elsevier. 269–294.
- HOLM, L. (2007), *Predictive eyes recede retrieval. Visual recognition as hypothesis testing*. Doctoral dissertation. Department of Psychology, Umea University Sweden.
- HOLMQVIST, K./ M. NYSTRÖM/ R. ANDERSSON/ R. DEWHURST/ H. JARODZKA/ J. van de WEIJER (2011), *Eye Tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford.
- HUTTON, S.B./ D. TEGALLY (2005), *The effects of dividing attention on smooth pursuit eye movements*, (w:) *Experimental Brain Research* 163. 306–313.
- HYÖNÄ, J./ A. POLLATSEK (1998), *Reading Finnish compound words: Eye fixations are affected by component morphemes*, (w:) *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 24. 1612–1627.
- JACOB, R.J.K. (1987), *Human–computer Interaction*, (w:) S.C. Shapiro (red.), *Encyclopedia of Artificial Intelligence*. New York. 383–388.
- JUHASZ, B.J. (2005), *Age-of-acquisition effects in word and picture processing*, (w:) *Psychological Bulletin* 131. 684–712.
- JUST, M.A./ CARPENTER, P.A. (1976), *Eye fixations and cognitive processes*, (w:) *Cognitive Psychology* 8. 441–480.
- JUST, M.A./ P.A. CARPENTER (1980), *A theory of reading: from eye fixation to comprehension*, (w:) *Psychological Review* 87. 329–354.
- KHURANA, B./ E. KOWLER (1987), *Shared attentional control of smooth eye movement and perception*, (w:) *Vision Research*, 27, 1603–1618.
- KINGSTONE, A./ R.M. KLEIN (1993), *Visual offset facilitates saccade latency: Does pre-disengagement of attention mediate the gap effect?* (w:) *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 19. 251–265.
- KOWLER, E./ E. BLASER (1995), *The accuracy and precision of saccades to small and larger targets*, (w:) *Vision Research* 35. 1741–1754.

- LEE, P.H./ T. SOOKSAWATE/ Y. YANAGAWA/ K. ISA/ T. ISA/ W.C. HALL (2007), *Identity of a pathway for saccadic suppression*, (w:) Proceedings of National Academy of Science 104. 6824–6827.
- LEIGH, R.J./ D.S. ZEE (2006), *The neurology of eye movements*. Oxford University Press.
- LEŚNIAK, M. (2008), *Disorders of the eye movement control in Wilson's disease*. Doctoral dissertation. Warsaw, The Institute of Psychiatry and Neurology.
- LEVINE, M.W. (2000), *Fundamentals of Sensation and Perception*. Oxford.
- LIVERSEDGE, S.P./ J.M. FINDLAY (2000), *Saccadic eye movements and cognition*, (w:) Trends In Cognitive Sciences 1. 6–14.
- LOFTUS, G.R. (1981), *Tachistoscopic Simulations of Eye Fixations on Pictures*, (w:) Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory 7(5). 369–376.
- van LOON, E.M./ HOOGE, I.Th.C./ A.V. van den BERG (2002), *The timing of sequences of saccades in visual search*, (w:) Proceedings of the Royal Society of London 269.
- MAREK, T./ M. FAJROWICZ (1995), *Neuropsychologiczne mechanizmy procesu przenoszenia uwagi wzrokowej*, (w:) Kolokwia Psychologiczne 3. 69–86.
- MARTIN, J.H. (2003), *Neuroanatomy*. New York.
- MARTINEZ-CONDE, S./ S.L. MACKNIK/ D. HUBEL (2004), *The role of fixational eye movements in visual perception*, (w:) Nature Reviews Neuroscience 4. 229–240.
- MARTINEZ-CONDE, S./ S.L. MACKNIK/ X.G. TRONCOSO/ D.H. HUBEL (2009), *Microsaccades: a neurophysiological analysis*, (w:) Trends in Neurosciences 32(9). 463–475.
- MAYER A.R./ J.M. DORFLINGER/ S.M. RAO/ M. SEIDENBERG (2004), *Neural networks underlying endogenous and exogenous visual-spatial orienting*, (w:) NeuroImage 23. 534–541.
- MELCHER, D./ M.C. MORONNE (2003), *Spatiotopic temporal integration of visual motion across saccadic eye movements*, (w:) Nature Neuroscience 8. 877–881.
- MELCHER, D. (2005), *Spatiotopic transfer of visual form adaptation across saccadic eye movements*, (w:) Current Biology 15. 1745–1748.
- MELCHER, D. (2009), *Selective attention and the active remapping of object features in trans-saccadic perception*, (w:) Vision Research, 49, 1249–1255.
- NAZIR, T.A./ A.M. JACOBS (1991), *The effects of target discriminability and retinal eccentricity on saccade latencies: An analysis in terms of variable-criterion theory*, (w:) Psychological Research 53. 281–289.
- NEWHALL, S.N. (1928), *Instrument for observing ocular movements*, (w:) American Journal of Psychology. 40. 628–629.
- OGLE, K.N./ F. MUSSEY/ A.D. PRANGEN (1949), *Fixation disparity and the fusional processes in binocular single vision*, (w:) American Journal of Ophthalmology 32.1069–1087.
- PERNICE, K./ J. NIELSEN (2009), *Eyetracking Methodology. How to Conduct and Evaluate Usability Studies Using Eyetracking*. Nielsen Norman Group.
- POSNER, M.I./ M.E. RAICHLE (1994), *Images of Mind*, New York: Scientific American Library.
- PRATT, J./ C.M. LAJONCHERE/ R.A. ABRAMS (2006), *Attentional modulation of gap effect*, (w:) Vision Research 46. 2602–2607.
- PRIME, S./ M. NIEMEIER/ J.D. CRAWFORD (2004), *Trans-saccadic integration of the orientation and location features of linear objects*, (w:) Journal of Vision 8. 742.
- PRIME, S.L./ L. TSOTSOS/ G.P. KEITH/ J.D. CRAWFORD (2007), *Visual memory capacity in transsaccadic integration*, (w:) Experimental Brain Research 180. 609–628.
- RAYNER, K. (1998), *Eye Movements in Reading and Information Processing: 20 Years of Research*, (w:) Psychological Bulletin 124(3). 372–422.
- RAYNER, K. (red.) (1992), *Eye Movements and Visual Cognition: Scene Perception and Reading*. New York.

- RAYNER, K./ A. POLLATSEK (1992), *Eye Movements and Scene Perception*, (w:) Canadian Journal of Psychology 46(3). 342–376.
- RAYNER, K./ A.D. WELL (1996), *Effects of contextual constraint on eye movements in reading: A further examination*, (w:) Psychonomic Bulletin & Review 3. 504–509.
- REICHLER, E.D./ A. POLLATSEK/ D.L. FISHER/ K. RAYNER (1998), *Toward a Model of Eye Movement Control in Reading*, (w:) Psychological Review 105(1). 125–157.
- ROSS, L.E./ S.M. ROSS (1980), *Saccade latency and warning signals: Stimulus onset, offset and change as warning events*, (w:) Perception & Psychophysics 27. 251–257.
- ROSS, S.M./ L.E. ROSS (1981), *Saccade latency and warning signals: Effects of auditory and visual offset and onset*, (w:) Perception & Psychophysics 29. 429–437.
- ROSS, J./ M.C. MORRONE/ D.C. BURR (1997), *Compression of visual space before saccades*, (w:) Nature 386(6625). 598–601.
- SEKULER, R./ R. BLAKE (1994), *Perception*. New York.
- SRIHASAM, K./ D. BULLOCK/ S. GROSSBERG (2007), *Coordinating saccades and smooth pursuit eye movements during VISUAL tracking and perception of objects moving with variable speeds*, (w:) Journal of Vision 6. 908–908.
- THIEL, Ch.M./ K. ZILES/ G.R. FINK (2004), *Cerebral correlates of orienting and reorienting visuospatial attention: an event-related fMRI study*, (w:) Neuroimage 21. 318–328.
- WADE, N./ B.W. TATLER (2005), *The moving tablet of the eye. The origins of modern eye movement research*. Oxford.
- YARBUS, A.L.(1967), *Eye Movements and Vision*. Plenum Press.
- YOUNG, L.R./ D. SHEENA (1975), *Survey of eye movement recording methods*, (w:) Behavior research methods, instruments and computers 7(5). 397–429.
- ZEE, D.S./ A.G. LASKER (2004), *Antisaccades Probing cognitive flexibility with eye movements*, (w:) Neurology 63. 1554–1554.