

平成21年5月1日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18300059
 研究課題名（和文） 3次元医用画像の多重解像度局所構造解析に基づく線状・面状構造の精密復元と高次処理
 研究課題名（英文） Accurate recovery of line and sheet structures in 3D medical images based on multiscale local structure analysis and its advanced applications

研究代表者
 佐藤 嘉伸（SATO YOSHINOBU）
 大阪大学・医学系研究科・准教授
 研究者番号：70243219

研究成果の概要：3次元画像の局所的な2次関数近似と多重解像度解析に基づく局所的な線・面の位置・方向の精密決定、多重解像度空間探索による線状・面状の大局構造（尾根線、尾根面）の自動抽出、撮像系特性を考慮に入れた超解像精密定量化を行う3次元線状・面状構造解析の統一的枠組みを構築した。この枠組みに基づいて、3次元MR画像からの関節軟骨厚精密定量化、3次元CT画像からの骨折部位（骨折線）の抽出と骨折整復計画、3次元CT画像からの肺3次元CT画像からの肝血管の抽出とカテーテル治療支援などの医学問題に応用して、有効性を実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2007年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2008年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：画像情報処理、多重解像度解析、CT、MRI、撮像系特性、点広がり関数、血管、関節軟骨

1. 研究開始当初の背景

本研究では、3次元画像中の尾根線・尾根面の最適解像度における抽出、撮像系特性に基づく超解像精密定量化の枠組みを構築し、この枠組みを利用した新たな医学応用を開発することを目的とする。

尾根線・尾根面抽出については、2次元画像における尾根線のフォーマルなスケールスペース解析については、基礎研究の立場から、スウェーデン王立工科大学の Lindeberg が、1990年代に研究を行い、高い評価を得ていた。

本研究は、その3次元拡張を行うだけでなく、スケールスペース解析に基づき、撮像系および撮影対象の数理モデルを組み合わせた高精度復元の理論を開発する点が独創的である。さらに、様々な医用画像解析の問題を対象とし、医療における実用問題に積極的に取り組む点も特色としてあげられる。

3次元画像からの尾根線抽出法の開発は、米国ノースカロライナ大学で精力的に行われている。スケール変化する尾根線構造の抽出を行っているが、本研究におけるように系統

的・網羅的な抽出ではなく、手入力した初期値に依存したヒューリスティックな探索方法をとっている。また、撮像系特性を考慮した定式化は全く行われていない。本研究では、フォーマルなスケールスペース理論の直接的実装が可能な方法をとっており、撮像系特性を考慮した定式化をスケールスペース解析に組み合わせることにより、微細構造の抽出・復元精度を格段に向上させることが期待できる。

本申請の研究代表者らは、1990年代より、複数スケールでの線状・面状構造の強調および抽出の研究を進めてきた。これらの手法は、連続スケールではなく、離散スケールを前提としており、多重スケール統合としては、各ボクセルにおける最大値選択という単純な方法しかとっていなかった。最近では、撮像系特性が既知という条件で、面状構造の精密復元において、3次元画像の撮像系特性が精度に与える影響について解析し、推定精度の信頼性の評価および補正による推定精度向上が行えることを示した。しかし、微細構造に対する補正の信頼性は十分ではなかった。本研究では、撮像系特性が未知の場合および微細構造を扱うことが可能で、連続したスケールにおいて撮像過程の数理モデルに基づいたスケール統合法を開発する点で、これまでの研究をさらに発展させるものである。

以上のように理論的に体系化された3次元医用画像解析の枠組みが、実際の医学問題にどのように有用であることを示すことが重要である。従来、理論的枠組みの構築と、実際の医学応用が遊離する傾向にあり、構築された枠組みの有用性の実証が不十分であった。本研究では、この点についても焦点をあてる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、3次元医用画像中の様々な幅・広がりを持つ線状、面状構造の抽出および精密復元を行うために、撮像過程のモデルを組み込んだスケールスペース (scale space) 解析の枠組みを構築し、抽出した線状、面状構造を様々な医学応用課題に適用することである。具体的な達成目標は以下の通りである。

(1) 3次元画像 (厳密には、3次元連続関数の立法格子標本データ) からの線状・面状構造の系統的・網羅的抽出と精密復元に関して、連続空間におけるスケールスペースの理論的解析に基づいて定式化された方法を、十分な近似精度、かつ、許容できる計算時間で実画像に適用するための実装法を開発する。

(2) 撮像対象 (線状、面状構造) と撮像系 (CT、MRI装置) 解像度特性の数理モデルに基づき、来法の精度限界を超える線状、面状構造のモデルパラメータ推定法、および、分岐・接触などの高次特徴復元法を開発し、実

際のCT、MRI装置を用いた実験的検証を行う。

(3) 抽出された線状、面状構造を用いた3次元構造解析・パターン照合処理を医学応用課題に適用し有用性を検証する。体内の線状構造として、血管・気管支、臓器形状の特徴線、骨折線など、面状構造として、関節軟骨、肺の葉間裂、皮質組織などがある。本研究で提案する枠組みが、多岐にわたる実際の応用課題の要素技術として有効であることを示す。

3. 研究の方法

(1) 線状・面状構造スケールスペース解析の基本システムの構築: 3次元画像 (厳密には、3次元連続関数の立法格子標本データ) からの線状・面状構造の系統的・網羅的抽出と精密復元に関して、連続空間におけるスケールスペースの理論的解析に基づいて定式化された方法を、十分な近似精度、かつ、許容できる計算時間で実画像に適用するための実装法を開発する。

(2) スケールスペース解析に基づく線状・面状構造の精密復元法の開発と検証: 撮像対象 (線状、面状構造) と撮像系 (CT、MRI装置) 解像度特性の数理モデルに基づき、スケールスペースにおける尾根線・尾根面上の微分フィルタ応答値の振る舞いを解析する。この解析に基づき、従来法の精度限界を超える線状、面状構造のモデルパラメータ推定法、および、分岐・接触などの高次特徴復元法を開発し、実際のCT、MRI装置を用いた実験的検証を行う。

- スケールスペース解析によるパラメータ推定法を確立する。図1に示す理想応答曲線に、実際の応答値を当てはめることによりパラメータ推定を行う。特に、パラメータ推定の曖昧さ (安定性) を定量化し、曖昧さの小さいパラメータ値をまず推定して、確定した情報に基づき、順次、その他のパラメータ値推定の曖昧さを減らす方法を確立する。これにより、あらゆるサイズの線状・面状構造に対しての安定なパラメータ推定法を開発する。

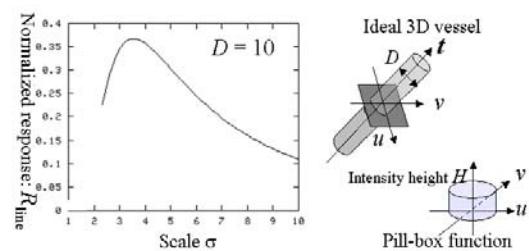


図1: スケールスペース解析によるパラメータ推定

(3) 線状・面状構造解析を用いた応用システムの開発: 抽出された線状、面状構造を用いた3次元構造解析・パターン照合処理を医学応用課題に適用し有用性を検証する。本研究で提案する枠組みが、多岐にわたる実際の応用課題の要素技術として有効であることを示す。具体的な応用として以下に取り組む。

- ・ 3次元画像から関節軟骨（面状構造）の精密復元
- ・ 3次元画像からの肺・肝臓における血管構造（線状構造）および分割面組織（面状構造）の抽出とそれらに基づく臓器内部構造復元
- ・ 骨折手術計画のための3次元画像からの骨折線（線状構造）抽出とそれらの照合
- ・ 手術中の肝臓位置合わせのための術中3次元超音波画像からの肝血管抽出と位置合わせ
- ・ 肝臓カテーテル治療支援のため3次元画像からの肝動脈（線状構造）抽出とガイドワイヤ形状決定支援

4. 研究成果

(1) 線状・面状構造スケールスペース解析の基本システムの構築

多重解像度で抽出された局所的な線状・面状の構造要素を、多重解像度空間（空間軸+解像度軸）で連結処理を行い、大域的な線状・面状構造を抽出する方法を開発した。ガウス平滑化における標準偏差を解像度パラメータとした場合の最適解像度の定義、および尾根線・尾根面としての線状・面状構造の数学的定義に基づく、空間的に変化する最適解像度における線状・面状大域的構造の抽出方法を定式化した。

(2) スケールスペース解析に基づく線状・面状構造の精密復元法の開発と検証

人体内部においては、多くの場合、線状・面状構造は孤立して存在していない。具体的に、股関節軟骨を対象とする場合には、薄面状構造である軟骨が2つ近接している。線状構造である血管も接近して存在している場合が多い。このような状況においては、従来開発された孤立した状態を仮定した復元手法では、十分な精度は達成できない。本研究では、CTおよびMRIからの薄面形状復元において、近接する2薄面体をCT、MRIで撮像する過程を、これら2つの薄面体の厚み、および、2薄面体間の間隙幅を変数とする数式で表現し、CT・MRIの撮像過程の数理モデルと組み合わせ、これら未知変数を推定する逆問題として定式化した。実際の状況に基づき、CTの点広がり関数は、幅未知のガウス関数でモデリングし、MRIの点広がり関数は、幅既

知 SINC 関数でモデリングした。画像から得られた濃淡値プロファイルが、数式により導かれるプロファイルに一致するという制約条件を用いた。この逆問題は非線形最小2乗問題として定式化されるが、極小解に陥ることなく高精度に解を得る方法として、まず、各変数に対して、一定間隔で全数探索を行い、得られた最小解を Levenberg-Marquadt 法で精密化する方法を適用した。実験では、アクリル板で作成した近接薄面体ファントムを CT および MR 撮影を行い、それらのデータに対して提案手法を適用し、安定かつ高精度に薄面物体幅の推定が行えることを実証した。さらに、実際の人体の股関節軟骨についても、実験を行い、その有効性が示唆された。図2に、ファントム実験による精度検証の結果を示す。提案法改良版により、どの条件（横軸）においても、誤差が 0.1 mm 以下となった。

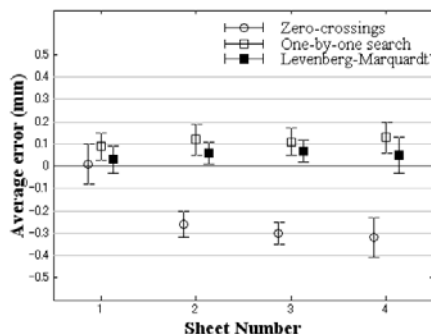


図2 厚み計測の精度検証。○従来法、□提案法初期版、■提案法改良版

(3) 線状・面状構造解析を用いた応用システムの開発

①股関節軟骨抽出システム: 精密3次元幅計測法を実用に供するために、軟骨領域の自動抽出システムの構築とその評価を行った。MRI画像中で軟骨画像の画質が良好な場合については、臨床適用可能な精度を達成できることを確認した。画質が不十分な画像については、適用が困難であった。

②線状構造抽出に基づく臓器内部構造解析システム: 線状分岐構造を用いた臓器内部構造分割システムの評価を行った。特に、胸部CTを用いた肺の区域分割を重点的に行った。多数のCT画像データを用いて、区域静脈を用いた分割、区域気管支を用いた分割、双方を用いた分割に関して複数の分割法（平面分割とスプライン分割）を比較した。右上肺を対象として、境界面と区域静脈の距離および区域気管支のはみ出しを誤差として、評価を行った。その結果、区域静脈と区域気管支の双方を用いて、スプライン分割を行った結果が最良であることが示された。また、術中画像を用いた内視鏡手術支援のため、手術中の3次元超音波

画像と手術前のCT画像を位置合わせに用いる、肝臓超音波3次元血管の再構築を行った。

③線状分岐構造抽出を用いた治療支援システム:骨折整復計画システムについては、実際の患者データを用いた骨折線抽出精度および骨折線に基づく骨折整復計画精度の検証実験を行った。従来行われていた、反対側を利用した方法および骨折線と反対側を統合した方法との比較実験も行い、統合法の性能が良いことが示された。図3に抽出された骨折線と整復計画の結果を示す。カテーテルガイドワイヤ形状推定システムについては、血管中心線抽出精度、および、ガイドワイヤ形状推定精度の評価実験を行った。血管中心線抽出については、多重解像度尾根線による網羅的抽出法が、従来の血管追跡法よりも優れていることが示された。ガイドワイヤの通過範囲についての新しい拘束条件を導入することにより性能が向上することが示された。

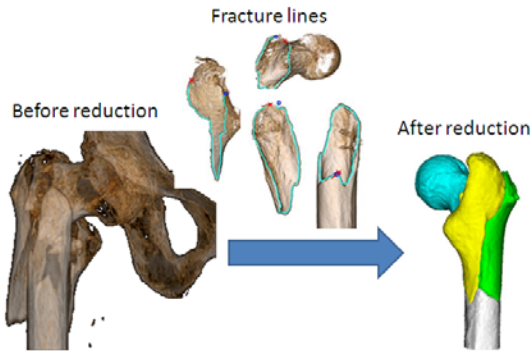


図3 骨折線抽出と骨折整復結果

(4) 本研究の意義と今後の展望

以上のように、3次元画像中の線状・面状構造の抽出および定量化を行うための多重解像度解析の理論的枠組みを構築した。この理論の特徴は、撮像系モデル、対象(線状・面状構造)のモデルにおけるモデルパラメータを、画像データから復元する問題として定式化することにより、撮像系モデリングから対象抽出に至るまで統一的な枠組みを構築した点にある。さらに、構築した枠組みを多くの医学問題に実際に適用し、その有用性を実証した点も意義が大きい。今後は、抽出された線状・面状構造を解剖学的知識と関係づける枠組みに発展させ、さらにそれらの枠組みの医学的有用性を実証することが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Cheng Y, Sato Y, Tanaka H, Nishii T, Sugano N, Nakamura H, Yoshikawa H, Wang S, and Tamura S: Accurate thickness measurement of two adjacent sheet structures in CT images, *IEICE Transactions on Information and Systems*, E90-D(1): 271-282, 2007, 査読有
2. Nakamoto M, Hirayama H, Sato Y, Konishi K, Kakeji Y, Hashizume M, and Tamura S: Recovery of respiratory motion and deformation of the liver using laparoscopic freehand 3D ultrasound system, *Medical Image Analysis*, 11(5): 429-442, 2007. **【Medical Image Analysis-MICCAI'06 Second Best Paper Prize】**, 査読有
3. Okada T, Iwasaki Y, Koyama T, Sugano N, Chen YW, Yonenobu K, Sato Y: Computer-assisted preoperative planning of proximal femur fracture using 3-D CT data, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, in press, 査読有

[学会発表] (計 6 件)

1. 木西 基, 岡田 俊之, 大須賀 慶悟, 堀 雅敏, 陳 延偉, 佐藤 嘉伸, マルチスケールに基づく3次元線状構造の中心線の抽出---マルチスケール化による効果の基礎的検討---, 電子情報通信学会2009年総合大会講演論文集 D_16_003, 2009年3月.
2. 木西 基, 岡田 俊之, 大須賀 慶悟, 堀 雅敏, 陳 延偉, 佐藤 嘉伸, 肝動脈血管分岐部での最適ガイドワイヤ形状の推定---カテーテル先端方向の角度制限の導入---, 電気関係学会関西支部連合大会, 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 G13-19, 2008年11月. **【電気関係学会関西支部連合大会奨励賞】**
3. **【招待講演】** Sato Y, "Intraoperative recovery of organ motion and deformation for endoscopic surgical navigation", 4th *Workshop on Augmented environments for Medical Imaging including Augmented Reality in Computer-aided Surgery (AMI-ARCS 2008)*, New York City, September 10, 2008.
4. Asaka T, Okada T, Osuga K, Hori M, Chen YW, Nakamura H, Sato Y: Determination of optimal guidewire shape for catheterization procedure based on vessel shape at bifurcation, *Computer Assisted Radiology and Surgery: 22th International*

Symposium and Exhibition (CARS2008), Osaka, Japan, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 3(suppl.1), S66-S67, June, 2008.

5. Nakamoto M, Hirayama H, Sato Y, Konishi K, Kakeji Y, Hashizume M, and Tamura S: Recovery of liver motion and deformation due to respiration using laparoscopic freehand 3D ultrasound system, *Lecture Notes in Computer Science*, 4192 (*Proc. Ninth International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI2006)*, Part II, Copenhagen, Denmark), 372-379, November, 2006.
6. Zoroofi RA, Sato Y, Nishii T, Nakanishi K, Tanaka H, Sugano N, Yoshikawa H, Nakamura H, Tamura S: Automated segmentation of acetabular cartilage in CT images of the hip, *Computer Assisted Radiology and Surgery: 20th International Symposium and Exhibition (CARS2006)*, Osaka, Japan, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 1(suppl.1), 73-76, June, 2006.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 嘉伸 (SATO YOSHINOBU)
大阪大学・医学系研究科・准教授
研究者番号: 70243219

(2) 研究分担者

中本 将彦 (NAKAMOTO MASAHIKO)
大阪大学・医学系研究科・助教
研究者番号: 00380634

西井 孝 (NISHII TAKASHI)
大阪大学・医学系研究科・助教
研究者番号: 70304061

田中 壽 (TANAKA HISASHI)
大阪大学・医学系研究科・講師
研究者番号: 40294087

堀 雅敏 (HORI MASATOSHI)
大阪大学・医学系研究科・助教
研究者番号: 00346206

富山 憲幸 (TOMIYAMA NORIYUKI)
大阪大学・医学系研究科・准教授
研究者番号: 50294070

田村 進一 (TAMURA SHINICHI)
大阪大学・医学系研究科・教授
研究者番号: 30029540

上甲 剛 (JHOKO TAKESHI)
大阪大学・医学系研究科・教授
研究者番号: 20263270