

Technika digitalizacji położenia elektrod w badaniu elektroencefalograficznym EEG

Digitization technique of EEG electrodes localization

Tomasz Zyss

Klinika Psychiatrii Dorosłych, Szpital Uniwersytecki w Krakowie, ul. Kopernika 21a, 31-358 Kraków, tel. +48 (12) 424 87 58, e-mail: mzyyss@cyf-kr.edu.pl

Streszczenie

W rutynowym badaniu elektroencefalograficznym EEG (*Electroencealography*) na powierzchni głowy rozmieszcza się 19-21 standardowych elektrod do rejestracji czynności bioelektrycznej mózgu. Do ich rozlokowania wykorzystuje się zasady układu 10-20. Metoda ta jest jednak mało skuteczna w badaniach eksperymentalnych wykorzystujących większe ilości elektrod lub rozlokowanych w nietypowych miejscach. Skorelowanie sygnału EEG z rejestrującą go elektrodą wymaga techniki digitalizacji. Za jej pomocą możliwe jest precyzyjne określenie położenia dowolnej elektrody. Listy ze współrzędnymi elektrod mogą być później eksportowane do programów dedykowanych wizualizacji sygnału EEG np. do przestrzennego mappingu EEG.

Słowa kluczowe: badanie EEG, elektrody rejestrujące, dokładna lokalizacja, digitalizacja

Abstract

About 19-21 standard electrodes destined for the registration of the bioelectric brain activity are displaced during the routine EEG recording on the surface of the head. The distribution of electrodes is based on the principles of 10-20 system. Nevertheless, the method is less effective in experimental investigations using the larger quantities of electrodes or quartering them in atypical places. To correlate EEG signal with the recording electrode the application of digitization technique is necessary. The precise estimation of position of any electrode is possible thanks to this method. The list with coordinates of electrodes can be later exported to dedicated software for visualizations of EEG signal, e.g. spatial EEG mapping.

Key words: EEG test, sampling electrodes, precise localization, digitalization

Wstęp

Badanie EEG jest rutynowym badaniem stosowanym w diagnostyce czynności bioelektrycznej mózgu [1]. Do rejestracji aktywności elektrycznej mózgu wykorzystuje się zwyczajowo 19-21 elektrod rozmieszczonych w odpowiednich miejscach na powierzchni głowy [2]. Lokalizacja punktów położenia elektrod określana jest za pomocą schematu prof. Jaspera z 1958 r. – zwanego obecnie układem 10-20 [3]. Podane liczby odpowiadają 10% lub 20% odległości trzech odcinków wyznaczonych na powierzchni głowy dzięki standardowym punktom orientacyjnym [4-6]. Zasady wyznaczania punktów na trzech głównych osiach głowy XYZ (a właściwie – na trzech głównych liniach – strzałkowej, wieńcowej i poprzecznej), na których umieszcza się elektrody zostały opisane we wcześniejszych pracach [7, 8].

Zaletą układu 10-20 jest jego łatwość stosowania i tzw. otwartość. Odcinki między elektrodami mogą być zmniejsza-

ne (10%, 5% i 2,5% odległości), a elektrody „dogęszczane” [9, 10]. Dzięki postępowi technik cyfrowych możliwa stała się równoczesowa akwizycja sygnału EEG ze znacznie większej ilości elektrod, niż to stosuje się w badaniu rutynowym [11, 12]. Obecne najbardziej zaawansowane systemy cyfrowego EEG pozwalają na rejestrację sygnału EEG równocześnie z 512 elektrod [13].

Techniki EEG, pozwalające na rejestrację sygnału EEG z więcej niż 32 (według niektórych – dopiero 64) elektrod, określane są mianem EEG wysokich/dużych rozdzielczości hrEEG (*high resolution EEG*) [14, 15].

W zakresie tej techniki pojawiły się dwa problemy metodologiczne:

1. Stworzenie nazewnictwa dużej ilości nowych elektrod, nawiązujących do nazw, jakie były przyjęte dla pierwszych standardowych elektrod. Problem ten rozwiązali z powodzeniem Oostenweld i Pramstra w 2001 r. [16, 17], prezentując zasady rozmieszczania elektrod zgodnie z 5% odstępami między elektrodami (układ 5-5) – wraz z propozycją odpowiedniej nomenklatury dla tych elektrod. W układzie tym możliwe jest zdefiniowanie aż 346 elektrod.
2. Dokładne lokalizowanie elektrod, tj. określenie ich położenia – we współrzędnych kartezjańskich (XYZ) lub biegunowych (kąty: θ i φ).

W artykule skupiono się nad drugim problemem – według Autora znacznie poważniejszym.

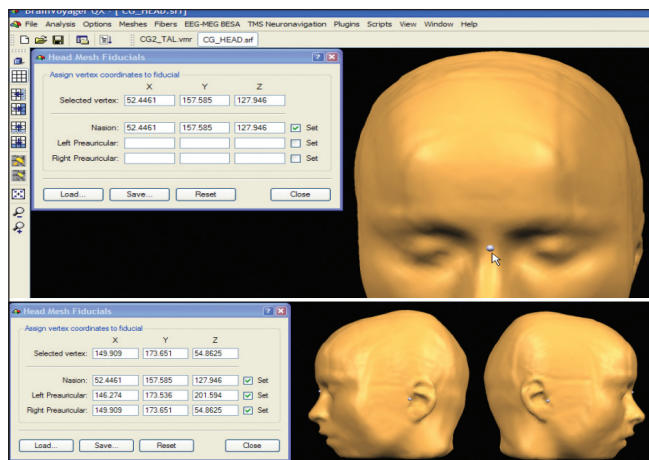
Problemy z rozlokowywaniem elektrod

W przypadku badania rutynowego, wykorzystującego jedynie 19-21 elektrod, położenie elektrody wyznaczane jest metodą orientacyjną („na oko”) – zgodnie z zasadami układu 10-20. Doświadczony technik, rozmieszczając elektrody, umieszcza je pod gumowym czepkiem i może poprawić dokładność ich rozlokowywania przez posłużenie się przymiarem metrycznym. Przymiar pozwala na dokładne wymierzenie długości podstawowych odcinków, na których dokonuje się 10% i 20% podziałów [18, 19].

Ze względu na dość duże średnice elektrody rejestrującej (10-15 mm) oraz w pewnym zakresie orientacyjny charakter rutynowego badania EEG, dokładność lokalizacji elektrod nie musi być szczególnie duża. 1-3-centymetrowe odchylenia położenia elektrody (położenie rzeczywiste) od położenia właściwego (idealnego) tej elektrody nie wpływa w znaczący sposób na rejestrowany sygnał EEG (nie prowadzi do jego zniekształcenia) [20].

Sytuacja taka jest jednak niedopuszczalna w przypadku techniki hrEEG. Duża ilość elektrod stosowana jest w celu dokładnego zobrazowania czynności bioelektrycznej mózgu z precyzyjnym określeniem położenia ewentualnych nieprawidłowych generatorów mózgowych. Tym samym położenie elektrody musi być definiowane możliwie jak najdokładniej.

Rozwiązaniem problemu dokładnego rozmieszczania i lokalizacji elektrod EEG jest zastosowanie metody ich digitalizacji [21, 22]. Za pomocą czepka rozmieszcza się na powierzchni głowy określoną ilość elektrod, a następnie precyzyjnie określa się ich położenie [23]. Nie ma większego znaczenia bardzo dokładne założenie czepka, jakoś jego wyko-



Rys. 1 Okna programu Brain Voyager – wykorzystujące punkty nasion Nz i dwa punkty przeduszne jako wyjściowe do określania położenia innych elektrod [26]
 Źródło: http://download.brainvoyager.com/doc/BrainVoyagerTMS-Neuronavigator_UserManual_v2.pdf

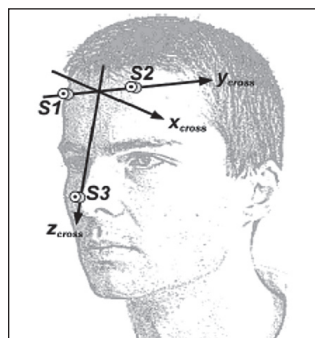


Rys. 2 Odbiornik i jednostka podstawowa systemu Zebris [27, 28]
 Źródło: http://www.zebris.de/deutsch/pdf/d_produkinfo_ElGuide_1.pdf



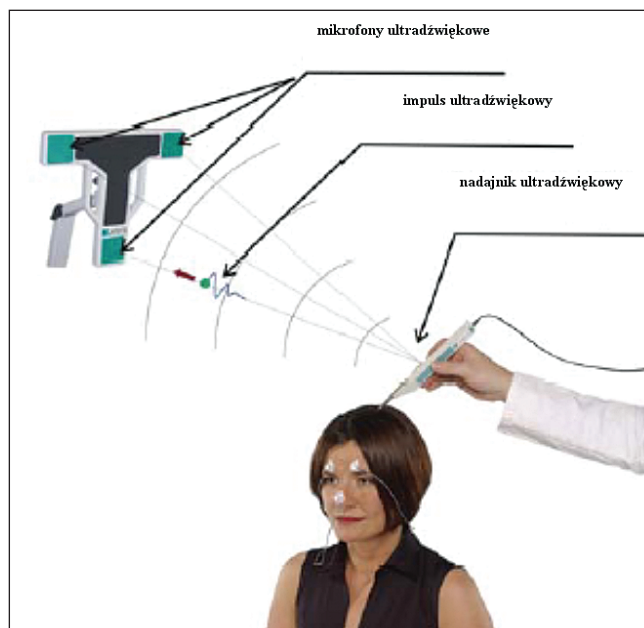
Rys. 3. Sposób digitalizacji za pomocą systemu Zebris [27, 28]
 Źródło: http://www.zebris.de/deutsch/pdf/d_produkinfo_ElGuide_1.pdf

kania, rzeczywista geometria głowy itp., gdyż specjalne urządzenia mierzą realistyczne położenie punktu-elektrody – względem określonych stałych punktów głowy, a specjalistyczne oprogramowanie pozwala na wizualizację wyniku. Rzeczywiste współrzędne elektrod będą natomiast wykorzystane przez moduły oprogramowania służące do mapowania czynności EEG (mappingu) [24, 25], które będą wyliczały rozkład np. potencjału między elektrodami – przyjmując rzeczywiste, a nie idealne odległości między nimi.

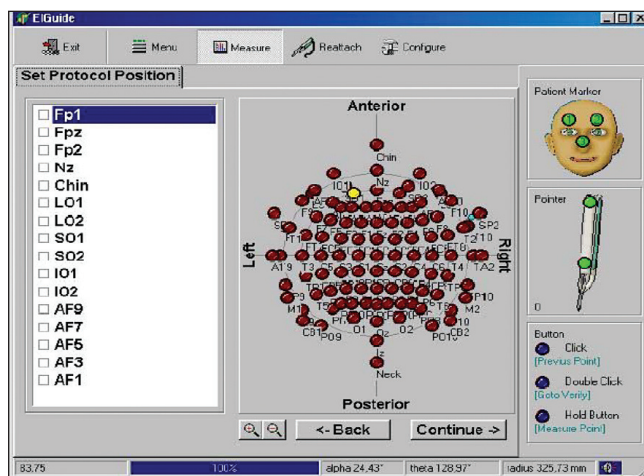


Rys. 4 Markery pozwalające systemowi Zebris wytyczenie osi kartezjańskich głowy [27, 28]
 Źródło: http://www.zebris.de/deutsch/pdf/d_produkinfo_ElGuide_1.pdf

- Systemy digitalizacji umożliwiają:
1. wyznaczenie przestrzennych, trójwymiarowych (3D) współrzędnych elektrod rozlokowanych już na powierzchni głowy,
 2. pozycjonowanie elektrody po wcześniejszym określeniu miejsca, z którego ma być rejestrowany sygnał EEG,
 3. wyznaczenie konturów głowy pacjenta we współrzędnych przestrzennych celem korelacji z danymi pozyskanymi z technik neuroobrazowania.



Rys. 5 Prezentacja metody digitalizacji elektrod za pomocą ultradźwiękowego systemu Zebris [27, 28]
 Źródło: http://www.zebris.de/deutsch/pdf/d_produkinfo_ElGuide_1.pdf



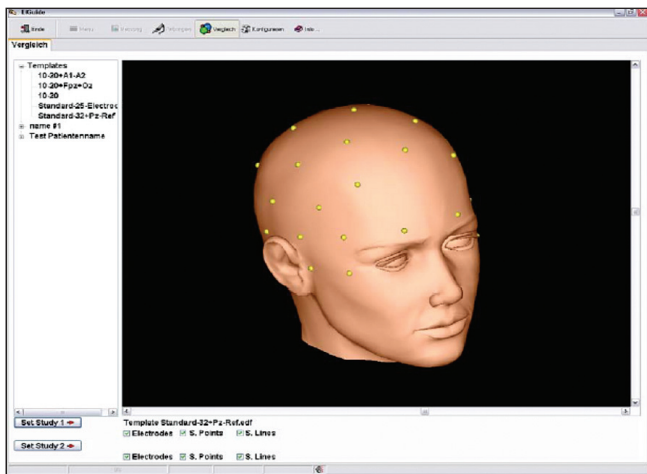
Rys. 6 Oprogramowanie ElGuide wykorzystywane w procedurze digitalizacji elektrod w systemie Zebris [27, 28]
 Źródło: http://www.zebris.de/deutsch/pdf/d_produkinfo_ElGuide_1.pdf

Pewnym ułatwieniem w technice digitalizacji jest posługiwanie się trzema, a nie czterema stałymi punktami na powierzchni głowy. Punktami tymi są zwykle punkt nasion Nz i dwa punkty przeduszne. Wymienione punkty wystarczą do wyznaczenia płaszczyzny poziomej (lecz nie równikowej) oraz prostopadłej do niej płaszczyzny wieńcowej.

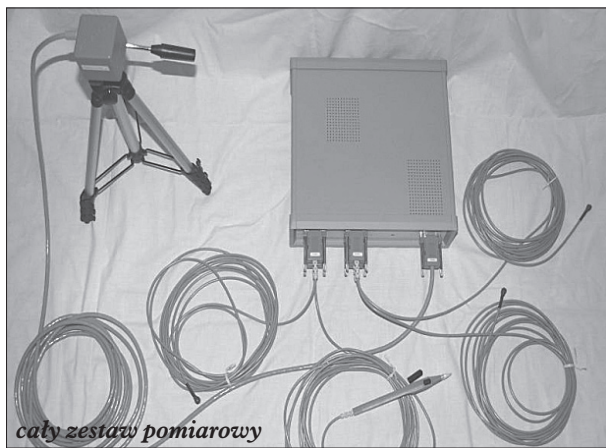
Dostępne są systemy posługujące się technikami ultradźwiękowymi, elektromagnetycznymi i laserowymi. Poniżej omówiono zasadę działania pierwszych dwóch rodzajów systemów digitalizacji (systemy laserowe raczej nie są stosowane w digitalizacji okolic głowy – w związku możliwością uszkodzenia narządu wzroku).

Przykładem aparatury do digitalizacji elektrod EEG metodą ultradźwiękową jest system Zebris niemieckiej firmy o tej samej nazwie – ZEBRIS MEDICAL GmbH [27, 28]. Sama nazwa Zebris wiąże się zapewne z kształtem jednego z elementów układu digitalizacji – odbiornikiem fal ultradźwiękowych raczej przypominającym trochę głowę żyrafy niż zęby.

Przed procedurą digitalizacji samych elektrod systemowi należy wskazać, jak ma wytyczać osie kartezjańskie głowy. W tym celu na końcu nosa oraz w obu okolicach czołowych



Rys. 7 Inne okno programu ElGuide pozwalające na wizualizację zdigitalizowanych już elektrod [27, 28]
 Źródło: http://www.zebri.de/deutsch/pdf/d_produktinfo_ElGuide_1.pdf



cały zestaw pomiarowy



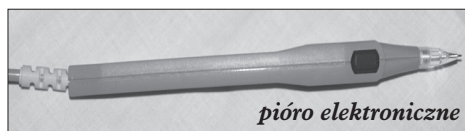
główna jednostka elektroniczna



nadajnik

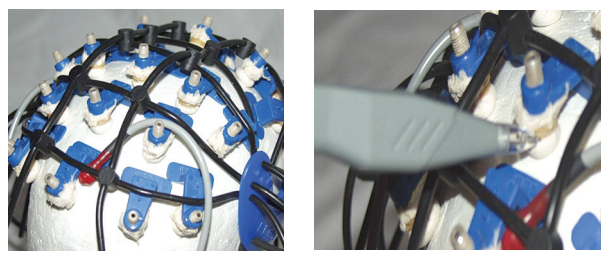


miniaturowy odbiornik



pióro elektroniczne

Rys. 8 System digitalizacji Digitrak firmy Polhemus [29]
 Źródło: opracowanie własne



Rys. 9 Miniaturowe odbiorniki umieszczone pod czepkiem gumowym (lewo) oraz pióro elektroniczne do digitalizacji elektrod
 Źródło: opracowanie własne

umieszcza się specjalne markery. Po ich wskazaniu piórem elektronicznym można przystąpić do digitalizacji samych elektrod.

Elektronicznym piórem wskazuje się punkt na głowie lub znajdującą się już tam elektrodę. Naciśnięcie specjalnego przycisku na piórze (wskaznika – pointera) prowadzi do wyemitowania sygnału ultradźwiękowego, który rozchodzi się w powietrzu we wszystkich kierunkach, w tym również w kierunku umieszczonej w pobliżu głowy anteny odbiorczej. Antena składa się z trzech osobnych mikrofonów. Odległość między punktem wskazywanym przez pióro elektroniczne a każdym z mikrofonów jest różna. Wykorzystywane jest tu zjawisko Dopplera [27, 28].



Rys. 10 Digitalizacja elektrod czepka wieloelektrodowego [31]
 Źródło: opracowanie własne

Oprogramowanie jest w stanie przeliczyć sygnał, podając rzeczywiste współrzędne danej elektrody oraz je przestrzennie zobrazować.

System ZEBRIS potrafi umieszczać elektrodę z dokładnością do 0,8 mm. W przypadku ponownego pozycjonowania elektrody błąd systemu nie przekracza 1,4 mm.

Zaletą systemu ZEBRIS jest niewrażliwość na zakłócenia środowiskowe w rodzaju pola elektromagnetycznego, hałasu czy światła.

Zasady digitalizacji elektromagnetycznej

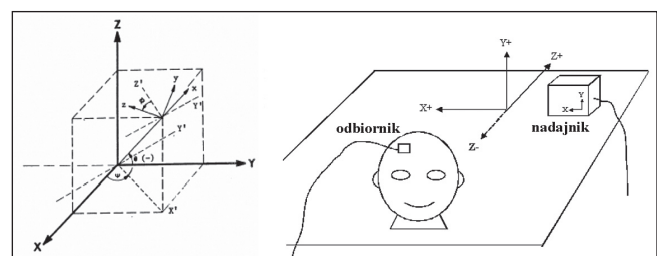
W technice digitalizacji elektrod EEG za pomocą digitizera typu elektromagnetycznego stosowane jest urządzenie Digitrak firmy Polhemus [29].

Centralna jednostka elektroniczna systemu generuje przez specjalny nadajnik (transmitter) niskoczęstotliwe pole elektromagnetyczne. Nadajnik ten umieszczany jest w pobliżu głowy pacjenta. Generowane pole jest z kolei rejestrowane za pomocą od jednego do trzech specjalnych odbiorników (receivers), które trzeba umieścić bezpośrednio na powierzchni głowy pacjenta. Miniaturowe odbiorniki 1-3 służą do triangulacji sygnału. Czwartym odbiornikiem jest pióro elektroniczne (stylus), którym wskazuje się punkt/elektrodę z powierzchni głowy, mający być poddany digitalizacji.

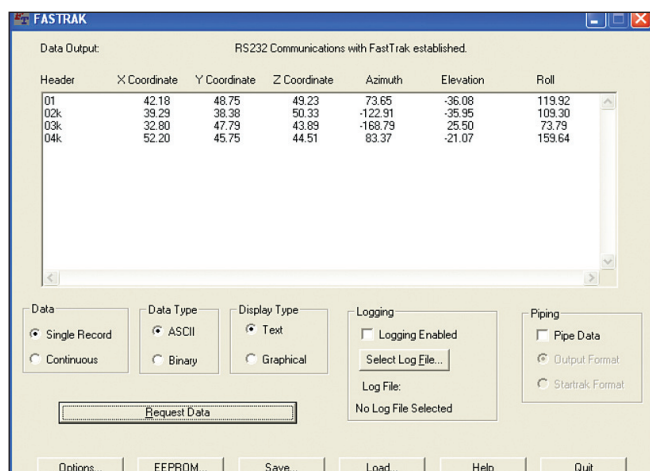
Większa ilość odbiorników pozwala na wyeliminowanie błędów pomiarowych wynikających z ruchów głowy pacjenta w trakcie przeprowadzania procedury digitalizacji [30].

Miniaturowe odbiorniki oraz końcówka pióra elektronicznego przekazują jednostce centralnej digitizera informacje o swoim aktualnym położeniu względem nadajnika.

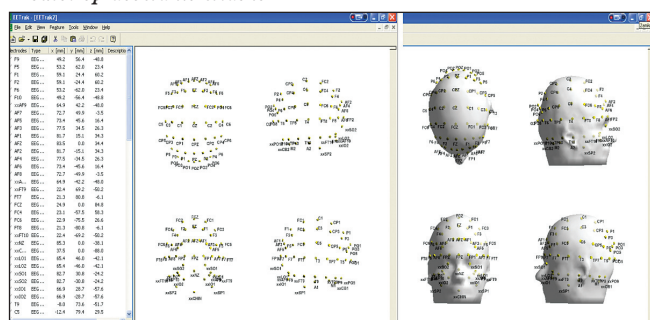
Zaprezentowana na rys. 9-11 digitalizacja położenia elektrod grzybkowych może być postrzegana jako mało dokładna i mało celowa. Piórem elektronicznym trudno wskazać środek elektrody. Gdyby wykorzystać do tego metalową tulejkę, do której



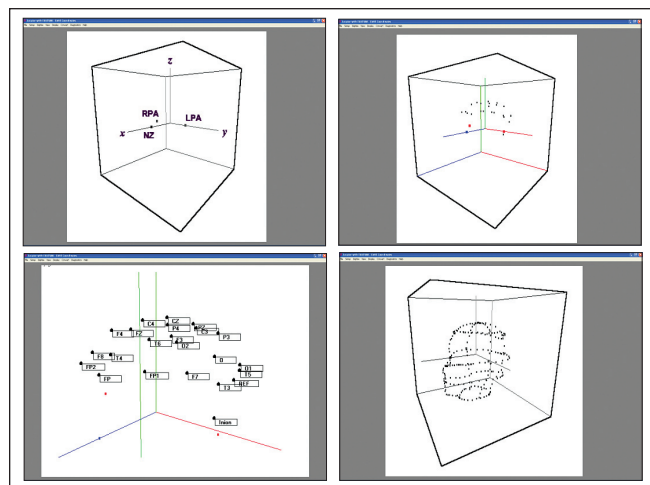
Rys. 11 Ogólne zasady dokonywania pomiarów położenia elektrod [29]
 Źródło: http://www.polhemus.com/polhemus_editor/assets/FASTRAK%20Rev%20F.pdf



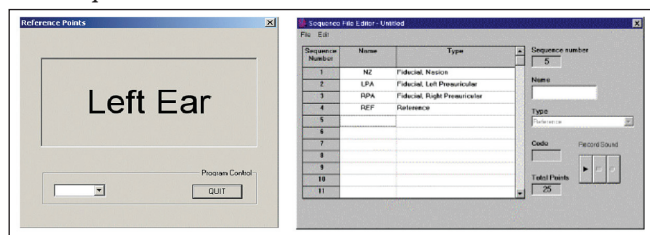
Rys. 12 Oprogramowanie Fastrak prezentujące wyniki pomiarów digitizerem Digitrak [29]
Źródło: opracowanie własne



Rys. 13 Wartości współrzędnych kartezjańskich elektrod układu 10-10 wraz z ich wizualizacją na trójwymiarowym 3-D modelu głowy; model głowy można obracać we wszystkich stopniach swobody – oprogramowanie EETrak
Źródło: opracowanie własne



Rys. 14 Przestrzenna wizualizacja zdigitalizowanych elektrod oraz funkcja kształtu (shape) – oprogramowanie Locator
Źródło: opracowanie własne



Rys. 15 Okna obu programów Eetrak i Locator z fazy ustalania „sztucznych” punktów orientacyjnych (fiducial)
Źródło: opracowanie własne

wkłada się tyk bananowy kabelka lub który „łapie się” krokodylkiem, to zdigitalizowany punkt znajdowałby się około 1-1,5 cm nad powierzchnią głowy.

Znacznie lepiej do procedury digitalizacji nadają się czepki elektrodowe. Końcówkę pióra umieszcza się w otworze elektrody, gdzie niemal dotyka powierzchni głowy. Należy przy tym pamiętać, aby pióro trzymać prostopadle, a nie ukośnie do powierzchni głowy.

Urządzenie jest w stanie tak przetwarzać dane z trzech odbiorników stanowiących stałe punkty na powierzchni głowy, aby móc zobrazować dane pozyskane z czwartego odbiornika – pióra elektronicznego (czwarty zmienny punkt).

Pomiary położenia elektrody dokonywane są na zasadzie triangulacji przestrzennej znanej z techniki GPS (*Global Positioning System*). Jest to możliwe przy wykorzystaniu poniższych równań:

$$\begin{bmatrix} \cos \text{ na osi X} & \cos \text{ na osi Y} & \cos \text{ na osi Z} \\ q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_3 q_0 - q_1 q_2) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_1 q_0 - q_3 q_2) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

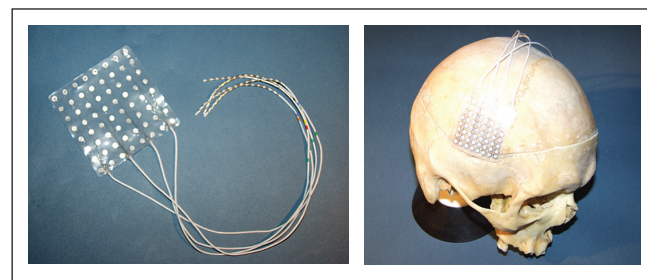
$$q = q_0 + iq_1 + jq_2 + kq_3$$

Oprogramowanie własne Fastrak digitizer dostarczane z digitizerem jest mało przyjazne dla użytkownika. Parametry położenia odbiorników i pióra, wyliczone z rachunku macierzewego, są prezentowane zbiorczo w oknie oprogramowania.

Istnieją jednak specjalistyczne oprogramowania, które umożliwiają przestrzenną wizualizację wyników pomiarów położenia elektrod EEG dla zastosowań neurofizjologicznych. Nie prezentują one położenia trzech odbiorników „kulistych”, a jedynie punkt wskazywany przez elektroniczne pióro.

Przykładem oprogramowań współpracujących z digitizerem Fastrak może być EETrak holenderskiej firmy ANT [32] oraz Locator amerykańskiej firmy SOURCE SIGNAL IMAGING [33].

W programie EETrak digitalizacji dokonuje się na elektrodach znajdujących się we wcześniej przygotowanych plikach (electrode files; *.elc). Plik elektrodowy można łączyć z danymi zawartymi w plikach <head model> (*.vol). Sposób wizualizacji elektrod jest w oprogramowaniu EETrak znacznie lepszy niż w programie Locator. Znacznie trudniejsze jest natomiast przygotowywanie plików elektrodowych, które miałyby zawierać do-



Rys. 17 64-elektrodowa matryca do korykografii firmy Ad-Tech (8 x 8, odstęp między elektrodami 10 mm)
Źródło: opracowanie własne

wolnie określoną liczbę elektrod. Plik elektrodowy jest plikiem ASCII i może być ręcznie edytowany. Wartości liczbowe współrzędnych XYZ zdigitalizowanych elektrod mogą być funkcją wtnij-wklej (*copy-paste*) przenoszone do odpowiednich oprogramowań dedykowanych cyfrowej analizie sygnału EEG.

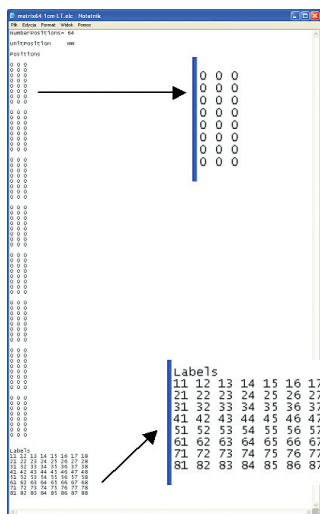
Z kolei w oprogramowaniu Locator lepsza jest metoda przygotowywania plików z niestandardowym zestawem elektrod. Już bowiem wewnątrz tego oprogramowania znajduje się specjalny edytor tego rodzaju plików.

Wyniki digitalizacji 64 elektrod z układu 10-10 wraz z ich wizualizacją zostały zaprezentowane na rysunku 13. Wartości XYZ są podawane w milimetrach od wyliczonego środka głowy.

Procedura samej digitalizacji elektrod w obu oprogramowaniach jest podobna. Na samym początku oprogramowanie żąda zaznaczenia „szytnych” punktów orientacyjnych (*fiducial*), jak punkt *nasion* Nz, oraz oba punkty przeduszne.

Po zdigitalizowaniu punktów stałych oprogramowanie „pyta” o kolejne elektrody zapisane w pliku elektrodowym. Ich digitalizacja następuje po wskazaniu końcem pióra i naciśnięciu znajdującego się na nim przycisku.

Próba digitalizacji elektrod o nietypowym położeniu



Rys. 18 Plik *.elc dla 64 elektrod z matrycy dla korykografii przygotowany do digitalizacji przez program EETrak

Źródło: opracowanie własne

Na rys. 18 przedstawiono wyniki digitalizacji matrycy złożonej z 64 elektrod (8 x 8) – stosowanej w korykografii – położonej w okolicy prawej skroni [34].

W programie EETrak za pomocą edytora tekstowego (np. notepad) przygotowuje się specjalny plik zawierający informacje o ilości elektrod (64), o wybranej jednostce pomiaru odległości (mm), o położeniu elektrod i ich nazwie. Predefiniując położenie elektrod, nie musimy posiłkować się żadnymi tabelarycznymi czy jakimikolwiek przybliżonymi wartościami. Położenie każdej elektrody może być zdefiniowane jako [0, 0, 0]. W procesie digitalizacji każda elektroda otrzyma adekwatną

realną wartość zgodną z jej rzeczywistym położeniem w kartezjańskiej przestrzeni XYZ.

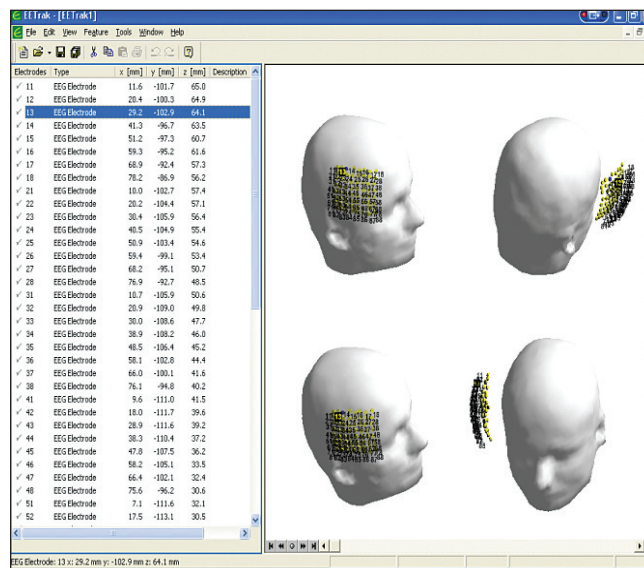
Ponieważ elektrody zdigitalizowanej matrycy elektrodowej nie odpowiadają elektrodom układu 10-20 – nie otrzymają nazw literowych, a jedynie liczbowe, według zasady:

- w rzędzie: 11, 12, ..., 17, 18,
- w kolumnie: 11, 21, ..., 71, 81

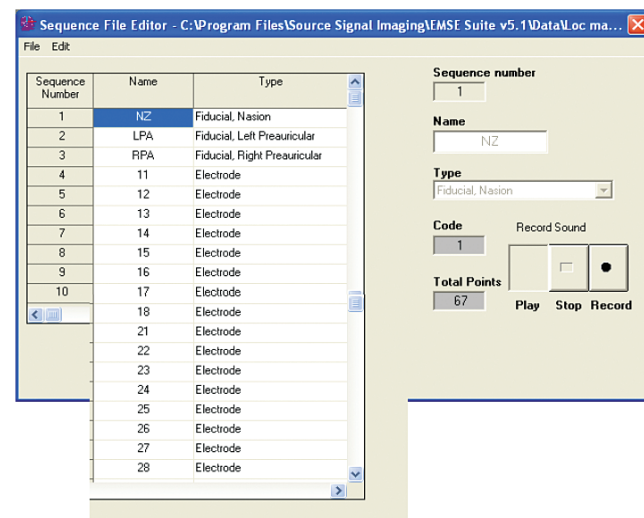
Okno programu EETrak prezentuje wyniki zarówno w postaci numerycznej, jak i zwizualizowanej.

Znajdujący się w oprogramowaniu Locator specjalny edytor umożliwia przygotowanie listy elektrod do digitalizacji w sposób znacznie prostszy, niż ma to miejsce w przypadku EETrak. Przygotowywana lista elektrod zapisywana jest do plików typu *.seq.

W Locatorze gorsza jest natomiast wizualizacja numerycznych wyników digitalizacji (brak dostępu na poziomie funkcji kopiuj-wklej) oraz bardziej skomplikowany jest plik eksportu tych danych (zawiera liczne niepotrzebne linie informacyjne).



Rys. 19 Zdigitalizowana matryca 64 elektrod w programie EETrak
Źródło: opracowanie własne



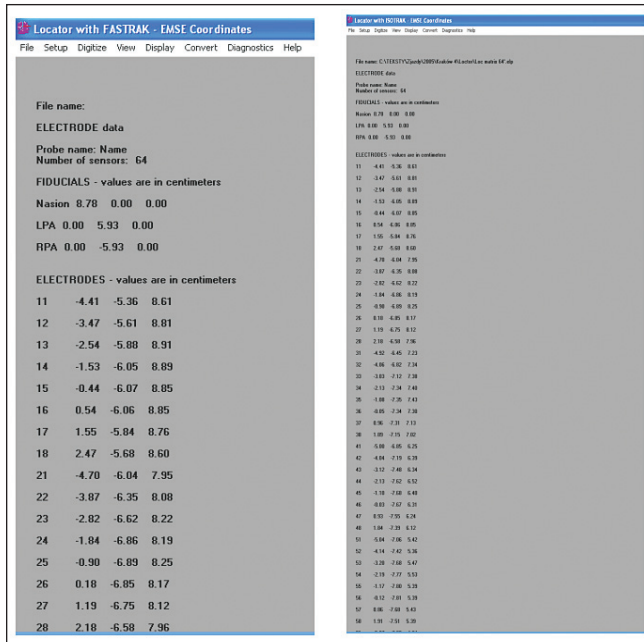
Rys. 20 Plik *.seq dla 64 elektrod z matrycy dla korykografii przygotowany do digitalizacji przez program Locator
Źródło: opracowanie własne

Wizualizacja zdigitalizowanych elektrod została zaprezentowana na poniższych rysunkach.

Okno Locatora ma nieco mniej możliwości niż ma to miejsce w przypadku EETrak. Elektrody mogą być zaprezentowane różnocześnie tylko w jednej projekcji (w EETrak – w maksymalnie aż 4 projekcjach). Elektrody można natomiast obracać w trzech stopniach swobody. Istnieje możliwość przybliżenia wizerunku elektrod.

Oba oprogramowania dysponują możliwością automatycznego eksportu wartości zdigitalizowanych elektrod do oprogramowań cyfrowego EEG dostarczanych przez odpowiednie firmy. W przypadku posługiwania się oprogramowaniem do EEG innych firm, przeniesienie wyników pomiarów możliwe jest na drodze ręcznej lub półautomatycznej (przez otwieranie odpowiednich plików systemowych).

Podsumowując, należy stwierdzić, iż sam układ 10-20 jest dobrą metodą rozmieszczania względnie niewielkiej ilości elektrod, jak ma to miejsce w przypadku badania rutynowego. W badaniach wykorzystujących technikę EEG wysokich rozdzielczości (hrEEG) rozszerzone układy 10-10 i 10-5 stanowią tylko pewną orientacyjną technikę rozlokowywania elektrod na głowie osoby badanej oraz nadawania im jednolitych nazw. Techniki digitaliza-

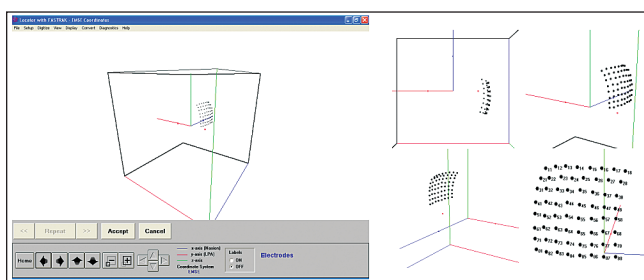


Rys. 21 Sposób prezentacji wyników digitalizacji elektrod w programie Locator
Źródło: opracowanie własne

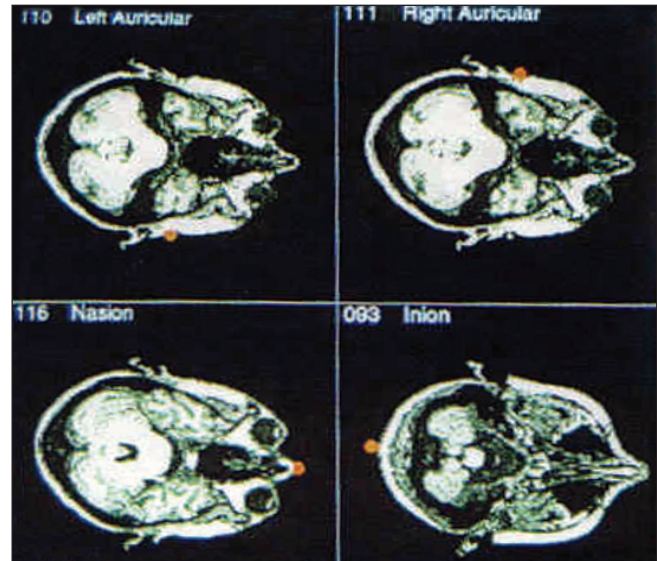
```

I: lister [c:\TEKSTY\jazdy\2005\W_rakow_4\Locator\oc matrix 64'.elp]
Blk: Edytuj Opcje Pomoc
3 2
//Probe file
//Minor revision number
1
//ProbeName
%N Name
//Probe type, number of sensors
0 64
//Position of Fiducials X+, Y+, Z- on the subject
%F 0.0878 0.0000 0.0000
%F 0.0000 0.0593 0.0000
%F 0.0000 -0.0593 0.0000
//Sensor type
%S 400
//Sensor name and data for sensor # 1
%N 11
-0.0441 -0.0536 0.0861
//Sensor type
%S 400
//Sensor name and data for sensor # 2
%N 12
-0.0347 -0.0561 0.0881
//Sensor type
%S 400
//Sensor name and data for sensor # 3
%N 13
-0.0254 -0.0588 0.0891
//Sensor type
%S 400
//Sensor name and data for sensor # 4
%N 14
-0.0153 -0.0605 0.0889
//Sensor type
%S 400
//Sensor name and data for sensor # 5
%N 15
-0.0044 -0.0607 0.0885
//Sensor type
%S 400
//Sensor name and data for sensor # 6
%N 16
0.0054 -0.0606 0.0885
//Sensor type
%S 400
//Sensor name and data for sensor # 7
%N 17
0.0155 -0.0584 0.0876
//Sensor type
%S 400
//Sensor name and data for sensor # 8
%N 18
0.0247 -0.0568 0.0860
//Sensor type
%S 400
//Sensor name and data for sensor # 9
%N 21
-0.0470 -0.0604 0.0795
//Sensor type
%S 400
    
```

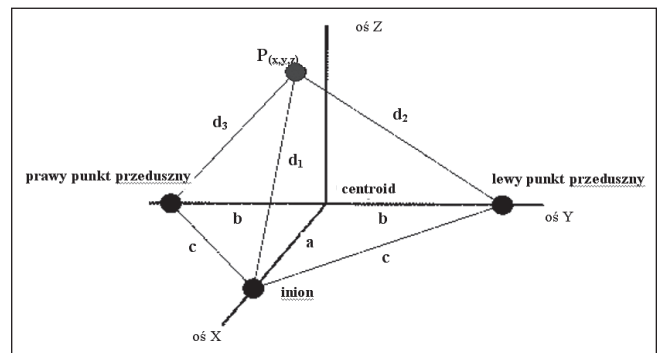
Rys. 22 Plik eksportu wyników digitalizacji elektrod w programie Locator
Źródło: opracowanie własne



Rys. 23 Zdigitalizowana matryca 64-elektrodowa w programie Locator
Źródło: opracowanie własne



Rys. 24 Miejsce markerów wskazane skanami MRI [35]
Źródło: <http://www.medcat.nl/megeeg/chap5.htm>



Rys. 25 Odległości między głównymi punktami orientacyjnymi głowy a wyznaczanym punktem-elektrodą [35]
<http://www.medcat.nl/megeeg/chap5.htm>

cji wydają się niezbędne, w celu precyzyjnego określenia topografii danej elektrody, tj. wyliczenia dokładnych jej współrzędnych.

Alternatywą do wyżej wymienionych metodą wyznaczania położenia punktów-elektrod na powierzchni głowy jest technika posiłkująca się badaniem neuroobrazowania typu MRI (*Magnetic Resonance Imagine*) [35]. Za pomocą skanów MRI możliwe jest wyznaczanie położenia głównych punktów orientacyjnych – tych samych, co w technice digitalizacji: punktu *nasion* i dwóch punktów przedusznych. Możliwe jest wyznaczenie również punktu *inion*, lecz przeprowadzenie badania MRI przy jego umieszczeniu w okolicy potylicznej znacznikiem może być niewygodnie dla pacjenta.

Dysponując położeniem trzech głównych punktów orientacyjnych, można wyznaczyć środek geometryczny głowy (centroid) i wytyczyć główne osie kartezjańskie.

Wyliczenie położenia szukanego punktu-elektrody we współrzędnych kartezjańskich odbywa się zgodnie z poniższymi wzorami:

$$P_x = \frac{(2a^2 - 2b^2 - d_1^2 + d_2^2 + d_3^2)}{4a}$$

$$P_y = \frac{(d_3^2 - d_2^2)}{4b}$$

$$P_z = \pm \sqrt{d_2^2 - P_x^2 - (P_y - b)^2}$$

Zastosowanie techniki obrazowania rezonansu magnetycznego MRI wymaga użycia specjalnych czepków. Ponadto dany skan MRI uwidacznia tylko część elektrod badanego czepka, dlatego też przedstawienie całego wieloelektrodowego

czepka EEG wymagałoby zastosowania specjalistycznego oprogramowania do rekonstrukcji trójwymiarowego obrazu głowy. Dodatkowo musiałyby istnieć specjalistyczne oprogramowanie, które pozwalałoby na automatyczne wyliczanie położenia licznych wskazywanych piórem elektronicznym punktów-elektrod.

W związku z wymienionymi zastrzeżeniami, obecnie technika oznaczania położenia punktów-elektrod za pomocą badania MRI nie ma właściwie większych zalet w porównaniu z metodami elektromagnetycznej lub ultradźwiękowej digitalizacji.

Wnioski

System elektromagnetycznej digitalizacji Digitizer wraz z oprogramowaniem dokonującym analizy i wizualizacji pomiarów położenia elektrod jest cennym narzędziem w eksperymentalnych badaniach neurofizjologicznych. Pozwala on na wyznaczenie bardzo dokładnej pozycji elektrod rejestrujących sygnał EEG, co jest niezwykle ważne w precyzyjnej analizie dynamiki aktywności źródeł czynności bioelektrycznej mózgu. ■

Literatura

1. E. Niedermeyer, F. Lopes da Silva (red.): *Electroencephalography. Basic principles, clinical applications and related fields*, Williams & Wilkins, A Waverly Company, Baltimore 2004.
2. C.D. Binnie, E. Dekker, A. Smit, G. Van der Linden: *Practical considerations in the positioning of EEG electrodes*, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.*, vol. 53, 1982, s. 453-458.
3. H.H. Jasper: *The ten-twenty electrode system of the International Federation; Report of the committee on methods of clinical examination in electroencephalography*, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.*, no. 10, 1958, s. 371-375.
4. R.W. Homan, J. Herman, P. Purdy: *Cerebral location of international 10-20 system electrode placement*, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.*, vol. 66(4), 1987, s. 376-382.
5. G.H. Klem, H.O. Lüders, H.H. Jasper, C. Elger: *The ten-twenty electrode system of the International Federation, The International Federation of Clinical Neurophysiology*, [in:] D. Deuschl, A. Eisen (red.): *Recommendations for the practice of clinical neurophysiology: Guidelines of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl.*, vol. 52, 1999, s. 3-6.
6. F. Sharbrough, G.-E. Chatrian, R.P. Lesser, H. Lüders, M. Nuwer, T.W. Picton: *American Electroencephalographic Society Guidelines for Standard Electrode Position Nomenclature*, *J Clin Neurophysiol.* vol. 8, 1991, s. 200-202.
7. T. Zyss: *Definiowanie położenia elektrod dla techniki EEG w standardowym układzie 10-20*, XI Krajowa Konferencja „Komputerowe wspomaganie badań naukowych”, XI KK Kowban 2004 – Materiały, Wrocław – Polanica-Zdrój, 2004, s. 81-86.
8. T. Zyss (red.): *Zastosowanie układu 10-20 do rozmieszczania elektrod do EEG*, Biblioteka ELMIKO, Krakowskie Wydawnictwo Medyczne, Kraków 2007.
9. G.E. Chatrian, E. Lettich, P.L. Nelson: *Modified nomenclature for the “10%” electrode system*, *J Clin Neurophysiol.*, vol. 5, 1988, s. 183-186.
10. A.S. Gevins, J. Le, N.K. Martin, B. Reutter, J. Desmond, P. Brickett: *High resolution EEG: 124-channel recording, spatial deblurring and MRI integration methods*, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.*, vol. 90, 1994, s. 337-358.
11. D. Yao, Z. Yin, X. Tang, L. Arendt-Nielsen, A.C. Chen: *High-resolution electroencephalogram (EEG) mapping: scalp charge layer*, *Phys. Med. Biol.*, vol. 49(22), 2004, s. 5073-5086.
12. ANT: *ASA-lab 256 channel recording. 256 channel raw data*, <http://www.ant-neuro.com/products/asa-lab/cases/1/>.
13. Neuroscan: *SynAmps RT*, [http://www.neuroscan.com/images/AE074_1%20SynAmps%20RT%20specs%20sheet-final%20\(3\).pdf](http://www.neuroscan.com/images/AE074_1%20SynAmps%20RT%20specs%20sheet-final%20(3).pdf).
14. L. Astolfi, F. Cincotti, D. Mattia, S. Salinari, C. Babiloni, A. Basilisco, P.M. Rossini, L. Ding, Y. Ni, B. He, M.G. Marciani, F. Babiloni: *Estimation of the effective and functional human cortical connectivity with structural equation modeling and directed transfer function applied to high-resolution EEG*, *Magn Reson Imaging.*, vol. 22(10), 2004, s. 1457-1470.
15. J. Le, M. Lu, E. Pellouchoud, A. Gevins: *A rapid method for determining standard 10/10 electrode positions for high resolution EEG studies*, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.*, vol. 106, 1998, s. 554-558.
16. R. Oostenveld, P. Praamstra: *The five percent electrode system for high-resolution EEG and ERP measurements*, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.*, vol. 112, 2001, s. 713-719.
17. R. Oostenveld.: strona domowa www.smi.auc.dk/~roberto/electrode.htm (obecnie: <http://robertoostenveld.ruhosting.nl/>).
18. C.D. Binnie, E. Dekker, A. Smit, G. Van der Linden: *Practical considerations in the positioning of EEG electrodes*, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.*, vol. 53, 1982, s. 453-458.
19. Moberg Multimedia: *Fundamentals of neuromonitoring. Introduction to EEG electrode placement*, CD-ROM. Macromedia 1998.
20. A. Gevins, J. Le, P. Brickett, B. Reutter, J. Desmond: *Seeing through the skull: advanced EEGs use MRIs to accurately measure cortical activity from the scalp*, *Brain Topogr.*, vol. 4(2), 1991, s. 125-131.
21. S. Tong, N.V. Thankor (red.): *Quantitative EEG analysis methods and clinical applications*, Artech House Publishers, Nordwood 2009.
22. C.M. Michel, T. Koenig, D. Brandeis, L.R.R. Gianotti, J. Wackermann: *Electrical neuroimaging*, Cambridge University Press, Cambridge 2009.
23. EasyCap (FMS Falk Minow Services): *International 10/20 System for Electrode Placement*. [http://www.easycap.de/e/downloads/info_Standard_10_20.pdf](http://www.easycap.de/easycap/e/downloads/info_Standard_10_20.pdf)
24. K. Maurer (red.): *Topographic brain mapping of EEG and evoked potentials*, Springer Verlag, Berlin 1989.
25. P. Walerjan, A. Kołodziejak, R. Tarnecki: *Cyfrowe metody analizy EEG i potencjałów wywołanych*, [w:] W. Torbicz, L. Filipczyński, R. Maniewski, M. Nałęcz, E. Stolarski (red.): *Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000*, Biopomiary, vol. 2, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001, s. 443-462.
26. Brain Innovation B.V.: *BrainVoyager. Head Mesh Fiducial Points*. http://www.brainvoyager.com/bvqx/doc/UsersGuide/FlashHelp/TMSNeuronavigation/Head_Mesh_Fiducial_Points.htm.
27. Zebris Medical GmbH: *Elektroden-Positionierung*. <http://www.zebris.de/deutsch/medizin/medizin-elektroden-positionierung.php?navanchor=10012>
28. Zebris Medical GmbH: *Lokalisation und Repositionierung von EEG-Elektroden 3D Digitalisierung der Kopfform*. http://www.zebris.de/deutsch/pdf/d_Technische_Daten_ELGuide.pdf
29. Polhemus: *Fastrak – digital tracker*. <http://www.polhemus.com/fastrak.html>.
30. ANT: *3Space Fastrak Polhemus*. www.ant-software.nl/eetrak/fastrak.html.
31. Electro-Cap International Inc.: *Caps*. <http://www.electro-cap.com/>.
32. ANT: *eetrak 3D electrode localization*, <http://www.ant-neuro.com/products/eetrak>.
33. Source Signal Imaging (SSI) Inc.: *Locator – EMSE Suite Module Software*. <http://www.sourcesignal.com/locator.html>.
34. Ad-Tech Medical Instrument Corporation: *Epilepsy & Neurosurgery Product Guide – Epilepsy / long term monitoring (LTM) subdural grid electrodes*. <http://www.adtechmedical.com/MKTG-3006-Rev-J.pdf>.
35. H.J. Wieringa: *MEG, EEG and the integration with Magnetic Resonance Image. Chapter V. Integration of the MEG and EEG with the MRI*. Ph.D, Thesis University of Twente Enschede, The Netherlands, 1993, <http://www.medcat.nl/megeeg/chap5.htm>.

otrzymano / received: 15.02.2010 r.

wersję poprawioną nadesłano /

corrected version submitted: 28.06.2010 r.

zaakceptowano / accepted: 06.01.2011 r.