

Adam Baniuszewicz

nr albumu: 33816

kierunek studiów: Teleinformatyka

forma studiów: studia stacjonarne

specjalność: Sieci teleinformatyczne i systemy mobilne

**ALGORYTMY POLECEŃ MENTALNYCH W INTERFEJSACH
MÓZG-KOMPUTER**

**ALGORITHMS OF MENTAL COMMANDS IN BRAIN-COMPUTER
INTERFACES**

Praca dyplomowa magisterska

napisana pod kierunkiem:

dr. inż. Roberta Krupińskiego

Katedra Przetwarzania Sygnałów i Inżynierii Multimedialnej

Data wydania tematu pracy: 01.11.2018 r.

Data złożenia pracy: TODO r.

Szczecin, TODO

OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY DYPLOMOWEJ

Oświadczam, że praca magisterska pn.

„Algorytmy poleceń mentalnych w interfejsach mózg-komputer”

napisana pod kierunkiem:

dr. inż. Roberta Krupińskiego

jest w całości moim samodzielnym autorskim opracowaniem sporządzonym przy wykorzystaniu wykazanej w pracy literatury przedmiotu i materiałów źródłowych.

Złożona w dziekanacie Wydziału Elektrycznego treść mojej pracy dyplomowej w formie elektronicznej jest zgodna z treścią w formie pisemnej.

Oświadczam ponadto, że złożona w dziekanacie praca dyplomowa ani jej fragmenty nie były wcześniej przedmiotem procedur procesu dyplomowania związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w uczelniach wyższych.

.....
podpis dyplomanta

Szczecin, dn. TODO r.

Streszczenie pracy

TODO

Słowa kluczowe

BCI, Elektroencefalografia

Abstract

TODO

Keywords

BCI, Electroencephalography

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	6
Wprowadzenie	7
1. Analiza rozwiązań BCI	9
1.1. Rodzaje interfejsów	9
1.1.1. Inwazyjne	9
1.1.2. Nieinwazyjne	9
1.2. Rodzaje rejestrowanych sygnałów	9
1.2.1. EEG	9
1.2.2. EMG	9
1.2.3. ECG	9
1.2.4. EOG	9
1.3. Charakterystyka wybranych urządzeń komercyjnych	9
1.3.1. Emotiv Insight	9
1.3.2. Emotiv EPOC+	12
1.3.3. Muse/Muse 2	14
1.3.4. Mindwave Mobile 2	16
1.3.5. OpenBCI Ultracortex <i>Mark IV</i>	16
2. Przegląd dostępnych rozwiązań	21
3. Analiza istniejących algorytmów ekstrakcji cech	23
4. Projekt systemu	25
5. Badania opracowanego systemu	27
Zakończenie	28
Bibliografia	29
Spis tabel	31
Spis rysunków	32
Spis kodów źródłowych	33

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

API	Application programming interface — Interfejs programistyczny aplikacji
BCI	Brain-computer interface — Interfejs mózg-komputer
EEG	Elektroencefalografia
EKG	Elektrokardiografia
EMG	Elektromiografia
EOG	Elektrookulografia
SDK	Software development kit — Zestaw narzędzi do tworzenia oprogramowania

Wprowadzenie

TODO

Cel pracy

TODO

Zakres pracy

TODO

ROZDZIAŁ 1

Analiza rozwiązań BCI

1.1. Rodzaje interfejsów

1.1.1. Inwazyjne

1.1.2. Nieinwazyjne

1.2. Rodzaje rejestrowanych sygnałów

1.2.1. EEG

1.2.2. EMG

1.2.3. ECG

1.2.4. EOG

1.3. Charakterystyka wybranych urządzeń komercyjnych

1.3.1. Emotiv Insight

Insight (patrz rysunek 1.1 na następnej stronie) jest produktem wprowadzonym na rynek w roku 2015 przez firmę Emotiv przy wsparciu crowdfundingu na portalu kickstarter. Jest produktem do użytku codziennego, głównie za sprawą minimalistycznego designu oraz braku konieczności stosowania żelów przewodzących, przeznaczonym do mniej precyzyjnych zastosowań.

Jest wyposażony w pięć czujników właściwych oraz dwa referencyjne. Lokalizacja czujników została przedstawiona na rysunku 1.2 na stronie 11. Czas ubrania oraz ustawienia urządzenia oscyluje w granicach 1–2 minut. Parametry urządzenia zostały zestawione w tabeli 1.1 na stronie 12.

Koszt produktu na dzień 21 kwietnia 2019 roku wynosi 299\$.



Rysunek 1.1. Hełm Emotiv Insight

Źródło: [4]

Firma Emotiv dostarcza do swoich rozwiązań API¹ o nazwie Cortex. Stanowi on podstawę do budowania aplikacji wykorzystujących pobrane z hełmów strumienie danych dzięki wykorzystaniu JSON oraz WebSocket[2]. Cortex ułatwia tworzenie gier, aplikacji oraz rejestrowania danych do późniejszego ich wykorzystania do badań.

Cortex jest wrapperem SDK² firmy EMOTIV. Zapewnia on, w zależności od rodzaju zakupionej licencji, dostęp do różnych strumieni danych z hełmów. Jest kompatybilny z systemami Mac OS oraz Windows. Umożliwia programowanie w językach Java, C#, C++, Python, Ruby, JavaScript (Node.js) oraz PHP.

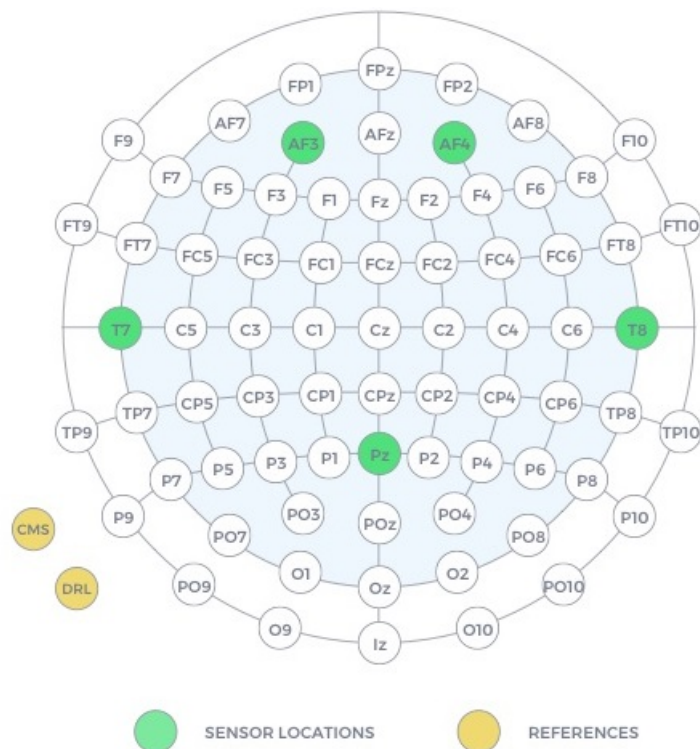
Licencja Cortex jest dostępna w trzech planach:

Darmowa

- Mental Commands API,
- Performance Metrics API (do 0,1 Hz),
- Frequency Bands API,
- Facial Expressions API,

¹API (*ang.* application programming interface) – Interfejs programistyczny aplikacji. Zawiera zestaw reguł i ich opisów, które definiują sposób komunikacji między programami komputerowymi.

²SDK (*ang.* software development kit) – Zestaw narzędzi dla programistów niezbędny w tworzeniu aplikacji korzystających z danej biblioteki.



Rysunek 1.2. Rozmieszczenie sensorów w hełmie Emotiv Insight

Źródło: [4]

- Motion data API,
- nielimitowana ilość sesji na 3 urządzeniach.

Niekomercyjna pro – \$55-99/miesiąc

- Wszystkie API z licencji darmowej,
- Raw EEG API,
- oprogramowanie EmotivPRO,
- nielimitowana ilość sesji na 3 urządzeniach.

Komercyjna

- Performance Metrics API o wysokiej rozdzielczości,
- konfigurowanie API pod swoje potrzeby,
- tworzenie komercyjnych rozwiązań.

Oprogramowanie EmotivPRO[5], dostępne w licencjach niekomercyjnej pro oraz komercyjnej, stanowi wsparcie dla badań wykorzystujących EEG. Pozwala ono na akwizycję oraz prezentację strumieni danych w czasie zbliżonym do rzeczywistego, zapisywanie sesji w chmurze oraz szybką analizę wbudowanym algorytmem FFT³, bez konieczności eksportu danych.

³FFT (ang. Fast Fourier Transform) – Szybka transformacja Fouriera.

Tabela 1.1. Parametry Emotiv Insight

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [6]

Ilość kanałów	5 (+2 referencyjne)
Umieszczenie elektrod	AF3, AF4, T7, T8, Pz
Czujniki referencyjne	DMS/DRL
Rodzaj czujników	Półsuchy polimer
Rozdzielczość	14 bit na kanał
Rozdzielczość LSB	0,51 μ V @ 14 bit
Detekcja ruchu	9-osiowy czujnik (3x żyroskop, 3x akcelerometr, 3x magnetometr)
Łączność	Bezprzewodowa 2,4GHz/Bluetooth 4.0
Zasilanie	Li-Pol 480 mAh, do 8 godzin pracy

1.3.2. Emotiv EPOC+

EPOC+, pokazany na rysunku 1.3 na następnej stronie, został wprowadzony na rynek w 2013 roku przez firmę Emotiv. Został zaprojektowany do badań wykorzystujących EEG oraz zaawansowanych zastosowań BCI[3].

Jest wyposażony w 14 kanałów właściwych oraz 2 referencyjne (dokładna lokalizacja sensorów została przedstawiona na rysunku 1.4 na sąsiedniej stronie). W odróżnieniu od Emotiv Insight, omówionego w rozdziale 1.3.1 na stronie 9, wymaga stosowania *mo-krych* elektrod, pokrytych nasączonym solą fizjologiczną filcem. Ze względu na większą ilość czujników niż w Emotiv Insight, czas ubrania oraz przygotowania urządzenia do pracy wynosi około 3–5 minut. Parametry hełmu zostały przedstawione w tabeli 1.2.

Koszt produktu na dzień 21 kwietnia 2019 roku wynosi 799\$.

Tabela 1.2. Parametry Emotiv EPOC+

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [6]

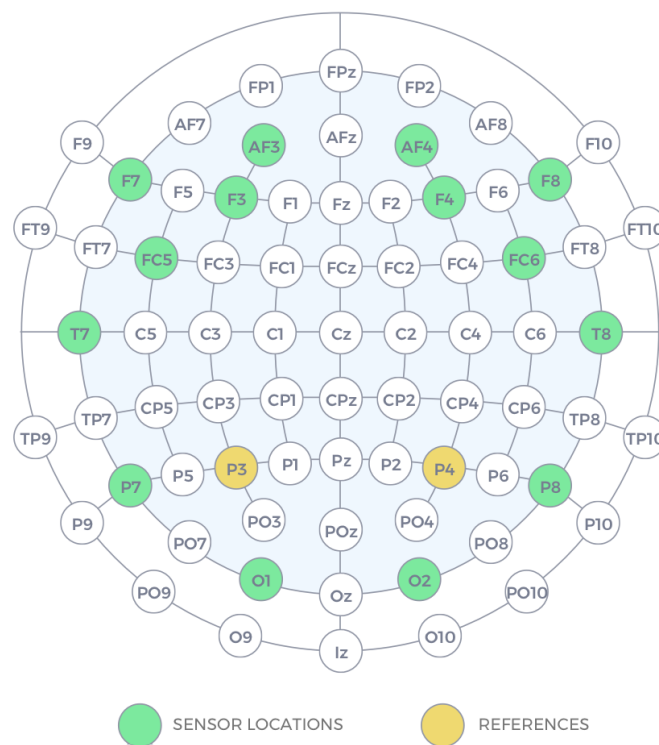
Ilość kanałów	14 (+2 referencyjne)
Umieszczenie elektrod	AF3, AF4, F3, F4, FC5, FC6, F7, F8, T7, T8, P7, P8, O1, O2
Czujniki referencyjne	DMS/DRL
Rodzaj czujników	Nasączone solą fizjologiczną
Rozdzielczość	14/16 bit na kanał
Rozdzielczość LSB	0,51 μ V @ 14 bit/0,13 μ V @ 16 bit
Detekcja ruchu	9-osiowy czujnik (3x żyroskop, 3x akcelerometr, 3x magnetometr)
Łączność	Bezprzewodowa 2,4GHz/Bluetooth 4.0
Zasilanie	Li-Pol 680 mAh, do 12 godzin pracy

Od strony programistycznej urządzenie wykorzystuje to samo API oraz SDK co Emotiv Insight; zostały one omówione w rozdziale 1.3.1 na stronie 9.



Rysunek 1.3. Hełm Emotiv EPOC+

Źródło: [3]



Rysunek 1.4. Rozmieszczenie sensorów w hełmie Emotiv EPOC+

Źródło: [3]

1.3.3. Muse/Muse 2

Muse/Muse 2 są urządzeniami wspomagającymi medytację, które pozwalają na rejestrację w czasie rzeczywistym aktywności mózgu, tętna, oddechu oraz ruchu ciała⁴[8]. Przekształcają one zmierzoną aktywność mózgu w predefiniowane dźwięki, takie jak szum wody czy deszczu; w zależności od poziomu skupienia dźwięk będzie spokojny lub gwałtowny, co pozwala osobom uczącym się medytować na efektywniejszą naukę wyciszenia umysłu.

Oba urządzenia są z wyglądu bardzo do siebie podobne. Nowsze, Muse 2 (pokazane na rysunku 1.5), w odniesieniu do poprzedniej wersji, zostało *odchudzone*, przez co nabrało bardziej eleganckiego wyglądu oraz zyskało niższy profil z dodatkowymi czujnikami[11]. Dodano również miękkie w dotyku wykończenie.



Rysunek 1.5. Opaska Muse 2

Źródło: [8]

Obie opaski są wyposażone w 7 czujników, w tym 3 referencyjne (patrz rysunek 1.6 na następnej stronie). Zestawienie parametrów oferowanych przez obie opaski znajduje się w tabeli 1.3 na stronie 16.

Koszt Muse wynosi 219€; Muse 2 – 269€.

Muse posiada oferty skierowane do następujących grup:

Deweloperów

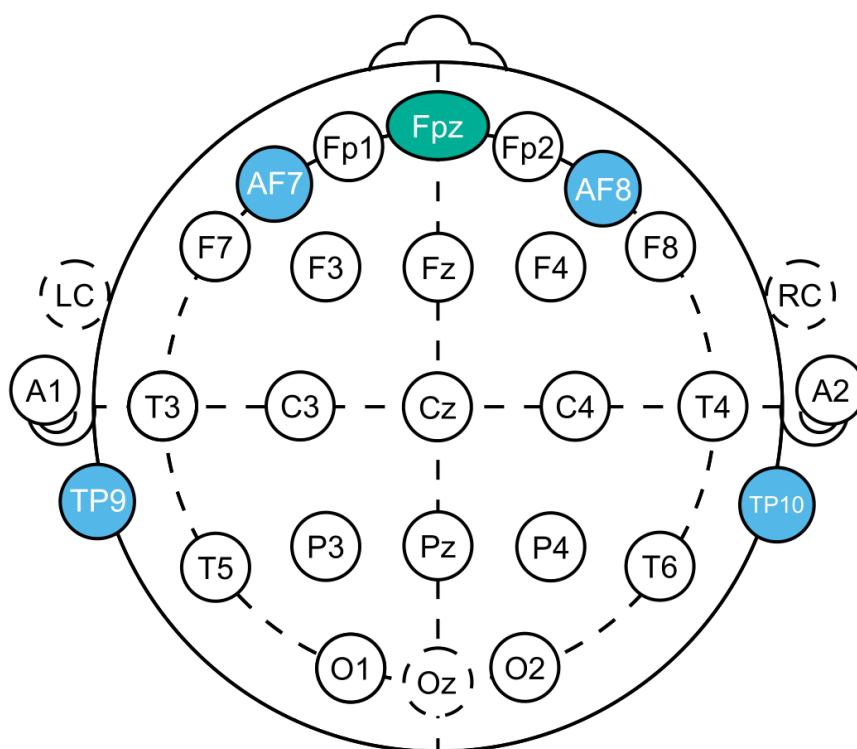
Na dzień 23 kwietnia 2019 roku Muse nie wspiera aktywnie swojego SDK⁵. Ostatnią dostępną wersją jest v6.0.3, wydana w marcu 2018 roku. Opaska Muse 2, z racji późniejszej daty premiery, **nie jest wspierana przez SDK**. Na stronie dla deweloperów[9] znajduje się odnośnik do innych narzędzi, takich jak Muse Direct czy projektów open source, np. MuseLSL, EEG Notebooks.

Profesjonalistów

W ramach subskrypcji Muse Connect profesjonaliści otrzymują program wspoma-

⁴Rejestracja poszczególnych parametrów w zależności od wersji opaski.

⁵SDK – Patrz przyp. 2 na stronie 10.



Rysunek 1.6. Rozmieszczenie sensorów w opasce Muse

Źródło: [19]

gający rozwój ich biznesu poprzez uczenie ich klientów technik medytacji[10]. W ten sposób otrzymują dostęp do różnych wskazówek m.in. webinarów⁶, studiów przypadków oraz informacji, które pomogą wprowadzić Muse do ich biznesu. Muse Connect wspomaga prowadzenie podopiecznych: ustalanie dla nich celów do realizacji oraz śledzenie ich progresu (również w czasie rzeczywistym).

Aplikacja oferuje dwa rodzaje subskrypcji:

1. miesięczną w cenie 39\$/miesiąc,
2. roczną w cenie 33\$/miesiąc; w tej opcji dodatkowo otrzymujemy za darmo urządzenie Muse.

Naukowców

W ramach narzędzi dla naukowców Muse oferuje dostęp do MusePlayer oraz MuseLab. MusePlayer służy do rejestrowania, ponownego odtwarzania, przekierowywania oraz przetwarzania danych z opasek. Umożliwia konwersję z natywnego typu danych (.muse) na inne (.txt, .mat, .csv). MuseLab wykorzystuje się do wizualizacji danych.

⁶Webinarium – Internetowe seminarium realizowane przy wykorzystaniu streamingu wideo.

Tabela 1.3. Parametry Muse oraz Muse 2

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [7] oraz [19]

Parametr	Muse	Muse 2
Ilość kanałów	4 (+ 3 referencyjne)	4 (+3 referencyjne)
Umieszczenie elektrod	TP9, AF7, AF8, TP10 ^a	TP9, AF7, AF8, TP10 ^a
Czujniki referencyjne	CMS/DRL	CMS/DRL
Rodzaj czujników	Suche srebrne/silikonowe	Suche srebrne/silikonowe
Rozdzielczość	12 bit na próbkę	12 bit na próbkę
Rejestrowane parametry	EEG	EEG, tętno, ruch ciała, oddech
Kompatybilność	iOS, Android	iOS, Android
Łączność	Bezprzewodowa Bluetooth 4.0	Bezprzewodowa Bluetooth 5.0
Zasilanie	Li-Ion, do 5 godzin pracy	Li-Ion, do 5 godzin pracy

^a Dokładna lokalizacja zależy od wielkości głowy użytkownika; zamieszczono lokalizację zgodną z [19].
W literaturze można spotkać również T9, FP1, FP2, T10[1].

1.3.4. Mindwave Mobile 2

1.3.5. OpenBCI Ultracortex Mark IV

Ultracortex, pokazany na rysunku 1.7 na sąsiedniej stronie, jest open-source'owym hełmem zaprojektowanym do pracy ze wszystkimi układami OpenBCI[18]. Pozwala na rejestrację sygnałów EEG, EMG oraz ECG. Wspiera do 16 kanałów rozmieszczonych na 35 różnych lokalizacjach według systemu 10-20⁷.

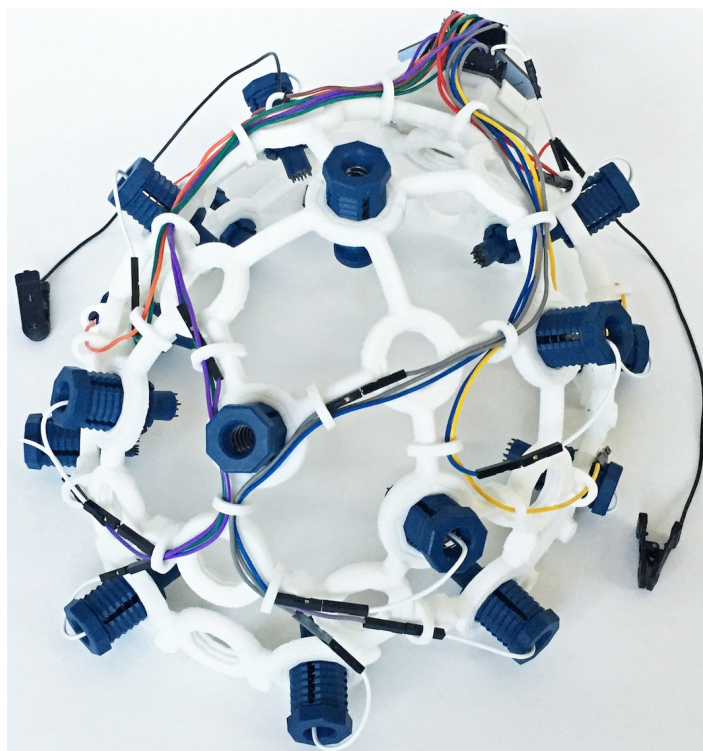
W projekcie zastosowano suche sensory EEG. Ich rozmieszczenie pokazano na rysunku 1.8 na następnej stronie.

Czas założenia oraz uruchomienia hełmu wynosi poniżej 30 sekund.

Produkt można kupić w trzech wariantach:

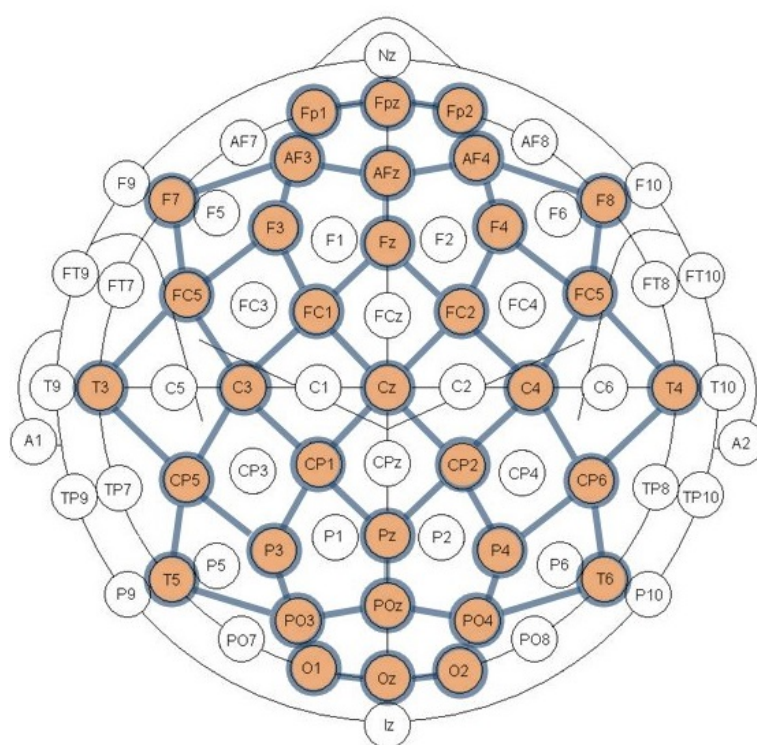
1. Do samodzielnego druku — dostarczane są wszystkie części hełmu oprócz tych, które można wydrukować na drukarce 3D. Hełm należy zmontować samodzielnie na podstawie dokumentacji. Cena: 300–400\$.
2. Niezmontowany — dostarczane są wszystkie części hełmu, również z tymi, które można wydrukować na drukarce 3D. Hełm należy zmontować samodzielnie na podstawie dokumentacji. Cena: 500–600\$.
3. Zmontowany — dostarczany jest całkowicie zmontowany hełm. Cena: 700–850\$.

⁷System 10-20 – system opisu umiejscowienia elektrod; składa się z 21 elektrod. Podstawą tego standardu jest zdefiniowanie konturów między punktami orientacyjnymi czaszki (np. nasion, inion), a następnie podzielenie ich na proporcjonalne odległości 20% całkowitej długości. Istnieją również systemy pokrewne, np. 10-10 oraz 10-5, które używają odpowiednio 10% oraz 5% całkowitej długości[20, rozdz. 6].



Rysunek 1.7. Helm Ultracortex Mark IV

Źródło: [17]



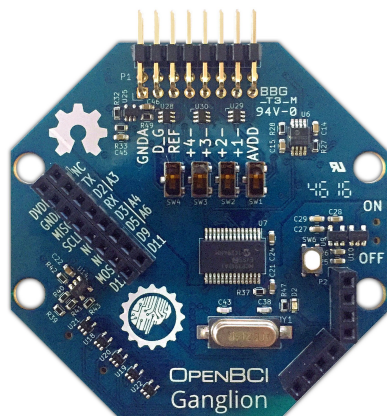
Rysunek 1.8. Rozmieszczenie sensorów w hełmie Ultracortex Mark IV

Źródło: [18]

Dodatkowo należy zakupić wybraną płytkę OpenBCI. Poniżej zamieszczono związane opisy dostępnych układów. Parametry helmu *Mark IV* w połączeniu z kompatybilnymi płytkami zamieszczono w tabeli 1.4 na stronie 20.

Ganglion Board

Ganglion (patrz rysunek 1.9) posiada 4 kanały, które mogą być użyte do mierzenia sygnałów EMG, EKG lub EEG[15]. Częstotliwość próbkowania wynosi 200 Hz.



Rysunek 1.9. OpenBCI Ganglion Board

Źródło: [15]

Komunikacja bezprzewodowa jest realizowana z wykorzystaniem Simblee BLE, modułu Bluetooth 4.0 kompatybilnego z Arduino, który pozwala na łatwą integrację z IoT⁸. Moduł umieszczony na płycie Ganglion jest zaprogramowany i gotowy do pracy, jednak część jego wyprowadzeń pozostaje dostępna dla użytkownika do celów własnych.

Koszt układu to 200\$.

Cyton Board

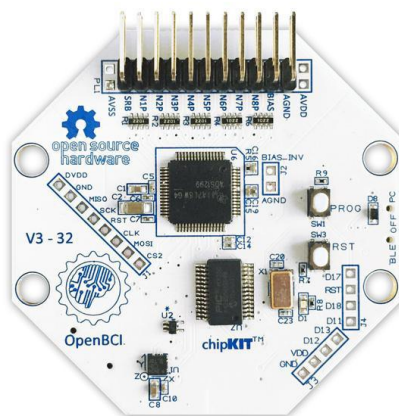
Cyton, pokazany na rysunku 1.10 na sąsiedniej stronie, jest kompatybilny z Arduino, posiada 8 kanałów oraz 32-bitowy procesor[14]. Podobnie jak Ganglion, może być wykorzystany do mierzenia aktywności mięśni, serca lub mózgu. Dane próbkowane są z częstotliwością 250 Hz.

Do komunikacji bezprzewodowej wykorzystywany jest moduł RFduino. Komunikacja z komputerem może być realizowana przy pomocy adaptera OpenBCI USB lub, jeżeli komputer posiada tę opcję, wbudowanego modułu BLE⁹.

Koszt płytki to 500\$.

⁸IoT (ang. Internet of Things) – Internet rzeczy. Koncepcja zgodnie z którą urządzenia mogą komunikować się ze sobą, wykorzystując do tego celu internet.

⁹BLE (ang. Bluetooth Low Energy) – technologia sieci bezprzewodowej o poborze mocy niższym niż w konwencjonalnych modułach Bluetooth.



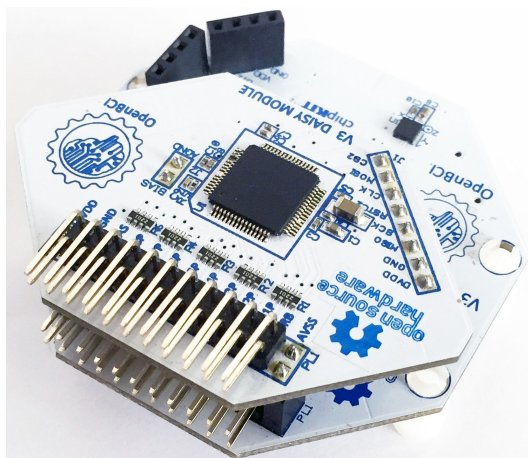
Rysunek 1.10. OpenBCI Cyton Board

Źródło: [14]

Cyton + Daisy Board

Ten układ zawiera opisaną wcześniej płytkę Cyton oraz Daisy, która jest wpinana w płytkę Cyton. Układ pokazano na rysunku 1.11.

Daisy zapewnia dodatkowe 8 kanałów, które mogą być użyte do mierzenia EMG, EKG lub EEG[13]. Częstotliwość próbkowania wynosi 250 Hz.



Rysunek 1.11. OpenBCI Cyton + Daisy Board

Źródło: [13]

Koszt układu to 950 \$. Płytkę Daisy nie może być zakupiona oddzielnie.

Oprogramowanie OpenBCI jest open source'owe i jest dostępne na ich profilu na GitHubie.

Głównym narzędziem do wizualizacji, nagrywania oraz komunikacji z płytkami jest OpenBCI GUI[16]. Narzędzie jest kompatybilne z systemami macOS, Windows oraz Linux. Pozwala na filtrowanie oraz przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym. Dodatkowo po-

Tabela 1.4. Parametry Ultracortex *Mark IV* w połączeniu z kompatybilnymi układami

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [18], [15],[14] oraz [13]

Parametr	Ganglion	Cyton	Cyton + Daisy
Ilość kanałów	4	8	16
Umieszczenie elektrod	Konfigurowalne ^a	Konfigurowalne ^a	Konfigurowalne ^a
Rodzaj czujników	Suche	Suche	Suche
Rozdzielczość	24 bit	24 bit	24 bit
Częstotliwość próbkowania	200 Hz	250 Hz	250 Hz
Rejestrowane parametry	EMG, EKG, EEG ^b	EMG, EKG, EEG ^b	EMG, EKG, EEG ^b
Detekcja ruchu	3 osiowy akcelerometr	3 osiowy akcelerometr	3 osiowy akcelerometr
Kompatybilność	macOS, Windows, Linux	macOS, Windows, Linux	macOS, Windows, Linux
Łączność	BLE 4.0 przez adapter	BLE	BLE
Zasilanie	6V (4 baterie AA)	6V (4 baterie AA)	6V (4 baterie AA)
^a <i>Mark IV</i> wspiera 35 lokalizacji według standardu 10-20. Punkty w których można umieścić elektrody pokazano na rysunku 1.8 na stronie 17.			
^b Sensory nie są dołączane do płytek i należy je zakupić oddzielnie.			

zwala na przekierowywanie danych wykorzystując protokoły UDP, OSC, LSL oraz port szeregowy.

Do komunikacji z płytkami używane są OpenBCI Ganglion SDK oraz OpenBCI Cyton SDK. Wykorzystują one protokół oparty na znakach ASCII¹⁰.

OpenBCI dostarcza również bibliotekę Brainflow, która służy do analizy danych EMG, EKG oraz EEG[12]. Została ona napisana w języku C/C++, jednak zawiera nakładki na języki Python, Java, R, C++¹¹, Matlab oraz C#.

Platforma OpenBCI umożliwia również współpracę z innymi programami do analizy sygnałów, m.in. MATLAB, Neuromore, OpenVIBE, LabStreamingLayer oraz BrainBay.

¹⁰ASCII (*ang.* American Standard Code for Information Interchange) – siedmiobitowy system służący do kodowania znaków.

¹¹Pomimo, że sama biblioteka napisana jest w C/C++, dodano nakładkę na język C++ w celu zapewnienia wysokopoziomowej warstwy abstrakcji.

ROZDZIAŁ 2

Przegląd dostępnych rozwiązań

ROZDZIAŁ 3

Analiza istniejących algorytmów ekstrakcji cech

ROZDZIAŁ 4

Projekt systemu

ROZDZIAŁ 5

Badania opracowanego systemu

Zakończenie

TODO

Bibliografia

- [1] Bashivan P., Rish I., Heisig S.: Mental state recognition via wearable EEG. *CoRR*, vol. abs/1602.00985, 2016, URL: <http://arxiv.org/abs/1602.00985>.
- [2] EMOTIV: *Develop with Emotiv*, URL: <https://www.emotiv.com/developer/> (dostęp: 08.04.2019).
- [3] EMOTIV: *EMOTIV EPOC+ 14 Channel Mobile EEG*, URL: <https://www.emotiv.com/product/emotiv-epoc-14-channel-mobile-eeeg/> (dostęp: 21.04.2019).
- [4] EMOTIV: *EMOTIV Insight 5 Channel Mobile EEG*, URL: <https://www.emotiv.com/product/emotiv-insight-5-channel-mobile-eeeg/> (dostęp: 21.04.2019).
- [5] EMOTIV: *Emotiv PRO*, URL: <https://www.emotiv.com/emotivpro/> (dostęp: 08.04.2019).
- [6] EMOTIV: *Headsets comparison chart*, URL: <https://www.emotiv.com/comparison/> (dostęp: 04.04.2019).
- [7] InteraXon Inc. *Compare Muse Devices*, URL: <https://choosemuse.com/product-comparison/> (dostęp: 23.04.2019).
- [8] InteraXon Inc. *Introducing Muse 2*, URL: <https://choosemuse.com/muse-2/> (dostęp: 23.04.2019).
- [9] InteraXon Inc. *Muse developer*, URL: <https://choosemuse.com/development/> (dostęp: 23.04.2019).
- [10] InteraXon Inc. *Muse professional*, URL: <https://choosemuse.com/muse-professionals/> (dostęp: 23.04.2019).
- [11] InteraXon Inc. *What are the differences between Muse 2 and Muse the brain sensing headband?*, URL: <https://choosemuse.force.com/s/article/How-is-Muse-2-different-than-Muse-the-brain-sensing-headband?> (dostęp: 23.04.2019).
- [12] OpenBCI: *Brainflow*, URL: <https://github.com/OpenBCI/brainflow> (dostęp: 04.06.2019).
- [13] OpenBCI: *Cyton + Daisy Biosensing Boards (16-channels)*, URL: <https://shop.openbci.com/collections/frontpage/products/cyton-daisy-biosensing-boards-16-channel> (dostęp: 29.04.2019).
- [14] OpenBCI: *Cyton Biosensing Board (8-channels)*, URL: <https://shop.openbci.com/collections/frontpage/products/cyton-biosensing-board-8-channel> (dostęp: 29.04.2019).
- [15] OpenBCI: *Ganglion Board (4-channels)*, URL: <https://shop.openbci.com/collections/frontpage/products/pre-order-ganglion-board> (dostęp: 29.04.2019).
- [16] OpenBCI: *The OpenBCI GUI*, URL: https://github.com/OpenBCI/OpenBCI_GUI (dostęp: 04.06.2019).

- [17] OpenBCI: *Ultracortex Mark IV*, URL: <https://docs.openbci.com/Headware/01-Ultracortex-Mark-IV> (dostęp: 28.04.2019).
- [18] OpenBCI: *Ultracortex Mark IV EEG Headset*, URL: <https://shop.openbci.com/products/ultracortex-mark-iv> (dostęp: 28.04.2019).
- [19] *Technical specifications, validation, and research use*, InteraXon Inc., kw. 2017.
- [20] Wolpaw J., Wolpaw E.: *Brain-computer interfaces: principles and practice*, Oxford University Press, USA, 2012.

Spis tabel

1.1. Parametry Emotiv Insight	12
1.2. Parametry Emotiv EPOC+	12
1.3. Parametry Muse oraz Muse 2	16
1.4. Parametry Ultracortex <i>Mark IV</i> w połączeniu z kompatybilnymi układami	20

Spis rysunków

1.1. Hełm Emotiv Insight	10
1.2. Rozmieszczenie sensorów w hełmie Emotiv Insight	11
1.3. Hełm Emotiv EPOC+	13
1.4. Rozmieszczenie sensorów w hełmie Emotiv EPOC+	13
1.5. Opaska Muse 2	14
1.6. Rozmieszczenie sensorów w opasce Muse	15
1.7. Hełm Ultracortex <i>Mark IV</i>	17
1.8. Rozmieszczenie sensorów w hełmie Ultracortex Mark IV	17
1.9. OpenBCI Ganglion Board	18
1.10. OpenBCI Cyton Board	19
1.11. OpenBCI Cyton + Daisy Board	19

Spis kodów źródłowych