Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych

Anna Mańska

nr albumu: 285119

Praca magisterska

na kierunku Automatyka i Robotyka

Zastosowanie uczenia maszynowego   
w poszukiwaniu źródeł aktywności poznawczej mózgu

Opiekun pracy dyplomowej

dr hab. Tomasz Piotrowski, prof. UMK

Katedra Informatyki Stosowanej

Toruń 2022

|  |  |
| --- | --- |
| Potwierdzam przyjmuję i akceptuję | Potwierdzam złożenie pracy dyplomowej |
| ……………………………….. | ………………………………… |
| *data i podpis opiekuna pracy* | *data i podpis pracownika dziekanatu* |

<podziękowania>

*UMK zastrzega sobie prawo własności niniejszej pracy inżynierskiej w celu udostępniania dla potrzeb działalności naukowo-badawczej lub dydaktycznej*

**Streszczenie**

**Słowa kluczowe:**

# 1. Wstęp

## 1.1. Wprowadzenie

Podstawowym zadaniem realizowanym przez układ nerwowy jest odbieranie informacji o zmianach stale zachodzących zarówno w środowisku wewnętrznym organizmu, jak i w jego otoczeniu. Percepcja świata zewnętrznego odbywa się za pomocą narządów zmysłów zwanych receptorami. Każdy bodziec zewnętrzny powoduje pobudzenie odpowiednich receptorów, co prowadzi do powstania impulsów elektrycznych   
w określonym obszarze kory mózgu [1].

Badanie bioelektrycznej czynności mózgu nazywane jest elektroencefalografią. Jest to nieinwazyjna metoda diagnostyczna polegająca na odpowiednim rozmieszczeniu na powierzchni skóry głowy elektrod, które rejestrują zmiany potencjału elektrycznego na powierzchni skóry i po odpowiednim ich wzmocnieniu tworzą z nich zapis – elektroencefalogram.

Potencjały mózgowe mierzone z powierzchni skóry czaszki mają niewielką wartość, dlatego pierwsze badania w tej dziedzinie prowadzone były na odsłoniętych mózgach zwierząt [1]. Sygnał mierzony w bezpośredniej bliskości źródeł był wystarczająco silny dla ówczesnych galwanometrów. Obecnie stosuje się znacznie bardziej zaawansowane urządzenia – elektroniczne mikrowoltomierze różnicowe, czyli elektroencefalografy. Zapewniają one wystarczające próbkowanie zarówno w czasie, jak i przestrzeni. Pomimo rozwoju matematyki i informatyki podstawową metodą analizy i interpretacji otrzymanych w ten sposób danych pozostaje analiza wzrokowa, co wiąże się przede wszystkim z wysokimi kosztami oraz ograniczoną powtarzalnością.

Niniejsza praca dyplomowa skupiać się będzie na wykryciu zależności między aktywnością struktur funkcjonalnych mózgu a rejestrowanym sygnałem elektroencefalograficznym za pomocą algorytmów uczenia maszynowego.

## 1.2. Cel i zakres pracy

Podstawowym celem pracy jest zrozumienie idei oraz implementacja w języku programowania Python algorytmów uczenia maszynowego, późniejsza analiza statystyczna uzyskanych wyników oraz porównanie ich z algorytmami głębokiego uczenia (ang. *deep learning*).

Opracowana struktura sieci neuronowej ma za zadanie rozwiązanie problemu odwrotnego tj. lokalizację przestrzenną źródeł aktywności rejestrowanej na zewnątrz czaszki. Kod powstały w ramach pracy dyplomowej powinien także umożliwiać import danych rzeczywistych   
z programu MATLAB.

Zakres pracy obejmuje:

* opracowanie kodu w języku programowania Python;
* przeprowadzenie badań z wykorzystaniem powstałego kodu.

## 1.3. Struktura pracy

# 2. Elektroencefalografia

Jak wspomniano w pierwszym rozdziale pracy, każdy bodziec zewnętrzny powoduje pobudzenie receptorów oraz powstanie impulsów elektrycznych w określonych rejonach kory mózgowej. Aktywność mózgu można zarejestrować na różne sposoby, na przykład przez pomiar z powierzchni głowy zmiennego w czasie potencjału elektrycznego. Technikę tę nazywa się elektroencefalografią, w skrócie EEG.

Wśród różnych metod badania mózgu elektroencefalografia wyróżnia się najdłuższą historią zastosowań klinicznych, najniższym kosztem oraz nieinwazyjnością badania, a także wysoką rozdzielczością czasową. Nie jest to jednak metoda całkowicie wolna od wad. Sygnał EEG jest podatny na zakłócenia – dane są często zanieczyszczone przez tzw. artefakty biologiczne (ang. *artifacts*), czyli sygnały elektryczne niepochodzące z mózgu. Najczęstsze rodzaje artefaktów biologicznych obejmują ruchy gałek ocznych, aktywność mięśnia sercowego i aktywację mięśni szkieletowych [2]. Ponadto, z uwagi na propagację pola elektromagnetycznego przez struktury anatomiczne głowy, metodę EEG charakteryzuje niska rozdzielczość przestrzenna [3].

Badania wykonywane z wykorzystaniem rejestracji elektroencefalogramu dzielą się na badania spoczynkowe, gdzie rejestrowana jest spontaniczna aktywność mózgu oraz badania zmian aktywności pod wpływem różnych bodźców. Reakcja na bodziec może nie być fazowo związana z bodźcem lub wykazywać stały związek fazowy z momentem wystąpienia bodźca. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z aktywnością indukowaną, której miarą jest desynchronizacja i synchronizacja EEG związana z bodźcem (ang. *event related desynchronization and synchronization, ERD/ERS).* W drugim przypadku natomiast z potencjałami wywołanymi (ang. *evoked fields, EF*).

Elektroencefalografia wykorzystywana jest głównie w:

* diagnostyce i monitorowaniu zaburzeń snu oraz epilepsji;
* ocenie stanu mózgu po zatruciu substancjami neurotoksycznymi;
* stwierdzeniu śpiączki oraz śmierci mózgu;
* tworzeniu interfejsów BCI (ang. *brain-computer interface*), gdzie pomiary aktywności elektrofizjologicznej układu nerwowego umożliwiają komunikację człowieka z otoczeniem bez użycia mięśni.

Problematyka elektroencefalografii obejmuje dwa główne zagadnienia: rozwiązanie problemu wprost (ang. *forward problem*) oraz rozwiązanie problemu odwrotnego (ang. *inverse problem*).

Rozwiązanie problemu wprost polega na obliczeniu rozkładu potencjałów mierzonych na powierzchni głowy, przy założeniu znanego rozkładu gęstości prądu wewnątrz mózgu. Zagadnienie to jest poprawnie postawione oraz jednoznaczne [3].

Lokalizacja przestrzenna źródeł aktywności neuro-elektrycznej rejestrowanej na zewnątrz czaszki stanowi rozwiązanie problemu odwrotnego. W przeciwieństwie do problemu wprost, problem odwrotny jest problemem źle zdefiniowanym (ang. *ill-posed problem*), to znaczy takim, który nie posiada jednoznacznego rozwiązania. Upraszczając model głowy do idealnej kuli będącej jednocześnie jednorodnym przestrzennie przewodnikiem, a model źródeł do dipoli prądowych w niej umieszczonych, istnieje nieskończenie wiele różnych konfiguracji prądów wewnątrz kuli generujących dokładnie ten sam rozkład potencjałów na jej powierzchni [1]. Istnieje wiele metod lokalizacji źródeł sygnału EEG. Różnią się one między sobą sposobem modelowania dipoli, formułowaniem dodatkowych kryteriów/więzów oraz stosowanymi metodami optymalizacji [4]. Szczegóły dotyczące metod lokalizacji źródeł aktywności mózgu zawarte zostały w rozdziale trzecim.

Celem rozwiązania obu problemów przyjmuje się podział mózgu na elementy objętości zwane wokselami, przy jednoczesnym założeniu stałej wartości i kierunku gęstości prądu dla każdego z tych elementów [1]. Propagację pola z każdego woksela do każdego czujnika (elektrody) opisuje macierz przejścia (ang. *lead field*). Po uwzględnieniu szumu , problem wprost przyjmuje postać:

, (1)

gdzie oznacza wektor potencjałów zmierzonych na elektrodach, o wymiarze równym liczbie elektrod a jest wektorem o wymiarze trzykrotnie większym niż liczba wokseli **,** zawierającym rozkład gęstości prądu jonowego.

Poszukiwanie rozkładu gęstości prądu jonowego w mózgu na podstawie potencjałów rejestrowanych na elektrodach odbywa się zgodnie z zależnością:

. (2)

Rozwiązanie problemu odwrotnego realizowane jest zazwyczaj przez założenie wybranego rozkładu i wielokrotne rozwiązywanie równania (1) z jednoczesną minimalizacją szumu . Macierz przejścia określana jest na podstawie równań Maxwell’a z więzami wyznaczonymi przez granice ośrodków. Granice wyznaczane są metodą elementów skończonych lub brzegowych lub przybliżane modelem koncentrycznych sfer. Z uwagi na fakt, że liczba wokseli jest znacznie większa od liczby elektrod wymagane jest przyjęcie dodatkowych kryteriów, takich jak jednoczesna minimalizacja normy rozwiązania (minimum energii), czy laplasjanu (maksymalna gładkość przestrzenna) [4].

# 3. Lokalizacja źródeł aktywności mózgu

## 3.1. Wstępne przetwarzanie sygnału EEG

Ze względu na złożoność zagadnienia problemu odwrotnego elektroencefalografii oraz brak jednoznacznego rozwiązania tego problemu, proces lokalizacji przestrzennej źródeł aktywności mózgu jest procesem skomplikowanym. Istnieje wiele różnych podejść różniących się między sobą sposobem modelowania dipoli, formułowaniem dodatkowych kryteriów/więzów czy zastosowanymi metodami optymalizacji [4].

Niezależnie od wybranej metody, sygnał EEG powinien zostać wstępnie przetworzony –będzie to mieć znaczący wpływ na jakość uzyskanych później rozwiązań. Jak wspomniano w rozdziale drugim sygnał EEG jest zanieczyszczony artefaktami, które powinny zostać dokładnie zidentyfikowane i następnie usunięte albo wyłączone z dalszej analizy. Zadanie to jest najczęściej wykonywane przez doświadczonych elektrofizjologów, jednak ze względu na stale rosnącą potrzebę analizowania dużych zbiorów danych podejmowane są próby wykorzystania oprogramowania do automatyzacji tego procesu [5]. W większości badań pierwszym etapem jest zastosowanie filtra mającego za zadanie usunięcie częstotliwości uznawanych za niefizjologiczne lub nieistotne dla danego badania. Zakres filtra pasmowoprzepustowego zależny jest od postawionego problemu badawczego. Przykładowo, dla sygnału EEG rejestrowanego w stanie spoczynku zakres filtra wynosi 1-40 Hz, natomiast dla danych dotyczących potencjałów wywołanych uwzględnia się szerszy zakres częstotliwości wynoszący 0.1-100 Hz [5].

Po filtracji danych przydatne może się okazać próbkowanie w dół (ang. *downsampling*) polegające na usunięciu próbek z sygnału przy jednoczesnym zachowaniu jego długości w odniesieniu do czasu. Zgodnie z twierdzeniem Nyquista częstotliwość próbkowania powinna być nie mniejsza niż dwukrotność najwyższej pozostałej częstotliwości. Ze względu na fakt, że odcięcia filtrów nie są idealnie ostre oraz celem zachowania dodatkowej rozdzielczości czasowej, w praktyce stosuje się częstotliwość próbkowania zbliżoną do czterokrotności najwyższej częstotliwości pozostałej po filtracji sygnału [5].

## 3.2. Metody lokalizacji przestrzennej źródeł aktywności mózgu

## 3.3. Oprogramowanie do analizy danych EEG