

## **Streszczenie**

Metapoznanie, rozumiane jako zdolność monitorowania i oceny własnych procesów poznawczych, obejmuje szeroki zakres zdolności samomonitorowania. Monitorowanie błędów temporalnych (TEM) jest jedną z takich zdolności, definiowaną jako proces metapoznawczy, w którym jednostki oceniają dokładność samodzielnie generowanych interwałów czasowych bez zewnętrznej informacji zwrotnej. Jako podatna na badania instancja metapoznania, TEM oferuje wgląd w obliczeniowe i neuronalne podłoże samomonitorowania. Czasowanie działań motorycznych służy jako ramy eksperymentalne do badania TEM: generuje precyzyjny, wewnętrznie dostępny sygnał błędu, odchylenie między wyprodukowanym interwałem a docelowym i wstrzymuje zewnętrzną informację zwrotną, izolując ocenę metapoznawczą od zewnętrznie napędzanych korekt. Niniejsza praca przedstawia wielopoziomowe badanie TEM, łącząc paradygmaty behawioralne obejmujące wiele gatunków, manipulacje wymaganiami motorycznymi oraz dekodowanie danych EEG na poziomie pojedynczych prób przy użyciu architektury opartej na transformerze.

Pierwsze pytanie dotyczyło tego, czy TEM jest zachowaną zdolnością u różnych gatunków i czy jest wspierana przez wspólne czy rozbieżne strategie. Szczury i ludzie byli testowani w dopasowanych warunkach, z wyrównanymi strukturami prób, warunkami nagradzania i regułami zadania i musieli wybrać właściwą opcję nagrody na podstawie wielkości błędu czasowania względem docelowego interwału. Oba gatunki wykazały wiarygodne monitorowanie błędów próba po próbie, ustanawiając TEM jako wspólną zdolność. Informacje wspierające to monitorowanie różniły się jednak między gatunkami: szczury opierały się bardziej na dowodach z bieżącej próby, podczas gdy ludzie korzystali ze zgromadzonej historii prób i wyuczonych reguł nagradzania. Co istotne, gdy rozumienie reguł zadania zostało zrównane między gatunkami, różnice w precyzji TEM zmniejszyły się, wskazując, że wspólna zdolność monitorowania jest kształtowana przez dobór strategii i stosowanie reguł, a nie przez fundamentalne różnice w zdolnościach temporalnych.

Zachowanie TEM u różnych gatunków nasunęło kolejne pytanie: jakie informacje leżą u podstaw metapoznawczych ocen czasowania działań motorycznych u ludzi? Sformułowano dwie konkurujące hipotezy. Zgodnie z hipotezą zegara precyzja TEM

maleje wraz ze wzrostem szumu sygnału zegarowego, ponieważ dodatkowa wariancja motoryczna zakłóca odczyt wewnętrznej reprezentacji temporalnej. Zgodnie z hipotezą motoryczną wariancja motoryczna poprawia precyzję TEM, zapewniając punkt odniesienia między zamierzonym a rzeczywistym działaniem motorycznym. W celu rozróżnienia tych hipotez wariancja sygnału motorycznego była eksperymentalnie manipulowana poprzez porównanie warunku naciśnięcia przycisku z warunkiem ruchu joystickiem. Zwiększone zapotrzebowanie motoryczne selektywnie obniżyło precyzję metapoznawczą, nie wpływając na dokładność czasowania motorycznego, co wspiera hipotezę zegara: jednostki oceniają wewnętrzne reprezentacje temporalne, a nie sygnały wyjścia motorycznego. Jest to zgodne z koncepcją metapoznania temporalnego, w której oceny pewności wyższego rzędu odzwierciedlają metapoznawczy odczyt zmienności czasowania, a nie wykonania motorycznego.

Wiedza o tym, że TEM opiera się na wewnętrznych reprezentacjach temporalnych, nie rozstrzyga jednak, czy ocena metapoznawcza jedynie odczytuje sygnały regulujące produkcję interwałów, czy też stanowi neuronie odrębny proces. Trzecie badanie odpowiedziało na to pytanie bezpośrednio, dekodując zoptymalizowaną metodą PCA dane EEG z pojedynczych prób za pomocą modelu Vision Transformer rejestrującego dynamikę fal theta ( $\theta$ ; 3–7 Hz), alfa ( $\alpha$ ; 8–12 Hz) i beta ( $\beta$ ; 13–30 Hz) zarówno podczas fazy czasowania działań motorycznych, jak i fazy decyzyjnej TEM. Dokładność szacowania czasu motorycznego była dekodowalna z dowolnego pojedynczego pasma częstotliwości, zgodnie z niezależnymi kodami oscylacyjnymi specyficznymi dla danego pasma. Wnioskowanie metapoznawcze, zgodność między obiektywną wydajnością czasowania a subiektywną oceną błędu, wymagały natomiast łącznego wkładu wszystkich trzech pasm podczas bieżącego czasowania motorycznego, przy czym żadne pasmo nie było wystarczające samodzielnie. Co więcej, osoby, których aktywność neuronalna przed zakończeniem działania motorycznego bardziej wiarygodnie kodowała stany metapoznawcze, wykazywały większą precyzję TEM. Łącznie wyniki te ustanawiają ocenę metapoznawczą jako neuronie odrębny proces, wspierany przez wielopasmową integrację wyższego rzędu.

We wszystkich trzech badaniach wewnętrzne reprezentacje temporalne stanowiły podstawowy substrat TEM, kształtowany przez reguły zadania, wymagania motoryczne i oczekiwania dotyczące nagrody. Selektywne pogorszenie precyzji TEM przy wyższych

wymaganiach motorycznych wspiera konto oparte na zegarze, w którym ocena błędów odzwierciedla zmienność reprezentacji czasu trwania, a nie wnioskowanie motoryczne. Rozbieżność między specyficznymi dla pasm kodami czasowania motorycznego a wielopasmowym wymogiem wnioskowania metapoznawczego potwierdza, że TEM działa poprzez mechanizmy neuronowe wyższego rzędu, odrębne od monitorowanej przez nie wydajności czasowania.

**Słowa kluczowe:** metapoznanie, monitorowanie błędu temporalnego (TEM), czasowanie działań motorycznych, produkcja interwałów, dekodowanie EEG, architektura transformera.