

POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH
WYDZIAŁ INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

Projekt z Przetwarzania Obrazów Medycznych

**Segmentacja struktury mózgu na podstawie zdjęć
rezonansu magnetycznego**

Paulina Klimanek

Gliwice, 15 maja 2020

Spis treści

1. Wstęp teoretyczny	1
1.1 Budowa mózgowia	1
1.1.1 Mózg	2
1.1.2 Mózdzek	2
1.1.3 Pień mózgu	3
1.2 Obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego	3
1.3 Grupowanie FCM	4
2. Cel projektu	5
3. Specyfikacja wewnętrzna	6
4. Specyfikacja zewnętrzna	13
5. Wyniki i podsumowanie	17
5.1 Uzyskane wyniki	17
5.2 Podsumowanie	19

Spis rysunków

1.1	Budowa mózgowia [3]	1
1.2	Płaty mózgu [4]	2
1.3	Przekrój mózgu – istota biała i szara [9]	2
1.4	Zdjęcia rezonansu magnetycznego w dwóch płaszczyznach: a) strzałkowej oraz b) poprzecznej	3
3.1	Schemat blokowy aplikacji	6
4.1	Okno startowe aplikacji – a) dla płaszczyzny strzałkowej oraz b) poprzecznej	13
4.2	Widok wczytywania zdjęć – a) wybór plików oraz b) zapalona lampka po poprawnym wczytaniu zdjęć	14
4.3	Zaznaczanie punktów dla segmentacji ręcznej w przypadku płaszczyzny a) poprzecznej oraz b) strzałkowej	15
4.4	Widok aplikacji po rekonstrukcji modelu 3D na podstawie ręcznej segmentacji w płaszczyźnie poprzecznej	16
4.5	Widok aplikacji po rekonstrukcji modelu 3D na podstawie automatycznej segmentacji w płaszczyźnie strzałkowej	16
5.1	Wysegmentowana struktura mózgu w płaszczyźnie a) poprzecznej oraz b) strzałkowej	17
5.2	Błędnie wysegmentowane struktury mózgu w płaszczyźnie strzałkowej	18
5.3	Błędnie wysegmentowane struktury mózgu w płaszczyźnie poprzecznej	18
5.4	Modele uzyskane w płaszczyźnie strzałkowej z segmentacji a) ręcznej oraz b) automatycznej	19
5.5	Modele uzyskane w płaszczyźnie poprzecznej z segmentacji a) ręcznej oraz b) automatycznej	19

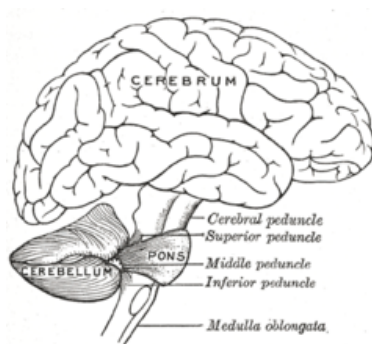
1. Wstęp teoretyczny

1.1 Budowa mózgowia

Strukturą, na jakiej skupia się projekt, jest centralna część ludzkiego ośrodkowego układu nerwowego - mózgowie (Rys. 1.1). W skład mózgowia wchodzi [2]:

- dwie półkule mózgu,
- mózdzek,
- pień mózgu.

Największą część mózgowia stanowią półkule mózgu, które wypełniając jamę czaszki, przykrywają pozostałe, dwie części mózgowia.

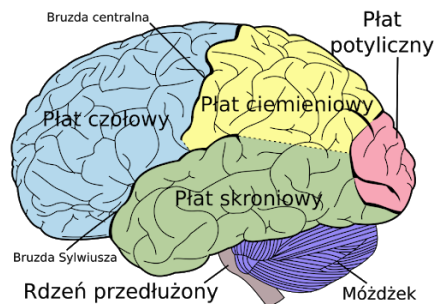


Rys. 1.1: Budowa mózgowia [3]

Znajdująca się na powierzchni kora mózgu, charakteryzuje się licznymi pofałdowaniami, zakrętami. Umożliwiają one podział na następujące na cztery płaty mózgu (Rys. 1.2) [2, 4]:

- płat czołowy (łac. *lobus frontalis*) – ośrodki kojarzeniowe (odpowiedzialne za powstawanie pojęć i myśli), funkcje poznawcze, rozumienie, podejmowanie decyzji, samoświadomość, w tym płacie umiejscowiony jest również ośrodek ruchu (kora motoryczna), a także ośrodek ruchowy mowy (ośrodek Broca),
- płat ciemieniowy (łac. *lobus parietalis*) – skupienie, możliwość dostrzeżenia elementów środowiska, lokalizacja kory sensorycznej, umożliwiającej odczuwanie temperatury oraz dotyku,

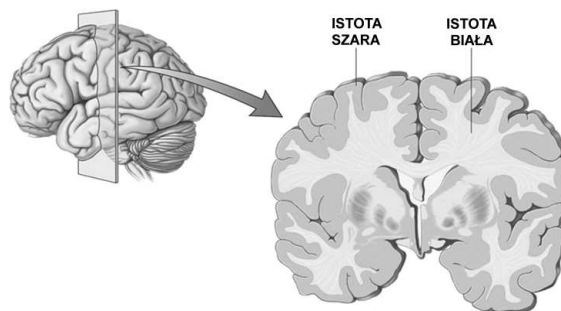
- płat potyliczny (łac. *lobus occipitalis*) – ośrodek wzroku,
- płat skroniowy (łac. *lobus temporalis*) – ośrodek słuchu oraz ośrodek czuciowy mowy (ośrodek Wernickiego), który odpowiada za przetwarzanie języka; płat skroniowy odpowiada również za zapamiętywanie i pamięć werbalną.



Rys. 1.2: Płaty mózgu [4]

Kora (łac. *cortex*) wraz z jądrami mózgu (łac. *nuclei nervosi*) wchodzi w skład istoty szarej (łac. *substantia grisea*) (Rys. 1.3), złożonej z ciał komórek nerwowych [7].

Istota biała (łac. *substantia alba*) jest z kolei skupiskiem wypustek neuronów – dendrytów i aksonów. Wypustki otoczone są osłonką mielinową [8].



Rys. 1.3: Przekrój mózgu – istota biała i szara [9]

1.1.1 Mózg

Mózg składa się z prawej oraz lewej półkuli, które oddzielone są od siebie szczeliną. Znajdujące się w niej ciało modzelowate (łac. *corpus callosum*) składa się z licznych włókien nerwowych, gwarantujących połączenie pomiędzy półkulami, a także co za tym idzie, pozwala ono na przepływ informacji między prawą i lewą półkulą [1, 2].

1.1.2 Mózdzek

Mózdzek (łac. *cerebellum*) to narząd odpowiadający za utrzymanie równowagi, koordynację ruchową, a także precyzyjność i płynność wykonywanych ruchów. Umiejscowiony jest w tylnym dole jamy czaszki [1, 2].

1.1.3 Pień mózgu

Ta część mózgowia, dokładniej rdzeń przedłużony mózgu, odpowiada za utrzymanie podstawowych funkcji życiowych (tj. oddychanie, regulacja pracy serca, ciśnienie tętnicze, temperatura organizmu, trawienie, funkcjonowanie narządów wewnętrznych, kichanie, kaszel, a także wymioty) [1,2].

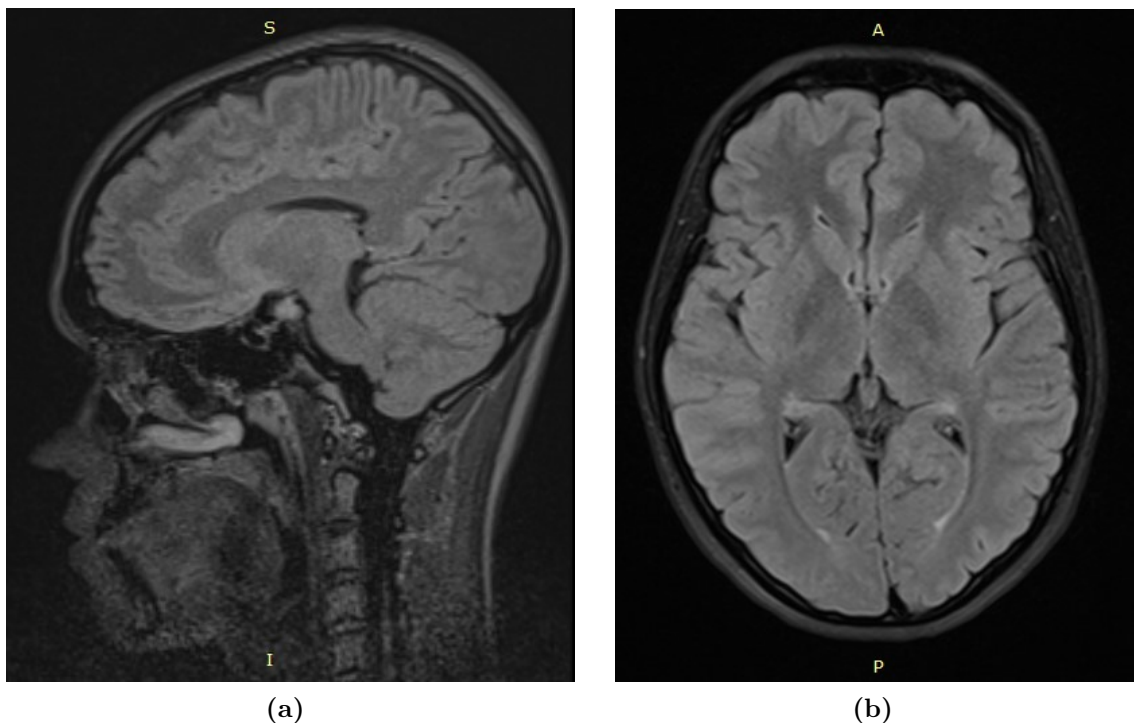
W jego skład wchodzi struktury, takie jak [2]:

- śródmózgowie,
- most (łac. *pons*),
- rdzeń przedłużony (łac. *medulla oblongata*).

1.2 Obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego

Rezonans magnetyczny jest nieinwazyjną metodą badania obrazowego, której szkodliwości jak dotąd nie dowiedziono. Badany obiekt poddaje się działaniu silnego stałego pola magnetycznego, gdzie nukleony wodoru ulegają częściowej polaryzacji, opisywanej wektorem magnetyzacji [5]. Obrazowanie metodą MR umożliwia ocenę struktury tkanek wewnętrznych, jak i ich analizę funkcjonalną [6].

Przykładowe obrazy uzyskane tą metodą przedstawione zostały na rysunku 1.4.



Rys. 1.4: Zdjęcia rezonansu magnetycznego w dwóch płaszczyznach: a) strzałkowej oraz b) poprzecznej

1.3 Grupowanie FCM

Algorytm FCM (ang. *Fuzzy C-Means*) umożliwia przypisanie obiektu do różnych grup z odpowiednim stopniem przynależności do poszczególnej grupy. Otrzymane w wyniku działania algorytmu grupy, są zbiorami rozmytymi [11]. Suma przynależności względem wszystkich grup wynosi 1 [10].

Stopień rozmycia (współczynnik m), to dodatkowy czynnik, który umożliwia wskazanie jak bardzo grupy powinny być rozmyte. Przyjmuje on wartości z zakresu $(1, \infty)$. Dla m zbliżającego się do 1+, otrzymany podział jest podziałem ostrym, natomiast im bliżej ∞ – podział rozmyty. Zazwyczaj przyjmuje się wartość $m = 2$ [10].

Wskaźnik grupowania dla metody FCM [10]:

$$J(\vec{U}, \vec{V}) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N u_{ik}^m \|\vec{x}_k - \vec{v}_i\|^2 \quad \vec{x}_k, \vec{v}_i \in \mathcal{F} \quad (1.1)$$

Powstałą macierz \vec{U} można poddać procedurze wyostrzania, binaryzacji, co zostanie wykorzystane w kodzie programu.

Prototypy oblicza się jako średnią ważoną przynależnością do danej grupy [10]:

$$\vec{v}_i = \frac{\sum_{k=1}^N u_{ik}^m \vec{x}_k}{\sum_{k=1}^N u_{ik}^m} \quad \forall 1 \leq i \leq c \quad (1.2)$$

Nowe elementy macierzy podziału obliczane są ze wzoru [10]:

$$u_{ik} = \frac{\|\vec{x}_k - \vec{v}_i\|^{\frac{-2}{m-1}}}{\sum_{z=1}^c (\|\vec{x}_k - \vec{v}_z\|^{\frac{-2}{m-1}})} \quad (1.3)$$

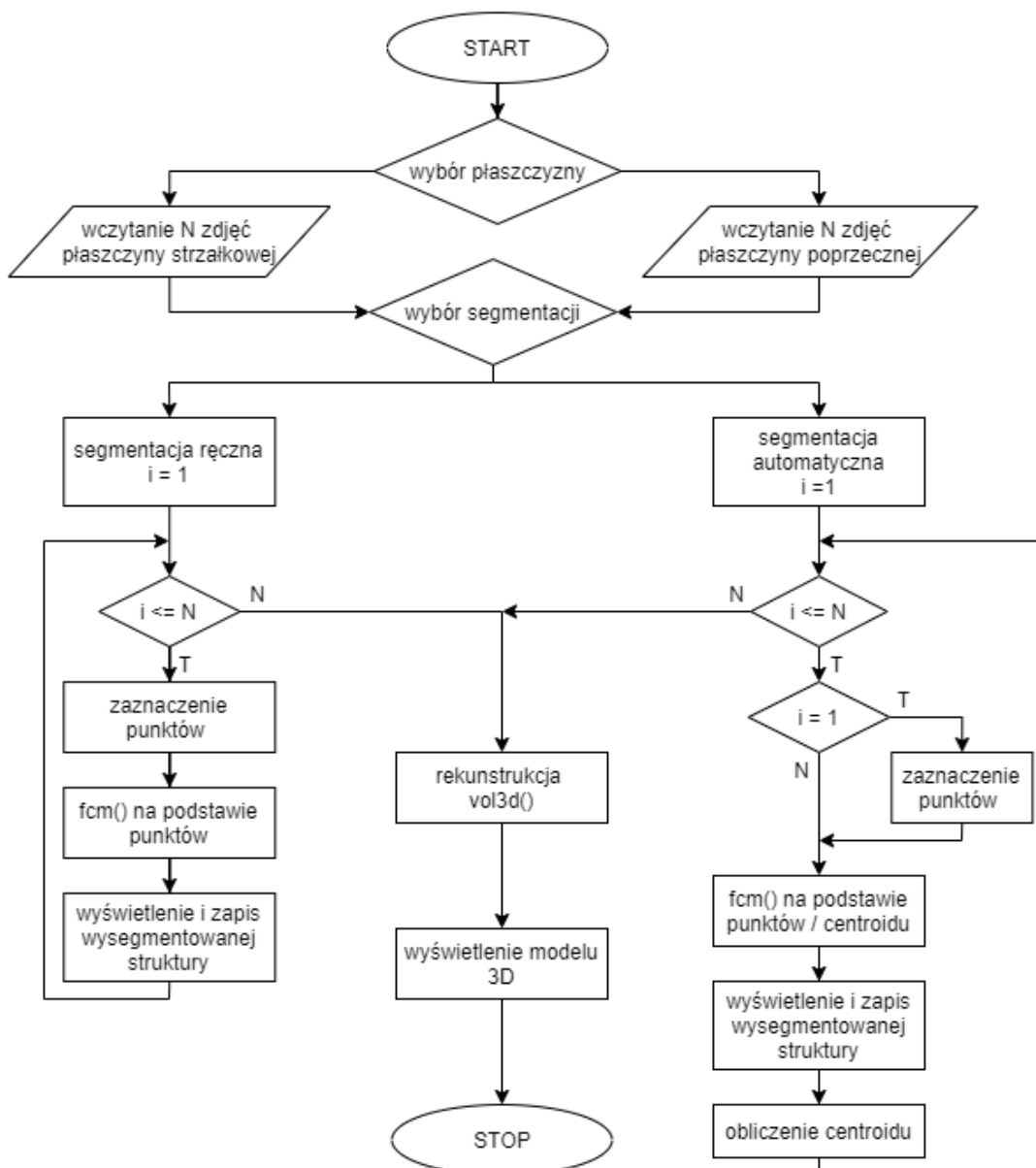
2. Cel projektu

Celem projektu było opracowanie programu wraz z interfejsem graficznym, pozwalającego na segmentację struktury mózgu na podstawie obrazów rezonansu magnetycznego wykonanych w dwóch płaszczyznach: strzałkowej oraz poprzecznej. Aplikacja umożliwia porównanie modeli 3D złożonych na podstawie zdjęć uzyskanych w wyżej wymienionych płaszczyznach.

Do wykonania projektu wykorzystano środowisko MatLab R2020a. Interfejs graficzny zaprojektowano przy użyciu narzędzia AppDesigner.

3. Specyfikacja wewnętrzna

Działanie aplikacji przedstawia uproszczony schemat blokowy widoczny na rysunku 3.1.



Rys. 3.1: Schemat blokowy aplikacji

Z uwagi na analogię działania aplikacji dla płaszczyzny strzałkowej i poprzecznej, kod programu zostanie zaprezentowany dla jednej z nich – płaszczyzny strzałkowej:

wczytajSPushed()

Funkcja pozwalająca na wczytanie serii obrazowej (plików typu DICOM) z eksploratora plików. Po prawidłowym wczytaniu zdjęć, w GUI zapala się zielona lampka, w przeciwnym przypadku pozostaje czerwona i wyświetla się komunikat błędu.

```
1 function wczytajSPushed(app, event)
    try
        strzalkowa = uigetfile('*.dcm','Select One or More Files',
                               'MultiSelect','on');
        save('strzalkowa.mat','strzalkowa')
5
        app.lampkaWS.Color = [0.39,0.83,0.07];
    catch
        msgbox('Wystąpił błąd podczas wczytywania obrazów!','Error','error')
9        app.lampkaWS.Color = [1.00,0.41,0.16];
    end
end
```

segRecznieSButtonPushed()

Funkcja obsługująca segmentację ręczną struktury mózgu na podstawie wprowadzonej serii zdjęć. Dla każdego ze zdjęć użytkownik zaznacza 2 punkty na wyświetlonym w osobnym oknie obrazie (punkt należący oraz nienależący do segmentowanej struktury). Struktura zostaje segmentowana przy użyciu funkcji *fcm()* [12].

```
1 function segRecznieSButtonPushed(app, event)
    try
        % wczytanie zdjęć
        load('strzalkowa');
5        [~,b] = size(strzalkowa);
    catch
        msgbox('Wystąpił błąd – obrazy nie zostały wczytane poprawnie',
              'Error','error')
    end
9
    try
        for i=1:b
            filename = strzalkowa{: , i};
```

```
13     OBRAZ = dicomread(filename);
    I(:, :) = double(OBRAZ);
    figure('Name', 'Wybór punktów')
    imshow(I, [])
17     title('Obraz MRI mózgu')

    data = reshape(I, [], 1);
    % wybór pierwszego punktu (należącego do struktury)
21     [xo, yo] = ginput(1);
    xo = round(xo);
    yo = round(yo);

25     hold on;
    p = plot(xo, yo, '*');
    set(p, 'MarkerSize', 10);
    set(p, 'Color', 'g');

29     % punkt należący do struktury
    [xp, yp] = ginput(1);
    xp = round(xp);
33     yp = round(yp);

    hold on;
    p = plot(xp, yp, '*');
37     set(p, 'MarkerSize', 10);
    set(p, 'Color', 'b');

    % określenie liczby klas
41     klasa_obszaru = 1;
    klasa_pozaobszarem = 1;
    ilosc_klas = 2;

45     while (klasa_obszaru == klasa_pozaobszarem)
        % grupowanie fcm - fuzzy c-means clustering
        [center, U, ~] = fcm(data, ilosc_klas, [NaN NaN NaN 0]);
        [~, nrklasy] = max(U', [], 2);
49         I_klasy = zeros(size(I));
        I_nr_klas = zeros(size(I));
        maxnrklasy = max(nrklasy);
        for j = 1:maxnrklasy
53             idx = find(nrklasy == j);
            I_klasy(idx) = (ones(length(idx), 1) * center(j));
            I_nr_klas(idx) = j;
        end
    end
```

```
57         klasa_obszaru=I_nr_klas(yo,xo);
        klasa_pozaobszarem=I_nr_klas(yp,xp);
        ilosc_klas=ilosc_klas+1;
        if ilosc_klas>5 %warunek zakończenia
61             break;
        end
    end
end

65     idx=find(I_nr_klas==klasa_obszaru);

    macierz=zeros(size(I));
    macierz(idx)=1;

69     wiersz=[xo xo];
    kolumna=[yo yo];

73     % wysegmentowany obraz
    wynikSegmentacji=bwselect(macierz,wiersz,kolumna,4);
    % wyświetlenie wysegmentowanej struktury
    figure
77     imshow(wynikSegmentacji);
    title('Wysegmentowana struktura mózgu');
    % przygotowanie do zapisu wysegmentowanej struktury jako
    plik .png
    segm_file = [num2str(i),'.png'];
81     imwrite(wynikSegmentacji,segm_file);
    close

    % wyświetlenie obrazu w GUI i zapalenie lampki
85     app.ImageS.ImageSource = segm_file;
    app.lampkaRecznieS.Color = [0.39,0.83,0.07];

end
89 catch

    msgbox('Wystąpił błąd podczas segmentacji!','Error','error')
    app.lampkaRecznieS.Color = [1.00,0.41,0.16];

end
93 end
```

segAutoSButtonPushed()

Funkcja obsługująca segmentację automatyczną struktury mózgu. Dla pierwszego zdjęcia użytkownik zaznacza 2 punkty na wyświetlonym w osobnym oknie obrazie (punkt należący oraz nienależący do segmentowanej struktury). Dla kolejnych zdjęć punkty te wyznaczone są na bazie centroidu zdjęcia poprzedniego. Ze względu na długość kodu zostaną przedstawione jedynie modyfikacje wprowadzone względem funkcji *segRecznieSButtonPushed()*.

```

if (i==1)
    % dla pierwszego obrazu wybór punktów ręcznie
3   figure ( 'Name', 'Wybór punktów' )
    imshow(I, [])
    title ( 'Obraz MRI mózgu' )
    % punkt należący do struktury
7   [xo, yo]=ginput (1);
    xo=round(xo);
    yo=round(yo);

11  hold on;
    p=plot(xo, yo, '*');
    set(p, 'MarkerSize', 10);
    set(p, 'Color', 'g');

15  % punkt nienależący do struktury
    [xp, yp]=ginput (1);
    xp=round(xp);
19  yp=round(yp);

    hold on;
    p=plot(xp, yp, '*');
23  set(p, 'MarkerSize', 10);
    set(p, 'Color', 'b');
else
    %dla każdego kolejnego obrazu - na podstawie centroidu
    poprzedniego
27  xo = round(centX);
    yo = round(centY);
    xp = 1;
    yp = 1;
31 end

1  % obliczenie centroidu wysegmentowanej struktury
    stats = regionprops(wynikSegmentacji);
    centroid = stats.Centroid;
    % dostanie się do współrzędnych X i Y centroidu

```

```
5 centX = centroid(1,1);  
centY = centroid(1,2);
```

zlozSButtonPushed()

Funkcja obsługująca klawisz „Złóż model”. Wynikiem jej działania jest pojawienie się zdjęcia trójwymiarowego modelu, uzyskanego wskutek rekonstrukcji z użyciem funkcji *vol3d()*. Model zostaje również wyświetlony w osobnej figurze, co pozwala na jego rotację [13].

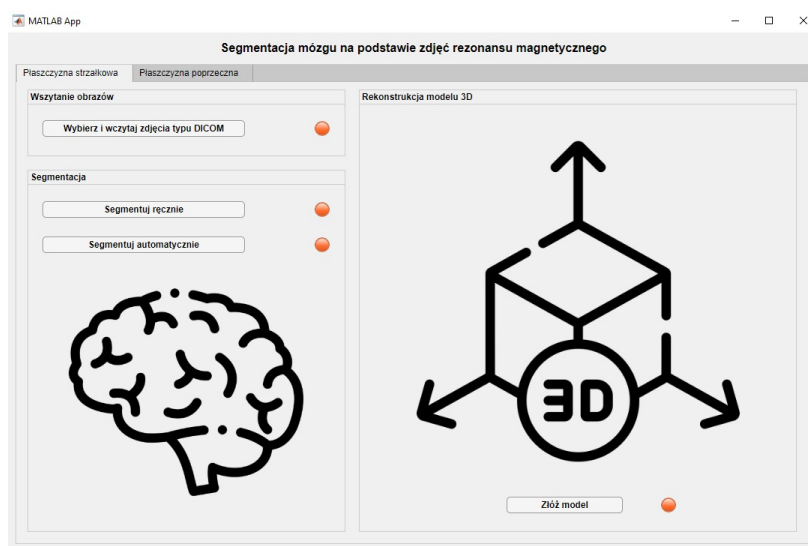
```
function zlozSButtonPushed(app, event)  
2 try  
    load('strzalkowa');  
    [~,b] = size(strzalkowa);  
catch  
6     msgbox('Wystąpił nieoczekiwany błąd','Error','error')  
end  
  
try  
10     for i=1:b  
        if i==1  
            nazwapliku = sprintf('%d', i);  
            obraz = [nazwapliku, '.png'];  
14            data = imread(obraz);  
  
            else  
                nazwapliku = sprintf('%d', i);  
                obraz = [nazwapliku, '.png'];  
18                obraz2 = imread(obraz);  
                data = cat(3,data,obraz2);  
  
            end  
        end  
22    catch  
        msgbox('Wystąpił błąd podczas wczytywania zdjęć struktur  
            po rekonstrukcji!','Error','error')  
    end  
  
26    try  
        img = figure;  
        H = vol3d('CData',data);  
        [x, y, ~] = size(data);  
30        axis tight;  
        view(3);  
        daspect([x y 130])  
        alphamap('decrease')
```

```
34     colormap([0.30 0.74 0.93])
        alphamap(0.02 .* alphamap);

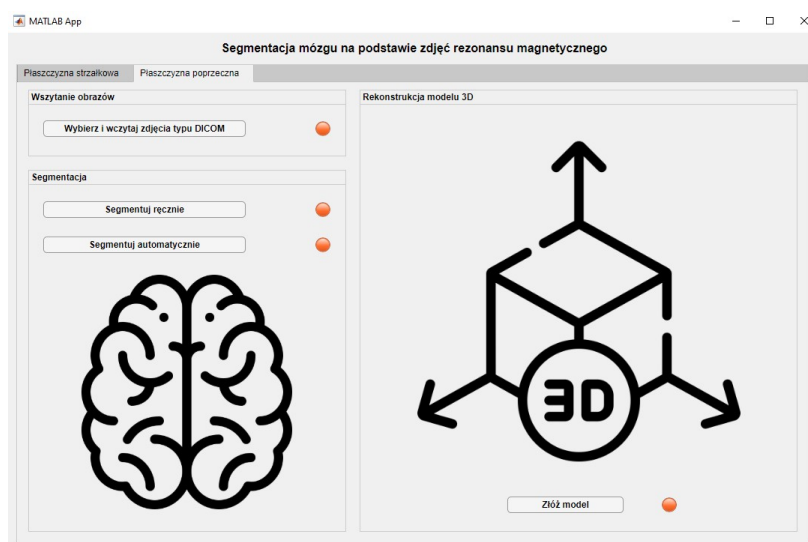
        % zastępstwo za wyświetlanie modelu w axes
38     saveas(img, 'modelS', 'jpg')
        app.modelS.ImageSource = imread('modelS.jpg');
        app.lampkaZS.Color = [0.39,0.83,0.07];
    catch
42     msgbox('Wystąpił błąd podczas rekonstrukcji!', 'Error', 'error')
        app.lampkaZS.Color = [1.00,0.41,0.16];
    end
end
```

4. Specyfikacja zewnętrzna

Na zaprojektowany interfejs graficzny składają się dwie zakładki dostępne w oknie aplikacji – zakładka osi strzałkowej (Rys. 5.1a) oraz poprzecznej (Rys. 5.1b).



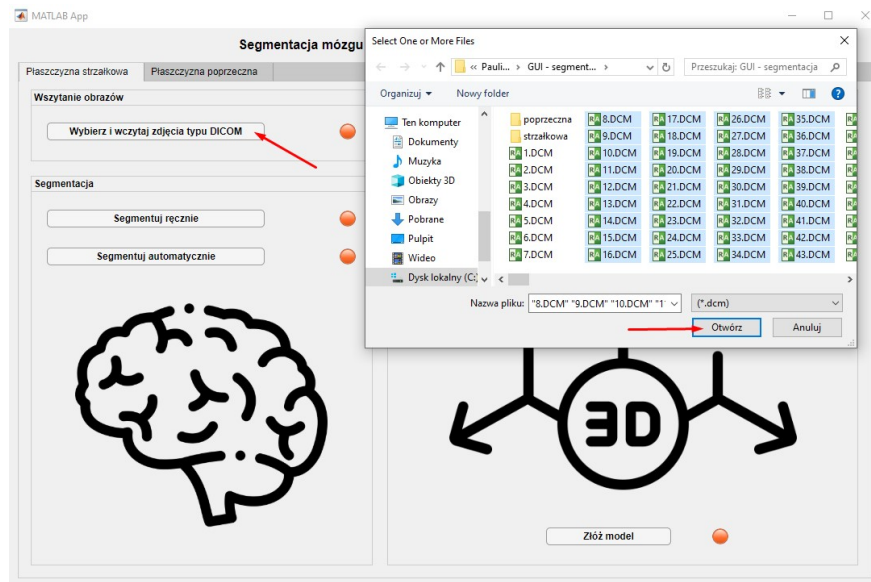
(a)



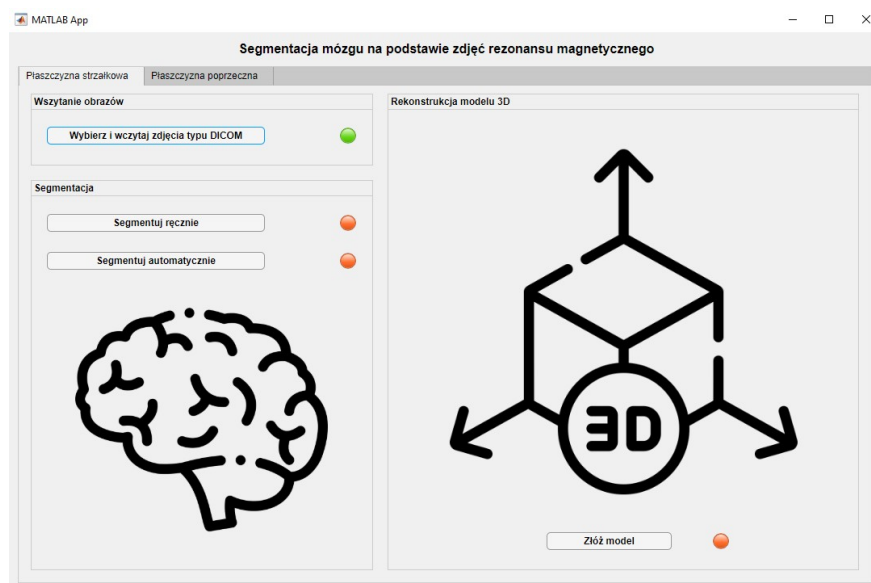
(b)

Rys. 4.1: Okno startowe aplikacji – a) dla płaszczyzny strzałkowej oraz b) poprzecznej

Wczytanie serii obrazowej następuje po wciśnięciu klawisza „Wybierz i wczytaj zdjęcia typu DICOM” (Rys. 4.2). Otwiera się okno eksploratora plików, gdzie można wybrać dowolną liczbę zdjęć, która zostanie poddana segmentacji.



(a)

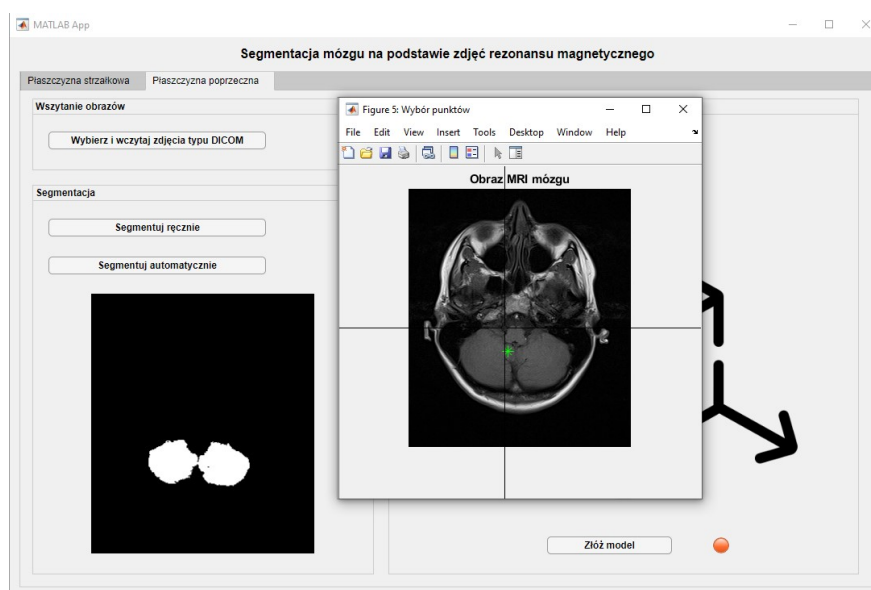


(b)

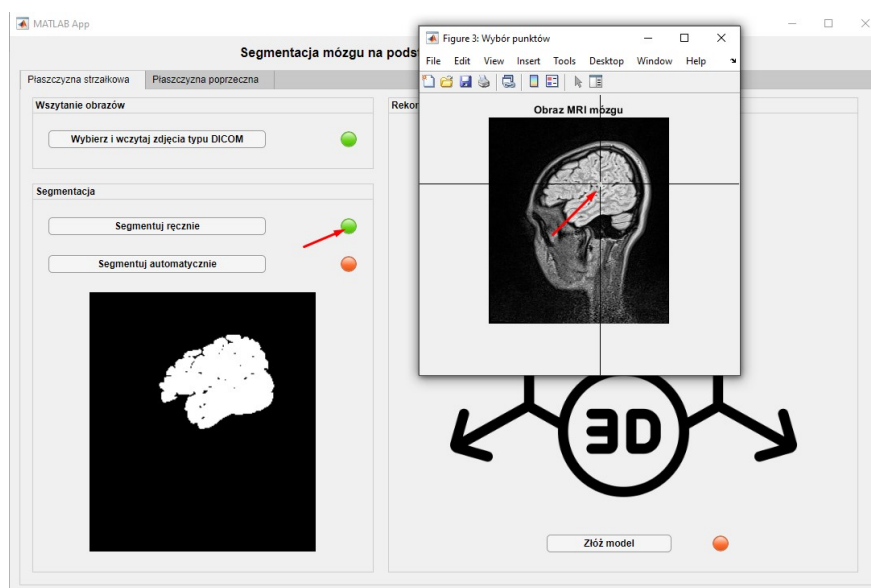
Rys. 4.2: Widok wczytywania zdjęć – a) wybór plików oraz b) zapalona lampka po poprawnym wczytaniu zdjęć

W sekcji „Segmentacja” dostępne są dwie możliwości – segmentacja ręczna bądź automatyczna. Widok wyboru punktów struktury (Rys. 4.3) dostępny jest dla pierwszego zdjęcia w przypadku segmentacji automatycznej oraz dla każdego – przy wyborze segmentacji ręcz-

nej.



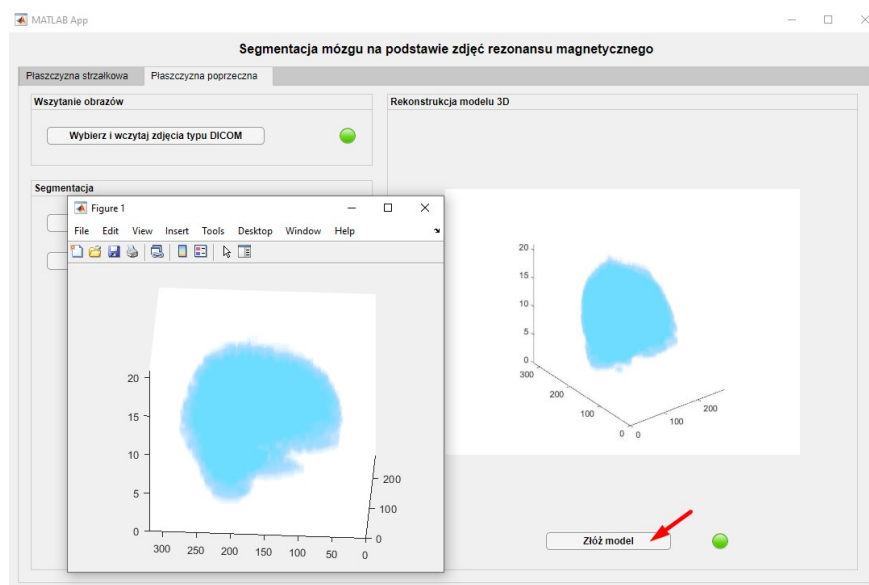
(a)



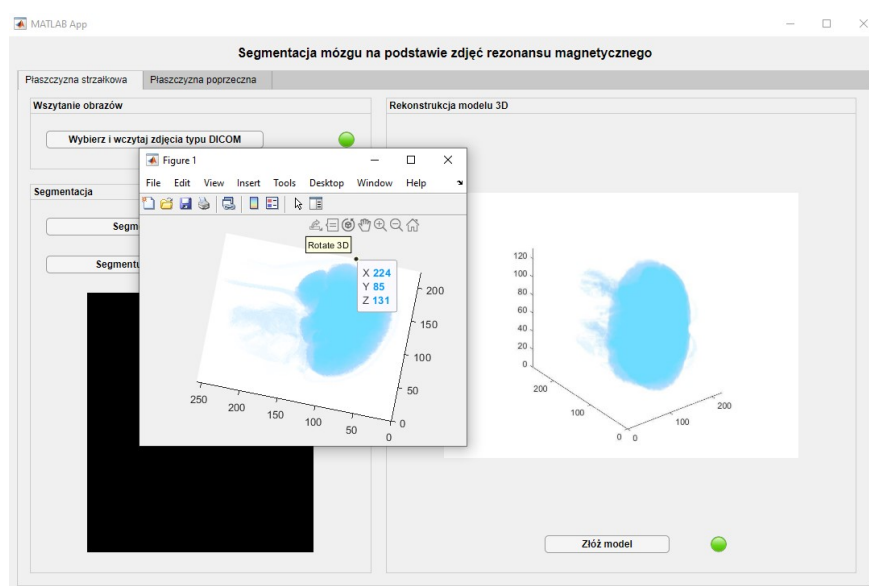
(b)

Rys. 4.3: Zaznaczanie punktów dla segmentacji ręcznej w przypadku płaszczyzny a) poprzecznej oraz b) strzałkowej

Po zakończeniu segmentacji, w sekcji „Rekonstrukcja modelu 3D” dostępny jest klawisz „Złóż model”, po którego wciśnięciu w oknie aplikacji pojawia się zdjęcie zrekonstruowanego mózgu, a w osobnym oknie (figurze) widoczny jest model 3D, umożliwiający użytkownikowi jego obrót (Rys. 4.4 i 4.5).



Rys. 4.4: Widok aplikacji po rekonstrukcji modelu 3D na podstawie ręcznej segmentacji w płaszczyźnie poprzecznej



Rys. 4.5: Widok aplikacji po rekonstrukcji modelu 3D na podstawie automatycznej segmentacji w płaszczyźnie strzałkowej

5. Wyniki i podsumowanie

5.1 Uzyskane wyniki

Zdecydowanie dokładniejsze wyniki otrzymuje się przy wykorzystaniu segmentacji ręcznej – przykłady prawidłowo wysegmentowanych struktur przedstawione są na rysunku 5.1. Jednak ze względu na rozmiar serii obrazowej (130 zdjęć w płaszczyźnie strzałkowej oraz 30 zdjęć w płaszczyźnie poprzecznej), segmentacja ręczna jest uciążliwa. Zautomatyzowana metoda, wykorzystująca centroid obrazu z poprzedniej iteracji działa szybko, jednak nie tak dokładnie. W środku serii obrazowej (przekroje w okolicy środka głowy), segmentowana struktura rozlewa się z uwagi na zbliżoną intensywność pikseli otaczających struktur. Błędnie wysegmentowane struktury przedstawiają rysunki 5.2 oraz 5.3.

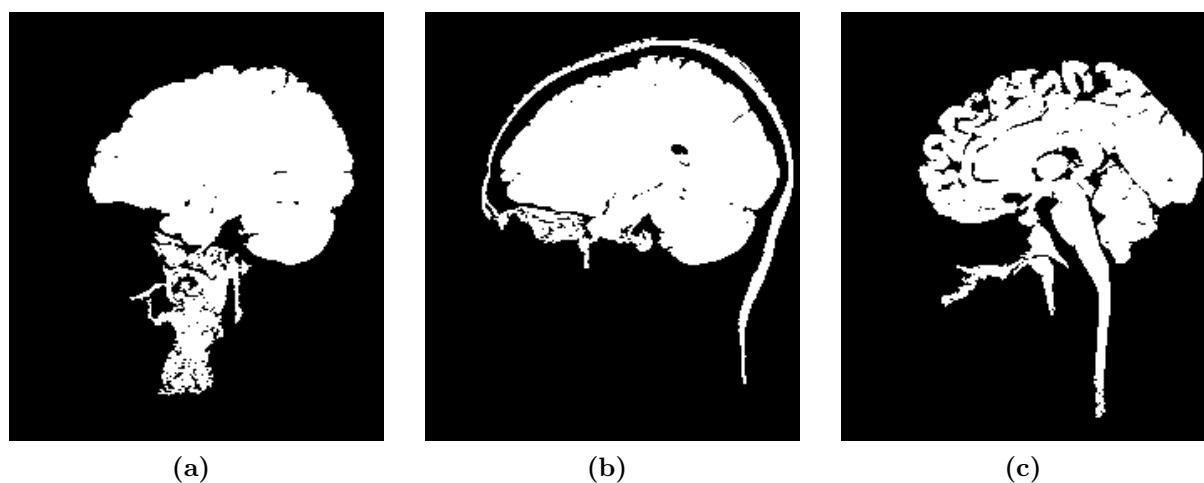


(a)

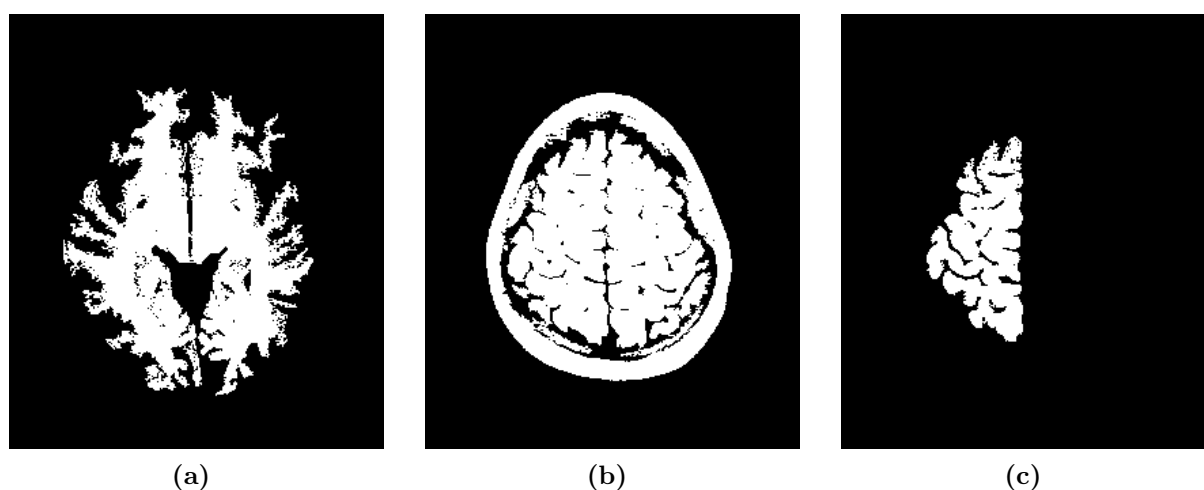


(b)

Rys. 5.1: Wysegmentowana struktura mózgu w płaszczyźnie a) poprzecznej oraz b) strzałkowej

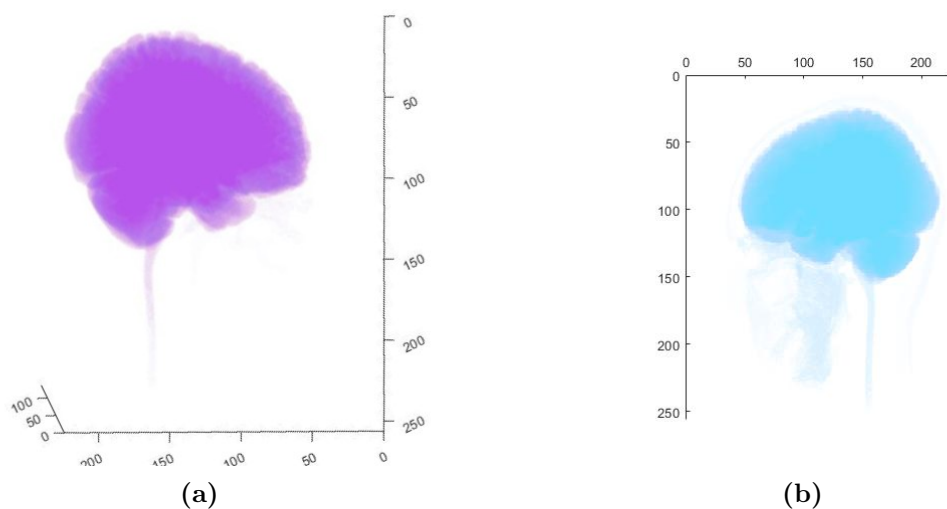


Rys. 5.2: Błędnie wysegmentowane struktury mózgu w płaszczyźnie strzałkowej

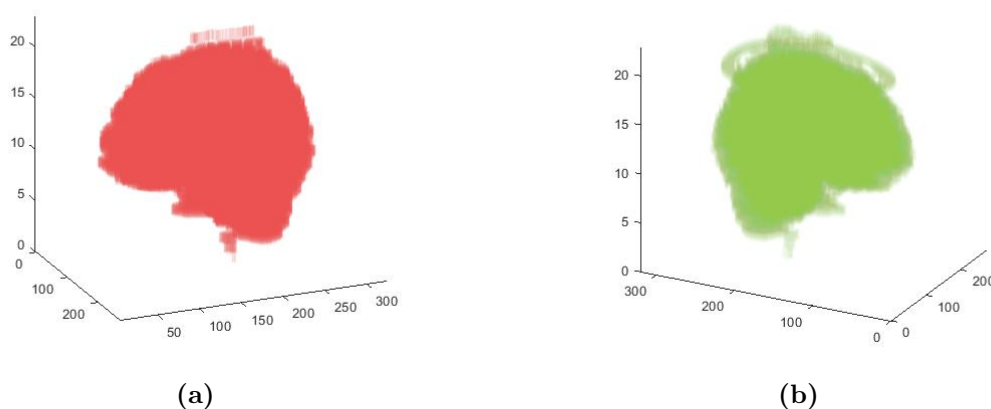


Rys. 5.3: Błędnie wysegmentowane struktury mózgu w płaszczyźnie poprzecznej

Uzyskane trójwymiarowe modele (Rys. 5.4 oraz 5.5) różnią się w znaczny sposób w zależności od płaszczyzny w jakiej zostały wykonane obrazy, a przede wszystkim od grubości warstwy. W przypadku płaszczyzny strzałkowej, gdzie warstwy były oddalone od siebie o odległość ponad 6 razy mniejszą niż w płaszczyźnie poprzecznej, model jest znacznie dokładniejszy a jego brzegi są bardziej wygładzone. Widoczne są liczne wycieki, szczególnie w przypadku płaszczyzny strzałkowej 5.4b.



Rys. 5.4: Modele uzyskane w płaszczyźnie strzałkowej z segmentacji a) ręcznej oraz b) automatycznej



Rys. 5.5: Modele uzyskane w płaszczyźnie poprzecznej z segmentacji a) ręcznej oraz b) automatycznej

5.2 Podsumowanie

Cel projektu został spełniony – powstała aplikacja pozwalająca na stworzenie modeli trójwymiarowych struktury mózgu na podstawie serii obrazowych z dwóch różnych płaszczyzn i ich porównanie.

Wykorzystana metoda segmentacji – grupowanie Fuzzy C-Means (FCM) – daje najlepsze względem innych metod wyniki dla wykorzystanych serii obrazowych. Niemniej jednak dokładność segmentacji w przypadku poszczególnych przekrojów nie jest satysfakcjonująca. Powstałe wycieki wprowadzają zakłócenia w rekonstruowany model mózgu.

Przeprowadzenie ręcznej segmentacji zdecydowanie wpływa na poprawę dokładności otrzymanych wyników, jednak wiąże się z dużym nakładem czasowym. Niestety, wybieranie punktów przez użytkownika, nie zawsze daje oczekiwane wyniki – mimo doboru „lepszych” punktów, algorytm nie zawsze pozwala na poprawną segmentację zaznaczonej struktury. Zbliżona intensywność pikseli należących do otaczających mózg struktur, a także niewielkie rozmycie obrazu, niekorzystnie wpływają na działanie programu.

Automatyczna segmentacja znacząco skraca czas pracy aplikacji, a z uwagi na dużą liczbę przekrojów serii obrazowej w płaszczyźnie strzałkowej, stworzony wskutek jej działania model nie posiada deformacji struktury mózgu – powstałe wycieki i błędy nie wpływają znacząco na wygląd modelu.

Wprowadzenie możliwości powtórzenia segmentacji struktury z danego przekroju zdecydowanie wpłynęłoby na rozwój aplikacji i umożliwiłoby jej zastosowanie dla różnych serii zdjęciowych.

Całość projektu dostępna pod linkiem do dysku Google:

<https://drive.google.com/drive/folders/1kxh88Lmo91HmilhKBNzEBLrD46DRgiXI?usp=sharing>

Bibliografia

- [1] Adam Bochenek, Michał Reicher „*Anatomia człowieka*” Wyd. 1(2). T. 4: Układ nerwowy ośrodkowy. Warszawa: PZWL, 1981, s. 317.
- [2] Medme.pl – data dostępu 06.05.2020
<https://www.medme.pl/anatomia/mozgowie>
- [3] Henry Gray „*Anatomy of the Human Body*”, Henry Vandyke Carter i jeden inny autor 1918
- [4] NeuroLab Badania Neuromarketingowe, „*Co mówi mózg Twojego klienta i jak to odczytać?*” – data dostępu 07.05.2020
<http://neurodata.pl/mowi-mozg-twojego-klienta-odczytac/>
- [5] Janusz Krzyżowski „*Leksykon Psychiatrii i Nauk Pokrewnych*” Warszawa: Medyk, 2010. ISBN 978-83-89745-68-2.
- [6] Tomma Diagnostyka Obrazowa „*Rezonans magnetyczny*” – data dostępu 07.05.2020
<https://tomma.com.pl/badanie/rezonans-magnetyczny/>
- [7] Alan Longstaff „*Neurobiologia*” Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012. ISBN 978-83-01-13805-9.
- [8] Agnieszka Nawrot „*Encyklopedia Biologia*” Kraków: Wydawnictwo GREG, s. 56. ISBN 978-83-7327-756-4.
- [9] „*Tkanka nerwowa. pobudliwość przewodnictwo*” – data dostępu 07.05.2020
<https://docplayer.pl/44162718-Tkanka-nerwowa-pobudliwosc-przewodnictwo.html>
- [10] Jacek Kawa „*Grupowanie twarde i rozmyte*” Laboratorium Przetwarzania Obrazów Medycznych, Wydział Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Śląska
- [11] Michał Grochowski „*Klasteryzacja danych*” Monitorowanie i Diagnostyka w Systemach Sterowania, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska
- [12] Piotr Zarychta, Kod udostępniony w ramach laboratorium „*Szkieletyzacja*” – skrypt szkieletyzacja5.m
- [13] Funkcja vol3d()
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22940-vol3d-v2>