

CEREBRAINIRS – Cerebrovascular AI-based Neurovascular Imaging using fNIRS

CEREBRAINIRS – obrazowanie naczyń mózgowych oparte o sztuczną inteligencję przy użyciu spektroskopii bliskiej podczerwieni

Wprowadzenie teoretyczne

Choroby naczyń mózgowych, zwłaszcza tętniczych, mogą prowadzić do zaburzeń przepływu krwi w mózgu a poprzez jego zmniejszenie powodować hypoperfuzję i w skrajnych sytuacjach ryzyko udaru niedokrwiennego [1,2]. Zwężenie naczyń krwionośnych ogranicza przepływ krwi i stopniowo ogranicza mechanizmy kompensacyjne, które zwiększają przepływ podczas wzmożonego zapotrzebowania energetycznego [2,3]. Zjawisko to jest procesem ciągłym, w którym mechanizmy chorobowe i mechanizmy naprawcze mogą przesuwac ciężar choroby w kierunku nasilenia lub poprawy. Jednocześnie procesy te mogą zachodzić w różnych tempie i kierunku w różnych segmentach mózgu. Wobec powyższego w procesie leczenia w każdym przypadku konieczna jest szczegółowa ocena, czy procesy naturalne lub leczenie farmakologiczne są wystarczające do stabilizacji stanu pacjenta, czy też konieczna jest interwencja chirurgiczna [3,4]. Zarówno w trakcie leczenia, jak i po jego zakończeniu kluczowe jest monitorowanie zmian w naczyniach, które mogą wskazywać na poprawę lub progresję choroby [3] i w związku z tym potrzebę kolejnych interwencji. Przykładem takiego procesu chorobowego jest choroba moyamoya (MMD) [4]. Choroba moyamoya to postępujące zaburzenie naczyń mózgowych charakteryzujące się stopniowym zwężeniem światła i ostatecznie niedrożnością tętnic szyjnych wewnętrznych i ich głównych odgałęzień u podstawy mózgu w obrębie koła Willisa. W rezultacie przepływ krwi do mózgu ulega zmniejszeniu, co może prowadzić do zdarzeń niedokrwiniennych, takich jak udary lub przemijające ataki niedokrwienne (TIA). Aby zrekompensować upośledzony przepływ krwi, organizm próbuje utworzyć spontanicznie sieć małych naczyń obocznych wrastających z zewnątrz w mózg. W trakcie leczenia, po stwierdzeniu braku skuteczności leczenia farmakologicznego, wykonuje się sztucznie takie nowe drogi unaczynienia poprzez mikrochirurgiczny by-pass'y. Moyamoya jest modelowym przykładem procesu chorobowego wywołanego przez upośledzenie dopływu krwi do mózgu i jednocześnie pozytywnie reagującego na leczenie mikrochirurgiczne drogą by-pass. Każdorazowo w leczeniu największą trudność stanowi ocena stopnia skompensowania krążenia mózgowego i wskazanie pacjenta zagrożonego udarem oraz okolicy Jego mózgu, gdzie najoptymalniej będzie zastosować operację. Docelową jednak największą grupą chorych mogących wymagać leczenia mikrochirurgicznego i skorzystać z proponowanej w tym projekcie metody diagnostycznej są pacjenci ze zmianami miażdżycowymi powodującymi niedokrwienie mózgu. Wskazania do leczenia zabiegowego w tej grupie są najwęższe, jednak, z uwagi na niezmiernie rozpowszechnienie tego zwyrodnienia naczyniowego w ogółu populacji, potencjalnych kandydatów wymagających leczenia, a przed i po operacji diagnostyki, najwięcej.

Obecnie stosowane metody obrazowania naczyń krwionośnych, np. tomografia komputerowa, dostarczają szczegółowych, ale jedynie okresowych danych diagnostycznych - wiarygodnych najbardziej dla momentu badania. Dodatkowo, są to procedury inwazyjne, które narażają pacjentów na

promieniowanie, co ogranicza możliwość ich częstego stosowania w długoterminowym monitorowaniu pacjentów [5]. Alternatywą może być wykorzystanie funkcjonalnej spektroskopii bliskiej podczerwieni (fNIRS) (w badaniach i specjalistycznych warunkach klinicznych). fNIRS to stosunkowo nowa, nieinwazyjna technika, która mierzy reakcje hemodynamiczne poprzez monitorowanie zmian w utlenowanej i odtlenowanej hemoglobinie w korze mózgowej. Jest ona szczególnie obiecująca w przypadku monitorowania pediatrycznego i ambulatoryjnego, gdzie korzystna jest przenośność i pomiar w czasie rzeczywistym.

Cel projektu

Epidemia chorób cywilizacyjnych, nasilająca się wraz ze starzeniem społeczeństw, jest jednym z kluczowych wyzwań zdrowotnych i ekonomicznych w krajach rozwiniętych, w tym w Unii Europejskiej [1]. Coraz większe obciążenie systemu opieki zdrowotnej wymaga skuteczniejszych metod wczesnej diagnostyki chorób naczyniowych, co pozwoliłoby przesunąć akcent na profilaktykę i leczenie ambulatoryjne, ograniczając konieczność hospitalizacji.

Projekt koncentruje się na wykorzystaniu sztucznej inteligencji (AI) do analizy krążenia mózgowego u pacjentów z chorobami naczyń, przy zastosowaniu funkcjonalnej spektroskopii bliskiej podczerwieni (fNIRS) – nieinwazyjnej, mobilnej metody obrazowania hemodynamicznych reakcji mózgu [6]. AI wspiera szybsze wykrywanie i interpretację wzorców przepływu krwi, umożliwiając lepszą diagnostykę, monitorowanie i personalizację leczenia. Może pełnić rolę „drugiej opinii” oraz przewidywać rozwój choroby, co pozwoli zrewolucjonizować opiekę nad pacjentami w warunkach szpitalnych i ambulatoryjnych.

Podsumowując cele projektu, to ma on za zadanie:

- określenie zakresu wykorzystania monitorowania krążenia krwi za pomocą spektrometrii jej utlenowania u pacjentów z chorobami naczyń mózgowych powodującymi jej niedokrwienie.
- dokonanie oceny przedoperacyjnego potencjału metody do określania prognozy:
 - ryzyka progresji choroby,
 - skuteczności/ryzyka stosowania wybranych metod leczenia operacyjnego.

Metodologia badań

W projekcie planujemy zastosować sztuczną inteligencję, wykorzystując sieci neuronowe o architekturze MISO (Multi Input Single Output), co pozwoli tworzyć prostsze i dokładniejsze modele dla każdego z trzech celów badawczych, zamiast jednego złożonego modelu MIMO. Kluczowym narzędziem będzie funkcjonalna spektroskopia bliskiej podczerwieni (fNIRS) – nieinwazyjna metoda monitorowania przepływu krwi i utlenowania mózgu w czasie rzeczywistym, bez użycia promieniowania jonizującego i drogich technik jak MRI czy CT. Czujniki na głowie tworzą mapę ukrwienia, co umożliwia wykrycie niedokrwienia i monitorowanie pacjentów w sposób ciągły, tani i bezpieczny. Monitorowanie będzie realizowane poprzez wielopunktową spektrometrię ukrwienia mózgu, tworzącą „mapę 3D” krążenia. Punkty pomiarowe zostaną przypisane do określonych obszarów naczyniowych, odpowiadających segmentom mózgu zasilanym przez konkretne tętnice.

Monitorowanie zmian w ukrwieniu tych segmentów może pozwolić na określenie:

- co jest prawidłowe u pacjentów,
- jak mózg reaguje na zwężenie tętnicy,
- jak mózg reaguje na stres (przeprowadzenie prostego testu z hiperwentylacją dla grupy kontrolnej),
- jak zmienia się ukrwienie mózgu u pacjentów leczonych mikrochirurgicznie (w kolejnych okresach po zabiegu).

W ramach projektu planuje się przebadanie czterech grup pacjentów:

- osoby zdrowe (grupa kontrolna): 40 osób,
- pacjenci bezobjawowi ze zwężeniem tętnicy, u których zwężenie wykryte przypadkowo: 20 osób,
- pacjenci objawowi ze zwężeniem tętnicy (leczeni za pomocą pomostowania tętniczego zewnątrz-wewnątrzczaszkowego oraz leczenia wewnątrznacyniowo): 20 osób.

Metodologia badawcza wykorzysta narzędzia AI do porównania map krążenia mózgowego pacjentów zdrowych, chorych i leczonych. Na podstawie doświadczeń zespołu zakładamy możliwość określenia „pozostałego potencjału kompensacyjnego” – czyli czy segmenty mózgu mogą, dzięki jego plastyczności, wspierać obszary zagrożone niedokrwieniem. Celem projektu CEREBRAINIRS jest sprawdzenie, czy takie „pożyczanie” ukrwienia jest możliwe na podstawie badań obrazowych naczyń. Dodatkowo zostaną przeprowadzone badania obserwacyjne, tj. analiza stanu neurologicznego pacjentów, którzy byli leczeni zgodnie z przyjętymi metodami diagnostycznymi i operacyjnymi. Uzyskane dane będą wtórne do procesu leczenia, więc nie będą miały na niego wpływu.

W okresie diagnostycznym konieczne jest:

- określenie, jak wygląda „zdrowa” mapa krążenia mózgowego w tej metodzie oraz jak długo trwa badanie, aby uzyskać wiarygodne dane;
- ocena, czy wystarczy mapa statyczna, czy też potrzebna jest mapa dynamiczna - nagranie w ciągu kilku minut.

Personel

Kluczowy personel projektu:

- Aleksandra Kawala-Sterniuk - Katedra Sztucznej Inteligencji, WIT - kierownik
- Dariusz Szarek - Katedra Neuronauk Klinicznych, WM - zastępca kierownika
- Karolina Fila-Pawłowska - Katedra Neuronauk Klinicznych, WM - psycholog
- Joanna Rymaszewska - Katedra Neuronauk Klinicznych, WM - specjalista psychiatra
- Tomasz Kajdanowicz - Katedra Sztucznej Inteligencji, WIT – ekspert AI/ML

Dodatkowy personel:

- Doktorant - Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
- Student II-go stopnia - Informatyka/Sztuczna inteligencja

- Pracownik ze stopniem naukowym minimum doktora odpowiedzialny za modelowanie matematyczne
- Pracownik ze stopniem naukowym minimum doktora odpowiedzialny za obsługę fNIRS
- Specjalista neurolog
- Neuropsycholog

Harmonogram projektu

- **Miesiące 1–2: Etap przygotowawczy:** Przygotowanie dokumentacji etycznej i uzyskanie zgód komisji bioetycznej. Zakup i kalibracja sprzętu fNIRS oraz przygotowanie środowiska analitycznego.
- **Miesiące 3–4: Badania pilotażowe:** Przeprowadzenie pilotażowych pomiarów fNIRS na grupie kontrolnej (osoby zdrowe).
- **Miesiące 5–11: Zbieranie danych:** 40 zdrowych osób (grupa kontrolna), 20 pacjentów bezobjawowych ze zwężeniem tętnic, 20 pacjentów objawowych ze zwężeniem tętnic.
- **Miesiące 7–12: Wstępne prace analityczne:** Wstępne określenie „zdrowej” mapy krążenia mózgowego (statycznej i dynamicznej). Monitorowanie krążenia mózgowego (mapy 3D). Rejestracja dynamiki przepływu (w tym testy stresowe, np. hiperwentylacja). Rozwijanie i trenowanie trzech oddzielnych modeli ANN (dla różnych celów badawczych).
- **Miesiące 13–16: Analiza danych oraz modelowanie:** Analiza różnic w mapach krążenia między grupami (zdrowi / bezobjawowi / objawowi). Weryfikacja możliwości określenia „potencjału kompensacyjnego” mózgu na podstawie danych fNIRS. Udoskonalanie modeli AI w oparciu o zebrane dane. Przeprowadzenie badań obserwacyjnych (obserwacje stanu neurologicznego monitorowanych chorych).
- **Miesiące 15–21: Walidacja modeli i interpretacja kliniczna:** Ostateczna walidacja dokładności modeli AI dla każdego celu (porównanie z danymi klinicznymi). Konsultacje z zespołem klinicznym (neurologi, neurochirurdzy naczyniowi) w celu interpretacji wyników.
- **Miesiące 22–24: Raportowanie oraz pisanie publikacji:** Opracowanie końcowego raportu z wynikami badań. Przygotowanie i złożenie publikacji naukowych w czasopismach branżowych. Prezentacja wyników na konferencjach medycznych i technologicznych.

Budżet projektu

- Zakup urządzenia pomiarowego fNIRS: PLN 350.00,00
- Elektrody i drobny sprzęt: PLN 2.500,00
- Rekompensata dla pacjentów za udział w badaniu: Wizyta diagnostyczna (fNIRS, badania psychologiczne): $\text{PLN } 150,00 \times 80 = \text{PLN } 12.000,00$. Badania z hiperwentylacją dla grupy kontrolnej: $\text{PLN } 250,00 \times 40 = \text{PLN } 10.000,00$
- Wynagrodzenia członków zespołu: Kluczowy personel projektu - kierownik i zastępca kierownika: $\text{PLN } 1.800,00 \times 24\text{m} \times 2 = \text{PLN } 86.400,00$. Pozostały kluczowy personel projektu:

PLN 1.600,00 x 24m x 3 = PLN 115.200,00. Doktorant: PLN 1.000,00 x 24m = PLN 24.000,00.
Student: PLN 800,00 x 24m = PLN 19.200,00. Pracownik: PLN 1.100,00 x 24 x 2 = PLN 52.800,00. Neurolog: PLN 1.500,00 x 15m = PLN 22.500,00. Neuropsycholog: PLN 1.500,00 x 15m = PLN 22.500,00

- Łączny budżet: **PLN 717.100,00**

Podsumowanie

Projekt wykorzystuje sztuczną inteligencję do monitorowania krążenia krwi u pacjentów z chorobami naczyń mózgowych za pomocą funkcjonalnej spektroskopii w bliskiej podczerwieni (fNIRS). Stanowi uzupełnienie działań Unii Europejskiej na rzecz precyzyjnej opieki zdrowotnej i transformacji cyfrowej, zgodnie z inicjatywami takimi jak Horyzont Europa. Integracja AI i fNIRS wspiera projekty związane z big data, uczeniem maszynowym i opieką spersonalizowaną, poprawiając diagnozę i monitorowanie leczenia. Projekt przyczynia się do zmniejszenia nierówności w dostępie do opieki zdrowotnej i rozwoju zrównoważonych technologii medycznych.

Projekt ma charakter badań wstępnych, które to umożliwią zebranie pewnej grupy pacjentów oraz zakup podstawowego sprzętu, co ma w niedalekiej przyszłości stworzyć pewnego rodzaju fundament - bazę pod przyszłe projekty finansowane ze środków Unii Europejskiej (Granty ERC czy Synergy).

Bibliografia

- [1] Skalik, R., & Janocha, A. (2024). Cardiovascular screening of elderly athletes. *Medycyna Pracy*, 75(3), 233-241.
- [2] Csiszar, A., Ungvari, A., Patai, R., Gulej, R., Yabluchanskiy, A., Benyo, Z., ... & Ungvari, Z. (2024). Atherosclerotic burden and cerebral small vessel disease: exploring the link through microvascular aging and cerebral microhemorrhages. *Geroscience*, 46(5), 5103-5132.
- [3] Markus, H. S., & Joutel, A. (2025). The pathogenesis of cerebral small vessel diseases and vascular cognitive impairment. *Physiological Reviews*.
- [4] Pettersson, S. D., Olofsson, H. K., Ali, S., Szarek, D., Miękisiak, G., & Ogilvy, C. S. (2023). Risk factors for ischemic stroke after revascularization surgery in patients with moyamoya disease: an age-stratified comparative meta-analysis. *World Neurosurgery*, 173, 146-157.
- [5] Csore, J., Drake, M., & Roy, T. L. (2023). Peripheral arterial disease treatment planning using noninvasive and invasive imaging methods. *Journal of Vascular Surgery Cases, Innovations and Techniques*, 9(4), 101263.
- [6] Barnova, K., Mikolasova, M., Kahankova, R. V., Jaros, R., Kawala-Sterniuk, A., Snasel, V., ... & Martinek, R. (2023). Implementation of artificial intelligence and machine learning-based methods in brain– computer interaction. *Computers in biology and medicine*, 163, 10