

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：32203
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2012～2014
 課題番号：24500242
 研究課題名(和文)リアルタイム知的画像処理・拡張現実技術に基づく手術ナビゲーションシステムの構築

 研究課題名(英文)Development of Surgery Navigation System Based on Real-time Intelligent Image Processing and Augmented Reality

 研究代表者
 下田 貢(Shimoda, Mitsugi)

 獨協医科大学・医学部・准教授

 研究者番号：90332999

 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、肝臓外科手術支援を目的として、1) 3次元CT画像を用いた術前プランニング技術、2) 拡張現実技術に基づく術中ナビゲーション技術を技術を開拓し、その有用性を明らかにした。術前プランニングにおいては、従来、医師の経験に基づき決定されていた肝切除領域を、腫瘍と肝臓血管の配置に基づき最適に設定する手法を開発した。これにより、切除体積の縮小と腫瘍の再発率の低下を両立した。また、術前プランニングの結果を術中に患部に重畳して表示するためのシースルー型のヘッドマウントディスプレイと、3次元コンテンツを術者が非接触で自由に操作できるユーザーインターフェイスを備えたシステムを開発した。

研究成果の概要(英文)：In order to support liver surgery, we have developed technologies for 1) pre-operative planning using three-dimensional(3D) CT images, and 2) navigation exploiting Augmented-Reality (AR) where information from computers can be super-imposed onto real scene. In the conventional pre-operative planning, surgeons determine the resected region based on their empirical knowledge. To solve this problem, we have developed a method that finds the optimal resected region based on the geometrical relation between a tumor and liver vessels under the condition of patient's liver function. This approach allows both of reducing the resected volume and preventing tumor metastasizing. Moreover, a navigation system has been developed using a see-through-type head-mount display that super-impose the 3-D content onto the patient's abdomen, and a touch-less user interface to manipulate the 3-D content.

研究分野：肝胆膵外科

キーワード：肝臓外科手術支援 医療情報処理 医療画像処理 術前計画 最適切除領域推定

1. 研究開始当初の背景

肝臓腫瘍切除のための外科手術では、事前に3次元CT画像を用いた手術前プランニングにより、切除領域及び手術手順を決定する。手術中は、その術前プランニングの結果得られた3次元画像をもとに、手術を進行する。術前プランニングにおける、従来、切除領域は個々の医師の経験に基づき決定されている。そのため、過剰な切除による肝不全の危険性や、過小な切除による転移・再発の可能性が高いという問題がある。また、手術中に、3次元のプランニング結果を術者に提示する方法としては、コンピュータのディスプレイに3次元コンテンツを表示し、術者が3次元コンテンツの表示サイズ、角度、位置などを変えたいときには、PCの操作者に口頭で指示を与える方法が主である。この表示方法では、術者はディスプレイと患部を交互に見比べながら手術を進めるため作業効率が極めて悪く、術者の負担が大きい。3Dコンテンツの操作方法においても、口頭で術者の意図をPC操作者に伝達することは、極めて困難である。

2. 研究の目的

本研究では、これらの問題を解決する術前プランニングおよび、術中ナビゲーションのための技術の開発を目的とする。具体的には、

- 1) 医師の経験によらない安定した術前プランニングを実現するために、
 - 3次元CT画像から肝臓・血管などを高精度に抽出する画像処理アルゴリズム
 - 血管構造と腫瘍の位置関係に基づき、腫瘍に関連した肝臓実質領域を見つけ出す画像処理アルゴリズム
 - 患者の肝機能に応じて切除体積制約に基づき、腫瘍に関連した領域を最大限に取り除くような切除領域を計算するアルゴリズム

を開発する。

- 2) 術前プランニング結果を、手術中に術者が効率よく参照できるように、

- 術者の視野で、術前プランニング結果を、実際の患部に投影できるような情報提示システム
- 3Dコンテンツを、術者が装置に触ることなく、自身の意のままに操作できるユーザーインターフェース

を開発する。

3. 研究の方法

3次元CT画像から肝臓・血管などを高精度に抽出する画像処理アルゴリズム開発のために以下の方法で研究をすすめる：

- 3次元画像中の血管らしい明暗パターンをもつ領域を強調するラインフィルタと、血管の太さ・分岐構造に着目して、高精度な血管抽出アルゴリズムを開発する。

- 3次元CT画像における、肝臓と、周辺の筋肉・臓器の明度、構造の違いを表現できるモデルを構築して、患者の個体差にロバストな高精度肝臓抽出を開発する。

腫瘍は最も近い血管から栄養を与えられるという基本的理論に基づき、腫瘍に栄養する血管をすべて抽出し、さらにその血管により影響される肝臓実質領域をボロノイ図に基づき求める手法を開発する。これにより、腫瘍に関連する領域(切除しないと再発の可能性のある領域)をすべて抽出することが可能となる。

術前の血液検査等により、患者の肝機能を評価し肝機能が低下している場合には、前述の提案方法により計算した、腫瘍に関連した領域をすべて切除することができない場合がある。このような場合に、切除体積制約下で腫瘍の再発率をできる限り下げするために、腫瘍と血管の関連性を評価する“腫瘍支配率”を考案し、腫瘍支配率に基づき腫瘍と関連が深い血管の支配領域を計算する手法を開発する。

患者の肝機能に応じて切除体積制約に基づき、腫瘍に関連した領域を最大限に取り除くような切除領域を計算するアルゴリズムを開発する。

術者の視野で、術前プランニング結果を、実際の患部に投影できるような情報提示システムとして、術者に見えているシーンと、コンピュータにより生成された術前プランニング結果を重畳して表示するシースルー型のヘッドマウントディスプレイを用いて、切除ラインなどの患部に直接提示できるシステムを開発する。

3Dコンテンツを、術者が装置に触ることなく、自身の意のままに操作できるユーザーインターフェースとして、

- 赤外線等のアクティブなセンサにより術者の手の動きを検知してジェスチャー認識を行い、機器を操作する、非接触型のユーザーインターフェース
- 加速度・ジャイロセンサを用いて、術者の動きを取得し、ジェスチャー認識を行う接触型のユーザーインターフェースを開発する。接触型のユーザーインターフェースであっても、小型化し術者の手首等につけることにより、手術の妨げにならないように利用することが可能である。

4. 研究成果

1) 血管構造に着目した高精度肝臓血管抽出アルゴリズム

3次元画像中のチューブ状の輝度パターンを強調するラインフィルタを施した後、血管の角度、太さの変化などの血管構造情報を解析する。例えば、図1に示すように、血管が誤抽出された場合、すなわち、異なる血管(静脈と門脈)が同じ血管として抽出された場合には、血管の走行する角度が急激に変化するため、誤抽出として除去する。提案手法と、従来の市販ソフトウェア(Synapse Vincent Ver. 2)による抽出結果を図2に示す。これにより、提案手法が高精度に抹消までの血管を抽出できていることが分かる。

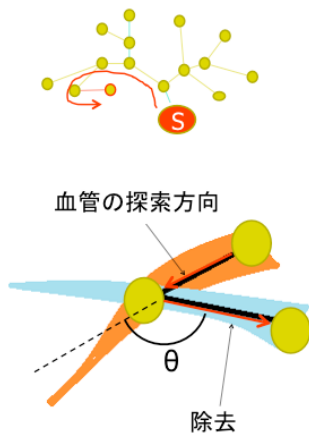


図1: 血管の走行角度の条件による誤抽出の除去

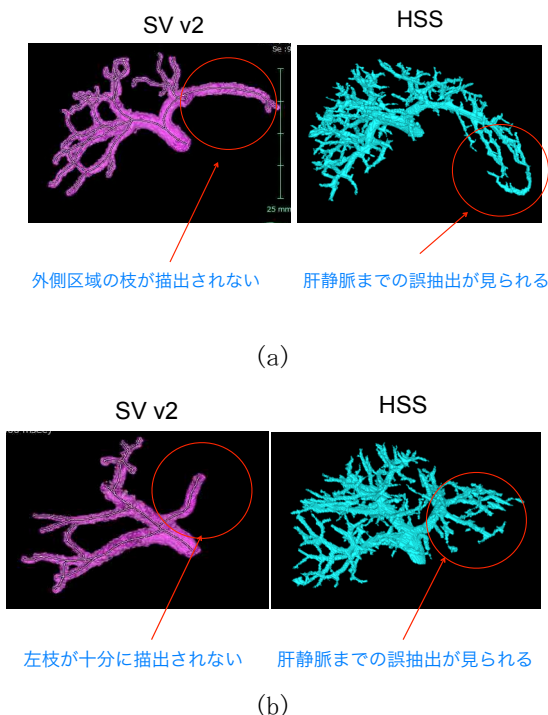


図2: 従来ソフト(左)と提案ソフト(右)の比較結果

2) 肝臓モデルを用いた高精度肝臓抽出アルゴリズム

肝臓は腹部臓器としては最大の臓器であり、CT画像中では肝臓は周辺臓器よりもCT値が高く抽出される。また、肝臓中には、門脈と肝静脈とよばれる特徴的な血管が走行している。これらの特徴を考慮した高精度な肝臓抽出アルゴリズムを提案する。はじめに、CT値を用いて大まかな肝臓領域を抽出する。その後、領域の厚さを評価するために、Local Thickness(LT)と呼ばれる特徴量を用いて領域分割を行う。図3に示すように、異なる臓器の接触面では、領域の厚みが小さくなる、すなわち、LT値が小さくなる、という性質がある。この性質に着目し、LT値が極小となる点で領域分割を行う。最後に、分割された領域を、血管情報を用いて統合する。図4に、従来の市販ソフトウェアとの誤抽出体積の比較を示す。提案手法は症例の違いに依存せず安定した結果を出していることが分かる。誤抽出体積の絶対値に関しては、医師の経験的な値として100CC以下が望ましいと言われている。提案手法はこの条件をクリアしていることが分かる。

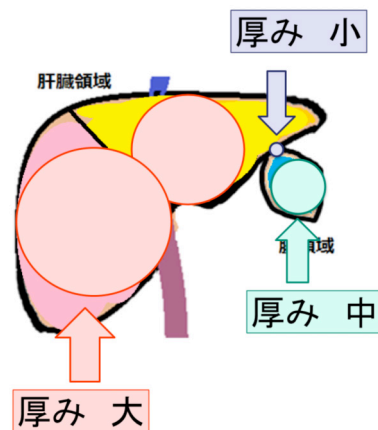


図3: 厚み情報に基づく領域分割の概念

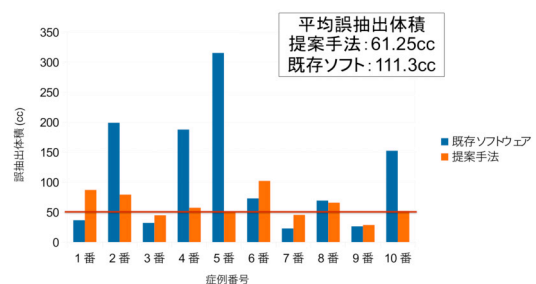


図4: 誤抽出体積における従来ソフトとの比較

3) 腫瘍支配率に基づく最適切除領域の推定

従来、医師の経験に基づき決定されている切除領域に関して、コンピュータにより理論的に、下限・上限を与えることができれば、医師の経験に依らず、一定レベルの診断を患者

が受けることができ、患者にとって極めて有用となる。図5に肝臓内の血管(門脈)と、腫瘍、再発リスクのある領域の関係を示す。腫瘍は最も近い門脈から栄養を与えられるという考え方にに基づき、腫瘍のある点から最も近い門脈点Pを計算する。Pから血管の下流にある血管は、腫瘍の影響を受ける可能性がある、すなわち、再発リスクのある領域と考えられる。この領域をPの支配領域と呼ぶ。支配領域はボロノイ図を用いて計算できる。腫瘍の各点から最も近い門脈点を見つけ、その点に対して支配領域を計算し、それをすべて加えることにより、腫瘍に関連する再発リスクがある領域をすべて抽出できる。このようにして、計算された切除領域と、医師の手によるプランニング結果との比較を図6に示す。この結果より、医師のプランニング結果と比べて、切除体積を大幅に削減できることが分かる。提案手法による結果は、腫瘍に関連した領域をすべて切除するという条件を満たしているため、再発リスクと切除体積を共に最小化していると言える。

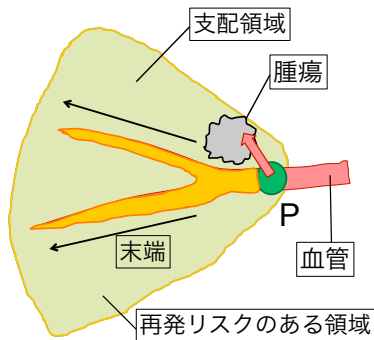


図5: 支配領域の考え方 (a)

sample1	従来手法	提案手法
切除体積 (cm ³)	192	66
カットポイント数 (点)	1	2
3D表示結果		

(b)

sample2	従来手法	提案手法
切除体積 (cm ³)	325	42
カットポイント数 (点)	2	4
3D表示結果		

図6: 術前プランニングでの切除体積比較果

ここまで述べた提案手法での結果では、切除する門脈点(カットポイント)として、血管の

太さや分岐点である条件を考慮していない。そのため、実際の手術の際にはそのままでは利用することができない。そこで、我々は、手術の際に重要となるカットポイントの条件を考慮して、切除領域をプランニングするように、提案手法を拡張している。その場合でも、従来の人手によるプランニング結果と比較して、切除体積を削減できる(図7)。

sample1	従来手法	提案手法 (太さ6mm)	提案手法 (太さ8mm)
切除体積 (cm ³)	192	112	178
カットポイント数 (点)	1	2	1
3D表示結果			

(a)

sample2	従来手法	提案手法 (太さ6mm)	提案手法 (太さ8mm)
切除体積 (cm ³)	325	170	346
カットポイント数 (点)	2	3	2
3D表示結果			

(b)

図7: 血管太さ・分岐点を考慮した最適切除領域の結果

4) 術中ナビゲーションのための情報提示システムと、3Dコンテンツ操作のためのユーザーインターフェイス

手術中に、術者が患部とプランニング結果を同一視野に見ることができれば、患部と離れたディスプレイを交互に見る必要がなくなり作業効率を大幅に高めることができ、医師の肉体的疲労を低減できる。その目的のために、シースルー型のヘッドマウントディスプレイを用いたシステムを検討した。用いたシースルー型のヘッドマウントディスプレイは、ブラザー社のエアスカウタである。図8に情報提示システムを示す。PCからの画像と、実際の目で見えているシーンを重畳できる。

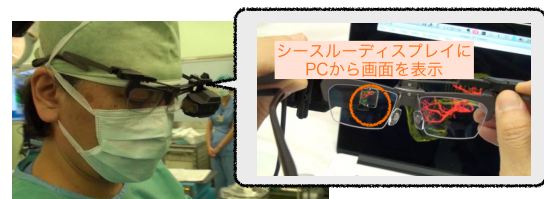
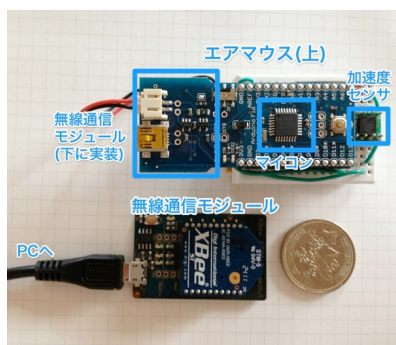
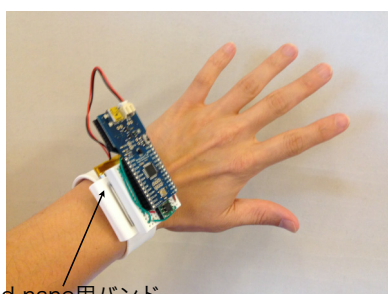


図8: シースルー型のヘッドマウントディスプレイによる情報提示

また、3D コンテンツ操作を、術者が手術中に自由に操作できるように、図9に示すように、術者の手の動きを加速度センサおよび、ジャイロセンサで取得し、PCに無線で転送し、コンテンツを操作できるユーザーインターフェイスを開発した。手術中には、バンド等で手首等に固定することにより、手術中でも容易に操作できる。この方式では、装置を術者が体に付けなければならないというデメリットはあるが、装置の設置場所は不要であるため、手術を行う狭い空間での使い勝手はよい。術者が装置を身につけなくてもよい非接触のユーザーインターフェイスとして Microsoft Kinect や Leap Motion を用いたシステムも開発している。非接触型のユーザーインターフェイスは、操作対象であるディスプレイ機器等に取り付け、不特定の人間が、その装置を使用する場合に、有用となることが分かった。



(a)



iPod nano用バンド

図9: 機器操作のためのユーザーインターフェイス

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 20 件)

[査読付き国際会議]

1. Masanori Hariyama, Riichi Tanizawa, Mitsugi Shimoda, Keiichi Kubota, Yasuhiro Kobayashi, "Liver Extraction from CT Images Based on Liver Structure Models", Proc. International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition (IPCV), pp.170-173, 2014-07-23, Las Vegas, Nevada, USA, regular).
 2. Masanori Hariyama, Moe Okada, Mitsugi Shimoda, Keiichi Kubota, "Estimation of Resected Liver Regions Using a Tumor Domination Ratio", Proc. International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition (IPCV), pp.52-56, (2014-07-22, Las Vegas, Nevada, USA, regular).
- [国内講演会]**
3. **(招待講演)** 張山昌論, "「計算」技術が拓く医療応用", CEATE Japan 2015 (2014-10-10, 幕張メッセ)
 4. 張山昌論, 下田貢, 白木孝之, 窪田敬一, "肝臓構造モデルに基づく高精度な肝臓領域自動抽出ソフトウェアの開発", 肝臓治療シミュレーション研究会, S3-6 (2014-09-30, 大阪国際会議場)
 5. 下田貢, 白木孝之, 張山昌論, 窪田敬一, "腫瘍視点から同定する門脈支配率を用いた肝臓切除領域の推定", 肝臓治療シミュレーション研究会, 07 (2014-09-30, 大阪国際会議場)
 6. 白木孝之, 下田貢, 張山昌論, 窪田敬一, "肝細胞癌手術におけるオンコロジカルな視点を考慮した最適部分切除領域自動抽出ソフトウェアの開発", 肝臓治療シミュレーション研究会, 20 (2014-09-30, 大阪国際会議場)
 7. Mitsugi Shimoda, Takayuki Shimizu, Takayuki Shiraki, Masanori Hariyama, Keiichi Kubota, "Experience of automatic hepatic resection region extraction software which took the oncological viewpoint into consideration to the liver resection", 第26回日本肝胆膵外科学会・学術集会, P133-4 (2014-06-13 和歌山県民文化会館)
 8. 下田貢, 清水崇行, 岡田 萌, 張山昌論, 窪田 敬一, 肝細胞癌手術におけるオンコロジカルな視点を考慮した切除領域自動抽出ソフトウェアの開発, 肝臓治療シミュレーション研究会 (2013-09-28)
 9. 張山昌論, 清水崇之, 下田貢, 窪田敬一, 外科手術支援システム操作のための3次元ユーザーインタフェース(エアマウス)の開発, 肝臓治療シミュレーション研究会 (2013-09-28)
 10. 清水崇行, 下田貢, 張山昌論, 窪田敬一, 血管グラフ構造解析を用いた門脈自動追跡の高精度化, 肝臓治療シミュレーション研究会 (2013-09-28)
 11. **(招待講演)** 張山昌論, "曲率に基づいたチューブ状構造要素の抽出と医用画像処理への応用", 文科省共催 SMART 研究会「応用現代幾何学」(2013-09-04)
 12. 日浦孝介, 張山昌論, 尾形吉隆, 亀山充

- 隆, 下田貢, "構造解析に基づく CT 画像からの肝臓血管抽出", 計測自動制御学会 東北支部 第 281 回研究集会, 281-12(2013)
13. 張山昌論, 小松与志也, 小林康浩, 下田貢, 外科手術支援システム操作のための 3 次元ユーザーインタフェースの製作, 計測自動制御学会 東北支部 第 281 回研究集会, 281-13(2013)
14. 山田駿平, 張山昌論, 亀山充隆, 小林康浩, 下田貢, "人体解剖モデルを用いた CT 画像からの下大静脈抽出", 計測自動制御学会 東北支部 第 280 回研究集会, 280-1(2013)
15. 谷澤理一, 張山昌論, 亀山充隆, 小林康浩, 下田貢, "人体解剖モデルを用いた CT 画像からの自動肝臓抽出", 計測自動制御学会 東北支部 第 280 回研究集会, 280-2(2013)
16. 岡田萌, 張山昌論, 亀山充隆, 下田貢, "腫瘍領域情報に基づく肝臓切除容量最小化のための門脈切除点計算", 計測自動制御学会 東北支部 第 279 回研究集会, 279-3(2013)
17. **(招待講演)** 張山昌論, 亀山充隆, "人間中心のリアル・ワールド知能システムのための計算技術", 電子情報通信学会技術報告(信学技報), ICD2012-64, pp. 31-33(2012-10-18, 盛岡)
18. 下田貢, 清水崇行, 張山昌論, 窪田敬一, "血管グラフ構造を用いた門脈自動追跡の使用経験", 第 7 回肝臓治療シミュレーション研究会, I-1, p. 18(2012-10-06, 熊本)
19. 尾形吉隆, 張山昌論, 亀山充隆, 下田貢, "グラフ構造解析に基づく肝臓血管の自動抽出", 電気関係学会東北支部連合大会(秋田), 2C06, (2012-08-31)
20. 岡田 萌, 張山昌論, 亀山充隆, 下田貢, 小林康浩, "高精度血管抽出に基づく門脈支配領域推定", 電気関係学会東北支部連合大会(秋田), 2C07 (2012-08-31)

[図書] (計 1 件)

Masanori Hariyama and Mitsugi Shimoda, "Automatic estimation of a resected liver region using a tumor domination ratio", in "Emerging Trends in Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition", Chapter 23(pp. 369--378), Morgan Kaufmann Publishers

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下田貢 (Shimoda Mitsugi)
獨協医科大学医学部 准教授
研究者番号 : 90332999

(2) 研究分担者

張山昌論 (Hariyama Masanori)
東北大学大学院情報科学研究科 准教授
研究者番号 : 10292260