

STRESZCZENIE

Wprowadzenie i cel badań

W celu obserwacji otaczającego nas świata, konieczne jest wykonywanie ruchów oczu, w których wyróżnić można składową sakadową i wergencyjną, czyli złożonych wergencji. Sakady są szybkimi, skokowymi ruchami oczu, które przekierowują wzrok w różnych kierunkach na jednej odległości (np. podczas czytania). Wergencje natomiast są ruchami oczu, które charakteryzują się tym, że podczas ich wykonywania oczy poruszają się w przeciwnych kierunkach. Wergencyjne ruchy oczu mogą być wyzwalane przez trzy typy wskazówek wzrokowych: dysparacje siatkówkową, rozogniskowanie obrazu na siatkówce oraz świadomość bliskości obiektu, z których dwie pierwsze są najistotniejsze. Wyróżnia się dwa rodzaje wergencji: zbieżne ruchy oczu – konwergencję oraz rozbieżne ruchy oczu – dywergencję. Choć złożone wergencje są ruchami oczu istotnymi dla percepcji głębi, badania nad nimi są rzadkością i tym samym kontrola neuronalna leżąca u ich podstaw jest słabo poznana. Celem niniejszej pracy było wyznaczenie obszarów kory mózgowej związanych z przygotowaniem i wykonaniem złożonych wergencji oraz określenie roli, jaką mogą one pełnić.

Niniejsza praca doktorska składa się z czterech rozdziałów: części teoretycznej, dwóch rozdziałów badawczych, które skupiają się kolejno na odruchowych i wolicjonalnych ruchach oczu oraz dyskusji końcowej. W części pierwszej skupiono się na przedstawieniu dotychczasowej wiedzy dotyczącej ruchów oczu oraz podstaw neuronalnych związanych z ich przygotowaniem i wykonaniem. W rozdziale drugim (badanie pierwsze) podjęto próbę odpowiedzi na pytanie które obszary korowe zaangażowane są w przygotowanie i wykonanie odruchowych sakad, złożonych konwergencji i złożonych dywergencji. Natomiast celem badania drugiego przedstawionego w rozdziale trzecim, było określenie obszarów korowych zaangażowanych w przygotowanie i wykonanie sakad oraz złożonych wergencji wyzwalanych wolicjonalnie (dobrowolnie).

Metoda

W badaniu pierwszym wzięło udział 16 ochotników w wieku 22.6 (SD = 0.7), natomiast w badaniu drugim 23, w wieku 23.2 (SD = 1.5). Wszyscy uczestnicy poddani

zostali badaniu optometrycznemu w celu wykluczenia zaburzeń widzenia obuocznego oraz patologii układu wzrokowego.

Ruchy oczu w obu eksperymentach wyzwalane były za pomocą układu z diodami LED. Boczna separacja diod wynosiła 10° . W eksperymencie pierwszym diody LED były umieszczone w odległości 20 cm i 100 cm od obserwatora. Każdy ruch oka rozpoczynał się pojawieniem diody centralnej umieszczonej w blizy lub w dali wzrokowej (dioda fiksacji), po którym następowało pojawienie się diody bocznej (dioda cel), wyzwalającej ruch oka. W eksperymencie drugim diody zostały umieszczone na trzech odległościach od obserwatora: 25 cm, 40 cm oraz 100 cm. W przypadku wolicjonalnych ruchów oczu, każdy typ ruchu oka (sakady, złożone konwergencje i złożone dywergencje) badany był w osobnym bloku. Ruch oka rozpoczynał się pojawieniem się diody centralnej (dioda fiksacji) umieszczonej w odległości 40 cm, która następnie zmieniała swój kolor wskazując badanemu, czy ruch oka powinien być wykonany w prawo lub w lewo, wskazując tym samym diodę cel. Zadaniem wszystkich osób badanych było jak najszybsze wykonanie ruchu oka z diody fiksacji na diodę cel.

Do pomiaru aktywności mózgu wykorzystano metodę elektroencefalografii (*ang. electroencephalography*, EEG) z wykorzystaniem 64 aktywnych elektrod (Brain Products GmbH). Zebrany sygnał EEG posłużył do wykonania analizy potencjałów wywołanych skorelowanych ze zdarzeniem (*ang. event-related potentials*, ERP), które następnie zostały opisane poprzez aktywność źródeł korowych. Do wyznaczenia korowych obszarów związanych z odruchowymi oraz wolicjonalnymi ruchami oczu wykorzystano procedurę analizy źródła elektrycznego (*ang. Brain Electrical Source Analysis*, BESA). Dzięki temu, że BESA bazuje na metodzie ERP, charakteryzującej się wysoką rozdzielczością czasową, pozwala porównać aktywność źródła wyznaczaną względem ruchu oka (*ang. response-locked activity*) z aktywnością wyznaczaną względem bodźca (*ang. stimulus-locked activity*). Przewaga aktywności wyznaczanej względem bodźca w porównaniu z aktywnością wyznaczaną względem ruchu oka sugeruje zaangażowanie danego obszaru w procesy związane z przetwarzaniem prezentowanego bodźca, podczas gdy przewaga aktywności wyznaczanej względem ruchu oka będzie wskazywać na ich zaangażowanie w procesy związane wykonaniem ruchu. Dodatkowo, w rozprawie ruchy oczu opisano za pomocą czasów reakcji, czyli latencji, które określane są poprzez interwał czasu, który upłynął od momentu pojawienia się bodźca do początku ruchu oka. Latencje wyznaczone były za pomocą elektrookulografii (*ang. electrooculography*,

EOG). Porównanie czasów latencji uzyskanych dla różnych typów ruchów oczu daje dodatkową informację na temat procesu przygotowania tych ruchów, co umożliwi precyzyjniejszą interpretację wyników, np. dłuższe latencje uzyskane dla danego typu ruchu oczu w porównaniu do innego mogą świadczyć o konieczności przetwarzania dodatkowych informacji charakterystycznych dla tych ruchów oczu.

Wyniki

Uzyskane wyniki pomiarów behawioralnych odruchowych ruchów oczu wykazały, że złożone konwergencje charakteryzują się najdłuższym czasem latencji, pośredni wynik uzyskano dla złożonych dywergencji, a najkrótszy czas latencji zarejestrowano dla sakad. Bazując na uzyskanych latencjach, analiza lokalizacji źródeł korowych została wykonana w oknie czasowym od -180 do -60 ms przed ruchem oka. Analiza głównych składowych (*ang. principal component analysis*, PCA) wykazała, że trzy źródła korowe są wystarczające do opisania 99,2% danych. Wyznaczono trzy źródła korowe, które zlokalizowane zostały w obszarze przednim czołowym (*ang. anterior frontal area*), korze potylicznej (*ang. occipital cortex*) oraz czołowym polu ocznym (*ang. frontal eye field*, FEF). Analiza statystyczna wykazała najwyższą aktywność dla kory potylicznej. Nie stwierdzono różnic w aktywności pomiędzy FEF a obszarem przednim czołowym. Z uwagi na istotne statystycznie korelacje pomiędzy aktywnością źródła zlokalizowanego w obszarze przednim czołowym a sygnałem EOG oraz umiejscowieniem tego źródła w pobliżu gałek ocznych, obserwowana aktywność w tym obszarze została uznana za artefakt wynikający z ruchu gałek ocznych. Zarówno w przypadku kory potylicznej jak i FEF, najwyższą aktywność zaobserwowano dla złożonych konwergencji, słabszą dla złożonych dywergencji, a najniższą dla sakad. Co więcej, w przypadku sakad i złożonych dywergencji zarejestrowano wyższą aktywność mierzoną względem bodźca w porównaniu do aktywności mierzonej względem ruchu oka. W przypadku złożonych konwergencji nie wykazano różnic między aktywnością mierzoną względem bodźca a aktywnością mierzoną względem ruchu oka.

Uzyskane wyniki latencji wolicjonalnych ruchów oczu wykazały, że statystycznie istotne różnice w czasach latencji dotyczą jedynie sakad i złożonych konwergencji. Uzyskane latencje posłużyły również do określenia okien czasowych, w których wykonano analizę źródła. W przypadku wolicjonalnych ruchów oczu analizę tę wykonano na ERP wyznaczonych zarówno względem ruchu oka w oknie czasowym od

-300 do -100 ms przed ruchem, jak i na ERP wyznaczonych względem pojawienia się bodźca w oknie czasowym 0 – 200 ms. Analiza głównych składowych wykazała, że dwie pary źródeł są wystarczające, aby wyjaśnić 96,9% danych aktywności mierzonej względem bodźca i 99,3% danych aktywności mierzonej względem ruchu oka.

Podobnie jak w badaniu pierwszym, zlokalizowano dwa źródła korowe związane z badanymi ruchami oczu: pierwsze w FEF, a drugie w korze potylicznej. Aktywność źródła umiejscowionego w korze potylicznej przewyższała aktywność zarejestrowaną dla FEF, zarówno w przypadku analizy wykonanej względem bodźca jak i względem ruchu oka. Wyniki uzyskane w tym badaniu wykazały przewagę aktywności mierzonej względem bodźca w porównaniu do aktywności mierzonej względem ruchu oka. Aktywność w obszarze kory potylicznej była taka sama dla wszystkich rodzajów ruchów oczu zarówno w analizie wykonanej względem bodźca jak i względem ruchu oka. W przypadku FEF zarejestrowano przewagę aktywności mierzonej względem bodźca dla złożonych wergencji w porównaniu do sakad. Co ciekawe, nie zaobserwowano różnic pomiędzy ruchami oczu w aktywności FEF wyznaczonej względem ruchu oczu.

Wnioski

Uzyskane wyniki badania nad odruchowymi ruchami oczu pokazały różnice w aktywności źródła obserwowane dla poszczególnych typów ruchów oczu w obszarze kory potylicznej (większa dla złożonych konwergencji w porównaniu do złożonych dywergencji i sakad oraz większa dla złożonych dywergencji w porównaniu do sakad). Może to wskazywać, że aktywność ta jest związana z przetwarzaniem dysparacji siatkówkowej, która jest procesem nieodłącznie związanym z wergencjami. Podobne obserwacje dotyczą FEF. Uzyskane wyniki pomiarów behawioralnych korespondują z aktywnością źródeł korowych (najdłuższe latencje obserwowane dla złożonych konwergencji, pośrednie dla złożonych dywergencji, a najkrótsze dla sakad), co dodatkowo wzmacnia hipotezę sugerującą, że różnice w aktywności wyznaczonych źródeł odzwierciedlają przetwarzanie dysparacji siatkówkowej.

W oparciu o wyniki uzyskane dla wolicjonanych ruchów oczu można stwierdzić, że w przypadku FEF, z uwagi na większą aktywność związaną ze złożonymi wergencjami w porównaniu do sakad oraz na przewagę aktywności mierzonej względem bodźca w porównaniu do aktywności mierzonej względem ruchu, obserwowana aktywność związana mogła być z procesem przetwarzania dysparacji siatkówkowej. Natomiast brak

różnic w aktywności źródła zlokalizowanego w korze potylicznej sugeruje, że zaangażowanie tego obszaru jest niezależne od typu ruchu oka. Sugeruje to, że aktywność ta może odzwierciedlać przetwarzanie cech bodźca wywołującego ruch oczu lub zaangażowanie pamięci roboczej. Udział pamięci roboczej mógł wynikać z wykonywanego zadania, które wymagało zapamiętania znaczenia koloru diody LED wskazującej wymagany kierunek ruchu oczu. W przypadku wolicjonalnych ruchów oczu, wyniki czasów latencji poszczególnych typów ruchów były częściowo zgodne z wynikami uzyskanymi dla aktywności źródeł korowych (brak różnic w latencjach pomiędzy różnymi typami ruchów oczu może korespondować z brakiem różnic w aktywności źródła zlokalizowanego w korze potylicznej dla różnych rodzajów ruchów oczu).

Podsumowanie

Wyniki uzyskane w eksperymentach będących częścią niniejszej rozprawy doktorskiej potwierdzają wcześniejsze sugestie, że wergencje i sakady mogą angażować te same neuronalne korelaty, jednak w różnym stopniu. Obserwowane różnice w aktywności źródła pozwalają określić rolę, jaką pełnią one w przygotowaniu i wykonaniu ruchów oczu, a wyniki czasów latencji mogą stanowić dopełniającą wskazówkę dotyczącą interpretacji uzyskanych wyników aktywności źródeł. Co więcej, wykorzystane w przedstawionych analizach porównanie aktywności wyznaczonej względem bodźca z aktywnością wyznaczoną względem ruchu oka wydaje się być konieczne dla rzetelnej interpretacji roli jaką pełnią obszary korowe związane z ruchami oczu. Wykorzystanie tej analizy może być również pomocne w badaniu wielu innych procesów motorycznych.

Zaprezentowane wyniki poszerzają dotychczasową wiedzę dotyczącą anatomii funkcjonalnej leżącej u podstaw wergencyjnych ruchów oczu, istotnych dla postrzegania głębi. Co więcej, wyniki te mają istotne znaczenie dla lepszego zrozumienia, jak działa najbardziej skomplikowany i zarazem najmniej poznany system występujący u ludzi – ośrodkowy układ nerwowy.