

**Kacper Pluta<sup>1</sup>, Michał Postolski<sup>2,3</sup>, Marcin Janaszewski<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Wyższa Szkoła Informatyki w Łodzi

<sup>2</sup>Politechnika Łódzka, Katedra Informatyki Stosowanej

<sup>3</sup>Universite Paris-Est, LIGM-A3SI-ESIEE 2, 93162 Noisy le Grand, France,

e-mail: kacperp@wsinf.edu.pl, mpostol@kis.p.lodz.pl,  
janasz@kis.p.lodz.pl

## **ALGORYTMY MODELOWANIA DRZEWA OSKRZELOWEGO**

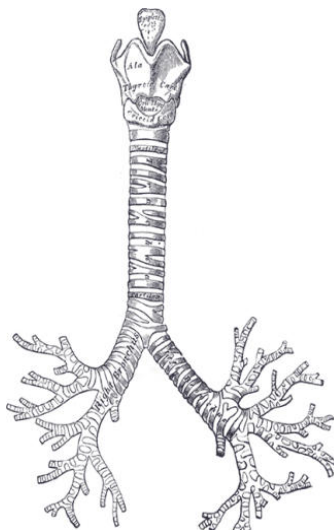
Streszczenie – Artykuł prezentuje nową koncepcję trójwymiarowego modelu ludzkiego drzewa oskrzelowego przydatnego do testowania algorytmów ilościowej analizy drzew oskrzelowych na bazie obrazów tomograficznych. Zaproponowany model został opracowany jako rozwinięcie algorytmu generowania trójwymiarowego ludzkiego drzewa oskrzelowego autorstwa Hiroko Kitaoka, Ryuji Takaki oraz Bela Suki. Model ten został rozwinięty o zniekształcenia drzewa oskrzelowego oraz zakłócenia w obrazie objętościowym. Prezentowana koncepcja została zaimplementowana w postaci komputerowych algorytmów generujących trójwymiarowe, objętościowe obrazy drzew oskrzelowych. Artykuł prezentuje również wyniki działania zaimplementowanych algorytmów, wpływ parametrów na właściwości generowanych drzew oraz przydatność wygenerowanych modeli do testowania procedur ilościowej analizy oskrzeli na bazie obrazów tomograficznych.

### **1 Wstęp**

Oskrzela są częścią układu oddechowego i znajdują się pomiędzy tchawicą a oskrzelikami. Funkcją oskrzeli jest doprowadzanie i odprowadzanie powietrza do/z płuc. Oskrzela posiadają strukturę drzewa, w której wyróżnia się dwa oskrzela główne: lewe i prawe, oskrzela główne dzielą się następnie na kolejne. Na rysunku 1 przedstawiono fragment drzewa oskrzelowego.

Geometria drzewa oskrzelowego jest ściśle powiązana z jego położeniem przestrzennym. Kolejne gałęzie dzielą dostępną przestrzeń na zaopatrywane przez nie obszary organu, co umożliwia powiązanie objętości transportowanego przez gałąź powietrza z jej położeniem wewnątrz organu. Kształt i objętość danego obszaru ma bezpośredni wpływ na wielkość gałęzi oraz kierunek, w którym gałąź jest skierowana.

Sposób podziału dostępnej przestrzeni został opisany w dalszej części artykułu.



Rys. 1. Przedni widok chrząstek krtani, tchawicy i oskrzeli. [1]

W przeciągu ostatnich kilkunastu lat zaproponowano szereg modeli ludzkiego drzewa oskrzelowego różniących się pod względem swojej konstrukcji oraz dokładności, z jaką potrafią one odzwierciedlić budowę rzeczywistego drzewa oskrzelowego. Początkowo opracowane modele były ograniczone jedynie do przestrzeni jednowymiarowej Weibel [2], Horsfield [3], oraz dwuwymiarowej Nelson i Manchester [4], oraz Martonena i inni [5].

Szybki rozwój technologii trójwymiarowej, który nastąpił pod koniec lat 90 XX wieku i trwa do dziś, a także zapotrzebowanie ze strony środowiska medycznego na trójwymiarowe obrazowanie ludzkich dróg oddechowych, doprowadziło do powstania kilku trójwymiarowych modeli drzewa oskrzelowego. Pierwsze modele odnoszące się do przestrzeni trójwymiarowej powstały już na początku lat 80 XX wieku - Chen, W.J.R., Shiah, D.S.P., Wang, C.S [6]. Jednym z pierwszych trójwymiarowych modeli drzewa oskrzelowego, jest model opracowany przez Hiroko Kitaoka, Ryuji Takaki oraz Bela Suki [7]. Warto wspomnieć w tym miejscu o późniejszym modelu autorstwa Howatson Tawhai, M., Pullan, A.J., Hunter, P.J. [8].

Autorzy rozszerzyli wspomniany wyżej model Hiroko Kitaoka, Ryuji Takaki, Bela Suki, dodając do niego szumy i zniekształcenia geometryczne. Celem wprowadzenia tych elementów było uzyskanie modeli bardziej podobnych do rzeczywistych drzew, co umożliwiłoby wykorzystanie ich do testowania procedur ilościowej analizy oskrzeli. Zaproponowany w tym artykule model objętościowy składa się z dwóch

części, z których jedna zawiera mapę drzewa oskrzelowego niezawierającego szumów, druga natomiast zawiera poddany zaszumieniu obraz. Rozszerzenie modelu zostało oparte na poniższych założeniach.

*Stołość średnicy gałęzi:* analiza średnicy gałęzi pozwala uzyskać szereg istotnych informacji na temat analizowanego drzewa. Dlatego ważne jest, aby wartość ta nie uległa zmianie podczas wykonywania transformacji na generowanym modelu. Dzięki temu założeniu znamy poprawną wartość średnicy, co jest istotne podczas testowania algorytmów ilościowego opisu drzew oskrzelowych.

*Wprowadzenie szumów i zniekształceń geometrycznych:* dane uzyskiwane za pomocą tomografów komputerowych bardzo często zawierają różnego typu zakłócenia, dlatego w celu przybliżenia generowanych modeli do realnych tomografów wprowadzono zakłócenia szerzej opisane w podrozdziale III.2.

*Szybkość uzyskania informacji o średnicy gałęzi:* podczas analizy drzewa istotna wydaje się możliwość szybkiego i łatwego w realizacji porównywania uzyskiwanych przez testowane algorytmy wyników, z faktycznymi wartościami. Dlatego zdecydowano się, aby przechowywać informację o średnicy danej gałęzi w wartościach wokseli, które do niej przynależą. Dane te zapisane są w niezawierającej szumów mapie drzewa. Zadaniem autorów zabieg ten upraszcza i przyspiesza dostęp do najistotniejszej z punktu widzenia analizy obrazu informacji – średnicy gałęzi.

Autorzy na potrzeby omawianej implementacji zrealizowanej w języku C++ wykorzystali biblioteki pakietu VTK [9] (Visualization ToolKit). Za wyborem VTK na tle konkurencyjnych rozwiązań przemawia przede wszystkim bogactwo klas wchodzących w skład pakietu, przenośność, bardzo dobra dokumentacja oraz dostępność VTK w formie Wolnego Oprogramowania.

## 2 Koncepcja trójwymiarowego modelu drzewa oskrzelowego

Algorytm opracowany przez Hiroko Kitaoka, Ryuji Takaki oraz Bela Suki, zwany dalej algorytmem podstawowym, został oparty na dwóch przedstawionych poniżej założeniach umożliwiających zrealizowanie równomiernego i efektywnego transportu powietrza wewnątrz całych płuc.

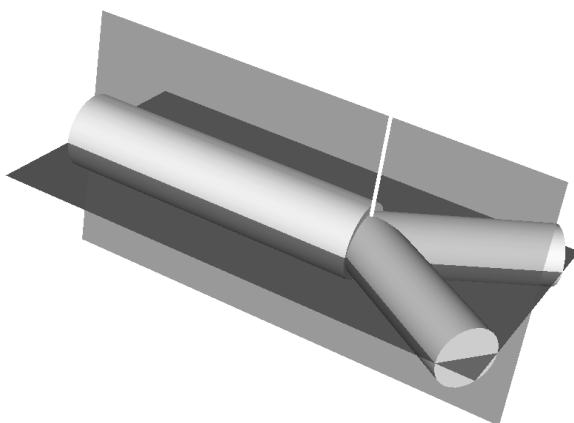
Pierwsze z założeń pozwala na połączenie powietrza transportowanego przez oskrzele z jego położeniem przestrzennym i mówi, że całkowita objętość tego powietrza jest proporcjonalna do objętości obszaru, który jest przez nie zaopatrywany. Ponadto przyjęto, że dla każdego rozwidlenia objętość dzieci jest proporcjonalna do objętości rodzica, a także, że całkowity przepływ powietrza

transportowany przez dzieci jest proporcjonalny do przepływu powietrza transportowanego przez rodzica.

Drugie założenie mówi natomiast, że końcowe gałęzie drzewa są homogenicznie rozmieszczone wewnątrz organu. Dla ludzkiego drzewa oddechowego gałęzie końcowe modelu są przyjmowane za końcowe oskrzeliki.

Przedstawione powyżej założenia pozwalają na zdefiniowanie opisanych dalej reguł procesu generowania kolejnych rozwidleń drzewa oskrzelowego.

Na rysunku 1 przedstawiono podstawowe parametry pojedynczego rozwidlenia.



Rys. 2. Pojedyncze rozwidlenie. Ciemniejsza płaszczyzna rozwidlenia, jaśniejsza płaszczyzna podziału objętości. Obie płaszczyzny rozpościerają się do granic obszaru rodzica. Kolorem białym zaznaczono normalną płaszczyzny rozwidlenia zaczepioną w punkcie rozwidlenia.

## 2.1 Konstrukcja algorytmu podstawowego

Algorytm został zbudowany na bazie dziewięciu podstawowych i czterech dodatkowych reguł, których kolejne wykonywanie umożliwi wygenerowanie drzewa oskrzelowego. Algorytm wymaga podania danych wejściowych, które stanowią zestaw parametrów opisujących korzeń drzewa – tchawica oraz powierzchnia ograniczająca przestrzeń, w której generowane jest drzewo.

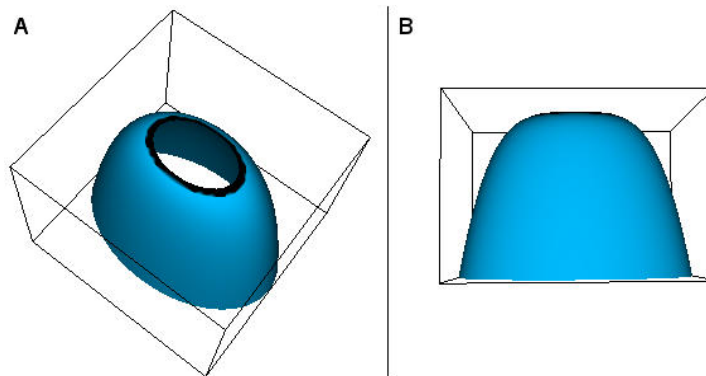
*Tchawica*: najistotniejszymi parametrami korzenia drzewa jest jego średnica, długość, oraz położenie w przestrzeni. Ważne jest, aby korzeń znajdował się w odpowiedniej pozycji względem powierzchni ograniczającej przestrzeń. Parametry tchawicy powinny zostać dobrane

tak by były zgodne z wynikami badań morfologicznych. Koniec korzenia za pomocą, którego wyznaczony jest punkt pierwszego rozwidlenia, powinien znajdować się w około  $\frac{1}{4}$  długości przestrzeni w kierunku osi Z, w której nastąpi wygenerowanie drzewa.

*Przeźrezeń:* jest ona ograniczona za pomocą powierzchni, która może zostać określona na kilka sposobów. Jednakże dla uproszczenia tej pracy przyjęto prostą postać powierzchni opisaną *równaniem 1*.

$$z = 2 * 15^{-z} (x^2 + (1,5y)^2)^2 \text{ dla } 0 \leq z \leq 30 \quad (1)$$

Tak zdefiniowana powierzchnia przedstawiona na rysunku 2 w sposób wystarczający do dalszych rozważań opisuje granice organu.



Rys. 3. Powierzchnia ograniczająca przestrzeń, w której następuje wygenerowanie drzewa.

Przedstawione poniżej reguły definiują kolejne kroki, których sukcesywne wykonywanie aż do spełnienia warunku końcowego – zdefiniowanego w regule 9 umożliwia wygenerowanie drzewa oskrzelowego.

*Reguła 1:* rozwidlenie jest dychotomiczne, tzn. każdy rodzic dzieli się na dwoje dzieci.

*Reguła 2:* przekroje wzdłużne rodzica i jego dzieci leżą na tej samej płaszczyźnie, zwanej dalej płaszczyzną rozwidlenia.

*Reguła 3:* suma przepływu przez dzieci równa się całkowitemu przepływowi rodzica;  $d_0^3 = d_1^3 + d_2^3$ , gdzie  $d_0$ ,  $d_1$  i  $d_2$  oznaczają odpowiednio średnicę rodzica, pierwszego dziecka, drugiego dziecka,  $n$  dla uproszczenia wynosi 2,8 oraz  $d_1 \leq d_2$ . Przepływ wyrażony przez znormalizowane równanie równy jest:  $Q = (d)^3$

*Reguła 4:* obszar przestrzeni, który jest zaopatrywany przez rodzica, jest dzielony na dwa obszary dzieci za pomocą płaszczyzny podziału przestrzeni. Płaszczyzna ta jest prostopadła do płaszczyzny rozwidlenia

i rozciąga się do granic segmentu rodzica. Na rysunku 2 przedstawiono segment wyznaczony zgodnie z tą regułą dla jednej z gałęzi drzewa.

*Reguła 5:* stosunek podziału przepływu  $r$  wykorzystany w równiach z reguły 6 jest równy stosunkowi podziału objętości, zdefiniowanemu jako stosunek obszaru przestrzeni rodzica do obszaru mniejszego dziecka. Wartość  $r$  powinna zawierać się w przedziale  $0 < r \leq 0,5$ . Stosunek podziału objętości wyznaczany jest poprzez podział prostokątnego obszaru zawierającego przestrzeń rodzica na mniejsze prostokąty, których boki są 20 razy mniejsze niż boki prostokąta wewnątrz którego są umieszczone. Następnie określany jest stosunek ilości tych prostokątów do ich ilości w prostokątnym obszarze zawierającym przestrzeń dziecka.



Rys. 4. Obszar przestrzeni wyznaczony dla gałęzi drzewa zaznaczonej na obrazie obwódka.

*Reguła 6:* średnica dzieci oraz kąt rozwidlenia między nimi wyrażona jest odpowiednio przez *równanie 2*, oraz *równanie 3*.

$$\begin{aligned} d_1 &= d_0 r^{\frac{1}{n}} \\ d_2 &= d_0 (1 - r)^{\frac{1}{n}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{[1+r\bar{r} - (1-r)\bar{r}]}{2r\bar{r}} \\ \cos \theta_2 &= \frac{[1+(1-r)\bar{r} - r\bar{r}]}{2(1-r)\bar{r}} \end{aligned} \quad (3)$$

$d_0$  – średnica rodzica  
 $d_1, d_2$  – średnica dzieci  
 $n = 2,8$

*Reguła 7:* długość każdej z gałęzi jest trzykrotnością jej średnicy.

*Reguła 8:* kontynuacja generowania nowych gałęzi w danym kierunku powoduje, że dzieci stają się nowymi rodzicami a ich płaszczyzna rozwidlenia zostaje ustawiona prostopadle do płaszczyzny rozwidlenia ich rodzica.

*Reguła 9:* generowanie nowych gałęzi w danym kierunku trwa do momentu przekroczenia wartości progu określającego minimalną wartość przepływu przez gałąź lub w momencie, gdy opuściła ona swój segment.

*Reguła 4a:* W przypadku gdy  $|\theta_1 - \theta_2| \geq 10^\circ$  oznacza, to że współczynnik podziału objętości nie jest wystarczająco izotropowy, przez co jest on nieoptymalny, a w konsekwencji kąt rozwidlenia oraz średnica dzieci są nieoptymalne. W celu uzyskania lepszego stosunku podziału należy ograniczyć płaszczyznę podziału do końca rodzica oraz wyznaczyć nową półpłaszczyznę podziału, która zaczepiona jest na końcu rodzica i rozchodzi się do końca jego obszaru oraz skierowana jest w kierunku dwusiecznej kąta rozwidlenia. Po skorygowaniu obszarów dzieci oraz współczynnika podziału za pomocą obu półpłaszczyzn podziału reguły 5 i 6 muszą zostać ponownie wykonane. Reguła ta stosowana jest tylko raz dla każdego rozwidlenia.

*Reguła 6a:* Zgodnie z *równaniem 3* maksymalny kąt każdego rozwidlenia wynosi  $90^\circ$ . Kiedy współczynnik podziału przepływu  $r$  przyjmuje małą wartość np. 0,01 mniejszy kąt rozwidlenia przyjmuje wartość około  $78^\circ$ . Zatem *równanie 3* przewiduje, że prawie każdy kąt rozwidlenia jest mniejszy od  $80^\circ$ . Jednakże dopuszczalne jest, aby drzewo posiadało kilka gałęzi o kącie zbliżonym do kąta prostego. Taka sytuacja występuje, gdy obszar takiej gałęzi rozszerza się w kierunku wstecznym. W tym wypadku *równanie 3* nie zapewnia odpowiedniego kąta dla takiej gałęzi. Aby sytuacji takiej przeciwdziałać po wykonaniu *reguły 4a*, należy określić płaszczyznę dzielącą obszar dziecka na dwa zawierające identyczną objętość. Płaszczyzna ta skierowana jest prostopadle do płaszczyzny rozwidlenia i zaczepiona w punkcie rozwidlenia (patrz rysunek 2). Kąt  $\psi$  jest kątem wyznaczonym przez tę

płaszczyznę oraz rodzica. Jeżeli kąt  $\theta$  jest mniejszy od kąta  $\psi$ , wtedy wyznaczany jest nowy kąt  $\theta$  równy wartości średniej obu kątów (równania 4).

$$\theta' = \frac{(\psi + \theta)}{2} \quad (4)$$

Natomiast jeśli wartość średnia obu kątów przekracza  $90^\circ$ , wtedy należy ją zmniejszyć do wartości  $90^\circ$ .

*Reguła 7a:* Jak wspomniano wcześniej, współczynnik stosunku długości względem średnicy powinien wynosić 3. Jednakże czasami jest to wartość nieodpowiednia i gałąź wykracza poza obszar rodzica albo jej koniec znajduje się zbyt blisko granicy obszaru. W celu korekcji stosunku długości wprowadzono stosunek dystansu do długości. Stosunek ten wyrażony jest *równaniem 5*. Korekcja stosunku długości do średnicy odbywa się w krokach co 0,25 aż do przekroczenia dolnego lub górnego progu stosunku dystansu do długości odpowiednio 3 i 6. Nowa wartość stosunku długości do średnicy nie powinna być mniejsza od 1.

$$\frac{d(P_0, P_2)}{d(P_0, P_1)} \quad (5)$$

$P_0$  – punkt rozgałęziania

$P_1$  – koniec gałęzi

$P_2$  – punkt na granicy obszaru wyznaczony przez wektor kierunkowy gałęzi

*Reguła 8a:* Kąt obrotu płaszczyzny rozwidlenia nowego rodzica względem jego rodzica został zdefiniowany wcześniej jako  $90^\circ$ . Jednakże jeśli współczynnik podziału objętości  $r$  przyjmuje małą wartość, średnica mniejszego dziecka staje się nierealnie mała. Dlatego konieczne jest wprowadzenie dolnej granicy wartości tego współczynnika. Kiedy wartość  $r$  dla kąta prostego jest mniejsza od progu, kąt ten zostaje skorygowany poprzez zmniejszenie lub zwiększenie w krokach co  $9^\circ$  aż do momentu osiągnięcia współczynnika podziału objętości wartości wyższej od granicznej. Wartość graniczna równa jest 0,05, jednakże gdy przepływu gałęzi jest niski:  $<1,5$  razy wartości granicznej przepływu, wartość graniczna  $r$  powinna zostać zwiększona do 0,35.

### 3 Algorytm rozszerzony generowania modelu drzewa oskrzelowego

Rozdział ten został podzielony na dwie części. W pierwszej z nich omówiono sposób generowania drzewa oskrzelowego w grafice



objętościowej z wykorzystaniem wygenerowanego wcześniej modelu powierzchniowego. W drugiej części zawarto informacje na temat zanieczyszczeń i deformacji, jakie zostały wprowadzone do obrazu drzewa na potrzeby tej implementacji. W rozdziale IV natomiast podjęto próbę uzasadnienia słuszności wprowadzenia tego typu niedeterministycznych elementów do obrazu wynikowego.

### **3.1 Transformacje w grafice objętościowej z wykorzystaniem modelu powierzchniowego**

Podzielenie procesu generowania drzewa oskrzelowego na dwa etapy miało na celu minimalizację błędów powstających podczas dokonywania przekształceń na obiektach. Błędy te w grafice objętościowej są znacznie większe aniżeli w grafice powierzchniowej, dlatego w celu zminimalizowania tych błędów generuje się najpierw model powierzchniowy, a następnie przekształca się go do modelu objętościowego.

#### **A. Proces generowania modelu powierzchniowego**

Proces ten powinien rozpocząć się od określenia przestrzeni, w której zostanie wygenerowane drzewo oraz od wygenerowania korzenia drzewa, który tak jak pozostałe gałęzie drzewa jest reprezentowany za pomocą cylindra.

Warto w tym miejscu zaznaczyć, że cylinder z powodu ostrych krawędzi oraz powstawania nagłego skoku w miejscu gdzie dzieci łączą się z rodzicem, nie odwzorowuje idealnie gałęzi drzewa oskrzelowego. Wykorzystanie cylindra pozwala jednak na uzyskanie jednolitej średnicy, której zachowanie na całej długości gałęzi było jednym z kluczowych założeń tej implementacji. W drugiej części tego rozdziału przedstawiono metodę wyeliminowania tych niedoskonałości poprzez wygładzenie drzewa z zachowaniem jego topologii.

Jednym z ważniejszych aspektów generowania drzewa są współrzędne nowych gałęzi. Współrzędne nowej pary gałęzi powinny zostać za każdym razem tak określone, by były one zgodne z punktem rozwidlenia wyznaczonym przez ich rodzica.

Klasa *vtkTransform* umożliwia zdefiniowanie hierarchii transformacji, w lokalnym układzie współrzędnych rodzica co ułatwia dokonywanie geometrycznych przekształceń na jego dzieciach. Hierarchia ta pozwala także manipulować obiektami nadrzędnymi bez konieczności ręcznej aktualizacji współrzędnych obiektów podrzędnych. Zdefiniowanie hierarchii transformacji pozwala na znaczne uproszczenie procesu generowania nowych gałęzi. Klasa *vtkTransform* pozwala również za pośrednictwem metody *TransformNormal* na uzyskanie normalnej

obiektu, który został wcześniej za pośrednictwem tej klasy poddany przekształceniom. Uzyskanie normalnej rodzica umożliwia wyznaczenie płaszczyzny podziału, płaszczyzna ta wyznaczana kolejno dla kolejnych rodziców pozwala na podział przestrzeni na kolejne segmenty nowych gałęzi.

Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, zgodnie z *regułą 9* zakończenie generowania nowych gałęzi w danym kierunku powinno zakończyć się w momencie, gdy gałąź opuści swój segment. W celu zrealizowania tego założenia przeprowadzono wykrywanie kolizji pomiędzy gałęziami a ścianami ich segmentów. Odpowiednie algorytmy wykrywania kolizji niestety nie znajdują się bezpośrednio w VTK, dlatego wykorzystano klasę *vtkCollisionDetectionFilter* [10] rozwijaną niezależnie przez

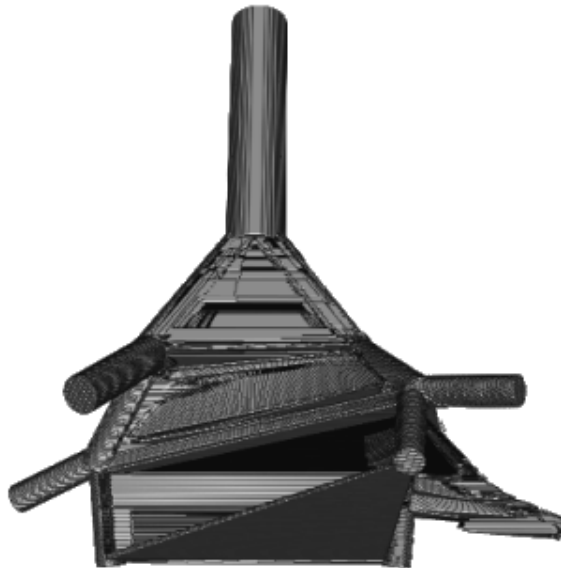
Goodwina Lawlor. Dzięki zastosowaniu omówionych w poprzednim rozdziale reguł oraz opisanym powyżej najistotniejszym szczegółom implementacji możliwe jest wygenerowanie modelu powierzchniowego. Model ten umożliwia nam następnie wygenerowanie modelu objętościowego.

## **B. Metody konwersji modelu powierzchniowego do modelu objętościowego**

Konwersja modelu powierzchniowego do modelu objętościowego może zostać zrealizowana na kilka sposobów. Jednak z punktu widzenia dalszych analiz wygenerowanego obrazu interesujące są te metody, które zapewniają wypełnienie wnętrza konwertowanego obiektu. Metody te można dalej podzielić na dwie grupy w zależności od tego czy dany obiekt da się przedstawić za pomocą innych obiektów, czy też należy go rozpatrywać jako całość. Rozpatrywanie drzewa oskrzelowego, jako jednego niepodzielnego obiektu niesie za sobą kilka problemów. Najwydajniejszą metodą konwersji dostępną w VTK jest metoda zaimplementowana w klasie *vtkPolyDataToImageStencil*. Metoda ta polega na przeszukiwaniu za pomocą promienia wzdłuż osi X kolejnych obrazów obiektu wyznaczonych przez płaszczyznę opisaną na osiach YZ. Promień ten wypełnia wokselami przestrzeń zawartą pomiędzy dwoma dowolnymi ścianami obiektu, nie dokonując przy tym wystarczających sprawdzeń. Dlatego w momencie, gdy promień zostanie zaczepiony na granicy obiektu posiadającego „zatokę” i trafi on w przeciwległą ścianę przestrzeń ta zostanie wypełniona. Błędy, które powstają podczas takiej konwersji, zostały przedstawione na rysunku 3. W VTK znaleźć można jeszcze jedną obiecującą metodę opartą o funkcję matematyczną opisującą obiekt. Metoda ta niestety nie jest wystarczająco wydajna, a ponadto może w niej dochodzić do wycieków wokseli. Warto w tym miejscu wspomnieć o możliwości konwersji obiektu algorytmem „promienia prze-

szywającego” [11] zaimplementowanego w programie binvox [12], która ze wspomnianych do tej pory metod oferuje najlepsze wyniki.

Zadowolające wyniki można uzyskać również poprzez konwersję drzewa gałąź po gałęzi z zastosowaniem wcześniej wspomnianej metody konwersji zaimplementowanej w klasie *vtkPolyDataToImageStencil*. Metoda ta pozwala także na przypisanie już na etapie konwersji odpowiednich wartości wokselom konwertowanej gałęzi, bez późniejszej klasyfikacji wokseli, którą należałoby wykonać po konwersji całego drzewa traktowanego jako niepodzielny obiekt. I właśnie ten sposób został wykorzystany przez autorów.



Rys. 5. Błędy powstające podczas konwersji drzewa metodą siatki wielokątów.

### 3.2 2. Zniekształcenia drzewa

Rozdział ten omawia rodzaje zakłóceń oraz deformacji, które nie zostały uwzględnione w algorytmie podstawowym, a które wprowadzono do algorytmu rozszerzonego. Rozdział ten został podzielony na dwa podrozdziały względem typu grafiki przedstawiającej model w chwili wprowadzania danego zakłócenia. Uzasadnienie potrzeby wprowadzenia tych elementów do omawianego modelu opisano w rozdziale IV.

## A. Zniekształcenia generowane w grafice powierzchniowej

Omówione dalej wygięcia gałęzi pozwalają w sposób bardziej realistyczny przedstawić gałęzie drzewa oskrzelowego. Przez co jak opisano to w kolejnym rozdziale, umożliwiają dokładniejsze przetestowanie algorytmów analizujących obrazy prawdziwego drzewa oskrzelowego.

Wygięcia zostały opracowane poprzez odpowiedni dobór wartości iteracyjnego równania spirali oraz klasy *vtkTubeFilter*, która umożliwia odrysowanie „rury” wzdłuż linii. Odrysowanie linii odbywa się przez wylosowanie odpowiedniego wariantu funkcji  $f$  w równaniu 6, która może przyjąć postać  $\sin$ ,  $-\sin$ ,  $\cos$ ,  $-\cos$ . - kolejne warianty równania 6 różnią się znakiem oraz typem funkcji tak jak *sinus* lub *cosinus* dla współrzędnych w osi  $X$  i  $Z$ . Następnie na podstawie wybranego wariantu równania 6 obliczane są współrzędne kolejnych punktów opisujących linię na podstawie kształtu, której zostanie odrysowana gałąź.

$$\begin{aligned} z_k &= r \cdot f\left(2\pi \cdot x \cdot \frac{i}{n-1}\right), \\ x_k &= r \cdot f\left(2\pi \cdot x \cdot \frac{i}{n-1}\right), \\ y_k &= h \cdot \frac{i}{n} \end{aligned} \quad (6)$$

$x$  – współczynnik obrotu. Określa liczbę zawinęć spirali. Wartość tego współczynnika dobierana jest w zależności od stopnia deformacji gałęzi.

Autorzy przyjęli  $x=1$

$r$  – promień obrotu. Jego wartość może zostać określona na kilka sposobów w zależności od spodziewanego efektu. Może to być np. wartość losowana z przedziału od 0,1 do 0,9 lub promień gałęzi podzielony przez np. 3,5

$n$  – liczba punktów tworzących gałąź

$k$  – kty punkt linii opisującej gałąź

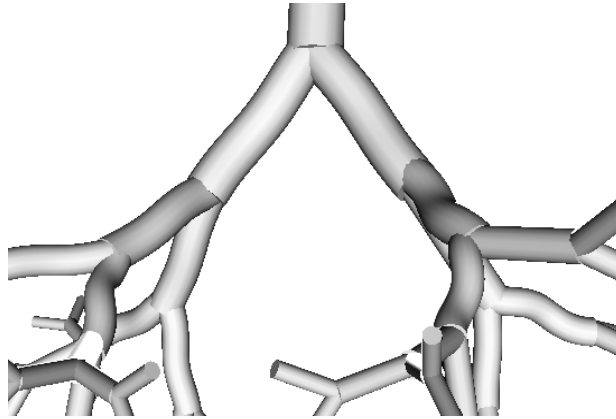
$h$  – długość gałęzi

$i$  – wartość iteracji

W celu wygenerowania gałęzi nieposiadającej wygięć należy za wartości w osiach  $X$  i  $Z$  podstawić 0. Podczas generowania kolejnych gałęzi dochodzić może do sytuacji, gdy dzieci w punkcie rozwidlenia nieznacznie wykraczają poza krawędź rodzica. Aby przeciwdziałać takim sytuacjom, można uwzględnić pewien margines -pewną niewielką, liczbę punktów o współrzędnych 0 w osi  $X$  i  $Z$  znajdujących się na końcu i początku linii.

Przykładowy efekt zastosowania wygięć przedstawiono na rysunku 4. Na koniec tego podrozdziału należy wspomnieć, że z obserwacji

autorów wynika, iż wygięcia zrealizowane z wykorzystaniem *równania 6* najlepiej ograniczyć do górnych poziomów drzewa.



Rys. 6. Fragment modelu drzewa z widocznymi powyginanymi gałęziami.

### ***B. Zniekształcenia generowane w grafice objętościowej z wykorzystaniem pakietu PINK***

PINK [13] jest biblioteką zawierającą około 200 algorytmów filtracji oraz segmentacji obrazu. Biblioteka ta powstała w ESIEE Engineering do celów badawczych oraz edukacyjnych i jest rozpowszechniana jako Wolne Oprogramowanie.

Końcowym wynikiem wszystkich operacji są dwa pliki; jeden zawierający mapę wartości wokseli w drzewie nie poddanym modyfikacjom w grafice objętościowej oraz drugi zawierający obraz binarny. Jako opcję pozostawiono możliwość transformacji obrazu binarnego do obrazu, gdzie wartości wokseli reprezentują współczynnik pochłaniania promieni roentgena w skali Hounsfielda.

Jednymi z podstawowych zniekształceń, które zostały wprowadzone do obrazu wynikowego, są; dodawanie oraz odejmowanie wokseli do/od obiektu zrealizowane z wykorzystaniem algorytmu EDEN [14], który pozwala na zachowanie topologii drzewa oskrzelowego, co można osiągnąć poprzez modyfikowanie tylko tzw. wokseli prostych – takich, których dodanie lub odjęcie nie zmienia topologii obiektu. Obie operacje wykonywane są zgodnie z poniższym schematem postępowania:

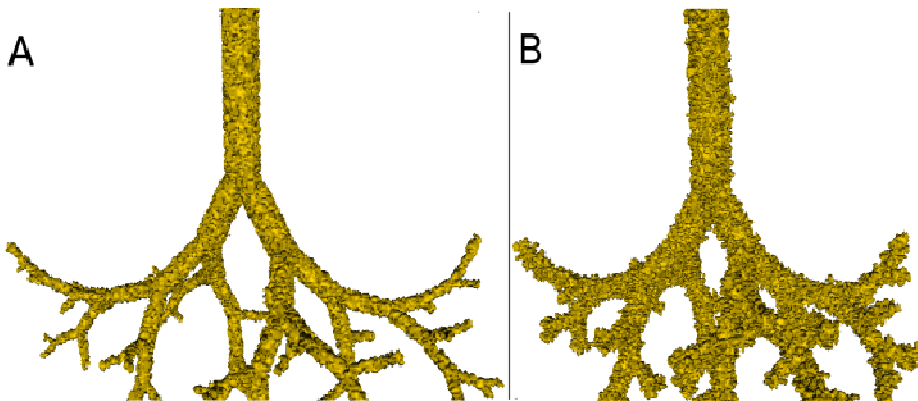
- ◆ rozpocznij od znanej pozycji
- ◆ dodaj woksele brzegowe do kolejki
- ◆ wybierz losowy woksel z kolejki
- ◆ zmień wartość wylosowanego woksela
- ◆ zaktualizuj kolejkę
- ◆ powtarzaj powyższe punkty do momentu

- ♦ osiągnięcia żądanej liczby iteracji

Przez odejmowanie należy rozumieć zmianę wartości wylosowanego woksela obiektu na wartość tła, a przez dodawanie zmianę wartości wybranego woksela tła na wartość woksela obiektu. Przykładowy efekt, jaki można uzyskać poprzez zastosowanie dodawania oraz odejmowania wokseli przedstawiono na rysunku 5. Należy wspomnieć, że EDEN umożliwia również wykonanie obu operacji jednocześnie.

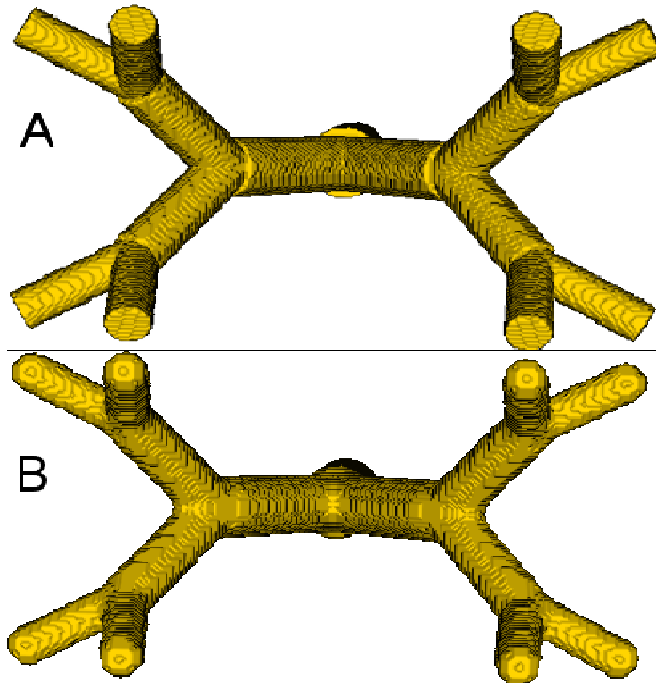
Po zastosowaniu operacji EDEN wynik nie jest zadowalający z punktu widzenia podobieństwa do rzeczywistych drzew oskrzelowych. Dlatego autorzy na kolejnym etapie przetwarzania stosują iteracyjny algorytm wygładzania ASFT (ang. *Alternate Sequential Filter controlled by Topology*) bazujący na sekwencyjnie zmiennym filtrze [15].

W metodzie tej wygładzenie uzyskiwane jest poprzez operację otwarcia oraz zamknięcia [16] z zastosowaniem kuli o zmiennym promieniu. Przykładowy efekt wygładzenia zastosowany do modelu drzewa przedstawiono na rysunku 6, gdzie można zaobserwować zanik wcześniej wymienionych niedoskonałości, które powstały w wyniku wykorzystania cylindra jako modelu gałęzi.



Rys. 7. Przykładowy obraz uzyskany po wykonaniu operacji EDEN **A** - odejmowanie **B** - dodanie.

Połączenie EDENU i ASFT pozwala na uzyskanie bardzo realistycznego wyglądu powierzchni drzewa. Przykładowy efekt przedstawiono na rysunku 7. Wartości parametrów wymienionych wyżej operacji zależne są od rozdzielczości obrazu oraz wielkości zawartego w nim drzewa.



Rys. 8. **A.** Obraz oryginalny, **B.** wygładzony – promień kuli  $r_{\max} = 7$ .

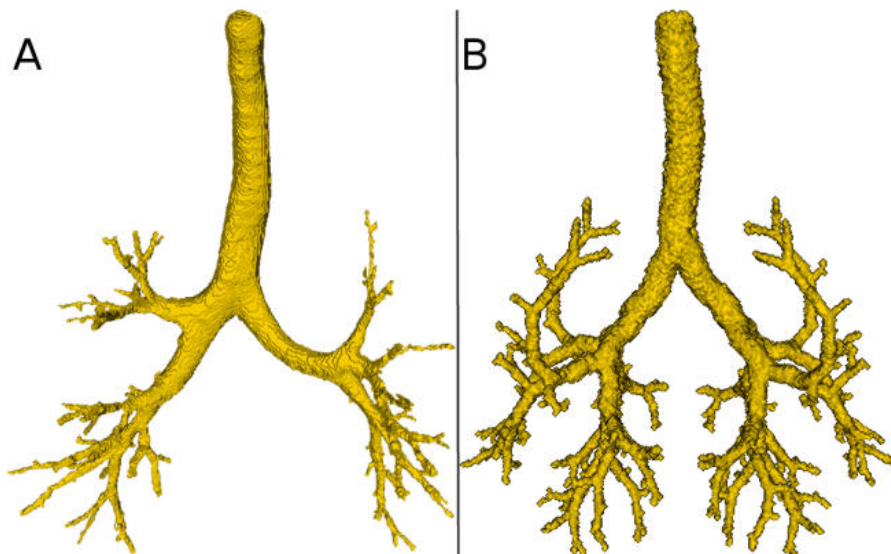


Rys. 9. Efekt uzyskany poprzez zastosowanie EDEN – dodanie oraz wygładzenia - ASFT.

#### 4 Przedstawienie i omówienie wykorzystania modelu do testowania algorytmów analizujących drzewo oskrzelowe

Obraz drzewa oskrzelowego uzyskany w wyniku segmentacji danych uzyskanych z tomografu komputerowego jest obarczony zniekształceniami, których źródłem są na przykład błędy segmentacji, ruchy podczas akwizycji danych, akwizycja z wykorzystaniem niskiej dawki promieniowania czy nawet bicie serca pacjenta podczas wykonywania skanowania.

Z potrzeby dokładnej analizy ilościowej drzewa oskrzelowego wynika konieczność opracowania zbioru algorytmów, które pozwalają osiągnąć ten cel mimo szeregu wymienionych wyżej zniekształceń. Testowanie algorytmów ilościowej oceny drzew oskrzelowych na obrazach rzeczywistych oskrzeli jest trudne, ponieważ nie znamy poprawnych, lokalnych wartości parametrów drzewa. Dlatego istotne jest by zaproponowany przez nas model, którego parametry są znane, mógł zostać w tym celu wykorzystany. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że model składający się jedynie z połączonych, prostych geometrycznych obiektów jest zbyt łatwy do analizy i nie zapewnia, że uzyskane wyniki będą miały odzwierciedlenie w rzeczywistych obrazach.



Rys. 10. **A** – drzewo oskrzelowe uzyskane poprzez segmentację obrazu tomograficznego. **B** – omawiany w niniejszej pracy model rozszerzony.



Zastosowanie takiego modelu ogranicza się do wstępnych testów oraz weryfikacji koncepcji. Dlatego ważne jest to, że zaproponowany przez nas model, odzwierciedla często zniekształcone i zaszumione drzewo oskrzelowe z jednoczesnym zachowaniem informacji o jego parametrach. Wprowadzenie na przykład skręceń miało na celu utrudnienie wyznaczenia kierunku drzewa, natomiast wprowadzenie innych zakłóceń wymienionych we wcześniejszym rozdziale miało między innymi utrudnić wyznaczenie szkieletu drzewa.

Uproszczony schemat generowania modelu:

- ◆ Generowanie tchawicy i powierzchni ograniczającej organ
- ◆ Generowanie kolejnych gałęzi drzewa z wykorzystaniem reguł algorytmu podstawowego
- ◆ Realizacja wygięcia poszczególnych gałęzi drzewa
- ◆ Konwersja drzewa do obrazu objętościowego
- ◆ Iteracyjne, naprzemienne, zastosowanie operacji EDEN i ASFT

## 5 Wnioski końcowe

W niniejszym artykule autorzy zaprezentowali koncepcję nowego, trójwymiarowego modelu przestrzennego drzewa oskrzelowego. Zaprezentowany model jest rozwinięciem istniejących modeli przestrzennych poprzez dodanie deformacji geometrycznych gałęzi oraz szumu. Autorzy zaimplementowali komputerowy algorytm, który umożliwia generację drzew z wykorzystaniem modelu rozszerzonego, co prowadzi do wyników, bardziej zbliżonych do rzeczywistych drzew oskrzelowych otrzymanych jako rezultat segmentacji trójwymiarowego obrazu tomograficznego. Model rozszerzony w odróżnieniu do modelu podstawowego można zastosować do testowania algorytmów pomiaru lokalnego prześwitu gałęzi oskrzeli.

## Podziękowania

Prace opisane w niniejszym artykule są częściowo finansowane z grantu Narodowego Centrum Nauki nr N516 480640

## 6 Literatura

- [1] [www.wikipedia.pl](http://www.wikipedia.pl)
- [2] Weibel, E. R. *Morphometry of the Human Lung*, New York: Academic, 1963.
- [3] Horsfield, K., G. Dart, D. E. Olson, G. F. Filley, and G. Cumming, *Models of the human bronchial tree*, J. Appl. Physiol. 31: 202–217, 1971.

- [4] Nelson, T. R., and D. K. Manchester, *Modeling of lung morphogenesis using fractal geometries*, IEEE Trans. Med. Imag. 7: 321–327, 1988.
- [5] Martonen, T. B., Y. Yang, and M. Dolovich, *Definition of airway composition within gamma camera images*, J. Thorac. Imaging 9: 188–197, 1994.
- [6] Chen, W.J.R., Shiah, D.S.P., Wang, C.S., *A three-dimensional model of the upper tracheobronchial tree*, Bulletin of Mathematical Biology, Volume 42, Issue 6, 1980, Pages 847-859
- [7] Kitaoka Hiroko, Ryuji Takaki, Bela Suki, *A three-dimensional model of the human airway tree*. J. Appl. Physiol. 87(6): 2207–2217, 1999.
- [8] Howatson Tawhai, M. , Pullan, A.J., Hunter, P.J., *Generation of an Anatomically Based Three-Dimensional Model of the Conducting Airways*, Annals of Biomedical Engineering, Volume 28, Issue 7, 2000, Pages 793-802
- [9] [www.vtk.org](http://www.vtk.org)
- [10] [www.bioengineering-research.com/software/vtkbioeng](http://www.bioengineering-research.com/software/vtkbioeng)
- [11] Fakir Nooruddin, Greg Turk, *Simplification and Repair of Polygonal Models Using Volumetric Techniques*, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, vol. 9, nr. 2, April 2003, pages 191-205
- [12] [www.cs.princeton.edu/~min/binvox/](http://www.cs.princeton.edu/~min/binvox/)
- [13] [www.pinkhq.com](http://www.pinkhq.com)
- [14] Murray Eden. *A two-dimensional growth process*. In *Proceedings of the 4th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probabilities*, volume 4, pages 223–239. Univ. of Calif. Press, 1961.
- [15] Michel Couprie, Gilles Bertrand, *Topology preserving alternating sequential filter for smoothing 2D and 3D objects*, Journal of Electronic Imaging, Vol. 13, No. 4, pp. 720-730, 2004.
- [16] Ryszard Tadeusiewicz, Przemysław Korohoda, *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997.

## **BRONCHIAL TREE MODELING ALGORITHMS**

Summary - The article presents a new conception of 3D human bronchial tree model which is useful to test algorithms for quantitative analysis of bronchial tubes based on tomographic images. The proposed model has been developed as an extension of the algorithm to generate the human bronchial tree by Hiroko Kitaoka, Ryuji Takaki and Bela Suki, The new model has been extended with geometrical deformations of branches and procedure which iteratively add noise and smooth a tree in voxel space. The presented conception has been implemented in the form of computer algorithms which generate 3D images of bronchial trees in voxel space. The article presents results of the implemented algorithms which are more like the segmented, real, bronchial trees than model Kitaoka, Takaki and Suki. Moreover the authors present influence of the algorithm parameters on the results and usefulness of the generated models for testing procedures of quantitative analysis of bronchial trees.