

# Zaawansowane narzędzia optometrii i psychofizyki widzenia. Część VIII

## – śledzenie ruchów oczu metodami optycznymi



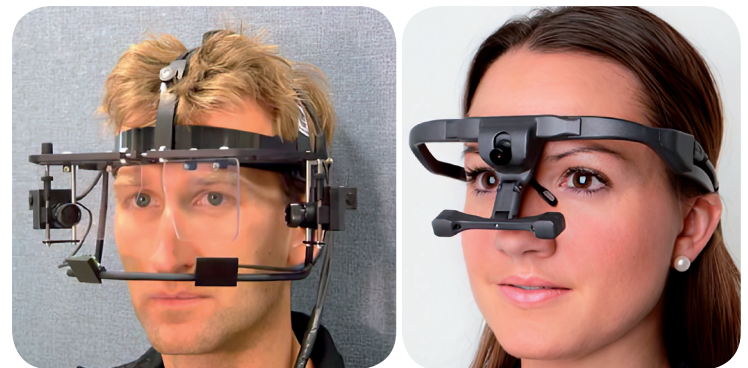
Dr hab. MAREK KOWALCZYK-HERNÁNDEZ  
 Wolontariusz w Zakładzie Fotoniki, Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki UW

W poprzednim odcinku cyklu omówiłem ogólne zagadnienia związane ze śledzeniem ruchów oczu oraz urządzenia do śledzenia tych ruchów (*eyetrackery*), których działanie opiera się na wykorzystaniu efektów elektromagnetycznych towarzyszących ruchom oczu [1]. Ten odcinek, kończący cały cykl, poświęcony jest śledzeniu ruchów oczu metodami optycznymi. Do metod tych należą:

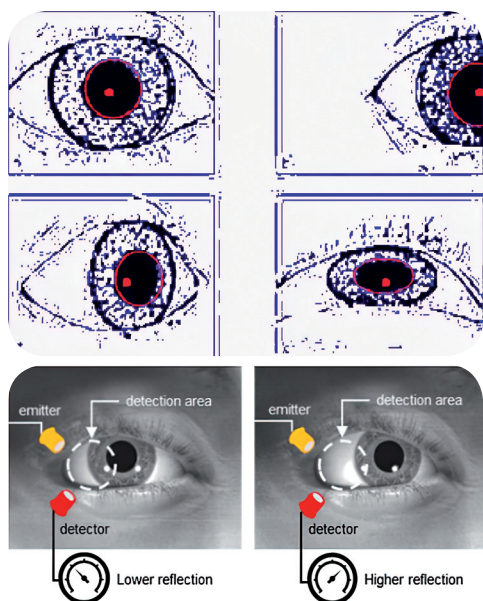
- fotookulografia (*photo-oculography*, POG),
- wideookulografia (*video-oculography*, VOG),
- reflektometria rogówkowa i soczewkowo-rogówkowa (*corneal reflectometry*, CR),
- okulografia fotosensoryczna (*photosensor oculography*, PSOG).

W POG i VOG rejestrowane są obrazy oka, na których widoczne są cechy oka zmieniające się w czasie jego ruchów translacyjnych, tj. związanych z ruchem głowy i rotacyjnych, czyli obrotów dokonujących się wokół środka obrotu gałki ocznej. (Środek obrotu gałki ocznej jest drugim obok punktu fiksacji punktem definiującym oś fiksacji). Możemy tu przykładowo wymienić pozorne zmiany kształtu źrenicy i zmiany położenia środka źrenicy. W reflektometrii rejestrowane są obrazy oka, na których refleksy rogówkowe i/lub soczewkowe zmieniają swoje położenie na powierzchni oka, gdy oko wykonuje ruch. Wykorzystywane są zwykle refleksy będące pierwszym i czwartym obrazem Purkinjego. Refleksy te pochodzą od źródła światła z zakresu podczerwieni znajdującego się blisko oka, emitującego skolimowaną wiązkę światła. W PSOG nie rejestrujemy obrazów oka. Rejestrowane są zmiany natężenia światła podczerwonego odbitego od niewielkiej powierzchni oka obejmującej fragment rąbka rogówki. Techniki te, chociaż różnią się podejściem, mają tę wspólną cechę, że najczęściej skupiają się na badaniu wybranych parametrów ruchów oczu (np. długości i kierunków sakkad, czasów fiksacji) i rzadko ich celem jest odtworzenie trajektorii spojrzenia na obserwowanym obiekcie czy w wybranym obszarze pola widzenia [2].

Techniki optyczne zapewniają pacjentowi wyższy komfort badania niż techniki omówione w poprzednim odcinku, wymagające aplikowania do oka specjalnych soczewek kontaktowych lub naklejania elektrod na skórę w pobliżu oka [1]. Możemy wyróżnić trzy podstawowe typy mocowania rozważanych tu *eyetrackerów*: urządzenia stacjonarne (na kablu) mocowane na głowie, urządzenia mobilne mocowane na głowie i bezkontaktowe urządzenia przenośne (rycina 1).



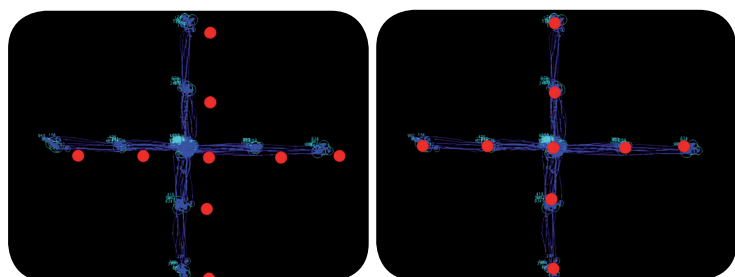
Ryc. 1. Podstawowe sposoby mocowania urządzeń POG i VOG: u góry po lewej urządzenie stacjonarne mocowane na głowie [3], u góry po prawej urządzenie mobilne mocowane na głowie [4], u dołu urządzenie przenośne bezkontaktowe [5]



Ryc. 2. Obrazy oka w różnych fazach ruchu. U góry: obrazy uzyskiwane metodami POG lub VOG. Widzimy zmiany pozomego kształtu źrenicy z kołowego na eliptyczny i zmiany położenia refleksu rogówkowego względem środka źrenicy. U dołu: ilustracja działania PSOG. W zależności od fazy rotacyjnego ruchu oka zmienia się natężenie światła docierającego do detektora. Przyczyną tego jest większy współczynnik odbicia światła podczerwonego przez twardówkę niż przez rogówkę. Czasowa i przestrzenna zdolność rozdzielcza PSOG wynoszą odpowiednio 1 ms i 0,1° [2,6,7]

Wymienione wyżej techniki monitorowania ruchów oczu często pozostawiają niejednoznaczność interpretacyjną wynikającą z braku precyzyjnego ustalenia położenia punktu fiksacji, który w literaturze przedmiotu nazywany jest raczej punktem skupienia uwagi (*point of regard*, POR). Stwarza to szczególne trudności przy oddzieleniu ruchów translacyjnych od rotacyjnych [2]. Ustalenie położenia POR wymaga albo unieruchomienia głowy, wówczas ustawienie oczu względem głowy i względem POR pokrywają się, albo zmierzania co najmniej dwóch parametrów ruchów oczu. Parametrami tymi mogą być na przykład położenie na zarejestrowanym kadrze pierwszego obrazu Purkiniego i położenie środka źrenicy (ryc. 2).

W VOG wykorzystywane są zwykle tanie kamery oraz algorytmy cyfrowej obróbki obrazu pozwalające na obliczenie położenia POR w czasie rzeczywistym. Dotyczy to zarówno urządzeń przenośnych bezkontaktowych, jak i mobilnych mocowanych na głowie. Dzięki odpowiedniej kalibracji urządzenia te pozwalają dokładnie ustalić położenie POR w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku obserwacji. Proces kalibracji polega na rejestracji obrazów oka, gdy obserwator kieruje wzrok na punkty kalibracyjne znajdujące się w tej płaszczyźnie [8]. Zwykle używa się dziewięć punktów kalibracyjnych ułożonych na planie symetrycznego krzyża lub macierzy 3 x 3 (ryc. 3 i 4).

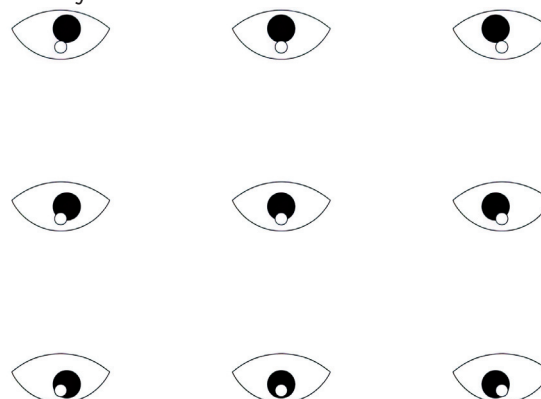


Ryc. 3. Po lewej: wynik obliczenia trajektorii spojrzeń przed kalibracją. Trajektorja spojrzeń (kolor niebieski) obliczona przez oprogramowanie wideookulografu na podstawie obrazów oka patrzącego na punkty kalibracyjne (kolor czerwony), widzimy systematyczny błąd, tj. przesunięcie trajektorii w lewo i w górę. Po prawej: trajektorja spojrzeń obliczona po kalibracji pokrywa się z rzeczywistą [8,9]

Przykłady obrazów oka w różnych fazach ruchu rejestrowane wspomnianymi wyżej technikami pokazane są na rycinie 2.

Odtworzenie ruchów oczu na podstawie zdjęć lub sekwencji wideo może być przeprowadzone automatycznie przy użyciu odpowiednich algorytmów lub na podstawie wizualnej analizy. Analiza wizualna kadr po kadrze może być niezwykle żmudna i podatna na błędy i jest ograniczona przez częstotliwość próbkowania urządzeń wideo.

Jak wspomniano już wyżej, do oddzielenia ruchów oczu i ruchów głowy wystarczająca jest analiza położenia środka źrenicy i refleksu rogówkowego. Wykorzystywany tu jest fakt, że względna odległość środka źrenicy i pierwszego obrazu Purkiniego zmienia się w wypadku czystej rotacji oka, natomiast niemal nie zmienia się przy niewielkich ruchach głowy [2]. Względne położenie tych dwóch obiektów pokazane jest na rycinie 4 tak, jak widzi je kamera *eyetrackera*, gdy wzrok obserwatora przenoszony jest do kolejnych punktów kalibracji ułożonych w macierz 3 x 3.



Ryc. 4. Położenie źrenicy i pierwszego obrazu Purkiniego widziane przez kamerę *eyetrackera* w momentach fiksacji lewego oka na punktach kalibracyjnych ułożonych w macierz 3 x 3 [2]

*Eyetrackery* zwane *eyetrackerami* V generacji wykorzystują również czwarty obraz Purkiniego [10]. Rejestracja położenia pierwszego i czwartego obrazu Purkiniego pozwala na oddzielną analizę translacyjnych i rotacyjnych ruchów oczu. Oba refleksy zachowują swoje względne położenie przy ruchach translacyjnych natomiast w trakcie ruchu rotacyjnego oka dystans między nimi ulega zmianie.

Idealny *eyetracker* powinien oprócz ruchów translacyjnych i rotacyjnych mierzyć również ruchy torsyjne, tj. obroty gałki ocznej wokół osi pokrywanej się z linią wzroku. Spośród metod optycznych śledzenia ruchów oczu do wykrywania i pomiaru ruchów torsyjnych można zastosować jedynie VOP. We współczesnych wideookulografach wykrywających ruchy torsyjne wykorzystuje się obrazy struktury tęczęwki, która, jak wiadomo, nie ma symetrii obrotowej, więc łatwo jest śledzić jej położenie kątowe [11].

Listę *eyetrackerów* aktualnie dostępnych komercyjnie, liczącą ponad 30 pozycji, możemy, jak prawie wszystko, znaleźć w Internecie [12]. Znajdziemy na niej dwa urządzenia, do powstania których przyczyniła się polska myśl techniczna [13,14].

**Piśmiennictwo**

1. M. Kowalczyk-Hernández. Zaawansowane narzędzia optometrii i psychofizyki widzenia. Część VII – śledzenie ruchów oczu. Techniki wykorzystujące efekty elektromagnetyczne *OPTYKA* 1(74)2022
2. A.T. Duchowski. *Eye Tracking Methodology Theory and Practice* (Springer – 2017) [http://eprints.ukh.ac.id/id/eprint/255/1/2017\\_Book\\_EyeTrackingMethodology.pdf](http://eprints.ukh.ac.id/id/eprint/255/1/2017_Book_EyeTrackingMethodology.pdf)
3. A.H. Clarke, J. Ditterich, K. Drüen, U. Schönfeld, C. Steineke. Using high frame rate CMOS sensors for three-dimensional eye tracking. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 2002; vol. 34: 549–560. <https://doi.org/10.3758/BF03195484>
4. [www.ergoneers.com/en/mobile-eye-tracker-dikablis-glasses-3/](http://www.ergoneers.com/en/mobile-eye-tracker-dikablis-glasses-3/)
5. [www.sr-research.com/eyelink-portable-duo/](http://www.sr-research.com/eyelink-portable-duo/)
6. I. Hooge, K. Holmqvist, M. Nyström. The pupil is faster than the corneal reflection (CR): Are video based pupil-CR eye trackers suitable for studying detailed dynamics of eye movements? *Vision Research* 2016; vol. 128: 6–18, <https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.09.002>
7. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1707/1707.05413.pdf>
8. [www.uniklinik-freiburg.de/fileadmin/mediapool/07\\_kliniken/psy\\_psykuj/pdf/lehre/ESSEM\\_2014/ESSEM\\_2014\\_-\\_Lecture\\_slides\\_-\\_Hutton\\_-\\_Technical\\_challenges.pdf](http://www.uniklinik-freiburg.de/fileadmin/mediapool/07_kliniken/psy_psykuj/pdf/lehre/ESSEM_2014/ESSEM_2014_-_Lecture_slides_-_Hutton_-_Technical_challenges.pdf)
9. P. Kasprowski, K. Hareźlak, M. Stasch. Guidelines for the Eye Tracker Calibration Using Points of Regard. In: E. Piętka, J. Kawa, W. Wieclawek (eds). *Information Technologies in Biomedicine 2014*, vol. 4. *Advances in Intelligent Systems and Computing* vol 284. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-06596-0\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06596-0_21)
10. H.D. Crane, C.M. Steele. Generation-V dual-Purkinje-image eyetracker. *Applied Optics* 1985 24: 527–537
11. J.K. Ong, T. Haslwanter. Measuring torsional eye movements by tracking stable iris features. *Journal of neuroscience methods* 2010; vol. 192: 261–267 <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.08.004>
12. [wiki.cogain.org/index.php/Eye\\_Trackers](http://wiki.cogain.org/index.php/Eye_Trackers)
13. [www.ober-consulting.com/11/lang/0/](http://www.ober-consulting.com/11/lang/0/)
14. [www.ober-consulting.com/9/lang/0/](http://www.ober-consulting.com/9/lang/0/)