

X線 CT 像における気管・気管支の形状情報の計測

林 達郎[†], 周 向荣[†], 陳 華岳^{††}, 原 武史[†], 藤田 広志[†],
横山 龍二郎^{†††}, 兼松 雅之^{†††,††††}, 星 博昭^{†††††}

[†]岐阜大学大学院医学系研究科再生医科学専攻知能イメージ情報分野 〒501-1194 岐阜市柳戸 1-1

^{††}岐阜大学大学院医学系研究科病態制御学講座解剖学分野 〒501-1194 岐阜市柳戸 1-1

^{†††}岐阜大学医学部附属病院放射線部 〒501-1194 岐阜市柳戸 1-1

^{††††}岐阜大学医学部附属病院放射線科 〒501-1194 岐阜市柳戸 1-1

^{†††††}岐阜大学大学院医学系研究科腫瘍制御学講座放射線医学分野 〒501-1194 岐阜市柳戸 1-1

(2007年12月28日受付, 2008年3月27日受理)

Measurement of Shape Information of Trachea and Bronchus in X-ray CT Images

Tatsuro HAYASHI[†], Xiangrong ZHOU[†], Huayue CHEN^{††}, Takeshi HARA[†], Hiroshi FUJITA[†],
Ryujiro YOKOYAMA^{†††}, Masayuki KANEMATSU^{†††,††††}, and Hiroaki HOSHI^{†††††}

[†]Department of Intelligent Image Information, Division of Regeneration and Advanced Medical Sciences,
Graduate School of Medicine, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1194, Japan

^{††}Department of Anatomy, Division of Disease Control, Gifu University Graduate School of Medicine,
1-1 Yanagido, Gifu 501-1194, Japan

^{†††}Department of Radiology Services, Gifu University Hospital, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1194, Japan

^{††††}Department of Radiology, Gifu University Hospital, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1194, Japan

^{†††††}Department of Radiology, Division of Tumor Control, Graduate School of Medicine, Gifu University,
1-1 Yanagido, Gifu 501-1194, Japan

(Received on December 28, 2007, in final form on March 27, 2008)

Abstract: The lung structures including airway tree, lung lobes and pulmonary segments are important information that are required by the development of computer-aided diagnosis systems. The structure of airway tree is the most important key point and provides the basic information for recognizing the lung lobe and lung segments. However, automated extraction and recognition of airway trees are difficult and the prior knowledge for supporting the extraction is expected. In this research, the distributions of angle, length, and diameter of airways in different branches were investigated using X-ray CT images from 50 patient cases. The experimental results showed that directions of each bronchial branch of airway regions in 50 CT cases distributed within a range of ± 30 degrees, and the decreasing ratio of airway diameter between the child/parent bronchial branch was 0.7-0.8. These results showed that the possibility of sequentially estimating the direction and diameter of airway tree from parent bronchial branch to its child bronchial branches may be useful for extraction and recognition of the airway trees in CT images.

Key words: multi-slice CT images, computer-aided diagnosis, bronchial branch, airways

1. はじめに

近年の医用画像における体軸方向の分解能の向上により、高精度な3次元画像解析が可能になった。一方で、撮影枚数の増加により読影医師の負担が増加しているため、計算機支援診断 (CAD: computer-aided diagnosis) システムの開発が求められている [1]。

肺の診断には、肺葉や肺区域の構造の把握が重要であり、CADシステムにおいてもこれら構造を認識する必要がある。気管支は肺葉や肺区域と解剖学的に関係があるため、気管支の構造に基づいて、肺葉や肺区域の構造を認識する研究が報告されている [2-5]。この気管支の構造を利用する方針に対して、肺葉や肺区域の構造に個体差があっても気管支と肺葉や肺区域との相対関係は変わらないため、その汎用性の高さが期待される。このとき、気管支の構造の計算機による安定的な認識が要求される。そこで、気管・気管支の抽出 [6, 7] や認識の手法 [8, 9] について多くの研究が報告されている。気管・気管支は、壁に囲まれて内腔を

空気が通る構造であるため、気管からの内腔領域の連続性を利用して抽出する方法が有効と考えられる。しかし、末梢の気管支は細く、撮影時の画質等によってCT像上で内腔領域と肺の空気領域の区別が困難になるため、安定的な抽出が難しい。

そこで、気管支の抽出や認識に失敗した場合に、気管・気管支の各枝から特徴量を取得し、それを参照情報として利用することにより、失敗箇所の特定や形状の比較による気管・気管支の内腔領域と空気領域の識別などによる補正ができると考えられ、より安定的な抽出が期待できる。また、気管・気管支の正常構造の特徴量を把握することにより、この正常構造から外れた症例を異常の候補として指摘するCADシステムの構築にも応用できる可能性があると考えられる。

そこで本研究では、気管・気管支の各枝について、角度、長さ、および直径 (内径) を調査し、気管・気管支を自動認識するための事前知識として、それらの特徴量が有用であるかの検討を行った。

2. 実験試料

本研究では、2002年5月から2003年7月にかけて、岐阜大学医学部附属病院で臨床診断のためにX線CT装置で撮像された画像50症例（男性35症例：20-88歳，平均57歳と，女性15症例：28-88歳，平均61歳）を用いる。試料画像の計測対象である気管・気管支に病歴がないことを診断レポートにより確認している。使用機器はGE社製LightSpeed Ultra，撮影条件は，濃度分解能12 bit，FOV 300-380 mm，マトリクスサイズ512x512 pixel，管電圧120 kV，管電流Auto mA，スライス厚1.25 mm，再構成間隔約0.6 mmである。前処理として，ボクセルが等方性の構造をもつように，sinc関数を用いて補正を行い，スライスの間隔を修正した。したがって，本研究で使用する画像は，0.58-0.74 mmの等方性の空間分解能である。また，人体の左右方向をx軸，前後方向をy軸，体軸方向をz軸と定義し，検定における有意水準を99%とする。

3. 方法

文献[2]の手法を用いて計算機により自動的にCT像から気管，主気管支，中間幹気管支，葉気管支，上区気管支，および舌区気管支を抽出し，細線化を行った（Fig.1）。Fig.1は，気管分岐部（ B_1 ）を中心として気管と主気管支の抽出結果を3次元表示した画像である。 B_2 は上葉枝と下葉枝の分岐部， B_3 は上葉枝と中間幹気管支の分岐部である。 V_i は，分岐部から各枝への方向ベクトルである。また，白線は各枝を細線化[10]して得られた芯線である。

細線化については，様々なアルゴリズムが開発されており，その手法や気管支の辺縁の形状に出力結果が左右され，特徴量の計測値が異なると懸念される。そのため，本研究では辺縁の形状の影響を避けるために，細線化の前処理として辺縁の形状を平滑化している。さらに，大半の気管支は，湾曲がなくほぼ直線に近い形状であるため，計測値は細線化の手法の違いにそれほど左右されないと考える。

本研究では，気管・気管支の抽出画像とそれを細線化した画像の2つから気管・気管支の特徴量を計算する。なお，自動抽出された気管・気管支は，放射線科医により領域の妥当性の確認を得ている。以下では，気管支の角度，気管・気管支の長さ，および直径の3つの特徴量の計算方法を示す。

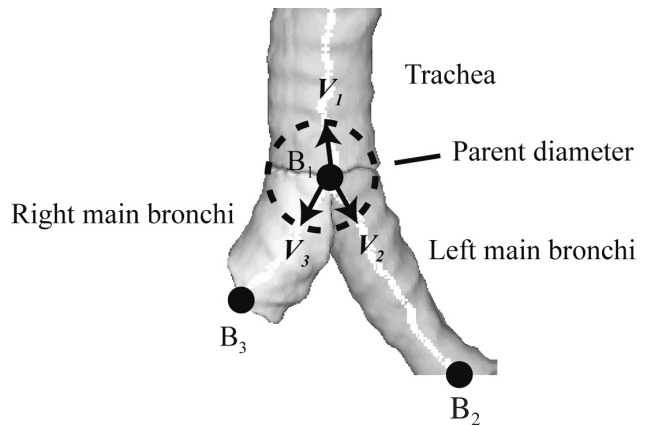


Fig.1 Measurements of direction, length and diameter at bronchial branch (white line : skeleton line, V_i ($i=1,2,3$) : direction vector, B_i ($i=1,2,3$) : bifurcation).

3.1. 気管支の角度

気管支の角度は，分岐部を基準とし，親枝の直径だけユークリッド距離が離れた位置を各気管支の代表点として方向ベクトル（Fig.1の V_i ）を計算する。ただし，患者の個体差等による角度のばらつきを軽減するため，親枝の角度が一定になるようにアフィン変換を用いて位置合わせをした後に，子枝の角度を計算する。

3.2. 気管・気管支の長さや直径

気管・気管支の長さ L mmは，対象とする枝の芯線のボクセル数で定義する。気管・気管支の直径（内径） D mmは，気管・気管支を円筒形状と仮定し，次式 $f(D)$ が最小になるときの値とする。

$$f(D) = \left| V - \frac{\pi D^2 - L}{4} \right| \quad (1)$$

ここで， V は対象の枝の容積 mm^3 であり，枝を構成する領域のボクセル数から計算する。

4. 結果と考察

4.1. 気管支の角度

主気管支，中間幹気管支，上葉気管支，中葉気管支，下葉気管支，上区気管支，および舌区気管支の角度の計算結果を計測し，Wilks'lambda法により男女間の有意差を検定

Table 1 Mean of directions of bronchus of the child bronchi from the parent bronchial bifurcation [unit vector]. p values show the differences between genders by Wilks'lambda method.

Direction	Male (n = 35)			Female (n = 15)			p
	x	y	z	x	y	z	
LMB	0.66	0.27	0.70	0.65	0.27	0.71	0.874
RMB	-0.61	0.17	0.77	-0.60	0.15	0.79	0.773
LSLB	0.81	-0.39	-0.44	0.88	-0.38	-0.30	0.100
LILB	0.50	0.26	0.83	0.56	0.25	0.79	0.957
SDB	0.53	-0.06	-0.84	0.53	-0.13	-0.84	0.802
LB	0.75	-0.34	0.57	0.72	-0.36	0.59	0.721
RSLB	-0.88	-0.10	-0.46	-0.96	-0.20	-0.18	0.410
IB	-0.34	0.10	0.94	-0.34	0.14	0.93	0.066
MLB	-0.50	-0.65	0.58	-0.48	-0.62	0.62	0.280
RILB	-0.50	0.29	0.81	-0.52	0.25	0.82	0.751

* : Significant difference between male and female ($p < 0.01$)

Table 2 Angle from the average directions of bronchus where 95.5% patient cases are contained [degree].

Degree		LMB	RMB	LSLB	LILB	SDB	LB	RSLB	IB	MLB	RILB
Angle	Male (n = 35)	16	25	23	21	23	22	30	12	19	23
	Female (n = 15)	18	22	18	13	26	16	20	16	15	15

Table 3 Results of airways length. p values show the differences between genders by Mann-Whitney U-test.

(a) Length of each bronchial branch [mm]

Airway	Male (n = 35)			Female (n = 15)			p
	Median	-2 σ	2 σ	Median	-2 σ	2 σ	
TR	107.0	77.9	154.3	91.5	65.6	132.4	* 0.006
LMB	61.2	51.8	74.7	57.1	47.4	68.6	0.242
RMB	27.5	16.5	45.3	24.4	13.4	38.5	0.501
IB	33.2	22.1	46.8	29.8	20.6	44.0	0.233

* : Significant difference between male and female (p < 0.01)

(b) Length ratio between item A and item B (item B / item A) [ratio]

Airway		Male (n = 35)			Female (n = 15)			p
Item A	Item B	Median	-2 σ	2 σ	Median	-2 σ	2 σ	
TR	LMB	0.57	0.40	0.86	0.63	0.38	0.89	0.038
TR	RMB	0.25	0.13	0.43	0.27	0.12	0.45	0.435
LMB	RMB	0.45	0.26	0.73	0.44	0.23	0.71	0.890
RMB	IB	1.22	0.59	2.27	1.17	0.59	2.27	0.873

Table 4 Results of airways diameter. p values show the differences between genders by Mann-Whitney U-test.

(a) Diameter of each bronchial branch [mm]

Airway	Male (n = 35)			Female (n = 15)			p
	Median	-2 σ	2 σ	Median	-2 σ	2 σ	
TR	17.26	13.76	20.62	14.50	11.12	17.26	* 0.001
LMB	12.38	10.12	15.00	10.38	8.38	13.00	* 0.002
RMB	13.00	10.00	16.26	11.38	8.00	14.12	* 0.007
IB	9.88	7.62	11.76	8.38	6.38	10.24	* < 0.001

* : Significant difference between male and female (p < 0.01)

(b) Diameter ratio between item A and item B (item B / item A) [ratio]

Airway		Male (n = 35)			Female (n = 15)			p
Item A	Item B	Median	-2 σ	2 σ	Median	-2 σ	2 σ	
TR	LMB	0.73	0.62	0.85	0.73	0.64	0.85	0.616
TR	RMB	0.76	0.64	0.89	0.79	0.66	0.93	0.461
LMB	RMB	1.06	0.84	1.23	1.05	0.92	1.27	0.387
RMB	IB	0.75	0.62	0.99	0.75	0.60	0.99	0.422

した。結果を Table 1 に示す。また、子枝の平均角度から 2 σ (σ : 標準偏差) の症例が分布する角度を Table 2 に示す。Table 1 では、各気管支について、分岐部からの方向ベクトルが分かる。Table 2 では、各枝の角度のばらつきを確認できる。なお、Table 1 と Table 2 では、LMB/RMB: 左/右主気管支、IB: 中間幹気管支、LSLB/RSLB: 左/右上葉気管支、MLB: 中葉気管支、LILB/RILB: 左/右下葉気管支、SDB: 上区気管支、LB: 舌区気管支、と表記する。また、これらの枝のモデルを Fig.2 に示す。Fig.2 から、親枝と子枝の関係を視覚的に把握できる。

Table 1 において示されるように、検定の結果、男女間で計測したすべての枝の角度に有意差がなかったため、気管支の角度について性別の違いを考慮する必要はないと言える。

次に、Table 2 において示されるように、親枝からの角度の変化が小さい子枝では 20° 以内、変化が大きい子枝でも 30° 以内の範囲で 2 σ の症例の子枝の分布が確認された。つまり、この結果から気管支の各枝の角度は平均から 30° 以内に 2 σ の症例が分布している。したがって、親枝が既知の場合に、子枝の探索領域を角度によって限定できるため、気管支の枝名対応付けに対して有効な特徴量の一つであるといえる。ただし、本研究では分岐部周辺を子枝の角度としているため、大きく湾曲した枝の場合にはうまく角度を計算できないと推測され、今後、検討する必要がある。

4.2. 気管・気管支の長さと同径

気管、主気管支、および中間幹気管支の長さと同径の計算結果を Table 3 (a) と Table 4 (a)、親枝と子枝の比率を Table 3 (b) と Table 4 (b) にそれぞれ示し、Mann-Whitney の U 検定による男女差の検定結果も合わせて示す。これらから、気管・気管支の長さと同径の測定値と、親枝を基準としたときの子枝の相対的な比率が確認できる。長さと同径について、今回の測定結果からは正規分布にしたがった結果が得られなかったため、測定した値の代表値を中央値、ばらつきを 2 σ でそれぞれ表している。なお、Table 3 と Table 4 では、TR: 気管、LMB/RMB: 左/右主気管支、

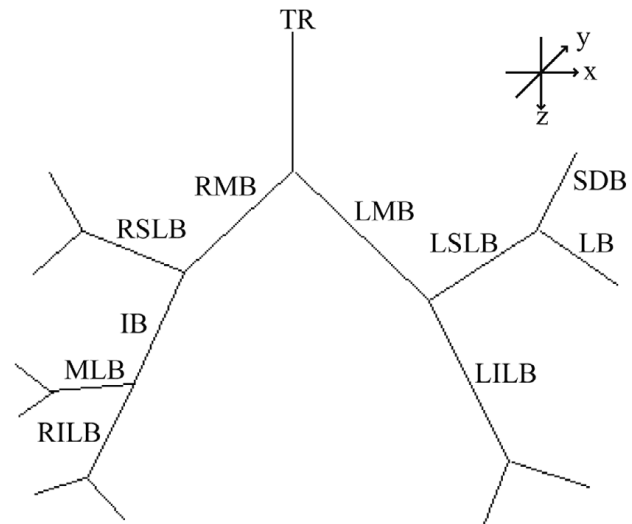


Fig.2 A sketch of the central line of the bronchial branches.

IB: 中間幹気管支、と表記する。

気管・気管支の長さについて、文献[11]では、気管が100-120 mm、右主気管支が10-25 mm、左主気管支と気管分岐部から右側の第2分岐まで(右主気管支+中間幹気管支)の長さが約50 mmと表記されている。人種などの違いを考慮する必要はあるが、Table 3 (a) の値は上記の文献の値と概ね近い値であった。ただし、Table 3 (a) の結果から、気管の長さのばらつきはかなり大きいことが分かる。これは、入力されたすべてのCT像が、気管の上端を撮影されていた訳ではなく、気管の一部分しか長さを測定できなかった症例が含まれているためである。

気管・気管支の直径に関して、実際の気管、気管支は楕円形状をしているため、気管・気管支の直径をより精密に計測するには、扁平率や円形度などを考慮する必要がある。しかし、本研究では画像から気管・気管支の抽出や認識の手法を構築するための事前知識として、気管・気管支の特徴量の大まかな傾向の把握を目的としている。そして、気

管・気管支の抽出処理では、それらを単純な形状である円筒形と仮定して抽出されることが多い。ここで、Table 4 (a) の値は、気管の横径が 13-22 mm で前後径よりも 1/4 ほど大きく、主気管支がそれぞれ 8-12 mm の直径をもつと表記されている文献 [11] と概ね近い値を示した。したがって、本手法は円筒形と仮定したときに妥当な太さの分布を提供できるため、円筒形に仮定して気管・気管支を抽出する手法を開発するときの事前知識として太さの分布を把握するための妥当な計測方法であったと考える。次に、親枝と子枝の相対的な関係に注目すると、Table 4 (b) から、気管・気管支の直径は左右の主気管支と中間幹気管支の 3 本のいずれにおいても 0.7-0.8 倍と一定の割合で減少していることが分かる。つまり、親枝と子枝の相対関係は安定しているため、親枝の直径が既知であるとき、子枝の直径が親枝から推定できる可能性があると推測する。

次に、男女間の関係に注目する。Table 3 (a) から、気管の長さは男女間で有意差があったが、気管支では有意差がなかった。そして、Table 3 (b) から気管・気管支間の相対的な比率は、男女間で有意差がなかった。この結果について、長さは男女間の差よりも個体差によるばらつきの影響が大きいいため、性別による有意差が検定で得られなかったと考える。直径は、Table 4 (a) から、男性の方が女性よりもすべての気管・気管支で太く、Table 4 (b) から気管・気管支間の相対的な比率は男女間で差がない結果であった。これは、人体の気管・気管支の構造は男女間で大きな差はないが、平均的には男性の方が女性よりも体格が大きいためであると考えられる。

また、Table 3 (b) と Table 4 (b) で示すように、相対的な比率で比較すると、長さと同様に男女間で有意差がなかったことから、気管や各気管支の構造そのものを特徴量とする場合は、性別や体格などを注意深く考慮して各特徴量のパラメータを検討する必要がある一方で、親枝と子枝のような相対的な関係の特徴量とする場合には、性別や体格の違いに影響されにくいと考えられる。

したがって、親枝と子枝の相対的な関係に注目して気管支の角度と気管・気管支の直径の特徴量を利用すれば、性別や体格の大きさにあまり影響を受けずに、気管・気管支の抽出や認識の補助、あるいは、気管・気管支の内腔領域と肺野の空気領域の識別に有用であると期待される。

5. まとめ

本稿では、50 症例の X 線 CT 像を用いて、気管と中核側の気管支を対象に気管支の角度、気管・気管支の長さ、および直径（内径）を調査し、以下の知見を確認した。

親枝からの角度の変化が小さい子枝では 20° 以内、変化が大きい子枝でも 30° 以内に 2σ の症例の子枝が分布していた。親枝が既知である場合、子枝の角度を限定できるため、計算機で子枝の構造を認識するための事前知識として、有効な特徴量であると考えられる。

本研究で測定した気管・気管支の長さと同様に直径の値は、人種などの違いを考慮する必要はあるが、文献 [11] の値と概ね一致していた。

気管・気管支の直径は、いずれも男性の方が女性よりも大きい。親枝と子枝の相対的な比率に注目すると、男女間で差が見られなかった。

気管・気管支の長さは、男女間ではっきりとした傾向が見られなかったが、これは個体差によるばらつきの影響がおおきいためであると考えられる。

親枝と子枝の相対的な関係に注目すると、気管・気管支の直径は左右の主気管支と中間幹気管支の 3 本いずれも 0.7-0.8 倍と一定の割合で減少しており、親枝が既知であるときに、子枝の直径を推定できる可能性が示唆された。

今後は、これらの特徴量を肺葉と肺区域の構造との関連が深い区域枝まで広げて調査する必要があると考える。また、これらの特徴量を利用して、従来から提案されている気管・気管支の抽出 [6, 7] や認識 [8, 9] の結果をさらに安定的に行える手法を構築する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、有益なご助言をいただいた藤田研究室の方々に感謝の意を表します。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（特定領域研究、多次元医用画像の知的診断支援）、日本学術振興会科学研究費補助金、および厚生労働省がん研究助成金（縄野班、長谷川班）によって行われました。

文 献

- [1] 藤田広志, 周 向荣, 原 武史, 他: 正常構造の理解に基づく知的 CAD, 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「多次元医用画像の知的診断支援」第 4 回シンポジウム, 55-62, 2007.
- [2] X. Zhou, T. Hayashi, T. Hara, et al.: Automatic segmentation and recognition of anatomical lung structures from high-resolution chest CT images, *Comput. Med. Imag. Graph.*, 30(5), 299-313, 2006.
- [3] 財田伸介, 久保 満, 河田佳樹, 他: 検診用マルチスライス CT 画像の肺葉間裂抽出アルゴリズム, *信学論 (D-II)*, J87-D-II(1), 134-145, 2004.
- [4] 中田有一, 北坂孝幸, 森 健策, 他: 3 次元胸部 CT 像から抽出された肺野領域の葉分割手法とその気管支葉分類手法への適用, *Med. Imag. Tech.*, 25(2), 111-119, 2007.
- [5] S. Krass, D. Selle, D. Boehm, et al.: A method for the determination of bronchopulmonary segments based on HRCT data, *Proc. of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS) 2000*, Elsevier, 584-589, 2000.
- [6] T. Kitasaka, K. Mori, J. Hasegawa, et al.: A method for extraction of bronchus regions from 3D chest X-ray images by analyzing structural features of the bronchus, *Forma*, 17(4), 321-338, 2002.
- [7] C. Fetita, F. Preteux, C. Beigelman-Aubry, et al.: Pulmonary airways: 3-D reconstruction from multislice CT and clinical investigation, *IEEE Trans. Med. Imag.*, 23(11), 1353-1364, 2004.
- [8] J. Kawai, S. Saita, M. Kubo, et al.: Classification algorithm of segmental bronchus based on multi-slice CT images, *信学技報*, MI 2005-78, 49-52, 2007.
- [9] 江間慎弥, 森 健策, 北坂孝幸, 他: 自動気管支枝名対応付けにおけるモデル選択法の改善, *信学技報*, MI 2004-110, 163-168, 2005.
- [10] 齋藤豊文, 森 健策, 鳥脇純一郎: ユークリッド距離変換を用いた 3 次元デジタル画像の薄面化および細線化の逐次型アルゴリズムとその諸性質, *信学論 (D-II)*, J79-D-II(10), 1675-1685, 1996.
- [11] 越智淳三: 解剖学アトラス. 文光堂, 東京, 2003.