

Michał Postolski*, **, ***, Marcin Janaszewski*, **,
Łukasz Jopek*, **, Laurent Babout*

Wyznaczanie kierunku stycznej do dowolnego punktu trójwymiarowej krzywej wolumetrycznej w ilościowej analizie ludzkich drzew oskrzelowych

1. Wstęp

Wyznaczanie podstawowych parametrów różnego rodzaju krzywych, np. kierunku stycznej do dowolnego ich punktu, krzywizny, skręcenia lub długości znajduje szerokie zastosowanie w wielu różnych praktycznych aplikacjach. Parametry te można jednoznacznie wyznaczyć, gdy do czynienia mamy z krzywymi parametrycznymi lub opisanymi odpowiednimi wzorami, w przestrzeni ciągłej. Jednakże praktyczne szerokie zastosowanie mają również krzywe wolumetryczne. Są to krzywe dyskretnie, składające się z połączonych ze sobą wokseli tj. punktów obrazu, gdzie jedyną posiadaną informacją są współrzędne w przestrzeni kartezjańskiej kolejnych punktów należących do danej krzywej. Krzywe wolumetryczne, zarówno dwuwymiarowe, jak i trójwymiarowe wykorzystuje się np. w zadaniach analizy obrazów wolumetrycznych w medycynie, gdzie źródłem danych mogą być obrazy pochodzące np. z tomografii komputerowej lub rezonansu magnetycznego. Przykładem takiego zastosowania może być wirtualna kolonoskopia [7], gdzie krzywą wolumetryczną reprezentującą kształt okrężnicy wykorzystuje się jako ścieżkę dla wirtualnej kamery. Dlatego istotne staje się dokładne wyznaczenie długości krzywej w celu określenia pozycji kamery oraz wyznaczenie kolejnych wektorów określających kierunek stycznych, na podstawie których ustawiana jest kamera. Kolejne zastosowanie praktyczne może być związane z problemem rozpoznawania wzorców lub analizy kształtów np. w dziedzinie materiałoznawstwa, gdzie również bazując na tomografii oraz właściwościach geometrycznych materiału możliwe jest

* Computer, Engineering Department, Technical University of Lodz, Poland

** Department of Expert System and Artificial Intelligence, The College of Computer Science in Lodz, Poland

*** Universite Paris-Est, LIGM, A3SI, ESIEE, Noisy le Grand, France

wyznaczenie cech tego materiału np. w trakcie testów obciążeniowych, kiedy materiał jest naprzemian zginiatany i rozciągany zmieniają jego właściwości [6].

Obecnie znanych jest wiele metod, za pomocą których możliwe jest przybliżone wyznaczenie poszczególnych parametrów krzywych wolumetrycznych. W większości dotyczą one krzywych dwuwymiarowych, np. [4, 9]. Jednakże istnieje też szereg metod, które mogą zostać użyte bezpośrednio, bądź mogą zostać naturalnie rozszerzone do przestrzeni trójwymiarowej. Wybór odpowiedniej metody ma ogromne znaczenie praktyczne, gdyż dyskretny charakter analizowanego problemu może być wynikiem wielu błędów, a co za tym idzie, nie wszystkie metody są w stanie wygenerować zadowalające rezultaty. Problemem, który najczęściej może się pojawić, jest szum w obiektach poddanych analizie. Powoduje on, że wygenerowane krzywe mogą również mieć zaszumione fragmenty znacznie utrudniające analizę. Tego typu problemy będą się pojawiać jako lokalne zmiany np. kierunku stycznnej. Często są one spowodowane przez pojedynczy wksel należący do analizowanej krzywej. Dodatkowo poszczególne metody różnią się nie tylko co do jakości generowanych wyników, ale również w szybkości działania lub ilości wykorzystywanych zasobów. Jednocześnie w literaturze przedmiotu brakuje prac, które pokazywałyby ilościowe różnice między metodami głównie działającymi w przestrzeni trójwymiarowej, stąd motywacja do napisania niniejszego artykułu, w którym porównano cztery popularne metody wyznaczania kierunku stycznnej do dowolnego punktu krzywej wolumetrycznej na dwóch obiektach sztucznych oraz w konkretnym zastosowaniu praktycznym, jakim jest analiza ilościowa ludzkich drzew oskrzelowych.

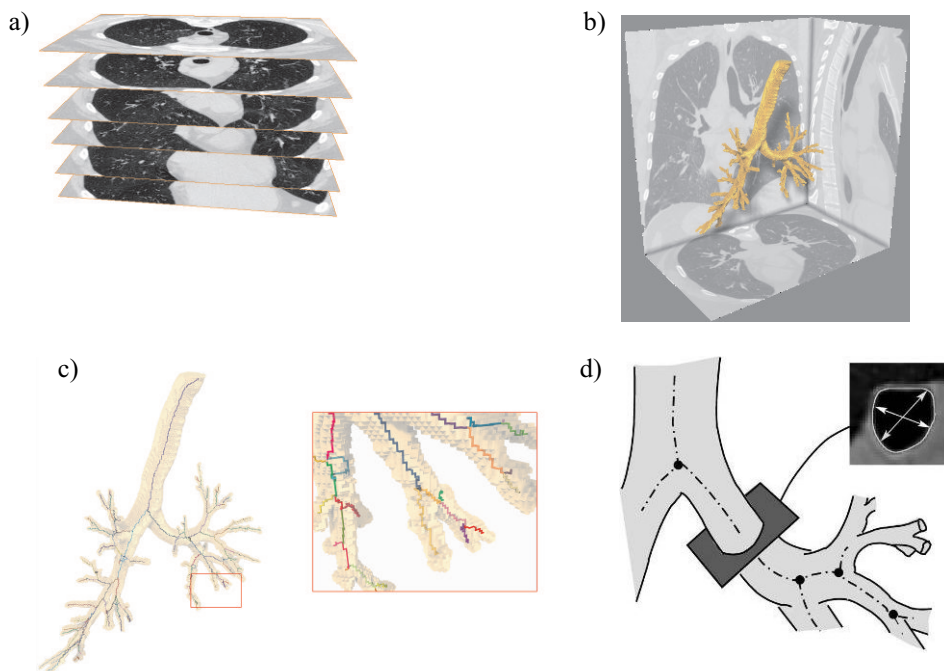
W rozdziale drugim przedstawiono problem analizy ilościowej ludzkich drzew oskrzelowych. Rozdział 3 zawiera definicję krzywej wolumetrycznej i podstawowe pojęcia z nią związane. W kolejnych rozdziałach przedstawiono algorytmy wyznaczania kierunku stycznnej (rozdz. 4), a następnie przeprowadzono eksperymenty z ich wykorzystaniem (rozdz. 5). Wnioski z uzyskanych wyników znajdują się w rozdziale 6.

2. Analiza ilościowa ludzkich drzew oskrzelowych

Analiza ilościowa ludzkich drzew oskrzelowych jest obecnie tematem wielu publikacji naukowych, np. [11, 12, 14]. Problem dotyczy wyznaczenia parametrów drzewa oskrzelowego na bazie tomogramów pochodzących z medycznej tomografii komputerowej. Dzięki wyznaczeniu parametrów, takich jak grubość ścian oskrzeli w dowolnym ich punkcie, średnicy prześwitu oskrzela, długości i kierunku poszczególnych gałęzi drzewa, możliwa będzie dokładniejsza diagnoza chorób, takich jak astma lub chroniczna obturacyjna choroba płuc. Co więcej, śledzenie zmian tych parametrów w czasie, w przyszłości pozwoli na lepsze poznanie problemu, a co za tym idzie, lepsze sterowanie procesem leczenia, potwierdzenie skuteczności używanych leków itp.

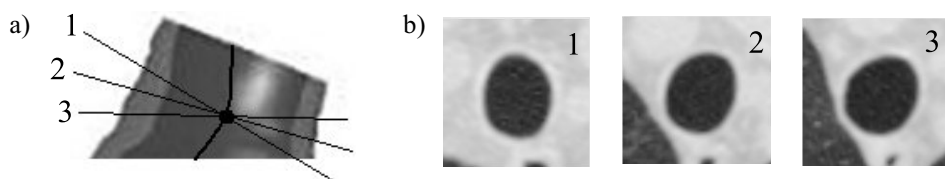
Przeprowadzenie analizy ilościowej wymaga wykonania wielu etapów, zaczynając od segmentacji trójwymiarowego organu ze zbioru tomogramów CT (patrz rys. 1a i b), następnie zastosowaniu algorytmów szkieletyzacji [13], które ułatwią proces analizy, redukując

trójwymiarowy obiekt to zbioru krzywych wolumetrycznych przy jednoczesnym zachowaniu jego parametrów geometrycznych oraz topologii (patrz rys. 1c). Kolejny etap jest ściśle związany z niniejszym artykułem, gdyż to w nim wyznaczone są kierunki stycznych do kolejnych punktów szkieletu. Wyznaczone wektory kierunku stycznej posłużą jako normalne do powierzchni przekrojów poprzecznych drzewa (patrz rys. 1d). Obrazy reprezentujące kolejne przekroje zostaną poddane ponownie procesowi segmentacji, tym razem dwuwymiarowej, w wyniku której wyznaczone zostaną obszary reprezentujące wnętrze oskrzela oraz ściany. Ostatni etap to wykonanie właściwych pomiarów.



Rys. 1. Wyniki kolejnych etapów analizy ilościowej ludzkich drzew oskrzelowych: a) zbiór danych wejściowych pochodzących z tomografii komputerowej CT; b) wysegmentowany trójwymiarowy obiekt wolumetryczny przedstawiający drzewo oskrzelowe; c) szkielet drzewa oskrzelowego; d) powierzchnia prostopadła do jednego z punktów gałęzi drzewa [14]

Niestety każdy z etapów może być źródłem błędów i wpływać na dokładność kolejnych, a co za tym idzie – na ostateczny wynik. Stąd silna potrzeba stosowania metod jak najbardziej niezawodnych i dających jak najlepsze rezultaty. W przypadku problemu wyznaczania kierunku stycznej duże znaczenie ma jakość uzyskanego szkieletu oskrzela, który często jest zdeformowany w wyniku zaszumienia obrazu wejściowego, przez co jego analiza jest utrudniona. Błędne wyznaczenie kierunku stycznej skutkuje wygenerowaniem błędnego przekroju poprzecznego, na którym faktyczna grubość ścian lub średnica prześwitu w danym punkcie może znacznie się różnić od rzeczywistej (patrz rys. 2).

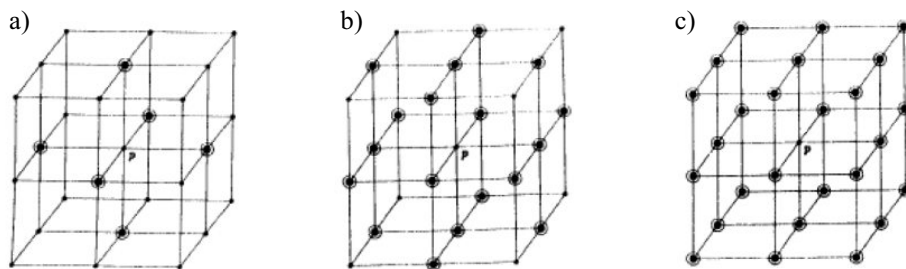


Rys. 2. Błędnie wygenerowane powierzchnie poprzeczne do danego punktu gałęzi drzewa oskrzelowego w wyniku złej estymacji wektora stycznej: a) gałąź drzewa z krzywą ją reprezentującą i zaznaczonymi trzema przekrojami; b) trzy przekroje tego samego miejsca generujące różne rezultaty

3. Podstawowe pojęcia

Szczegółowy opis podstawowych pojęć związanych z grafiką wolumetryczną (objętościową) oraz metod przetwarzania tego typu danych można znaleźć np. w [8]. W tym podrozdziale zostaną przedstawione tylko te pojęcia, które są niezbędne do zrozumienia artykułu.

W grafice objętościowej podstawowym elementem trójwymiarowego obrazu jest zbiór punktów nazywanych wokselaми (*voxels*). W binarnym obrazie wolumetrycznym każdy woksół jest reprezentowany przez czwórkę elementów (x, y, z, v) gdzie (x, y, z) reprezentuje pozycję woksela w kartezjańskim układzie współrzędnych. Natomiast wartość v określa przynależność woksela do tła, jeśli $v = 0$, lub obiektu (w naszym przypadku do krzywej wolumetrycznej), jeśli $v = 1$. Zgodnie z definicją zaprezentowaną w [8] możemy wyróżnić różne typy połączeniowości między punktami. W przestrzeni trójwymiarowej mówimy, że dwa woksóły są ze sobą *26-połączone*, jeśli różnice między wszystkimi współrzędnymi jednego punktu a odpowiadającymi im współrzędnymi drugiego punktu nie wynoszą więcej niż 1. Jeśli dwa punkty są 26-połączone i różnią się między sobą jedynie w dwóch współrzędnych, to możemy powiedzieć, że punkty te są *18-połączone*. Dwa woksóły mogą też być *6-połączone*, jeśli są 26-połączone oraz różnica między nimi dotyczy tylko jednej współrzędnej. Wymienione typy połączeniowości zostały przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Różne dopuszczalne typy połączeniowości w wolumetrycznym obrazie 3D: a) 6-połączone; b) 18-połączone; c) 26-połączone [8]

Sekwencję wokseli $p_1, p_2, \dots, p_n$ nazywamy ścieżką wokseli, jeśli spełnia następującą regułę: p_i jest połączone do p_j wtedy i tylko wtedy, jeśli $|i - j| = 1$, dla $i, j = 1, 2, \dots, n$ i $i \neq j$. Jeśli $p_n = p_1$, to taką ścieżkę wokseli nazywamy zamkniętą. Trójwymiarowa krzywą wolumetryczną o grubości 1 tworzą połączone woksele tworzące ścieżkę. Trójwymiarową zamkniętą krzywą wolumetryczną o grubości 1 tworzą połączone woksele tworzące zamkniętą ścieżkę. W przypadku ogólnym krzywa wolumetryczna może mieć większą grubość niż 1, ale takie krzywe nie są przedmiotem niniejszego artykułu, ponieważ zastosowany do analizy oskrzeli algorytm szkieletyzacji [13] gwarantuje, że analizowana krzywa będzie grubości jednego woksela.

4. Algorytmy wyznaczania kierunku stycznej

Wyznaczanie kierunku stycznej do dowolnego punktu wolumetrycznej krzywej polega na wyznaczeniu zbioru kolejnych wektorów jednostkowych, które będą odpowiadać kierunkowi stycznych w kolejnych punktach krzywej (patrz rys. 4). W przestrzeni trójwymiarowej wyznaczenie kierunku stycznej może być przeprowadzone bezpośrednio (algorytm naiwny, ulepszony algorytm naiwny, algorytm wykorzystujący krzywe skleane) bądź przez projekcje krzywej na płaszczyzny Oxy , Oxz , Oyz (metoda segmentacji krzywej). W kolejnych podrozdziałach zostaną przedstawione kolejne podstawowe metody działające w przestrzeni trójwymiarowej.



Rys. 4. Krzywa wolumetryczna r składająca się z kolejnych punktów $P_0, P_1 \dots P_6$ oraz odpowiadających im wektorów $b_1, b_2 \dots b_5$ reprezentujących kierunek stycznej w kolejnych punktach (a), zbiór wszystkich wektorów kierunku stycznej (b) [10]

4.1. Algorytm naiwny

Pierwszy z algorytmów tzw. algorytm naiwny (AN) bazuje na geometrycznej definicji wektora stycznej. Wektor stycznej s do krzywej $r(t)$ w punkcie $P(t_0) = r(t_0)$ jest zdefiniowany jako:

$$s(t_0) = r'(t_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{r(t_0 + h) - r(t_0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\overline{P_0 P}}{h} \quad (1)$$

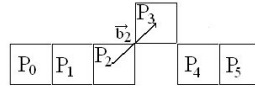
Przenosząc tę definicję do przestrzeni dyskretnej, możemy wektor stycznej s do punktu $P_i = r(i)$ zdefiniować jako:

$$s(i) = \frac{r(i+1) - r(i)}{1} = \frac{\overline{P_i P_{i+1}}}{1} = P_i P_{i+1} = \vec{b}_i \quad (2)$$

Jednostkowy wektor $\vec{b}_i$ można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$\vec{b}_i = [x_i - x_{i+1}, y_i - y_{i+1}, z_i - z_{i+1}] \quad (3)$$

gdzie x, y, z są kolejnymi współrzędnymi analizowanego punktu. Następnie należy dokonać normalizacji $\vec{b}_i$ w celu uzyskania wektora jednostkowego reprezentującego kierunek stycznej do analizowanego punktu (patrz rys. 5).



Rys. 5. Krzywa wolumetryczna składająca się z kolejnych punktów $P_0, P_1 \dots P_5$.

Wektor $\vec{b}_2$ z punktu P_2 do P_3 odpowiada kierunkowi stycznej w punkcie P_2

Ogólny algorytm naiwny AN dla całej krzywej objętościowej można przedstawić następująco:

Algorytm 1 AN

Input: I = 26-połączona krzywa wolumetryczna 3D

Output: O = kierunki stycznej do kolejnych punktów w I

Begin

for each i = punkt w I **do**

$v \leftarrow$ wektor z punktu $I(i)$ do $I(i+1)$

$O(i) \leftarrow$ normalizacja(v)

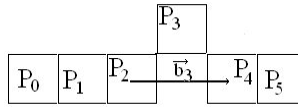
end for

End

4.2. Algorytm ulepszony naiwny

Zaprezentowany w poprzednim podrozdziale algorytm naiwny działa lokalnie, analizując jedynie dwa sąsiednie punkty. Dlatego jest bardzo szybki. Może być zastosowany do dowolnego punktu krzywej bez konieczności liczenia całego zbioru kolejnych wektorów. Jednakże, to sprawia, że jest to algorytm, który jest bardzo wrażliwy na szum (tj. lokalne deformacje krzywej). Dlatego kolejny z algorytmów, tzw. ulepszony algorytm naiwny (UAN) bazuje na zaletach poprzednika, tzn. również działa lokalnie, jest szybki i nie wymaga wyznaczania całego zbioru wektorów stycznych, przy jednoczesnej poprawie tolerancji na szum.

Podstawą algorytmu UAN są te same definicje co w przypadku klasycznego algorytmu naiwnego. Nie jest jednak konieczne, by liczyć wektor między sąsiednimi punktami, gdyż kierunek stycznej w punkcie P_i jest równy wektorowi jednostkowemu $\vec{b}_i = \frac{P_{i-1}P_{i+1}}{|P_{i-1}P_{i+1}|}$ (rys. 6).



Rys. 6. Krzywa wolumetryczna składająca się z kolejnych punktów $P_0, P_1 \dots P_5$.
Wektor $\bar{b}_3$ z punktu P_2 do P_4 odpowiada kierunkowi stycznej w punkcie P_3

Takie rozwiązanie jest mniej wrażliwe na jednopunktowe błędy w analizowanej krzywej, które mają teraz mniejszy wpływ na wynikowy kierunek stycznej, jednakże wpływ szumu ciągle istnieje.

Ogólny algorytm UAN dla całej krzywej można przedstawić następująco:

Algorytm 2 UAN

Input: I = 26-połączona krzywa wolumetryczna 3D

Output: O = kierunki stycznej do kolejnych punktów w I

Begin

for each i = punkt w I **do**

$v \leftarrow$ wektor z punktu $I(i-1)$ do $I(i+1)$

$O(i) \leftarrow$ normalizacja (v)

end for

End

4.3. Algorytm segmentacji krzywej

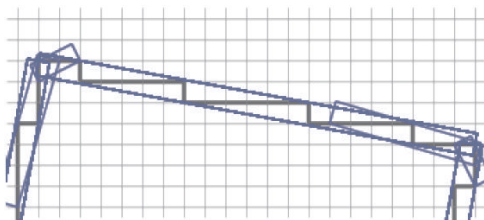
Kolejny opisywany algorytm należy do grupy metod, które w swoim działaniu wykorzystują definicję trójwymiarowej prostej w przestrzeni wolumetrycznej [3]. *Trójwymiarowa dyskretna prosta* D , której główny wektor to $V(a, b, c)$, gdzie $(a, b, c) \in \mathbb{Z}^3$ i $a \geq b \geq c$, jest zdefiniowana przez zbiór punktów (x, y, z) w $\mathbb{Z}^3$ spełniających poniższą nierówność diofantyczną:

$$D \begin{cases} u \leq cx - az < u + e \\ u' \leq bx - ay < u' + e' \end{cases} \quad (4)$$

gdzie $u, u', e, e' \in \mathbb{Z}$. Parametry u, u' nazywamy *dolnym ograniczeniem* D , a parametry e, e' nazywamy *arytmetyczną grubością* D . Całą prostą możemy zatem zapisać w postaci $D(a, b, c, u, u', e, e')$. Dodatkowo trójwymiarową prostą dyskretną nazywamy *naiwną*, jeśli spełniona jest równość $e = e' = a$, i zapisujemy ją jako $D(a, b, c, u, u')$.

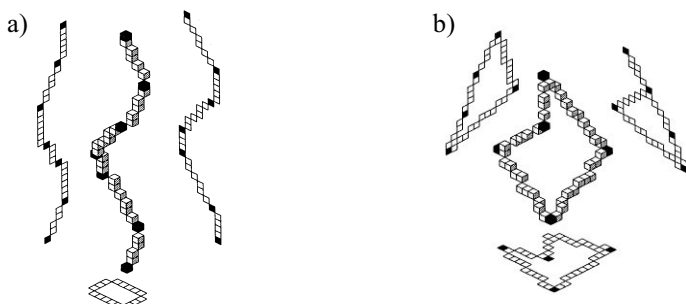
Krzywą wolumetryczną można podzielić na zbiór trójwymiarowych naiwnych prostych wolumetrycznych, które są wyszukiwane w procesie zwanym segmentacją krzywej. W wyniku procesu segmentacji otrzymujemy zbiór maksymalnych segmentów, tzn. zbiór naiwnych prostych o najdłuższej możliwej długości, które pokrywają całą analizowaną

krzywą (patrz rys. 7). Znając zbiór maksymalnych segmentów, a co za tym idzie również ich kierunku można przyporządkować kolejnym punktom krzywej wolumetrycznej odpowiadające im wektory kierunku prostej, której są częścią.



Rys. 7. Krzywa wolumetryczna (kolor szary) z maksymalnymi segmentami (kolor niebieski) [15]

Wyznaczenie maksymalnych segmentów w przestrzeni 2D zostało szeroko opisane w wielu publikacjach naukowych, np. [2, 15]. Jednakże, algorytmy te nie mogą zostać wprost użyte do segmentacji trójwymiarowej krzywej wolumetrycznej. Jako rozwiązanie tego problemu została zaprezentowana metoda wykorzystująca projekcje krzywej na płaszczyzny Oxy , Oxz , Oyz (patrz rys. 8). W tym celu wykorzystano właściwość prostej dyskretnej, której rzuty na przynajmniej dwie z trzech płaszczyzn również są prostą dyskretną. Bazując na tej właściwości, można dokonać segmentacji krzywej dyskretnej, szukając maksymalnych segmentów na dwóch niezależnych płaszczyznach.



Rys. 8. Dwie przykładowe trójwymiarowe krzywe wolumetryczne oraz ich projekcje na osie Oxy , Oxz , Oyz . Kolorem czarnym zaznaczone są końce kolejnych maksymalnych segmentów [3]

Algorytm wyszukiwania maksymalnej trójwymiarowej naiwnej prostej przedstawia poniższy pseudokod [3]:

Algorytm 3

Input: I = 26-połączona ścieżka wokseli 3D do analizy

Output: O = wartość PRAWDA lub FAŁSZ określająca, czy I jest naiwną prostą

Begin

If punkty z I nie mogą być rzutowane na przynajmniej dwie prostopadłe płaszczyzny (Oxy , Oxz , Oyz) w celu utworzenia dwóch krzywych

C_1 i C_2 **then** I nie jest naiwną prostą 3D

return $O = \text{FAŁSZ}$

end if

zastosuj algorytm rozpoznawania naiwnej prostej 2D [2, 15] do krzywej C_1 , a następnie do krzywej C_2

If C_1 i C_2 są naiwnymi prostymi 2D **then** I jest naiwną prostą 3D

return $O = \text{PRAWDA}$

else I nie jest naiwną prostą 3D

return $O = \text{FAŁSZ}$

end if**End**

Cały algorytm segmentacji krzywej (tzw. ASK) do wyznaczania kierunku stycznej dla dowolnego punktu trójwymiarowej krzywej wolumetrycznej przedstawia następujący pseudokod:

Algorytm 4 ASK

Input: $I = 26$ -połączona krzywa wolumetryczna 3D

Output: $O =$ kierunki stycznej do kolejnych punktów w I

Begin

dokonaj segmentacji I na zbiór maksymalnych prostych naiwnych 3D za pomocą algorytmu 3

for each $i =$ punkt w I **do**

$v \leftarrow$ wektor z kierunkiem segmentu, do którego należy i

$O(i) \leftarrow$ normalizacja (v)

end for

End

Główne cechy prezentowanego algorytmu to dobra tolerancja na szum i na lokalne fluktuacje prostej. Czas wyznaczania kolejnych wektorów kierunków stycznych jest większy niż w obu poprzednich metodach, gdyż zbudowanie maksymalnego segmentu wymaga przeprowadzenia większej liczby obliczeń, jednakże jest to też algorytm, w którym możliwe jest skrócenie obliczeń, jeśli interesuje nas kierunek stycznej tylko w konkretnym punkcie. W tym przypadku wystarczy obliczyć tylko segment, do którego należy dany punkt.

4.4. Algorytm wykorzystujący krzywe sklepane

Ostatni z prezentowanych algorytmów, tj. algorytm wykorzystujący krzywe sklepane (AWS), w swoim działaniu próbuje aproksymować krzywą dyskretną za pomocą zbioru

krzywych parametrycznych, których pochodną pierwszego rzędu w dowolnym punkcie będziemy w stanie dokładnie obliczyć. Do aproksymacji wykorzystywana jest jednorodna sklejana trzeciego rzędu [5] składająca się z punktów kontrolnych w jednakowych odległościach od siebie oraz zbioru krzywych parametrycznych trzeciego rzędu zdefiniowanych między kolejnymi punktami kontrolnymi. W przestrzeni trójwymiarowej pojedynczą krzywą parametryczną trzeciego rzędu można zapisać w następujący sposób:

$$\begin{aligned}x(t) &= a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \\y(t) &= b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0 \\z(t) &= c_3 t^3 + c_2 t^2 + c_1 t + c_0\end{aligned}\tag{5}$$

Zwykle przyjmuje się $t = [0 \dots 1]$ między kolejnymi punktami kontrolnymi. W wyniku procesu aproksymacji otrzymujemy zestaw punktów kontrolnych oraz współczynniki wielomianów trzeciego rzędu (a , b , c) opisujących krzywą między kolejnymi punktami kontrolnymi. Dokładność aproksymacji jest uzależniona od parametru d określającego tolerancję procesu aproksymacji, tj. maksymalnie jak daleko w rozumieniu odległości Euklidesowej wynikowa krzywa parametryczna może znajdować się od punktów aproksymowanej krzywej dyskretnej (patrz rys. 9).

Metodę tę można bezpośrednio zastosować do krzywej trójwymiarowej. Ogólny algorytm AWS można przedstawić za pomocą następującego pseudokodu:

Algorytm 5 AWS

Input: I = 26-połączona krzywa wolumetryczna 3D, d = tolerancja

Output: O = kierunki stycznej do kolejnych punktów w I

Begin

$S \leftarrow$ sklejana aproksymująca I z dokładnością d

for each i = punkt w I **do**

$t \leftarrow$ punkt w S znajdujący się najbliżej i

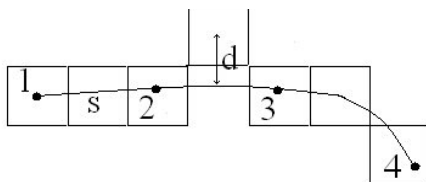
$v \leftarrow S'(t)$

$O(i) \leftarrow$ normalizacja (v)

end for

End

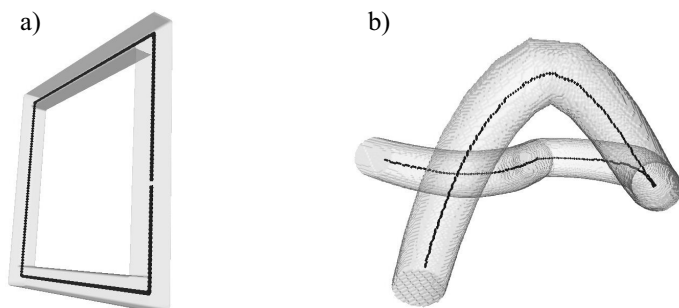
Ostatni z prezentowanych algorytmów jest najbardziej wymagający obliczeniowo. Jednakże wykazuje największą tolerancję na szum i lokalne fluktuacje krzywej. Jego działanie jest globalne i nie jest możliwe przyspieszenie algorytmu w przypadku potrzeby wyznaczenia tylko kierunku stycznej do konkretnego punktu. Za każdym razem wymagana jest aproksymacja całej krzywej. Co więcej metoda ta wymaga ustawienia parametru, jakim jest tolerancja, z jaką aproksymowana jest krzywa dyskretna. Źle dobrany parametr może powodować silny wpływ szumu lub zbyt duże wygładzenie krzywej. W obu przypadkach wyznaczony kierunek stycznej nie będzie dokładny.



Rys. 9. Krzywa wolumetryczna oraz aproksymująca ją sklejana S utworzona za pomocą trzech krzywych parametrycznych zdefiniowanych między kolejnymi punktami kontrolnymi od 1 do 4. Wartość d określa odległość punktu od sklejanej i nie może być większa niż zakładana tolerancja

5. Wyniki eksperymentów

W celu sprawdzenia, jak przedstawione metody działają w praktyce, przygotowane zostały trzy testy. Pierwsze dwa eksperymenty dotyczyły wyznaczania kierunku stycznej do kolejnych punktów wolumetrycznej krzywej wygenerowanej ze sztucznych obiektów objętościowych o stałej grubości (patrz rys. 10).

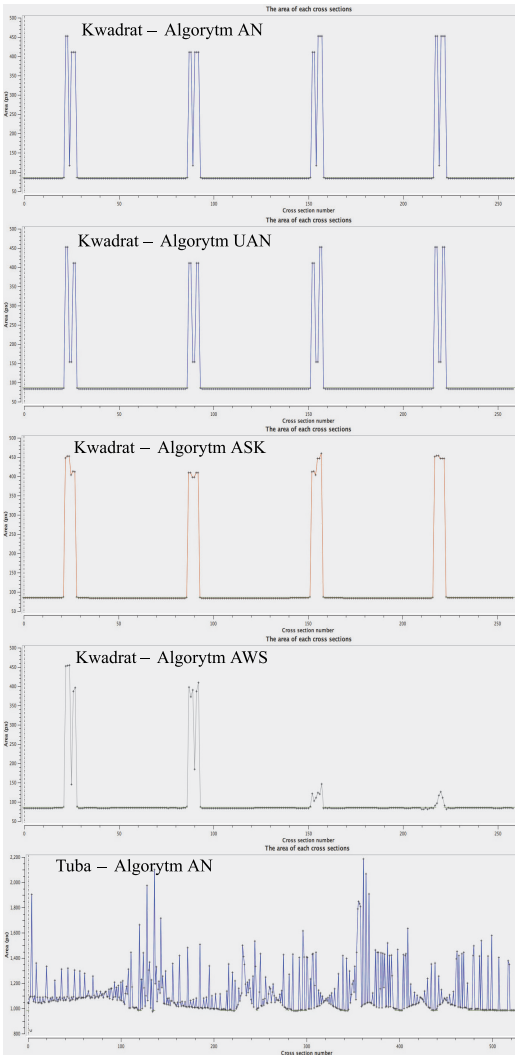


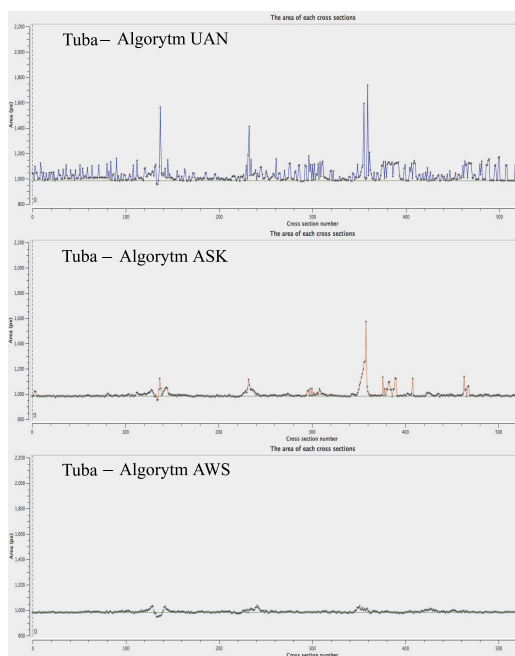
Rys. 10. Dwa sztuczne obiekty objętościowe (kolor szary): a) kwadrat i b) tuba oraz dwie trójwymiarowe krzywe wolumetryczne (kolor czarny) wygenerowane na podstawie tych obiektów

Krzywa do analizy została utworzona za pomocą algorytmu szkieletyzacji [1], którego właściwości gwarantują, że dana krzywa będzie miała kształt obiektu wejściowego oraz, że będzie dokładnie po jego środku. Następnie wyznaczone wektory kierunku, za pomocą kolejnych algorytmów, posłużyły do wygenerowania przekrojów poprzecznych wejściowych obiektów. Kolejny krok to określenie pola powierzchni każdego z przekrojów poprzecznych. Wartość obliczonych pól powierzchni dla kolejnych punktów krzywych została użyta do określenia poprawności algorytmu wyznaczania kierunku stycznej. W idealnym przypadku pole powierzchni powinno być stałe w kolejnych punktach krzywej oraz osiągać minimalną możliwą wartość. Wyznaczono też dodatkowe parametry statystyczne, takie jak wartość średnia uzyskanych pól przekroju, ich odchylenie standardowe oraz całkowitą objętość każdego obiektu wejściowego. Uzyskane wyniki prezentuje tabela 1 oraz rysunek 11.

Tabela 1
Porównanie ilościowe (liczba punktów) działania opisywanych algorytmów dla obiektów sztucznych

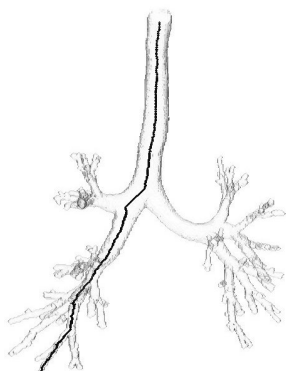
Kwa- drat	Średnia	AN	UAN	ASK	AWS ($d=3$)
	Odchylenie standardowe	110,5	106,8	115,8	98,7
	Objętość (całkowita)	93,1	84,3	100,3	63,4
		28627	27665	29994	25567
Tuba	Średnia	1122,4	1031,8	997,8	987,7
	Odchylenie standardowe	184,2	67,7	39,7	9,9
	Objętość (całkowita)	589278	541693	523872	518594





Rys. 11. Wykresy prezentujące wyniki działania opisywanych algorytmów. Na osi poziomej zamieszczono kolejne punkty krzywej, a na osi pionowej wartości pola powierzchni obiektu na wygenerowanym przekroju poprzecznym

Ostatni z testów dotyczył zastosowania praktycznego prezentowanych metod w problemie generacji przekrojów poprzecznych gałęzi ludzkich drzew oskrzelowych. W tym celu ponownie wykorzystano algorytmy szkieletyzacji. Za ich pomocą uzyskano wolumetryczną krzywą reprezentującą fragment ludzkiego drzewa oskrzelowego (patrz rys. 12).



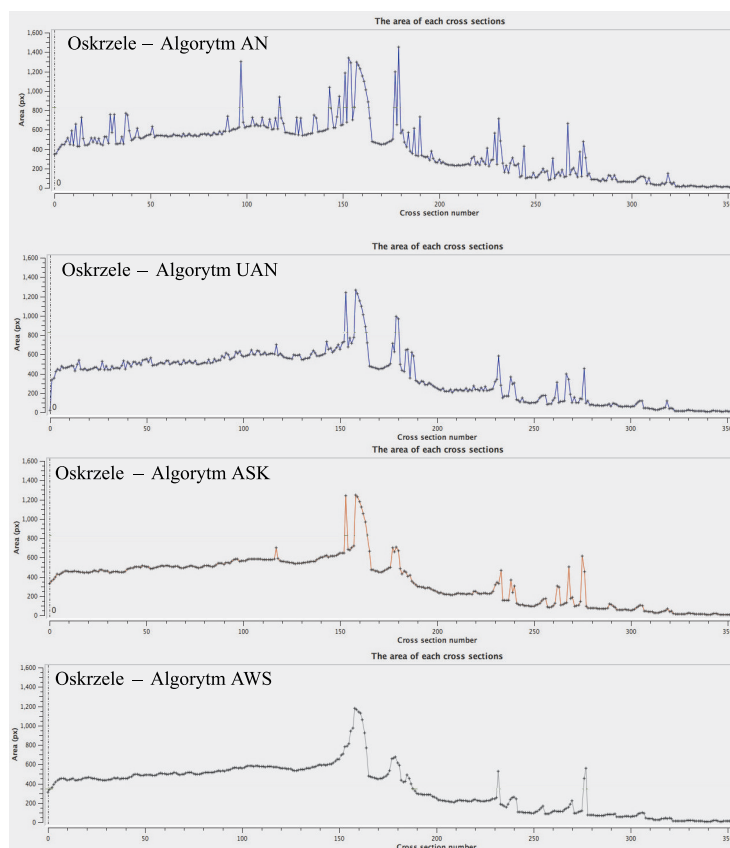
Rys. 12. Ludzkie drzewo oskrzelowe (kolor szary) oraz krzywa wolumetryczna (kolor czarny) reprezentująca kolejne wybrane gałęzie drzewa

Następnie policzone zostały kolejne wektory kierunku stycznej do krzywej oraz przekroje poprzeczne. Na podstawie przekrojów określono grubość wnętrza drzewa oskrzelowego w kolejnych jego punktach. Ze względu na kształt obiektu, który jest nieregularny, należy również inaczej niż poprzednio interpretować uzyskane wyniki. Tym razem, w idealnej sytuacji, grubość oskrzeli powinna płynnie maleć, a całkowita objętość powinna być jak najmniejsza. Uzyskane wyniki pokazuje tabela 2 oraz rysunek 13.

Tabela 2

Porównanie ilościowe (liczba punktów) działania opisywanych algorytmów dla ludzkiego drzewa oskrzelowego

	AN	UAN	ASK	AWS ($d=3$)
Objętość (całkowita)	141366	128660	124658	122802



Rys. 13. Wykresy prezentujące wyniki działania opisywanych algorytmów. Na osi poziomej zamieszczono kolejne punkty krzywej, a na osi pionowej wartości pola powierzchni obiektu na wygenerowanym przekroju poprzecznym

6. Wnioski

Opisywany w niniejszym artykule problem wyznaczania kierunku stycznej do dowolnego punktu krzywej wolumetrycznej ma istotny wpływ na jakość uzyskanych wyników np. w ilościowej analizie ludzkich drzew oskrzelowych. Dlatego bardzo ważny jest świadomy i jak najlepszy wybór odpowiedniego algorytmu do rozwiązania tego problemu. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że proste naiwne metody generują znaczne błędy. Dopiero metody bardziej zaawansowane, takie jak algorytmy ASK i AWS, wygenerowały wyniki, które mogą zostać zaakceptowane z punktu widzenia przedstawionego zastosowania praktycznego. Jednakże obie metody w niektórych miejscach zawiodły, dlatego należy je stosować z uwagą. Najlepsze wyniki osiągnięto, stosując metodę AWS, jednakże nie jest to metoda pozbawiona wad. Najpoważniejszą z nich jest konieczność ustawienia parametru tolerancji oraz znacznie wolniejsze działanie wykorzystujące większą ilość zasobów komputera niż podczas stosowania jednej z pozostałych metody. We wszystkich metodach największy wpływ na uzyskane wyniki miała jakość krzywych wejściowych. W tym miejscu należy podkreślić, że definicja krzywej wolumetrycznej przedstawiona w tym artykule gwarantuje, że analizowane krzywe będą tworzyły ścieżkę wokseli, dlatego nie są brane pod uwagę krzywe rozłączone lub mające grubość większą niż 1. Na wyznaczenie kolejnych kierunków stycznych nie mają też wpływu pojedyncze odizolowane woksele w obrazie. Jednakże należy zauważyć, że tego typu problemy również mogą się pojawić, jeśli problem będzie dotyczył bardziej ogólnego przypadku. Więcej na temat tego typu problemów i metod ich rozwiązania np. przez zastosowanie tzw. segmentów rozmytych, zainteresowana osoba może znaleźć w [2, 9].

Istotne jest również to, że w literaturze przedmiotu znaleźć można wiele metod coraz skuteczniej rozwiązujących prezentowany problem. W większości prezentowane rozwiązania działają tylko dla krzywych dwuwymiarowych i nie jest możliwe ich przeniesienie do przestrzeni 3D. Brakuje również prac, w których prezentowane nowe metody stosuje się do rozwiązania konkretnych problemów praktycznych, jak również porównania ilościowego metod już istniejących. Dlatego niniejszy artykuł ma duże znaczenie praktyczne, a uzyskane wyniki w przyszłości zostaną uwzględnione podczas tworzenia systemu do ilościowej analizy ludzkich drzew oskrzelowych na bazie obrazów z tomografii komputerowej CT, nad którym autorzy obecnie pracują. Równolegle trwają również prace nad nową metodą wyznaczania kierunku stycznej dla trójwymiarowych krzywych wolumetrycznych, która będzie mogła być z powodzeniem zastosowana w ilościowej analizie ludzkich drzew oskrzelowych.

Literatura

- [1] Bertrand G., Couprie M., *A new 3D parallel thinning scheme based on critical kernels*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 4245, 2006, 580–591.
- [2] Buzer L., *A simple algorithm for digital line recognition in the general case*. Pattern Recognition, vol. 40, 2006, 1675–1684.
- [3] Coeurjolly D., Debled-Rennesson I., Teytaud O., *Segmentation and Length Estimation of 3D Discrete Curves*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 2243, 2001, 77–88.
- [4] Coeurjolly D., Klette R., *A comparative evaluation of length estimator of digital curves*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 26, 2004, 252–257.
- [5] Diereckx P., *Curve and surface fitting with splines*. Monographs on Numerical Analysis, 1995.
- [6] Janaszewski M., Marrow T.J., Babout L., *Adaptive 3D thinning algorithm to detect bridging ligaments during intergranular stress corrosion cracking of stainless steel*. [w:] 5th World Congress on Industrial Process Tomography, 2007, 1107–1115.
- [7] Janaszewski M., Postolski M., Babout L., Kącki E., *Comparison of several centreline extraction algorithms for virtual colonoscopy*. Advances in Intelligent and Soft Computing, vol. 65, 2009, 241–254.
- [8] Kong T.Y., Rosenfeld A., *Digital topology: introduction and survey*. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 48, 1989, 357–393.
- [9] Nguyen T.P., Debled-Rennesson I., *Curvature estimation in noisy curves*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 4673, 2007, 474–481.
- [10] Nguyen T.P., Debled-Rennesson I., *Curvature and torsion estimator for 3D curves*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5359, 2008, 688–700.
- [11] Palagyi K., Tschirren J., Hoffman E.A., Sonka M., *Quantitative analysis of pulmonary airway tree structure*. Computers in Biology and Medicine, vol. 36(9), 2006, 974–996.
- [12] Postolski M., Janaszewski M., Fabijanska A., Babout L., Couprie M., Jedrzejczyk M., Stefanczyk L., *Reliable airway tree segmentation based on hole closing in bronchial walls*. Advances in Soft Computing: Computer Recognition Systems 3, vol. 57, 2009, 389–396.
- [13] Postolski M., Janaszewski M., Jopek Ł., Babout L., *3D skeletonization of pulmonary airway tree structures*. Automatyka (półrocznik AGH), vol. 14, 2010, 337–351.
- [14] Tschirren J., Hoffman E.A., McLennan G., Sonka M., *Intrathoracic airway trees segmentation and airway morphology*. IEEE Trans. Med. Imaging, vol. 24(12), 2005, 1529–1539.
- [15] de Vieilleville F., Lachaud J.-O., Feschet F., *Maximal digital straight segments and convergence of discrete geometric estimators*. Journal of Mathematical Image and Vision, vol. 27, 2007, 471–502.