

胸部4次元CT画像より気管支領域を抽出するための 最短路探索を利用した領域分割法

高田 康平^{1,a)} 道脇 幸博² 森谷 浩史³ 井尻 敬^{1,b)}

概要：本研究では、4次元 Computed Tomography (4DCT) 画像より気管支領域を半自動的に分割できる手法を提案する。提案手法において、ユーザは、木構造を持つ制御点群を3次元空間に配置する。するとシステムは、親制御点と子制御点の間のパスを計算し、このパスをシードとして領域拡張を行うことで気管支形状を抽出する。本研究では、制御点間のパス計算において、気管支特徴を考慮した最短路探索を利用する。また、木構造の深さにより拡張サイズを制御可能な領域拡張法も提案する。提案手法の有用性を示すため、提案手法のプロトタイプシステムを用いて複数症例の気管支領域分割を行い、呼吸時における気管支の動きを描出できることを確認した。

キーワード：医用画像領域分割, 4次元CT画像, 気管支領域分割

A Segmentation Method Using Shortest Path Search for Extracting Bronchial Regions from 4D CT Images of the Chest

TAKATA KOHEI^{1,a)} MICHIWAKI YUKIHIRO² MORIYA HIROSHI³ IJIRI TAKASHI^{1,b)}

Abstract: In this study, we propose a semi-automatically segmentation method for bronchial regions from 4D computed tomography (4DCT) images. In our method, the user places control points with a tree structure similar to a bronchus. We then calculate paths between all pairs of parent and child control points and extract the bronchus shape by region growing using the paths as a seed. In this study, we search the paths by the shortest path algorithm considering the bronchial features. We also propose a region growing in which the user can control the growth size based on the depth of the tree structure. To demonstrate the feasibility of our method, we show multiple examples of bronchial region segmentation by using our prototype system.

Keywords: Medical image segmentation, Four dimensional computed tomography, Bronchi segmentation

1. はじめに

4次元医用画像により、人体の内部を4次元的に観察し、臓器やその動きを解析する試みが行われている [1], [2], [3]. 特に本研究では、呼吸時の胸部4DCT画像(図1a)に着目し、気管支の形状と動きの抽出を目的とする。胸部4DCT画像において、肺領域はその周辺組織との境界が明瞭であり、閾値法などにより比較的容易に領域分割が可能である。一方、気管支領域は、末端ほど細くなりその境界が不明瞭

となるため、その領域分割は容易ではない。

そこで本研究では、胸部4DCT画像から気管支領域を分割できるツールの実現を目的とし、ユーザが木構造を持つ制御点を配置することで半自動的に気管支領域を抽出できる手法を提案する。具体的には、ユーザは気管支上部にルートとなる制御点を配置し、気管支の分岐部分に制御点を繰り返し配置する(図1b)。システムは、配置された制御点における親子間をつなぐパスを計算し(図1c)、さらにこのパスをシードとする領域拡張により気管支領域分割を行う(図1d)。これにより、ユーザは4DCT画像における各時相に制御点を指定することで、複雑な構造を持つ気管支領域を分割できる。

¹ 芝浦工業大学

² 武蔵野赤十字病院

³ 大原総合病院

a) ma20056@shibaura-it.ac.jp

b) ijiri@shibaura-it.ac.jp

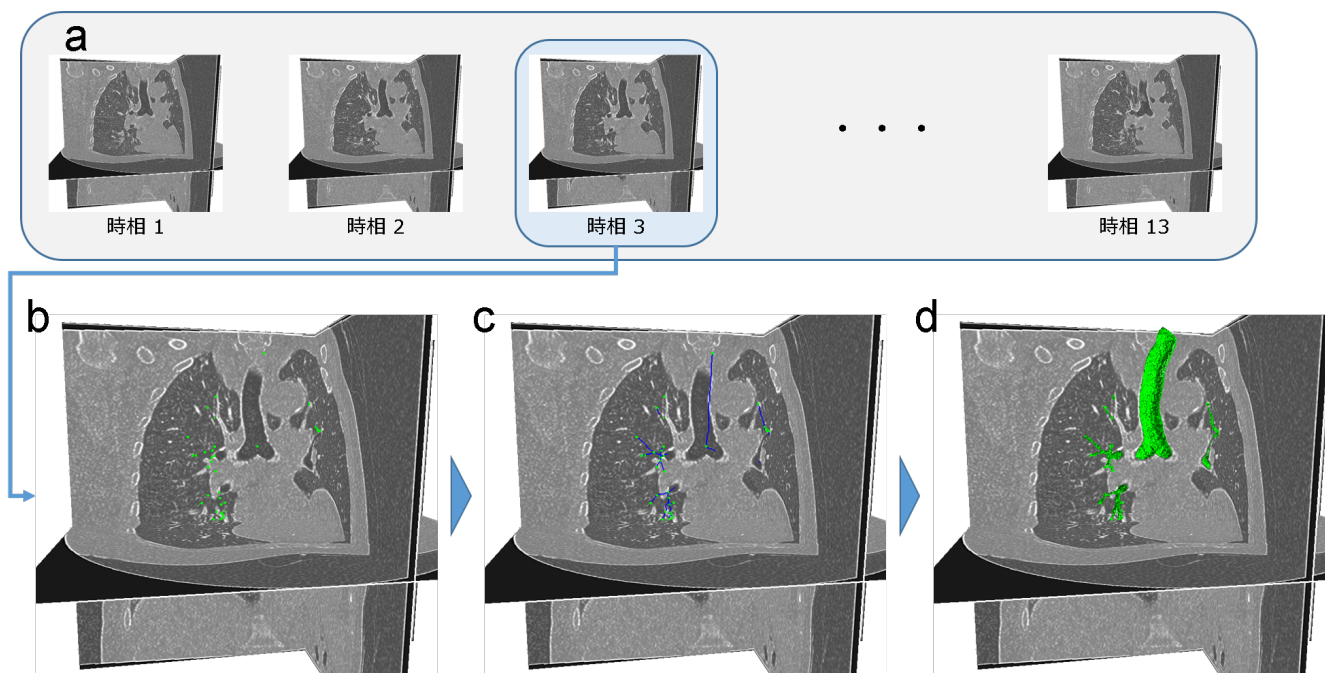


図 1 提案手法の概要. ユーザは, 入力胸部 4DCT 画像 (a) 内に木構造を持つ制御点を配置する (b). システムにより, 気管支に沿うようなパスがつながれ (c), このパスをシードとして領域拡張が行われ (d), 時間的に変化する気管支領域の分割が可能となる.

提案手法の有用性を示すため, 提案手法のプロトタイプシステムを用いて 3 症例の呼吸運動時の胸部 4DCT 画像の分割を行った. 結果, 1 フレーム当たり約 30 分程度の作業により, 詳細な分割を行えることを確認した. また, 提案手法は, 統合的な 4DCT 画像処理システム, RoiPainter4D[4] のツールとして実装され公開される予定である.

2. 関連研究

息止めして撮像された胸部 3 次元医用画像から気管支領域を分割するための手法が研究されている. 既存手法は, 半自動領域分割手法と全自動領域分割手法に大別できる.

気管支の半自動領域分割 ユーザが, シード点指定やパラメータ調整を行いながら半自動的に気管支領域の分割を行える手法が提案されている. Kiraly et al.[5] は, 気管にシードを指定し, 領域拡張とモルフォロジー演算により気管支領域を分割する手法を提案し, 統合的な領域分割システムを開発した. Nardelli et al.[6] は, 気管, 左右主気管支の 3 点にシードを指定し, 各シードについて異なる閾値で領域拡張を行う手法を提案した. Tschirren et al.[7] は, 円筒形の関心領域を拡張するシードを指定し, 拡張範囲を制御しながら領域拡張する手法を提案した. この通り, 気管支領域の分割は重要な課題であり, 多様な半自動領域分割手法が提案されている. ただし, 既存研究では呼吸したまま撮像される胸部 4 次元医用画像に関する議論はあまりなされていない.

気管支の全自動領域分割 Fabijańska[8] は領域拡張法を 2

段階に分けた分割手法を提案した. この手法では, まず, 気管支領域を超えて漏れ出す (以下, リークする, と呼ぶ) ことのない強い条件で領域拡張を実行し, この結果に基づいて気管支の候補領域を計算する. 続いて, 候補領域内にて 2 度目の領域拡張を実行する. Tschirren et al.[9] は, アキシャル断面 (人体が直立した際の水平方向断面) にて, 適切な面積の円形領域を探索し, これを基に気管内にシードを自動配置し, 領域拡張を行う分割手法を提案した. また, 気管支領域外へのリークに対応するため, リークする領域を手動で除去するツールについての開発も行われた. Bian et al. [10] は, ランダムフォレストを用いた気管支の分割手法を提案した. この手法では, 学習データより得られる 16 次元の特徴量を利用し, 入力画像に 5 種類のラベル値 (半径の異なる 4 種類の気道, および, 背景) を付与する. Meng et al.[11] は, 3 次元画像の局所領域より計算されるヘシアン行列の固有値により気管支特徴を定義し, サポートベクタマシンで気管支を領域分割する手法を提案した. これら全自動の領域分割手法では, シード点配置などの手間を掛けずに, 領域分割を行えるという利点がある一方で, 分割結果に誤りがあった場合に, その修正を行うことは容易でないという課題がある.

3. 提案手法

本研究では, 呼吸時の胸部 4DCT 画像から気管支領域を分割することを目的とし, 木構造を持つ制御点を配置することで半自動的に気管支領域を抽出できる手法を提案す

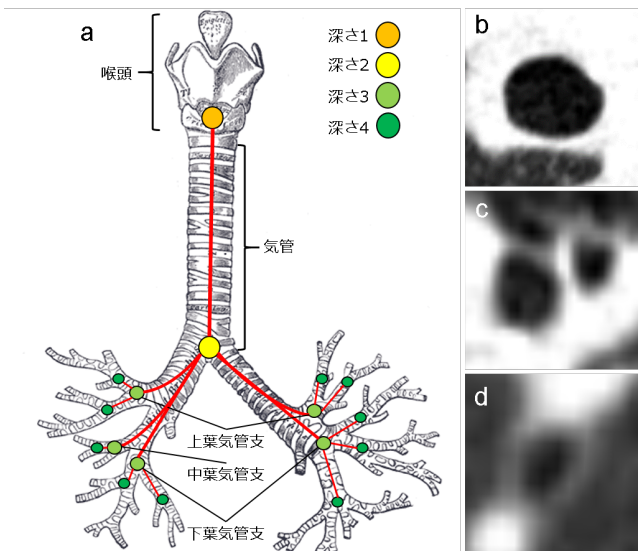


図 2 気管・気管支の構造と制御点の配置箇所 (a), 気管の断面 (b), 太い気管支の断面 (c), 細い気管支の断面 (d). 本図 (a) は Public Domain のイラストに著者が注釈を加えたものである.

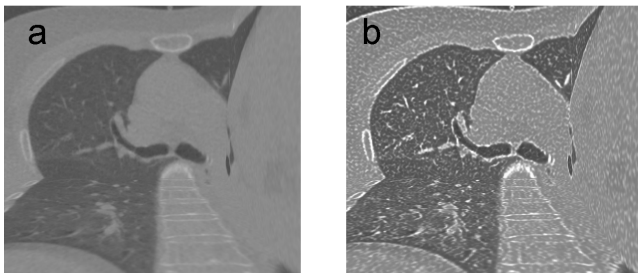


図 3 先鋭化処理の例. 元画像 (a), 先鋭化処理後の画像 (b).

る. 提案手法において, ユーザは入力 4DCT 画像中の気管支領域 (3.1 節) に, 気管支に沿った木構造を持つ制御点を配置する (3.2 節). するとシステムは, 制御点間の最短経路アルゴリズムにより気管支に沿うパスを計算する (3.3 節). 続いて, 計算したパスをシードとして利用し領域拡張を行うことで気管支の形状を抽出する (3.4 節).

3.1 胸部 4DCT 画像と気管支領域

本研究では, 呼吸運動中に連続的に撮像した胸部 4DCT 画像を対象とする. 対象画像の解像度は, 幅 × 高さ × スライス数 × 時相数 = $512 \times 512 \times 600 \times 15$ 程度のものを想定している. 特に, 本研究では, 320 列 CT, Aquilion ONE にて 3 fps の時間解像度で撮像された 4DCT 画像を利用した.

本研究にて領域分割の対象とする気管・気管支を図 2a に示す. 気管・気管支は, 喉頭から肺へ続く空気の通り道であり, 気管が二股に分かれ左右の肺の気管支へとつながる. また, 気管支は木構造を持ち, 分岐構造が深くなるほど細くなる. CT 画像中でも, 気管支は, 分岐構造が深くなるほど, その境界は不明瞭となる (図 2b,c,d).

前述の通り, 木構造が深くなるのに従い気管支の境界が不

明瞭となる. そこで, 本研究では, Meng et al.[11] が気管支の特徴抽出の前処理に利用した先鋭化処理 $F' = F - w \text{LoG}(F)$ を適用する. ここで, F は入力画像, F' は先鋭化処理後画像, w は重みパラメータ, $\text{LoG}(\cdot)$ は Laplacian of Gaussian フィルタを表す. この先鋭化処理の例を図 3 に示す. この先鋭化処理はユーザの可視化目的のみに利用し, 最短経路計算や領域拡張には入力画像を利用する.

3.2 制御点配置インターフェース

本研究では, 気管支が木構造を持つことに着目し, 気管支の構造に沿った木構造を持つ制御点を配置するユーザインターフェースを提案する. ユーザが指定する木構造を図 2a に示す. この木構造では, 気管の起点となる喉頭付近にルート制御点, 気管の左右へ分岐する部分に最初の子制御点を配置する. 続いて, 上葉気管支・中葉気管支・下葉気管支の末端に次の子制御点, その後, 気管支の分岐部分に制御点を繰り返し配置する. 最後に, 観察可能な気管支の末端に制御点を配置する.

呼吸時の 4DCT 画像では, 時相によって観察可能な気管支が変化する. 例えば, 肺が膨らむ吸気終了時には末端の気管支まで観察が可能であるが, 肺が縮む呼気終了時には, 末端の気管支の判別は困難となる. そのため提案手法では, 各時相においてユーザが観察可能な部分まで気管支中の制御点を指定することとする.

提案手法において, ユーザは, 4 次元 CT 画像を観察しながら領域分割作業を行う. 図 4 に, 提案手法のプロトタイプシステムのスクリーンショットを示す. プロトタイプシステムは, メイン画面 (左) と操作ダイアログ (右) より構成される. ユーザは, メイン画面において, XY-, YZ-, ZX-断面を利用して肺・気管支領域を観察する. また, 右のダイアログより, ボリュームレンダリングの透明度指定や, 表示する時相の変更を行える.

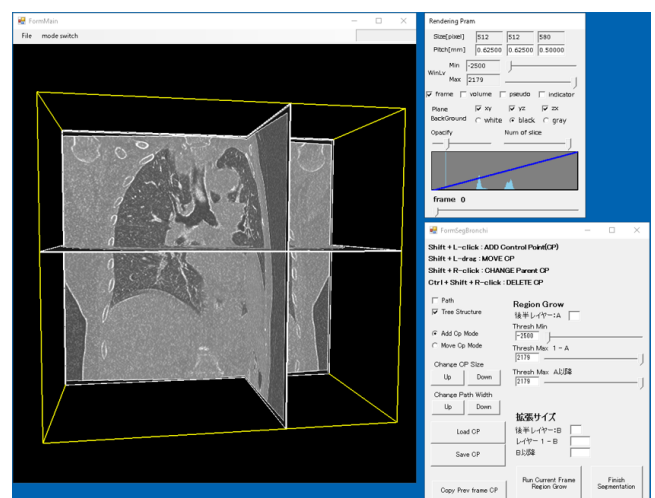


図 4 提案手法のプロトタイプシステムのスクリーンショット.

図 5 に制御点配置の流れを示す. まずユーザは, 右側の

操作ダイアログより「制御点追加モード」を選択する。続いて、既存の制御点を右クリックすることで選択状態とし(図 5a-b)、断面上の点を左クリックすることでその位置に新しい制御点を配置する(図 5c-d)。このとき、新しく追加された制御点は、選択状態の制御点の子として登録される。また、ひとつも制御点がない状態で制御点を追加すると、その制御点は木構造のルートとなる。ユーザは、可視化用の XY-, YZ-, ZX-断面により気管支を観察し、この作業を繰り返すことで、木構造を持った制御点配置を行う。

制御点配置後、制御点間のパスが自動的に計算される(図 5e)。もし、このパスに誤りがあれば、ユーザはマウス操作により制御点を移動・削除することが可能である。また、プロトタイプシステムでは、ひとつ前の時相からすべての制御点をコピーすることも可能である。

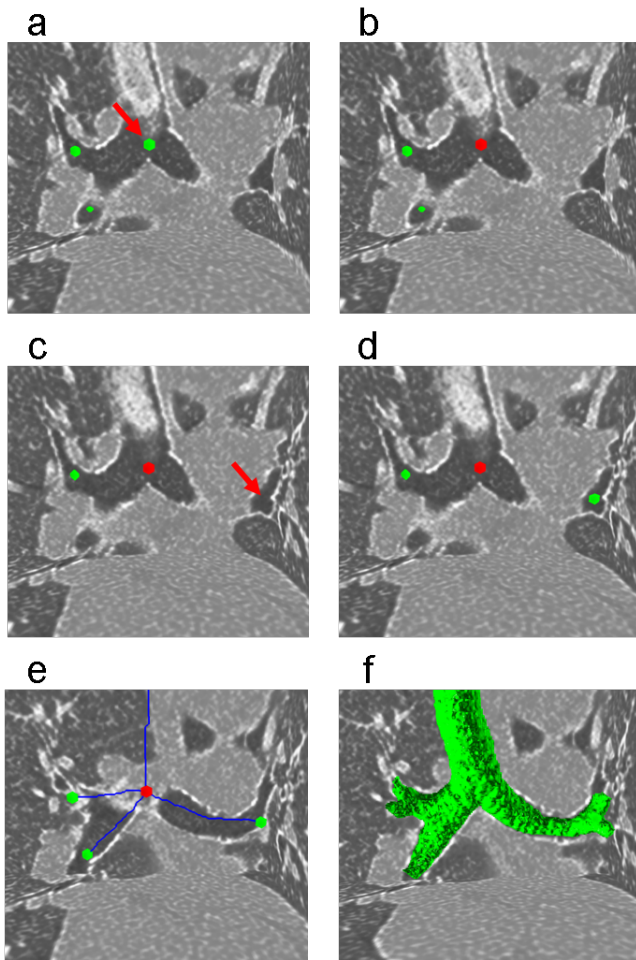


図 5 制御点配置の流れ。ユーザは、既存の制御点を右クリックすることで選択状態とし (a-b)、断面を左クリックすることで子制御点を新たに追加する (c-d)。制御点配置後、システムは自動的にパスを計算しユーザに提示する (e)。最後にこのパスをシードとして領域拡張が行われる (f)。

3.3 最短路アルゴリズムによるパスの計算

提案手法では、ユーザに指定された制御点群の親子間に

ついて、気管支領域を通るパスを生成する。本研究では、このパスを最短路アルゴリズムにより計算する。この計算は時相毎に行われる。まず、我々は、3次元画像ボクセルをノードとし、各ボクセルとその26近傍ボクセルをつないだエッジを持つ無向グラフを作成する。ここでボクセル (p, q) 間をつなぐエッジの容量 $C(p, q)$ を、以下の通り定義する、

$$C(p, q) = \frac{|I_p - I_q|}{I_{max} - I_{min}} + \|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_q\|. \quad (1)$$

ただし、 I_p と I_q はそれぞれ画素 p, q の画素値、 I_{max} と I_{min} はそれぞれ p の近傍領域の最大画素値と最小画素値、 $\mathbf{x}_p \in R^3$ と $\mathbf{x}_q \in R^3$ はそれぞれ画素 p, q の座標を表す。気管支の中心部分は、気管支の壁付近より画素値が小さいという特徴を持つため、気管支の中心付近では上式の容量が小さくなることが期待できる。本研究では、このグラフにおいて、ある親子制御点間の最短路を Dijkstra 法により計算する。その際、前もって閾値処理にて抽出した肺領域内に探索範囲を限定することで、計算時間短縮を行う。

3.4 気管支の深さを考慮した領域拡張法

前節で計算した最短路上のボクセルをシードとして領域拡張を行う。本研究では、6近傍画素を利用した領域拡張を実施し、領域拡張の規則には上限 T_{max} と下限 T_{min} の2つの閾値を利用する。ここで、気管領域(深さ 1-2)では、壁の境界が明瞭であり拡張する領域が対象領域を超えてリークすることが非常に少ない。一方で、深さ 2以降の気管支領域では、その壁が不明瞭のためリークを起しやすいため、そこで、本研究では、気管領域と、気管支領域について、異なる閾値で領域拡張を実施する。つまりユーザは、気管領域と気管支領域について、別々の閾値を指定する。

前述の、閾値調整のみでは、非常に細い気管支においてリークを防ぐことは難しい。そこで本研究では、上部領域・下部領域に分けた拡張サイズの指定も合わせて提案する。提案手法において、ユーザは、『上部領域と下部領域の境界となる深さ k 』『上部領域の深さ 1 の太さ $r_1^{depth=1}$ 』および『下部領域の太さ r_2 』を指定する。提案手法は、上部領域(深さ 1-k)において、領域拡張のサイズを、分岐のたびに減少するように、次の通り決定する、 $r_1^{depth+1} = r_1^{depth} / \sqrt{2}$ 。また、下部領域(深さ k以降)では、領域拡張のサイズを r_2 とする。提案手法は、このサイズの範囲内で領域拡張を実施する。

4. 結果と考察

提案手法の有用性を確認するため、提案手法のプロトタイプシステムを用いて、3件の胸部 4DCT 画像に対して気管支領域の分割を実施した。図 6 に分割結果を示す。図 6 の症例 1 では、時相 6 が、肺が最も膨らむ吸気終了時点に対応する。この結果より、提案手法により呼吸時の微細な

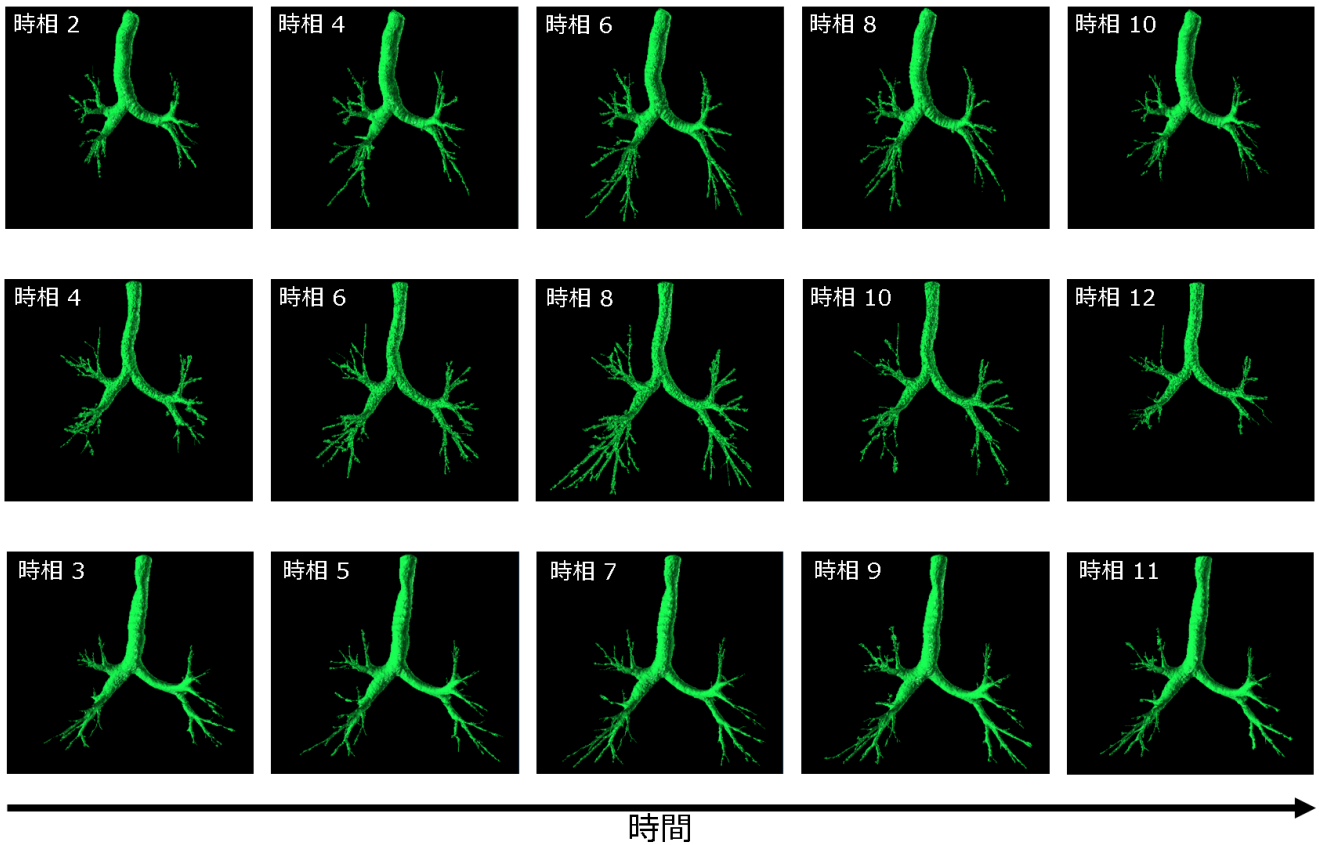


図 6 提案手法による気管支領域の分割結果. 1 段目に症例 1 の分割結果, 2 段目に症例 2 の分割結果, 3 段目に症例 3 の分割結果を表す. 図中の数字は時相番号を示す.

気管支の形状やその動きが描出てきていることが分かる. 同様に, 他の 2 症例についても気管支領域を分割し, 気管支の形状やその動きの描出が可能であることを確認した.

表 1 に, 配置した制御点の数と配置にかかった時間を表す. 図 6 の症例 1 において, 配置した制御点の数は平均 113 個, 最大 158 個 (肺が膨らむ吸気終了時), 最小 75 個 (肺が縮む呼気終了時) であった. また, 1 時相分に制御点配置する時間は, 平均 30 分, 最大 38 分, 最小 20 分程度かかった.

表 1 配置した制御点の数と配置時間

	制御点の数			配置時間		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小
症例 1	113	158	75	30m11s	38m2s	20m28s
症例 2	108	186	69	33m4s	45m13s	20m33s
症例 3	119	158	74	26m38s	34m50s	14m42s

5. まとめと展望

本研究では, 胸部 4DCT 画像から気管支領域を分割できるツールの実現を目的とし, 気管支に沿った木構造を持つ制御点を配置することで気管支領域を分割できる手法を提案した. 特に, 制御点間を結び, かつ, 制御点間をつなぐ

パスを生成するため, 最短路アルゴリズムを応用した. また, 領域拡張により正しく気管支形状を抽出するため, 木構造の深さにより閾値・拡張サイズを変化させられる領域拡張法を提案した. 最後に, 提案手法の有用性を確認するため, 3 症例分の 4DCT 画像の領域分割を実施しその結果を示した.

提案手法の課題のひとつは, 作業時間である. 現在の提案手法では, 各時相に多くの制御点を配置する必要があるため, 4DCT 画像全体の領域分割には長い作業時間を要してしまう. ある時相の前後の制御点情報や画像情報を利用して, 制御点の初期配置を自動化することで領域分割作業の負担軽減を行うことが重要な将来課題のひとつである.

謝辞 本研究は, 武蔵野赤十字病院臨床研究倫理審査委員会 (申請番号 1087), および, 芝浦工業大学生命工学研究倫理審査 (受付番号 20-005) の承認を受けて実施されたものである.

参考文献

- [1] 菊地貴博, 井尻敬, 才藤栄一, 稲本陽子, 道脇幸博. Harmonic Coordinate を用いた自由形状変形法による嚥下 4 次元 CT 画像の領域分割. In *Visual Computing 2020*, 2020.
- [2] Yubing Tong, Jayaram K Udupa, Dewey Odhner, Sanghun Sin, Mark E Wagshul, and Raanan Arens. A

- novel non-registration based segmentation approach of 4D dynamic upper airway MR images: Minimally interactive fuzzy connectedness. In *Medical Imaging 2014: Biomedical Applications in Molecular, Structural, and Functional Imaging*. SPIE, 2014.
- [3] 道脇幸博, 齋藤真由, 丹生かず代, 小澤素子, 南雲正男, 角保徳, 本多康聡. 四次元 MRI の矢状断画像による嚥下運動の観察. *日本口腔科学会雑誌*, Vol. 54, No. 3, pp. 309–315, 2005.
 - [4] 井尻敬. RoiPainter4D. <http://takashiijiri.com/SoftRoiPainter4D/index.html>.
 - [5] Atilla P Kiraly, William E Higgins, Geoffrey McLennan, Eric A Hoffman, and Joseph M Reinhardt. Three-dimensional human airway segmentation methods for clinical virtual bronchoscopy. *Academic radiology*, Vol. 9, No. 10, pp. 1153–1168, 2002.
 - [6] Pietro Nardelli, Kashif A Khan, Alberto Corvò, Niamh Moore, Mary J Murphy, Maria Twomey, Owen JO’ Connor, Marcus P Kennedy, Raúl San José Estépar, Michael M Maher ほか. Optimizing parameters of an open-source airway segmentation algorithm using different CT images. *Biomedical engineering online*, Vol. 14, No. 1, pp. 1–24, 2015.
 - [7] Juerg Tschirren, Eric A Hoffman, Geoffrey McLennan, and Milan Sonka. Intrathoracic airway trees: segmentation and airway morphology analysis from low-dose CT scans. *IEEE transactions on medical imaging*, Vol. 24, No. 12, pp. 1529–1539, 2005.
 - [8] Anna Fabijańska. Two-pass region growing algorithm for segmenting airway tree from MDCT chest scans. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, Vol. 33, No. 7, pp. 537–546, 2009.
 - [9] J. Tschirren, T. Yavarna, and J. M. Reinhardt. Airway Segmentation Framework for Clinical Environments. In *Second International Workshop on Pulmonary Image Analysis*, pp. 227–238, 2009.
 - [10] Zijian Bian, Jean-Paul Charbonnier, Jiren Liu, Dazhe Zhao, David A Lynch, and Bram van Ginneken. Small airway segmentation in thoracic computed tomography scans: a machine learning approach. *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 63, No. 15, p. 155024, 2018.
 - [11] Qier Meng, Takayuki Kitasaka, Yukitaka Nimura, Masahiro Oda, Junji Ueno, and Kensaku Mori. Automatic segmentation of airway tree based on local intensity filter and machine learning technique in 3D chest CT volume. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, Vol. 12, No. 2, pp. 245–261, 2017.