

TOKYO
UNIVERSITY
OF
INFORMATION
SCIENCES

東京情報大学 研究論集

Vol.5 No.1 抜刷

特 集

東京情報大学ハイテクリサーチセンター国際シンポジウム

- 石井 健一郎 人に近づくコンピュータ ―人間を知り、人間に迫る― 1
- 木ノ内康夫、小沼利光、石橋英水、田村祐一、松本直樹、佐生智一、稲林昌二
イメージ間の反応に基づく情報処理系の構成 ―イメージで考えるコンピュータの実現に向けて― 9
- 山崎和子 動的環境へのエージェントの適応 23
- 水谷正大、大森貴博、来住伸子、小川貴英
検索エンジンを利用した日本語Webページ数の統計的推定の研究 33
- 井関文一、小畑秀文、大松広伸、柿沼龍太郎
胸部CT画像からの肺野内3次元構造の抽出 47
- 田子島一郎、増田文夫、武井敦夫、原慶太郎、岡本眞一、田中ちえ、白川泰樹
全球域3次元拡散モデルを用いた大気中の微量粒子の発生地域特定のための研究 57
- Shin'ichi Okamoto, Keitarou Hara, Atsuo Takei, and Fumio Masuda
A Study on Numerical Methods for Air Quality Simulation 65
- Shin'ichi Okamoto, Keitarou Hara, Fumio Masuda, and Atsuo Takei
A Study on the Atmospheric Dispersion over Complex Terrain 73
- N.W.Harvey and V.Chantawong
Adsorption of Heavy Metals by Ballclay :
their Competition and Selectivity 79
- A.Wangkiat, H.Garivait, N.W.Harvey, and S.Okamoto
Application of CMB_s Model for Source Apportionment in Bangkok Metropolitan Area 87

東京情報大学
2001.8

胸部CT画像からの肺野内3次元構造の抽出

井関文一*、小畑秀文**、大松広伸***、柿沼龍太郎***

1. はじめに

胸部疾患の早期発見・治療のためのコンピュータによる自動診断や診断支援を実現するためには、気管支や血管などの肺野内の3次元構造を正しく抽出し、認識する必要がある。3次元構造の抽出では、領域拡大法[1]-[4]が代表的なものであるが、この方法で抽出するものはあくまでもボクセルの集合であり、気管支や血管の形状などの3次元的情報を抽出するには、再度別の方法で解析しなおさなければならない。

我々はこれらの問題を解決するために、胸部CT画像から気管支や血管の木構造の断面を3次元空間で再帰的に追跡し、気管支や血管領域とその3次元構造を同時に抽出する方法（再帰的領域探索法）を提案し[5]-[7]。実際のCT画像から気管支及び血管構造の抽出を行い、ほぼ満足した結果を得ている。この方法では気管支や血管の3次元形状と共に、さまざまな3次元特徴量を知ることが可能である。例えば、気管支の各部分領域において気管支の延びている方向やそこの断面積、重心、枝分かれ情報などである。

また、気管支や血管の中心線についても、領域拡大法では改めて細線化の処理をしなければならないが、我々の提案した手法では各断面領域の重心を繋げるだけで中心線を簡単に求めることが可能である[8]。

しかしながら、先に提案した手法では抽出に於いて幾つかの制限事項が存在する。即ち、

- 1) 鋭角または複雑な状態で分岐する枝は抽出出来ない。
- 2) 基本的に抽出する対象は木構造で、ループなどが存在すると探索も無限ループに陥る。

などである。これらの制限は、腫瘍などにより血管の状態が大きく変化している場合などには、非常に大きな問題となる。これらの問題を解決するために再帰的な領域探索のアルゴリズムを一部改良し、これにより腫瘍などにより血管がループを構成している場合でも、正確に構造を抽出することができることを確認した。

2. 手法

2-1. 従来の再帰的な断面探索手法

従来の3次元構造抽出の手法[5]は、対象物の断面領域を3次元的に追跡して行く方法であり、アルゴリズムは再帰的な構造をしている。

この手法では、木の幹部分から木の末端部分へと木構造に添って順次断面領域を求め、一つの枝の末端に達するとその一つ前の分岐に戻り、再び末端に達するまでの探索を繰り返すものである。図1に示すように各断面は気管支の延びていく方向に対して直交する平面での断面となっている。

*東京情報大学講師

**東京農工大学大学院

***国立がんセンター東病院

る。

以下に簡単にそのアルゴリズムを示す。

Step1 まず親領域から、その領域の方向ベクトルを用いて子領域を探すための観測面（視野）を決定する。ここで、領域の方向ベクトルとは、その領域に垂直なベクトルで、枝の伸びていく方向を推定したベクトルである。方向ベクトルは視線の方向とも言える。方向ベクトルは基本的に単位ベクトルであるとする。

Step2 観測面に対して定められた範囲内でしきい値処理を行い、子領域の候補を検出する。

Step3 検出された候補領域はその都度、子領域として適当かどうかの判定を行う。もし妥当な領域が見つからなければ探索を終了し、一つ上の分岐点に復帰する（再帰処理における停止条件）。

Step4 妥当だと判定された各子領域と親領域の重心座標から、それぞれの子領域の方向ベクトルを求める（図1の右図の4のベクトル）。

Step5 検出された各子領域に対して、新しく求めた方向ベクトルを視線として、改めて領域を検出し直す。

Step6 新しく検出した各子領域を改めて親領域とし、以上の Step1から Step5までの処理を再帰的に繰り返す。

図2にこの手法により抽出された気管支と領域拡大法により抽出された気管支を示す。我々の提

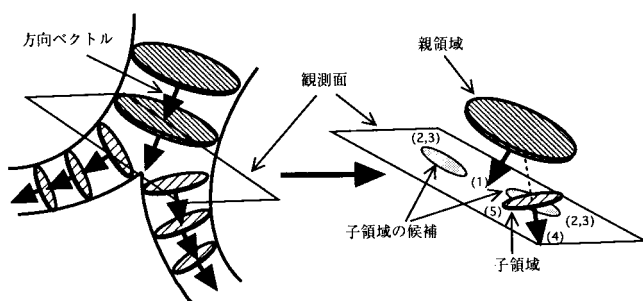


図1 再帰的な領域探索



(a)



(b)

図2 再帰的な領域探索による気管支抽出 (a) と領域拡大法による抽出 (b)

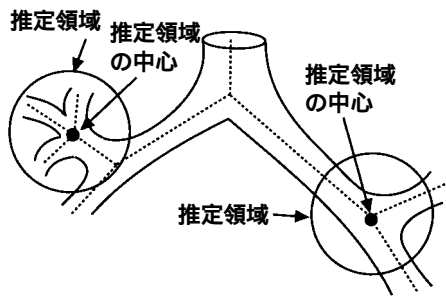
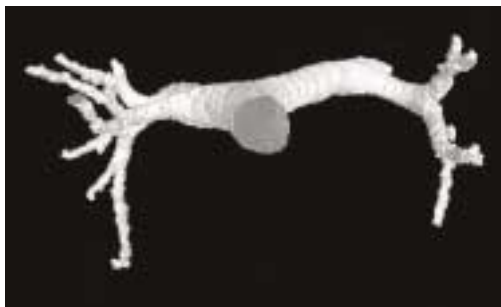


図3 肺門部領域の推定

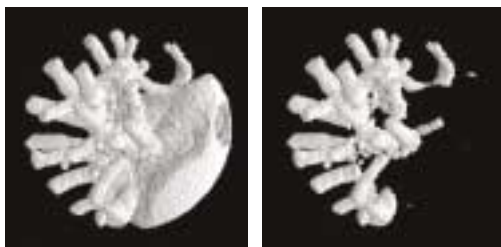


(a) 垂直方向



(b) 水平方向

図4 気管支の抽出結果



(a)

(b)

図5 肺門部周辺領域(a)と肺門部からの血管(b)



図6 抽出された血管と肺門部

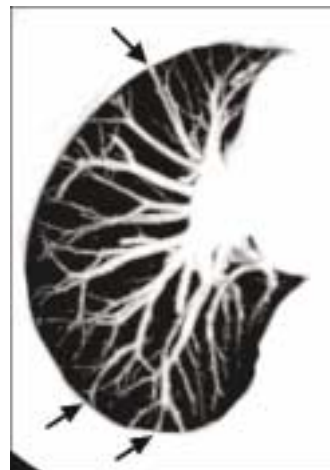


図7 血管の MIP 画像
矢印は図6に無い血管

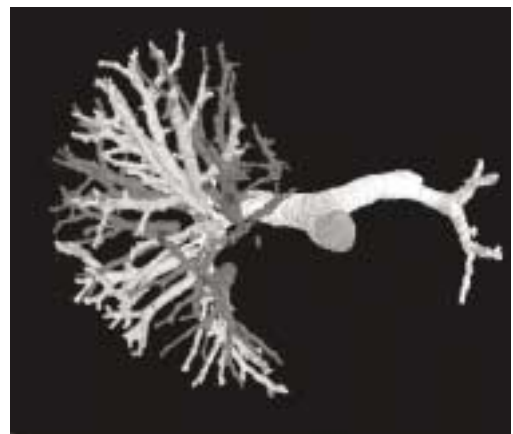


図8 肺動脈(薄いグレイ)と肺静脈(濃いグレイ)及び気管支

案した手法の方がより細かい部分まで抽出しているのが分かる。

なお、このアルゴリズムでは、追跡開始位置としての断面領域とその方向ベクトルは別に求める必要がある。気管支の探索の場合は、気管や体軸の下方方向に延びている気管支を探索開始領域とすれば特に問題が生じることはない。

一方血管を探索する場合、その探索開始領域を見つけることは非常に困難である。直観的には心臓領域を抽出し、そこから突き出ている血管を見付け出せば問題はないが、心臓とその周辺部はCT値のコントラストが低く、造影剤などを用いなければこれを分離することはほとんど不可能に近い。

そこで、心臓から肺野内への血管の侵入部分である肺門部の位置を、気管支形状との関係から推測し（図3）肺門部における血管の断面領域を探索開始領域とする〔7〕

以下に血管の探索開始領域を求めるアルゴリズムを示す。

Step1 再帰的な領域探索法により気管支の3次元構造を抽出する。

Step2 抽出した気管支の3次元構造を元に、右肺の肺門部の場合は気管支上幹の終端の断面の重心を、左肺の肺門部の場合は気管支主幹の終端の断面の重心をそれぞれの推定領域の中心とする（図3）。

Step3 推定領域の中心から一定半径の球を作り、球内部で血管のCT値に近いCT値を持つ領域を抽出し、平滑化する。

Step4 領域から突き出ている血管を削除するために、血管の半径より少し大きめの半径を持った球を構造要素として、モルフォロジー演算の opening処理を行う。さらに、半径3～5画素程度の小球の構造要素で dilation処理を行い、領域を少し膨張させる。

Step5 Step3の領域からStep4で求めた領域の差分をとる。差分の結果は、肺門部から突き出ている血管の一部となる。

Step6 Step5の血管の一部とStep4の領域が接する面を求める。これが、血管の探索開始領域の候補となる。また血管の走行方向（方向ベクトル）は血管と接しているStep4の領域の表面の法線ベクトルから求める。

Step7 Step6で求めた領域には血管として不適当な領域や肺門部から完全に分離していない領域も含まれている可能性があるので、予め数ステップの探索を実行して、途中の領域が血管の断面としてふさわしいかどうか（断面の面積や形状）をチェックし、不適当なものは破棄する。

以上の手法により抽出された気管支及び血管を図4 - 図8に示す。図7には比較のためにCT画像のMIPイメージを示している。ただし、全てのCT画像からMIPイメージを生成すると、肺壁のため見えなくなる肺野部分が存在するので、上部（頭部側）の12枚はMIPイメージの生成に使用していない。MIPイメージの中には存在し、図6は示されていない血管が存在するが（図中の矢印）、これはこれらの血管の始点がCTデータ外にあるためである。これらを除けばMIPイメージと比べても血管がよく抽出されているのがわかる。

肺門部を起点としない血管および肺門部の起点がCT画像中に写っていない血管の抽出については今後の課題である。

2-2. 従来の探索手法の問題点

前節で解説した再帰的な断面探索手法では、抽出に際し以下のような制限事項が存在する。

1) 鋭角または複雑な状態で分岐する枝は抽出出来ない。

2) 基本的に抽出する対象は木構造で、ループなどが存在すると探索も無限ループに陥る。

図1からも分かるように、従来の探索手法では観測面が平面であるため、大きな角度で分岐する枝を抽出することは原理的に不可能であった。また図9(a)のような分岐に於いても、図のように観測面が取られた場合は右上方に伸びる枝の抽出には失敗してしまう。

また2)の問題については、対象が完全な木構造ではなく、枝の末端等が接触しループ（閉回路）を構成している場合、探索もまた枝の断面を追跡していくため無限ループに陥ってしまう。分岐回数の上限を設定しても良いが根本的な解決ではない。またこの問題に関連して、1本の枝を多重に抽出してしまう問題もある。

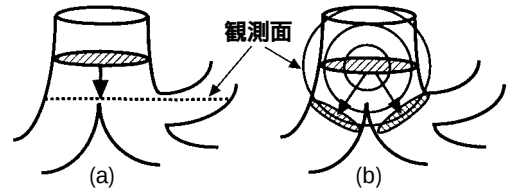


図9 追跡の失敗例(a)と球面の観測面(b)

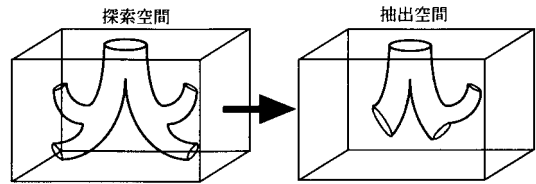


図10 探索空間から抽出した枝の抽出空間での再構築

2-3. 従来の探索手法の問題点の改良

(1) 球状観測面の導入

1) の抽出不能な枝の問題の解決のため、図9(b)のように、分岐点では観測面を平面ではなく球面とし、さらに最適な大きさの球面を決定するために、球面の半径を新たに適当な断面を検出するまで徐々に増加させる手法を採用した。ここで、球の半径 r は断面における親領域の半径の0.5~1.5倍までの範囲で0.2ステップずつ変化させている。この時、分岐点であることの判断と、分岐する枝の本数の推測には枝の断面の分散度を使用する。分散度 F は、一般に円形度と呼ばれる特徴値の逆数で以下のように定義される。

$$F = \frac{R^2}{4\pi S}$$

ここで R は領域の周囲長、 S は面積である。分散度は真円で1となり、その領域がこれから幾つに分岐するかという目安になる [5]

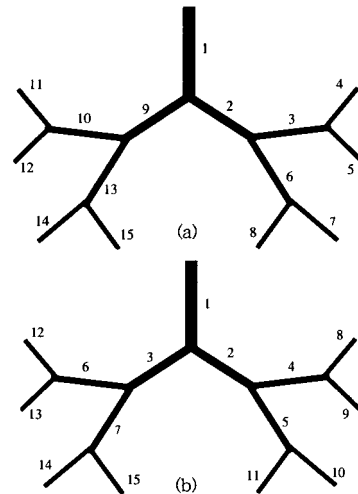


図11 枝の探索順序・従来の順序(a)と改良された順序(b)

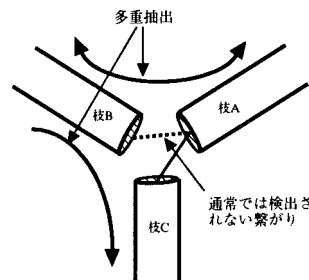


図12 ループ部

また、球状の観測面をとった時の観測画像の画素値 g を単純に球面上の画素値とせず、領域の連続性を考慮して以下のように定義する。

$$g(r, \theta, \varphi) = \frac{\sum_{i=1}^n f(r/n \cdot i, \theta, \varphi)}{n} \cdot h(r, \theta, \varphi)$$

$$h(r, \theta, \varphi) = \prod_{i=1}^n (\text{Step}(f_0 - f(r/n \cdot i, \theta, \varphi)))$$

但し

$$f_0 = f(0, 0, 0)$$

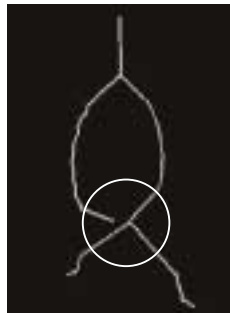
$$\text{Step}(x) = \begin{cases} 0 & \dots \mid x > \text{const} \\ 1 & \dots \mid x \leq \text{const} \end{cases}$$

である。

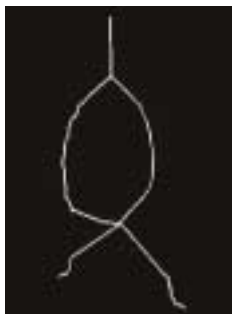
ここで $f(\quad)$ は球の中心を原点とした3次元極座標系での画素値を表す関数である。また $\text{Step}(\quad)$ はステップ関数であり、 $h(\quad)$ が領域の連続性を保証する関数となる。球面上の領域と球の中心



(a) 探索対象物体



(b) 抽出された領域の重心を5 step毎に網いだ(中心線)図形。○の部分で多重抽出を検出



(c) 多重抽出部をループと識別

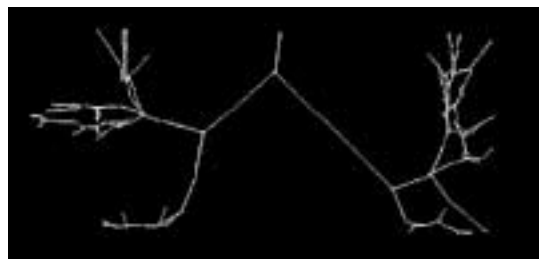
図13 モデルによる改良点の実験



(a) 球面探索による抽出領域の不連続性

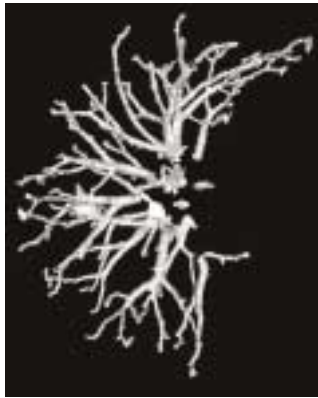


(b) 不連続部分の領域抽出



(c) 抽出した領域(a)の枝を繋いだ中心線

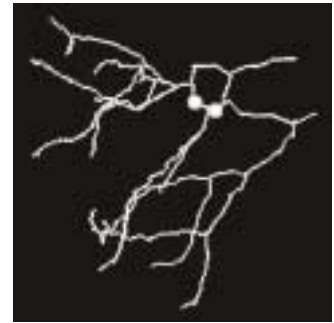
図14 改良法による気管支抽出の例



(a) 血管の抽出結果



(b) 抽出結果の細線化。○はループ部



(c) ループ部の拡大

図15 腫瘍により木構造が崩れている血管の抽出

とを繋ぐ線分上で画素値が大きく変化する場合は $h()$ は 0、そうでないときには 1 となり、連続性が保証される。そのときの画素値 g は線分上の n 画素の平均値となる。

球の中心（関数の極座標の原点）は、親領域の重心がその断面領域内に無い場合もありうるので、親領域内でかつその重心に最も近い点（通常は重心に一致する）とする。

子領域の探索は通常は平面で行い、親領域の円形度が低い（分散度が 1.8 以上 [5]）かまたは平面の観測面で子領域を 2 個以上検出した場合に、改めて上記に説明したような球状の観測面によって子領域の検出を行う。

(2) 抽出領域のラベリング

木構造が崩れループが存在すると、再帰的探索法では適切な処理が不可能となるので、ループおよびループでない場合を正しく識別し判断する必要がある。この問題を解決するために、一度抽出した枝をその都度別の空間（抽出空間）の中で再構築し、その領域が既に抽出空間の中に再構築されているかどうかを検査する（図10）。これにより一度抽出した枝を再び抽出したかどうかを知ることが出来る。

ただし、従来の探索手法では探索を図11(a)に示すような順序で再帰的に行い、枝の深い方を優先的に探索するので、ループまたは多重抽出部を対称性よく検出することができない。そこで探索順序を図11(b)に示す通り、単純な再帰的順序から、同じレベルの深さの枝を優先的に探索する順序に変更した。これは、枝の末端または分岐部を検出したら、その末端または分岐部の情報を待ち行列の最後に追加して、その場所での探索を一時中断し、次に探索する枝の情報を待ち行列の先頭から取り出して探索を行うものである。このような探索順序にすれば、ループまたは多重抽出部を対称性よく検出することが可能になる。

このようにして抽出した枝の内、ある枝に続く枝の少なくとも1本が多重抽出であった場合、その枝の末端は、他の同じような枝の末端とループしている可能性があることになる。

例えば、図12のような一般的なループを構成する分岐点において、枝Aと枝Bが既に抽出済であった場合、枝Aに続く枝の探索で枝Cは新たに抽出された枝となるが、枝Bは多重抽出となる。さらに枝Bに続く枝の探索では、枝A,C共に多重抽出となる。従って、枝Aは、続く枝に多重抽出の枝を

1本持ち、枝Bは2本の多重抽出の枝を持つことになる。これらが、真にループであるかそうでないかは、枝の末端の距離が、お互いの枝の断面の半径の和以下であるかどうかで判定すればよい。

3. 実験および考察

提案した改良点が実際正しく機能するかどうか、図13(a)に示すモデルを用いて実験を行った。抽出された領域の重心を5step毎に繋いだ中心線の結果を図13(b)に示す。探索対象物体では○印の部分でループを起こしているが、図13(b)ではこれを検出し、無限ループに陥らないよう停止している。また最初の90度での分岐点や比較的複雑な構造を持つループ部での分岐に於いても問題なく追跡が行われている。

図13(c)では多重抽出を行った部分で、そこがループかどうかの判定が行われ、この場合はループと認識されており、お互いの枝の末端が接続されている。

次に、図14に改良された手法による気管支抽出の例を示す。図14(a)では球面の観測面のために、分岐点で抽出領域は不連続となっている。しかし、枝を新しく抽出するたびに、同時にその枝と親枝との間の不連続部分の領域も抽出するようにすれば、図14(b)のように不連続領域のない抽出結果を得ることができる。ただし、この場合の不連続部分の領域自体は、対象物の3次元的な幾何学的特徴にはほとんど関与しない。

さらに図15(a)は改良された手法により実際に抽出された肺野内の血管部[9][10]である。この例では血管を包むように腫瘍が存在し、そのため付近の血管がループを構成している。この血管の細線化では、同図(b)のように実際にループ部が検出され(○内の球状部分)、中心線は正しく血管の構造を表現している。また同図(c)は同図(b)のループ部の拡大図である。

4. まとめ

本研究では、胸部CT画像から肺野内の気管支および血管を抽出するために、木構造の枝の断面領域を3次元的に追跡して行く再帰的領域探索法を新しく提案した。気管支については、実験により、これを精度よく抽出できることを確認した。また、肺野内の血管についても、肺門部を特定するアルゴリズムにより、肺門部を起点する血管については精度よく抽出可能であることを確認した。ただし、肺門部を起点としない血管および肺門部の起点がデータ中に写っていない血管については今後の課題である。

次に、複雑な木構造に対応できるように再帰的領域探索法の改良法を提案し、腫瘍などにより血管がループを構成している場合でも正確に構造を抽出できる事を確認した。

医療画像の3次元化は今後様々な局面でさらに有効的な手段として発展して行くことは十分に想像できる。そのような流れの中で再帰的領域探索法は、肺野内の気管支や血管に限らず木構造を持つ対象物であるならば適用可能であるので、今後様々な応用を期待することができる。

なお、本研究の一部は文部省ハイテクリサーチセンタ、科学研究費補助金および厚生省がん研究助成金の援助によります。またCT画像データについては平成8年度厚生省科学研究費補助金(がん克服戦略研究事業)(森山班)の援助によるものです。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

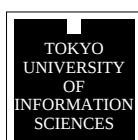
- [1] G.T.Herman and H.K.Liu, "Display of Three-Dimensional Information in Computed Tomography", Journal of Computer Assisted Tomography, Vol.1, pp.155-160, 1977.
- [2] J.K.Udupa, "Interactive Segmentation and Boundary Surface Formation for 3-D Digital Images", Comp. Graphics and Image Processing, Vol.18, pp.213-235, 1982.
- [3] S.A.Wood, J.D.Hoford, E.A.Hoffman, E.Zerhouni and W.A.Mitzner, "Quantitative 3-D Reconstruction of Airway and Pulmonary Vascular Trees Using HRCT", in Proc. Biomed. Image Processing, Biomed. Visualization, Vol.1905, pp.316-323, 1993.
- [4] K.Mori, J.Hasegawa, J.Toriwaki, H.Anno and K.Katada, "Extraction and Visualization of Bronchus from 3D Images of Lung", in N.Ayache ed.: Computer Vision, Virtual Reality and Robotics in Medicine, Lecture Note in Computer Science, 905, pp.542-548, Springer, 1995.
- [5] 井関文一、小畑秀文、大松広伸、柿沼龍太郎、"胸部CT画像からの気管支3次元木構造の抽出の一手法", 電子情報通信学会論文誌DII, Vol.J80-D-II, NO.10, pp.2841-2847, Oct, 1997.
- [6] 井関文一、小畑秀文、大松広伸、柿沼龍太郎、"胸部CT画像からの肺動脈及び静脈の3次元構造の抽出", 3次元画像コンファレンス'97, pp.91-96, July, 1997.
- [7] F.Iseki, H.Kobatake, T.Baigalmaa, H.Omatsu and R.Kakimuma, "Extraction of 3D Tree Structure of Blood Vessels in Lung Area from Chest CT Images", In Proceeding of CAR'98, pp.45-50, June, 1998.
- [8] 井関文一、小畑秀文 "再帰的な領域探索法による3次元木構造物体の細線化", Medical Imaging Technology, Vol.16, No.4, pp.365-366, July, 1998.
- [9] 井関文一、ツァーガン・バイガルマ、小畑秀文 他、"再帰的領域探索法による胸部CT画像からの血管の3次元構造の抽出", 信学論(D-II), vol.J82-D-II, no.9, pp.1533-1535, 1999.
- [10] 井関文一、小畑秀文、"再帰的領域探索法の改良と3次元木構造物体の細線化への応用", 信学論(D-II), vol.J83-D-II, no.2, pp.859-862, 2000.

Journal of Tokyo University of Information Sciences

Reprinted from Vol.5 No.1

Symposium

- Kenichiro Ishii
Computers and Humans Coming Together
- Understanding and Approaching Humans - 1
- Yasuo Kinouchi, Toshimitsu Onuma, Hidemi Ishibashi, Yuuichi Tamura
Naoki Matsumoto, Tomokazu Sasho, and Shoji Inabayashi
An Architecture of an Information Processing System Based on Image Reactions
- From Digital Processing to Image Reactions - 9
- Kazuko Yamasaki
Adaptation of Agents against the Dynamic Environments 23
- Masahiro Mizutani, Takahiro Ohmori, Nobuko Kishi, and Takahide Ogawa
On the Amount of Japanese Webpages Estimated by Means of Web Search Engines 33
- Fumikazu Iseki, Hidefumi Kobatake, Hironobu Omatsu, and Ryutaro Kakinuma
Extraction of 3D Structure in Lung Area from Chest X-ray CT Images. 47
- Ichiro Tagoshima, Fumio Masuda, Atsuo Takei, Keitarou Hara, Shin'ichi Okamoto,
Chie Tanaka, and Yasuki Shirakawa
Development of 3-Dimensional Global Dispersion Model
for Simulating Atmospheric Trace Substances 57
- Shin'ichi Okamoto, Keitarou Hara, Atsuo Takei, and Fumio Masuda
A Study on Numerical Methods for Air Quality Simulation 65
- Shin'ichi Okamoto, Keitarou Hara, Fumio Masuda, and Atsuo Takei
A Study on the Atmospheric Dispersion over Complex Terrain 73
- N.W.Harvey and V.Chantawong
Adsorption of Heavy Metals by Ballclay:
their Competition and Selectivity 79
- A.Wangkiat, H.Garivait, N.W.Harvey, and S.Okamoto
Application of CMB₈ Model for Source
Apportionment in Bangkok Metropolitan Area 87



2001.8

Published by Tokyo University of Information Sciences