

WYZNACZANIE RÓŻNICY LATENCJI WZROKOWEJ W ZJAWISKU PULFRICHA

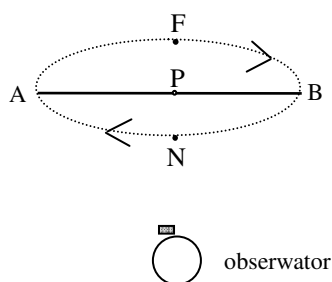
Uwaga! Jest to tylko zarys teorii wymaganej w celu przeprowadzenia ćwiczenia. Materiał teoretyczny można odnaleźć w przytoczonej bibliografii.

Ogólne wiadomości o zjawisku Pulfricha

Istota zjawiska Pulfricha

Zjawisko Pulfricha (ZP) jest iluzją optyczną, występującą podczas obuocznego obserwacji poruszających się obiektów¹. Manifestuje się ona pozornym zwiększeniem ilości wymiarów, w których ruch się odbywa, co skutkuje błędną oceną przestrzennego położenia tych obiektów. Spontaniczne ZP towarzyszy przebiegowi wielu stanów patologicznych, stwarzając na przykład problemy w uczestniczeniu w ruchu ulicznym oraz drogowym².

Można poglądowo powiedzieć, że ZP wprowadza w błąd umiejętność widzenia przestrzennego. Aby do tego doszło, poza obserwacją obuoczną oraz ruchem (względny) obserwowanego obiektu musi oczywiście być spełniony pewien dodatkowy warunek (bo ZP nie manifestuje się spontanicznie przy prawidłowym widzeniu). W klasycznych doświadczeniach, opisanych w roku 1922 przez Carla Pulfricha w



Ryc. 1 Geometria klasycznego doświadczenia Pulfricha (widok z góry). Wahadło porusza się „tam i z powrotem” wzdłuż toru AB. P – punkt fiksacji. Obserwowany (pozorny) tor ruchu zakończenia wahadła przedstawia linia przerywana. Gdy przysłonięte filtrem jest oko lewe, ruch pozorny odbywa się zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Punkt F określany jest jako daleki, natomiast punkt N jako bliski.

pracy „Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie”, zjawisko było wywoływane przez (dostatecznie dużą) różnicę w oświetleniu siatekówek obserwatora. Osiągano to, umieszczając przed jednym z oczu neutralny filtr optyczny o dostatecznie małej przepuszczalności (u niektórych ludzi ZP może być, na krótki czas, wywołane zaadaptowaniem jednego z oczu do ciemności poprzez dostatecznie długie jego przymknięcie; oko zaadaptowane zachowuje się tak, jakby było przysłonięte filtrem). Wystarczająco duża różnica w oświetleniu siatekówek spowodowana może być także procesem patologicznym, np. asymetryczną zaćmą czy zmętnieniem rogówki, co skutkuje spontaniczną postacią ZP.

W doświadczeniach opisanych przez Pulfricha obserwowano, po uprzednim przysłonięciu jednego z oczu filtrem, ruch drgający zakończenia wahadła odbywający się w płaszczyźnie czołowej na wysokości oczu. Wzrok fiksowano na położeniu równowagi zakończenia wahadła. Obserwator odnosi wówczas wrażenie, że płaski w rzeczywistości ruch zakończenia wahadła nabiera głębi i odbywa się po elipsie, której część leży przed

płaszczyzną rzeczywistego ruchu, pozostała natomiast część za tą płaszczyzną, ryc. 1. Rzeczywisty tor ruchu nie stanowi długiej półosi elipsy, lecz jest przesunięty ku punktowi bliskiemu. Ponadto, wahadło zdaje się poruszać zgodnie z ruchem wskazówek zegara, gdy przysłonięte filtrem jest oko lewe, czyni to natomiast

¹ ZP zachodzi także wtedy, gdy ruch obserwowanego obiektu jest jedynie względny, to znaczy porusza się obserwator, natomiast sam obiekt jest nieruchomy.

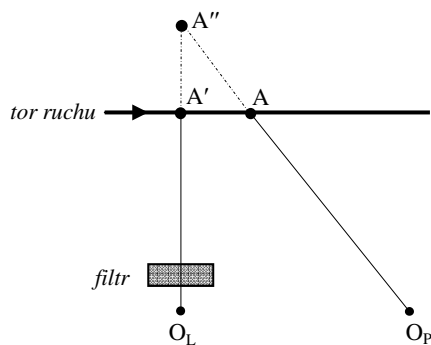
² W literaturze wymienianych jest wiele innych niedogodności towarzyszących spontanicznemu ZP: trudności podczas nalewania cieczy do naczyń, wkładania klucza do zamka, oceny wysokości i szerokości drzwi, utrudnienia w efektywnym udziale w grach sportowych jak tenis, badminton czy piłka nożna, utrudnienia w korzystaniu ze schodów, etc.

przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, gdy przysłonięte jest oko prawe. Łatwo to sprawdzić także w warunkach domowych, umieszczając przed jednym z oczu szkło okularów przeciwsłonecznych i obserwując (obuocznie!) ruch drgający zaimprovizowanego wahadła, na przykład ruch zawieszonej na żyłce kulki, puszczanej swobodnie po wychyleniu z położenia równowagi.

Wywołany przez filtr efekt głębi jest dobrze widoczny bez względu na to, czy podczas obserwacji punkt fiksacji jest statyczny czy też - w bardziej naturalny sposób - obserwator śledzi ruch zakończenia wahadła. W tym drugim przypadku w polu widzenia musi się jednak znajdować dobrze wyróżniony obiekt o stałym położeniu.

Wytłumaczenie zjawiska Pulfricha

Już w momencie odkrycia ZP powstało intrygujące pytanie, co jest jego przyczyną. W tej samej pracy z roku 1922, w której po raz pierwszy opisano zjawisko, Pulfrich stwierdził, że można je wyjaśnić przyjmując, iż latencja wzrokowa, rozumiana jako czas upływający między pojawieniem się bodźca wzrokowego w polu widzenia a jego percepcją, zależy od natężenia oświetlenia siatkówki i rośnie wraz ze spadkiem tego natężenia³. Zastosowanie filtra zwiększa więc czas, po którym sygnał optyczny dociera do kory wzrokowej. W ten sposób, jak poglądowo określił to Richard Gregory, oko przysłonięte filtrem „patrzy w przeszłość”. W efekcie mózg – nieustannie – zestawia „fałszywą” (spóźnioną) informację, otrzymywaną z



Ryc. 2 Różnica latencji wzrokowych (tu wywołana obecnością filtra przed okiem lewym) skutkuje błędną lokalizacją poruszającego się (tu w prawo) punktu. A – położenie sygnalizowane w pewnej chwili mózgowi przez oko „szybsze” (nie przysłonięte filtrem), A' – wcześniejsze położenie sygnalizowane w tej samej chwili przez oko „wolniejsze” (przysłonięte filtrem), A'' – położenie pozorne. O_L – oko lewe, O_P – oko prawe.

oka przysłoniętego filtrem, z „prawdziwą” (aktualną) informacją z oka filtrem nie przysłoniętego, co – nieustannie – skutkuje iluzją optyczną (pozorną głębią ruchu), ryc. 2. Lokalizując na ryc. 2 pozorne położenie obiektu założono, że każde z oczu posiada zdolność wyznaczania kierunku przestrzennego, na którym – z jego „punktu widzenia” – znajduje się obiekt, natomiast mózg nieustannie lokalizuje obiekt w miejscu przecięcia się obu kierunków przestrzennych. Dodatkowo założono, że mózg sztywno „trzyma się” tego „algorytmu” widzenia przestrzennego, to znaczy, że nie potrafi w żaden sposób uwzględnić dużych różnic w oświetleniu siatkówek. Dwa wymienione założenia można zastąpić jednym, a mianowicie przyjęciem, że w nieobecności filtra mózg zlokalizowałby obiekt w punkcie A''.

Konstrukcja geometryczna z ryc. 2 pozwala łatwo sprawdzić na kartce papieru, że pozorny tor ruchu wahadła będzie krzywoliniowy i przypominać będzie istotnie elipsę. Widać też łatwo, że po przysłonięciu filtrem oka lewego ruch pozorny odbywać się będzie zgodnie z ruchem wskazówek zegara, zachodzić będzie natomiast przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, gdy przysłonięte filtrem jest oko prawe.

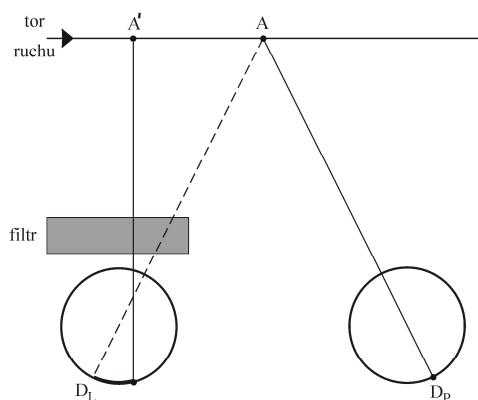
Jak modelową sytuację z ryc. 2 interpretować ma jednak mózg, konstruujący trójwymiarową przestrzeń wizualną na podstawie dwuwymiarowych obrazów z siatkówek? Najpierw rozpatrzony zostanie przypadek, gdy punkt fiksacji jest statyczny i przypada na rzeczywisty tor ruchu, jak miało to miejsce w klasycznych doświadczeniach Pulfricha (ryc. 1). Otóż różna latencja sygnałów optycznych powoduje, iż w chwilowych rejestracjach z siatkówki lewej i prawej, prezentowanych równocześnie korze wzrokowej,

³ Natężenie oświetlenia siatkówki definiujemy jako iloczyn luminancji L oraz powierzchni źrenicy S . Jeśli L wyrażać w nitach (cd/m^2), natomiast S w mm^2 , wówczas jednostką I_s jest troland (skrót td); natężenie oświetlenia siatkówki podawane jest zwykle jako logarytm dziesiętny z liczby trolandów. Do zrozumienia teoretycznych podstaw ćwiczenia wystarczy jednak wyobrazić sobie tę wielkość fizyczną jako łatwo dostępne intuicji „oświetlenie siatkówki”.

W rzeczywistości – jak podał sam Pulfrich – taką przyczynę zjawiska zasugerował Fertsch, jego asystent. Fertsch wykonał też wszystkie eksperymenty, albowiem Pulfrich, niewidomy na jedno oko od roku 1905, nie był w stanie zobaczyć zjawiska w czasie prac nad nim.

obrazy poruszającego się punktu znajdują się w różnych miejscach – ściślej, nie przypadają na korespondujące miejsca siatkówek. Jak wiadomo z fizjologii widzenia, powstawanie jednoczesnych obrazów punktu w miejscach nie korespondujących skutkuje efektem stereoskopowym, to znaczy umieszczeniem obrazu punktu przez mózg – w subiektywnej trójwymiarowej przestrzeni wizualnej – poza obrazem płaszczyzny nastawienia, tzn. za lub też przed nim. Tłumaczy to „wyrzucanie” poruszającego się punktu z płaszczyzny rzeczywistego ruchu, charakterystyczne dla ZP.

Omawiany mechanizm ilustruje ryc. 3. Dla prostoty - ale bez straty ogólności – rozważana jest na



Ryc. 3 Dysparacja wywołana różnicą latencji. D_L – dołek środkowy lewy, D_P – dołek środkowy prawy. Kropki na siatkówkach oznaczają obrazy położenia A' (lewa siatkówka) oraz A (prawa siatkówka) poruszającego się punktu, prezentowane jednocześnie mózgowi. Dalsze objaśnienia w tekście.

rycinie sytuacja, gdy położenie A poruszającego się punktu, sygnalizowane mózgowi przez oko nie przysłonięte filtrem, przypada akurat na statyczny punkt fiksacji. W tej samej chwili oko przysłonięte filtrem sygnalizuje mózgowi pewne wcześniejsze położenie A' . W jednocześnie „raportowanych” mózgowi projekcjach siatkówkowych obrazy poruszającego się punktu nie znajdują się w miejscach korespondujących – obraz na siatkówce prawej przypada (chwilowo) na dołek środkowy (bo tam obrazowany jest zawsze punkt fiksacji), natomiast w siatkówce lewej już tak nie jest. Miarą powstałej dysparacji, a więc i efektu stereoskopowego, jest odległość między miejscem powstania obrazu i tym miejscem, z którym koresponduje obraz punktu na drugiej siatkówce – jest to pogrubiony fragment lewej siatkówki. Pomimo różnicy w położeniu obrazu na siatkówkach, fuzja sensoryczna umożliwia pojedyncze widzenie punktu, o ile tylko zbyt duża różnica latencji nie wyprowadziła „spóźnionego” obrazu na przysłoniętej filtrem siatkówce poza obszar Panuma. Donosowy charakter dysparacji

powoduje, że obraz punktu będzie umieszczony przez mózg w trójwymiarowej przestrzeni wizualnej za obrazem płaszczyzny nastawienia (tzn. głębiej niż obraz punktu fiksacji)⁴.

Jakiemu konkretnemu miejscu w przestrzeni wizualnej zostanie przypisany obraz tego punktu? Będzie to punkt przecięcia się prostych, łączących położenia A' oraz A z ich obrazami na odpowiednich siatkówkach (są to dokładnie oba „kierunki przestrzenne” z ryc. 2).

Przedstawiony „algorytm” generowania efektu głębi, charakterystycznego dla zjawiska Pulfricha, dalece nie wystarcza jednak, gdy obserwator śledzi ruch. Wówczas (dynamiczna) fiksacja dokonywana jest na poruszającym się punkcie, zatem na obu siatkówkach jego obraz przypada na dołki środkowe – są one jednak miejscami korespondującymi, a więc o żadnej dysparacji obrazów punktu nie może być mowy. Decydujący jest zresztą całkiem inny argument – nawet jeśli śledzenie ruchu nie jest perfekcyjne, obrazy poruszającego się punktu przesuwają się bardzo wolno na siatkówkach. Tym samym, rozmiar iluzji optycznej powinien być niewielki, podobnie jak ma to miejsce podczas statycznej fiksacji i wolnego ruchu w polu widzenia – wniosek taki jest jednak kompletnie sprzeczny z doświadczeniem, albowiem podczas śledzenia ruchu wahadła ZP manifestuje się podobnie dobitnie, jak w przypadku statycznej fiksacji. Podczas śledzenia ruchu efekt stereoskopowy (pozorna głębia ruchu) musi więc być – dosyć zaskakująco, w pełnej jednak zgodzie z doświadczeniem – wywoływany przez obecność statycznego, dobrze wyróżnionego obiektu w tle. Jakkolwiek tło jest nieruchome w laboratoryjnym układzie odniesienia, to jednak jego obrazy przesuwają się na siatkówkach podczas obserwacji ruchu, zmieniając w czasie swoje położenie względem obrazów obserwowanego punktu. Nie jest trudno sobie wyobrazić, zwłaszcza w przypadku dużych rozmiarów statycznego obiektu w tle, że zmiana ta może być interpretowana przez mózg jako zmiana

⁴ Można poglądowo powiedzieć, że iluzja optyczna wynika - w tym opisie - z „przyjmowania” przez mózg, iż jeśli jednoczesne obrazy punktu nie powstają w korespondencyjnych miejscach siatkówek, to nie może on znajdować się na horopterze.

głębokości położenia raczej obserwowanego punktu aniżeli tła. Okazuje się jednak, że sama obecność tła nie wystarcza. Gdy – w odpowiednio przygotowanych eksperymentach – obserwowany (poruszający się) punkt niejednakowo oświetla siatkówki obserwatora, natomiast tło oświetla je tak samo, efekt Pulfricha nie występuje⁵. W odwrotnej sytuacji – gdy obserwowany punkt jednakowo oświetla siatkówki, natomiast stacjonarne tło już nie – efekt Pulfricha pojawia się, ale tylko podczas obserwacji ruchu, znika natomiast, gdy wzrok zostaje zafiksowany na stacjonarnym tle.

Tak więc, do manifestowania się ZP podczas dynamicznej obserwacji ruchu wymagana jest różnica latencji sygnałów optycznych z tła, natomiast różnica latencji sygnałów optycznych pochodzących od obserwowanego obiektu **nie** jest wówczas konieczna⁶. Tym samym, dysparacje (tym razem – obrazów tła) są nadal zaangażowane w genezę ZP. Odbyna się to jednak w sposób znacznie bardziej skomplikowany, niż wynikałoby to z prostych analogii z „klasycznym” mechanizmem widzenia przestrzennego, w którym o głębokości lokalizacji przestrzennej punktu decydują wyłącznie dysparacje *jego* obrazu.

Model geometryczny z ryc. 2 nie zależy jednak oczywiście od sposobu, w jaki mózg ma „tłumaczyć” dysparacje na głębię podczas obserwacji ZP.

Jeśli o samą hipotezę opóźnieniową – a więc o założenie, że różnica latencji jest przyczyną ZP – chodzi, ogromna ilość doświadczeń świadczy na jej korzyść. Należą do nich w szczególności eksperymenty, w których efekt aplikacji filtra jest eliminowany przez *późniejsze* prezentowanie sygnału optycznego oku „szybszemu”. Hipoteza opóźnieniowa przewiduje również trafnie, że spontaniczne ZP może manifestować się nie tylko w przypadku występowania patologicznej różnicy w oświetleniu siatkówek, jak ma to miejsce w przebiegu asymetrycznej zaćmy czy zmętnienia rogówki, ale także wtedy, gdy siatkówki są tak samo oświetlane, natomiast inny proces patologiczny asymetrycznie lub jednostronnie wpływa na czas przewodzenia sygnału optycznego do kory wzrokowej. Może to mieć miejsce już na etapie generowania odpowiedzi elektrycznej siatkówki, na przykład w przebiegu zwyrodnienia plamki żółtej. Opóźnienie w przekazywaniu bodźca optycznego do kory wzrokowej wywołane też być może procesem demielinizacyjnym w nerwie wzrokowym, wynikłym z pozagałkowego zapalenia tego nerwu – skutkuje to spontanicznym ZP w przebiegu stwardnienia rozsianego. Znajomość natury ZP pozwala na wyeliminowanie lub ograniczenie takich jego spontanicznych (nieraz bardzo dokuczliwych dla chorego) postaci poprzez umieszczenie odpowiednio dobranego filtra przed tym z oczu, które szybciej przekazuje sygnał optyczny do kory wzrokowej.

Jeśli hipoteza opóźnieniowa tłumaczy spontaniczne ZP w sposób kompletny, to powinna ona trafnie przewidywać wartość różnicy latencji, występującej podczas obserwacji zjawiska. Bezpośredni pomiar różnicy latencji jest jednak praktycznie niemożliwy do przeprowadzenia. Pewne możliwości porównawcze dają jedynie, świetnie znane z praktyki medycznej, wzrokowe potencjały wywołane (VEP), mierzone na powierzchni głowy w odpowiedzi na bodziec wzrokowy. U pacjentów ze spontaniczną postacią ZP istotnie obserwuje się oczekiwaną przez hipotezę opóźnieniową asymetrię jednoocznych (tzn. rejestrowanych podczas obserwacji jednoocznej) zapisów VEP. Tym niemniej, przesunięcie czasowe tych zapisów jest około 10 razy większe, aniżeli by wynikałoby to z oszacowania z teorii Fertscha-Pulfricha, dokonywanego na podstawie mierzonych przez pacjentów parametrów pozornego toru ruchu wahadła. VEP mierzą jednak nie tyle latencję wzrokową, ile raczej czas potrzebny na wywołanie rejestrowanej przez elektrody odpowiedzi kory. Ponadto, drogi nerwowe, istotne dla wywoływania iluzji optycznej, mogą mieć niewielki udział w generowaniu sygnału VEP. Tym niemniej, hipotezę opóźnieniową potwierdza mocno znacząca dodatnia korelacja między przesunięciem czasowym w zapisach VEP a różnicą latencji, przewidzianą przez tę

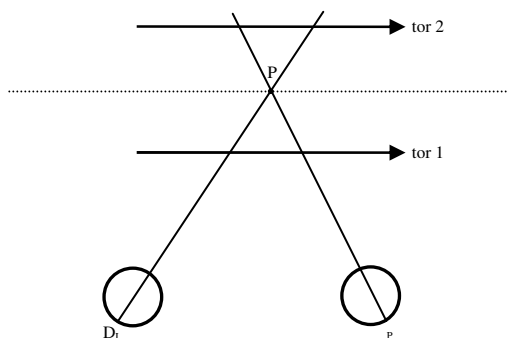
⁵ D. Eagleman twierdzi, że jest to oczekiwane, albowiem w toku ewolucji mózg nabył umiejętność uwzględniania różnic w luminancji obserwowanych obiektów. Jednakże mózg miał jednocześnie najczęściej do czynienia z sytuacją, w której średnia luminancja całej oglądanej sceny, a więc i średnia latencja sygnałów optycznych z tej sceny, ma dla obu siatkówek zbliżoną wartość - takie też czyni więc założenie podczas analizy bodźców wzrokowych. Tymczasem przystąpienie jednego z oczu filtrem czy też ekwiwalentny proces chorobowy powodują niezwykle, ekstremalnie odbiegające od normalnych warunki obserwacji, do których mózg nie miał sposobności się przystosować w toku ewolucji, co skutkuje iluzją optyczną.

⁶ Możemy więc powiedzieć, że ZP wywołuje ten element oglądanej sceny, którego obrazy przesuwają się na siatkówkach.

hipotezę.

Model czasowy efektu stereoskopowego

Jakkolwiek sama hipoteza opóźnieniowa jest trafna, to klasyczne wyjaśnienie ZP, przedstawione wyżej (ryc. 2), zakłada dodatkowo, że mózg „konstruuje” głębokość **ruchu** na podstawie analizy różnic równocześnie mu prezentowanych obrazów jednoocznych. Oznacza to, że nieustannie wykrywane i „tłumaczone” na głębokość położenia w trójwymiarowej przestrzeni wizualnej są chwilowe dysparacje (w ogólności – jak wskazano wyżej - w znacznie bardziej skomplikowany sposób, aniżeli ma to miejsce w przypadku statycznym).



Ryc. 4 Dysparacja czasowa. Punkt poruszający się poza płaszczyznę nastawienia (linia przerywana), np. po torze 1, pobudza korespondencyjne miejsca siatkówek (tu: dołki środkowe, odpowiednio D_L oraz D_P) w odstępie czasu. P – punkt fiksacji.

W modelu czasowym efektu stereoskopowego mózg analizuje projekcje siatkówkowe z pewnego przedziału czasu. Miejsca korespondujące siatkówek są nadal wykorzystywane, natomiast mózg wykrywa teraz *przesunięcia czasowe w ich stymulacji*, określane jako *kongruentne dysparacje czasowe*⁷ (ang. *contiguous temporal disparities*), ryc. 4. W analogii do dysparacji przestrzennych, podczas normalnej obserwacji dysparacje czasowe znikają, gdy ruch ma miejsce w płaszczyźnie nastawienia, a ściślej – po horopterze (bo korespondujące miejsca siatkówek – na ryc. 4 dołki środkowe - są wtedy stymulowane jednocześnie). Po przysłonięciu jednego z oczu filtrem powstała różnica latencji spowoduje jednak, że informacje o konkretnym położeniu (np. w punkcie fiksacji) poruszającego się po horopterze punktu dotrą do kory wzrokowej, z poszczególnych oczu, w odstępie czasu. Wynikłą stąd „fałszywą” dysparację czasową mózg mógłby – w analogii do „fałszywych”

dysparacji przestrzennych – błędnie „przetłumaczyć” na głębokość ruchu (efekt stereoskopowy, charakterystyczny dla ZP)⁸.

Sama analiza dysparacji czasowych nie wystarcza jednak do jednoznacznego określenia głębokości położenia (odległości od płaszczyzny nastawienia) poruszającego się punktu. Widać to dobrze na ryc. 4, na której jako przykład pary miejsc korespondujących wybrano dołki środkowe. Po pierwsze, czas upływający między „przecięciem” przez poruszający się punkt osi wzrokowych, a więc między stymulacją dołków środkowych, zależy nie tylko od odległości punktu od płaszczyzny nastawienia, ale także od szybkości ruchu - aby więc określić na podstawie kongruentnej dysparacji czasowej odległość punkt-płaszczyzna nastawienia, trzeba znać szybkość punktu. Po drugie, aby można było określić, czy punkt znajduje się przed czy też za płaszczyzną nastawienia, trzeba znać zwrot wektora jego prędkości – istotnie, ruch w prawo po torze 1 pobudzi dołki środkowe w odwrotnej kolejności niż ruch w tę samą stronę, odbywający się po torze 2. Tak więc, jeśli podczas ZP w wywoływanie efektu stereoskopowego ma być zaangażowana analiza czasowa sygnałów optycznych, mózg musi podczas takiej analizy wykorzystywać dodatkowe informacje, dostarczane przez układ wykrywania i określania ruchu. Jakkolwiek ośrodkowy układ nerwowy wyposażony jest w odpowiednie neurony, spór o to, w jaki sposób taka współpraca miałaby się odbywać, pozostaje nierozstrzygnięty.

Model czasowy tłumaczy powstawanie niektórych „mutacji” ZP, w wypadku których klasyczna teoria widzenia przestrzennego jest bezradna. Należy do nich stroboskopowy efekt Pulfricha, w którym pozorna głębokość jest kreowana, gdy obserwacja dokonywana jest naprzemiennie jednoocznie (tzn. obserwacji dokonuje, w powtarzającym się cyklu, raz jedno, raz drugie oko), zaś cała oglądana scena jest statyczna. Brak ruchu wyklucza wówczas powstawanie dysparacji przestrzennych, mimo obecności różnicy latencji wywołanej użyciem filtra. W przypadku klasycznego ZP, w którym – w odróżnieniu od jego „mutacji” – mamy do czynienia z ciągłą dwuoczną obserwacją poruszających się obiektów, teoria Fertscha-Pulfricha, oparta o założenie, że lokalizacja przestrzenna dokonywana jest, w sposób ciągły, na podstawie równocześnie prezentowanych mózgowi obrazów jednoocznych (ryc. 2), wystarcza jednak do satysfakcjonującego opisu zjawiska. Na jej rzecz świadczy trafne przewidywanie wielu faktów doświadczalnych i przebiegu zależności eksperymentalnych pomiędzy różnymi zmiennymi klasycznego ZP (jak choćby pomiędzy różnicą

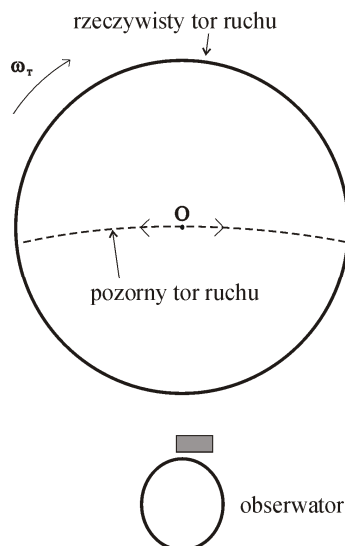
⁷ Konsekwentnie, względne przesunięcie obrazu w równocześnie prezentowanych mózgowi projekcjach siatkówkowych określa się jako „równoczesną dysparację przestrzenną” (ang. *simultaneous spatial disparity*), a nie po prostu dysparację, jak czyniono to wyżej.

⁸ W klasycznym modelu pozorna głębokość ruchu bierze się stąd, że równocześnie sygnalizowane mózgowi położenia znajdują się w różnych miejscach toru (ryc. 2), natomiast w modelu czasowym pozorną głębokość wywołuje to, że identyczne położenia sygnalizowane są w odstępie czasu.

latencji i różnicą natężeń oświetlenia siatkówki). Teoria Fertscha-Pulfricha dostarcza także zgodnego z wieloma faktami doświadczalnymi opisu rotacyjnego ZP. Nie bez praktycznego znaczenia jest to, że wynikły z niej formalizm matematyczny, oparty o elementarne rozważania geometryczne, pozwala w bardzo prosty i zrozumiały sposób przedstawić związki między różnymi parametrami obserwacji.

Rotacyjne ZP

W rotacyjnym ZP przedmiotem obserwacji jest ruch cienkiego, pionowo usytuowanego pręta, odbywający się po okręgu. Ruch taki realizuje się, umieszczając trwale pręt na wykonującej ruch obrotowy tarczy, w pewnej odległości od jej środka. Obserwacja dokonywana jest po przysłonięciu odpowiedniego z oczu filtrem (jest to oko lewe dla ruchu przeciwnego do ruchu wskazówek zegara, natomiast oko prawe w drugim przypadku). Przy małych prędkościach kątowych ruchu obrotowego tarczy ruch pręta odbywa się zgodnie z ruchem obrotów tarczy. Obserwowany tor ruchu jest zamkniętą krzywą, podobnie jak tor rzeczywisty, nie jest już jednak okręgiem. Tor ten może leżeć wewnątrz rzeczywistego toru albo też przecinać go, zawsze jednak otacza środek tarczy, zaś jego kształt zmienia się wraz z prędkością kątową tarczy. Zwiększanie prędkości kątowej ruchu obrotowego tarczy – przy jednoczesnym zachowaniu stałej odległości obserwatora od środka tarczy – doprowadza do osiągnięcia spektakularnej sytuacji, w której pozorny ruch pręta odbywa się *przeciwnie* do ruchu tarczy.



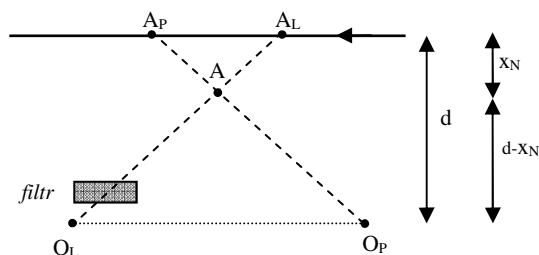
Ryc. 5 „Przejście” w rotacyjnym ZP, gdy przysłonięte filtrem jest oko prawe.

Tę zmianę poprzedza „przejście”, podczas którego pręt zdaje się poruszać „tam i z powrotem” po łuku spinającym rzeczywisty tor, ryc. 5. Kształt tego łuku zależy od parametrów doświadczenia (jak i od tego, które z oczu jest przysłonięte filtrem), tym niemniej łuk przechodzi zawsze przez środek tarczy.

Metody pomiarowe, stosowane w ćwiczeniu

Przedmiotem niniejszego ćwiczenia jest oszacowanie wzrostu latencji wzrokowej, spowodowanego użyciem filtra. Oszacowanie to dokonywane jest – dla trzech różnych przepuszczalności filtra – na podstawie obserwacji zarówno klasycznego (liniowego), jak i rotacyjnego ZP, zaś jego podstawą jest geometryczny model z ryc. 2. Warto zwrócić uwagę, że szacowany w ćwiczeniu czas jest rzędu milisekundy!

1. Liniowe zjawisko Pulfricha.



Ryc. 6 Rysunek pomocniczy do otrzymania związku między różnicą latencji wzrokowych i odległością punktu bliskiego od rzeczywistego toru.

W tej części ćwiczenia wyznaczane są położenia punktu bliskiego i punktu dalekiego pozornego toru ruchu wahadła (p. ryc. 1). Znając odległość któregośkolwiek z tych punktów od rzeczywistego toru ruchu, prędkość wahadła w położeniu równowagi, rozstaw źrenic oraz odległość obserwatora od rzeczywistego toru ruchu, jesteśmy w stanie obliczyć wzrost latencji, wywołany obecnością filtra.

Rozważmy w tym celu – bez straty ogólności rozważań – sytuację, gdy przysłonięte filtrem jest oko lewe, natomiast ruch odbywa się w lewo, ryc. 6. Kiedy zakończenie wahadła przechodzi pozornie przez punkt bliski (A), oko

$$\left| A_L A_P \right| = v \Delta t \quad (1)$$

gdzie v jest szybkością zakończenia wahadła podczas przechodzenia przez położenie równowagi. Ruch wahadła nie jest oczywiście jednostajny, jednakże przy różnicach latencji rzędu milisekund błąd wynikły z zastąpienia szybkości średniej na odcinku $A_L A_P$ szybkością w położeniu równowagi jest pomijalnie mały (okres ruchu wahadła jest rzędu sekund).

$|O_L O_P|$ jest rozstawem źrenic, któremu przypiszemy symbol b . Ponieważ trójkąty $A_P A_A L$ oraz $O_L A O_P$ są podobne, zachodzi, z wykorzystaniem równania (1):

gdzie x_N jest odległością punktu bliskiego od rzeczywistego toru ruchu, natomiast d odległością obserwator-rzeczywisty tor ruchu. Stąd ostatecznie:

The diagram shows a triangular optical cavity with vertices labeled A (top), O_L (bottom left), and O_P (bottom right). A horizontal beam, labeled "tor rachu" with an arrow pointing right, enters from the left and passes through point A_L on the side AO_L and point A_P on the side AO_P . A dashed line connects O_L and O_P . A shaded rectangular region labeled "filtr" is located near O_L , with a dashed line connecting it to O_L . On the right side, a vertical double-headed arrow indicates a distance d from the horizontal line $A_L A_P$ to the base $O_L O_P$. Another vertical double-headed arrow on the far right indicates a distance x_F from the horizontal line $A_L A_P$ to the top vertex A .

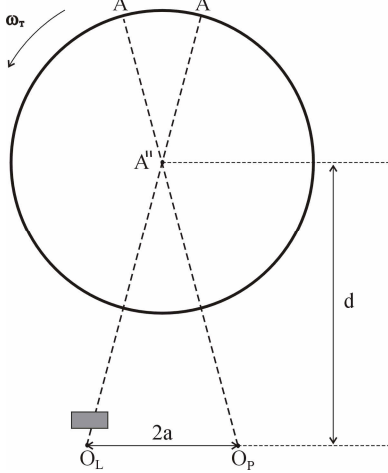
Ryc. 7 Rysunek pomocniczy do otrzymania związku między różnicą latencji wzrokowej i odległością punktu dalekiego od rzeczywistego toru.

$$\frac{v \Delta t}{x_F} = \frac{b}{d + x_F} \quad (4)$$
$$\Delta t = \frac{b}{v} \frac{x_F}{d + x_F} \quad (5)$$

Na poglądowych rycinach 6 oraz 7 skala nie jest oczywiście zachowana. W rzeczywistości odległość obserwatora od toru jest co najmniej o jeden rząd wielkości większa niż wyznaczane odległości (x_N oraz x_F). Odległość ta jest aż o kilka rzędów wielkości większa od odległości między punktami A_L i A_P , wynoszącej w rzeczywistości kilka milimetrów.

2. Rotacyjne zjawisko Pulfricha (obserwacja poruszającego się po wirującej tarczy pręta).

W tej części ćwiczenia przedmiotem obserwacji – po przysłonięciu jednego z oczu filtrem – jest ruch pręta, umieszczonego na wykonującej ruch obrotowy tarczy. Częstotliwość obrotów tarczy jest stopniowo zwiększana do momentu, w którym manifestuje się omówienie wyżej „przejście”, to znaczy pręt porusza się „tam i z powrotem”, praktycznie w płaszczyźnie czołowej (jeśli eksperymentator ma trudności z uchwyceniem tej sytuacji, częstotliwość jest zwiększana do momentu, w którym pręt zaczyna poruszać się przeciwnie do ruchu tarczy). Mierzone są graniczny okres ruchu obrotowego tarczy oraz odległość obserwatora od środka tarczy. Znając wartości obu wielkości fizycznych i wykorzystując uprzednio zmierzony rozstaw źrenic, jesteśmy w stanie obliczyć różnicę latencji.



Ryc. 8 Rysunek pomocniczy do znalezienia związku między różnicą latencji wzrokowych a parametrami obserwacji „przejścia”.

Rozważmy tę chwilę opisanego poprzednio „przejścia” (ryc. 5), w której pręt pozornie przechodzi przez środek tarczy. Taką sytuację – dla filtra przed lewym okiem i ruchu obrotowego tarczy odbywającego się przeciwnie do ruchu wskazówek zegara – przedstawia ryc. 8. Punkt A na rycinie to położenie „aktualne” pręta, prezentowane mózgowi przez oko prawe, natomiast punkt A' to odpowiednie położenie „przeszłe”, prezentowane przez oko lewe – pręt zostaje więc zlokalizowany przez obserwatora w punkcie A''. Różnica latencji, Δt , równa jest oczywiście czasowi, potrzebnemu na przejście pręta z A' do

A.⁹ Z definicji prędkości kątowej:

$$\omega_T = \frac{\angle AA''A'}{\Delta t} \quad (6)$$

gdzie ω_T jest prędkością kątową „przejścia”, natomiast kąt $AA''A'$ wyrażony jest w mierze łukowej.

Z elementarnej trygonometrii mamy:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\angle O_L A'' O_P}{2}\right) = \frac{a}{d} \quad (7)$$

gdzie a jest połową odległości między źrenicami, d odległością obserwatora od środka tarczy, zaś kąt $O_L A'' O_P$ wyrażony jest w mierze łukowej. Na mocy równania (7) zachodzi:

$$\operatorname{arctg} \frac{a}{d} = \frac{\angle O_L A'' O_P}{2} \quad (8)$$

gdzie arctg oznacza funkcję odwrotną do funkcji tangens (arcus tangens). Kąty $AA''A'$ oraz $O_L A'' O_P$ są sobie równe, zatem na podstawie równań (6) i (8) uzyskujemy:

$$\omega_T \Delta t = 2 \operatorname{arctg} \frac{a}{d} \quad (9)$$

⁹ Różnica latencji nie ulegnie naturalnie zmianie, gdy obserwator zmieni swoją odległość od środka okręgu, na przykład ją zwiększy. Ponieważ „przejście” zachodzi wtedy przy mniejszej prędkości kątowej, zakreślony przez pręt łuk AA' będzie odpowiednio mniejszy.

Dla małych wartości argumentu x zachodzi z bardzo dobrym przybliżeniem $\arctg x \approx x$, natomiast prędkość kątową ω_T można wyrazić wzorem:

$$\omega_T = \frac{2\pi}{T} \quad (10)$$

gdzie T jest okresem ruchu pręta podczas „przejścia”. Ostatecznie, używając wprowadzonej poprzednio odległości między źrenicami b ($b=2a$), otrzymujemy po prostych przekształceniach:

$$\Delta t = \frac{T}{2\pi} \frac{b}{d} \quad (11)$$

Wzór (11) był po raz pierwszy otrzymany przez D. Nickallsa.

Wymagane wiadomości teoretyczne:

1. Widzenie obuoczne: fiksacja, korespondujące miejsca siatkówek, dysparacja. Horopter. Fuzja sensoryczna, obszar Panuma.
2. Ogólne wiadomości o zjawisku Pulfricha, przedstawione we wprowadzeniu do ćwiczenia.
3. Metody pomiarowe, stosowane w ćwiczeniu (omówienie we wprowadzeniu do ćwiczenia).

Zalecana literatura:

1. A. Styszyński, „Korekcja wad wzroku – procedury badania refrakcji”, αmedica press, 2009 [rozdział V].