

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年3月31日現在

研究種目：基盤研究(A)
研究期間：2006～2009
課題番号：18200008
研究課題名(和文) 医用画像と医療知識に基づいて自動生成された患者モデルを用いた手術訓練システム
研究課題名(英文) Medical operation training system using patient models restored automatically from medical images and knowledge
研究代表者
安部 憲広 (ABE NORIHIRO)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号：00029571

研究成果の概要(和文)：従来人手によって作成された臓器モデルを用いた手術訓練システムでは、患者に即した手術模擬ができなかったが、医用画像の高精細化と計算機支援の診断技術の進歩によって、患者の医用画像から人体モデルの復元と、臓器の分離が可能となった。復元されたボクセル表現の臓器モデルをテトラ構造化することによって、手術器具による臓器の変形や切断とその際に術者が感じる操作感の実現が可能となる。本研究では、最近問題となっているくも膜下出血の原因となる脳動脈瘤破裂の防止策である、開頭クリッピング術とコイル塞栓術の訓練システム開発を具体的な目標として、必要な技術要素の実時間開発を、マルチコアとGPUを用いて開発し、更に当該システムを遠隔置換で共有し、熟練医師の術具の操作と操作感覚を非熟練医師に体験させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：In the conventional medical operation simulation system, it is difficult to realize the operation according to a patient as the organ model is made by hand. By advancing of high-resolution digital image and computer assisted medical diagnosis (CAD), restoration of human body model of a patient from medical image and segmentation of each organ become possible. Then by translating the restored voxel model into tetrahedral one, implementation of not only deformation and abscission of organ with surgical instruments but also the haptic feeling an operator feels in the operation becomes possible. This research aims at developing a system to simulate the craniotomy clipping art and the coil embolomy art; the preventive measure of cerebral aneurysm rupture which is possible case of subarachnoid hemorrhage becoming problem recently. Real time development of necessary techniques using multi-core and GPU, Furthermore, by sharing the system between remote location, we are successful in making non-skill physician experience manipulation of a skilled physician and haptic sensation the physician feels in so doing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2007年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2008年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
年度			
総計	30,100,000	9,030,000	39,130,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ，医用画像処理，手術シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

当時，CT装置を有する全ての医療機関にはCT画像の閲覧や様々な処理を加えることのできるシステムが導入されており，長時間の作業が必要ではあるが，医師がこれらのシステムを用いてCT画像から対象臓器，骨，血管などを抽出して，患者の3次元モデルを作成することが可能となっていた．患者の3次元モデルが利用できれば，人工現実感システム研究で開発されたセンサーや装置を用いて，患者の3次元モデルに対して手術シミュレーションを行うことが可能となり，手術ミスの防止に寄与することが可能となる．

しかし，医師がそのような作業に長い時間を割くことは事実上不可能であり，従って予め作成されたモデルに対する手術シミュレーションしかできないため，患者に対応したテーラーメイドな手術計画立案や手術シミュレーションは困難であった．一方で当時，著名大学の医学部や工学部では，CT画像を利用したCAD(Computer Assisted Diagnosis)システムの研究が精力的になされており，研究代表者もCADの特定研究の公募の一員として臓器横断的な癌検出システム開発を目指していた．しかし，当時はまだ患者モデルの自動生成と患者の臨床データを参照した手術計画立案，手術シミュレーションを支援するシステムの構築はなされておらず，高度化する医療技術を医学生に学ばせるためにも，本提案研究を始めなければならないと考え，共同研究者の支援を受けて当該研究を提案し，採択された．

2. 研究の目的

多次元医用画像の知的診断支援に関する特定領域研究で開発された各臓器の診断プログラムを利用して，癌が検出された臓器の組織，癌，血管，骨などの組織を自動復元した3次元人体モデルを構築し，患者個人の臨床データを参照した内視鏡

/開腹手術支援システムを作成する．

柔軟な人体組織に対する術具による圧迫や組織の切除によって生じる変形を模擬するために，隣接するボクセルの重心を結ぶ力学リンクの編み目構造に働く力学関係を並列計算によって，実時間で形状と応力の変動を算出し，力覚フィードバック装置を用いて操作者に感覚を提示し，実際の手術において要求される術技の訓練を支援するシステムを4年の研究期間で目標を達成する．上記の研究の過程で，CT画像の分解能の更なる向上，マルチモーダルな画像情報の追加，新たな学術的知見の発見など，明らかになったデータ，技術，事実の組み込みが容易となるよう，知識ベースの構築法やボリュームメモリの増設方法について予め対策方法を講じておく．

3. 研究の方法

(1) 患者に即した手術訓練システム開発には，まず，患者の臓器の復元が不可欠である，本研究では頭部頭蓋骨内部の復元を行わねばならない．脳動脈流の破裂防止手術模擬のためには，血管を検出し，動脈瘤を抽出する必要がある．次に，脳動脈瘤に至る経路上に存在する障害物となる他の血管，脳，頭蓋骨を復元する必要がある．

(2) 復元された頭蓋骨内部に術具を挿入する際や動脈瘤をクリップで留める際の変形を実時間で実現し，更にその際に術具を通じて変形時の応力を術者に伝えるhaptic feedbackを実現する必要がある．このために必要となる技術要素を確立する．

(3) 熟練医師による手術操作を獲得することによって，未熟練医師にその技法を伝達する必要がある．本研究では脳動脈流の破裂防止を主目標としているが，乖離性大動脈瘤破裂防止手術への対応も重要な課題であり，(1)で開発した手法を大動脈に適用し大動脈瘤の検出と破裂防止手術の模擬を試みる．

(4) 従来、熟練医師の技法を見ることによって手術を学ぶ方法が採られてきたが、熟練医師のメスや鉗子の詳細な取り扱い方法とその際に熟練医師が感じる力覚を遠隔地の医学生や非熟練医師に伝達するための実時間遠隔通信システムを構築する、そのためには、手術対象を撮像した画像と、メスや鉗子の操作量、操作に伴い装置に働く力覚の同期通信を確立する。しかし、通常のインターネットを利用する際に生じる Haptic feedback データの送信時の欠落や誤送信への対応策が講じなければならない。

4. 研究成果

(1) 先ず、MRA 画像から血管を抽出し、分岐構造解析を行い、分岐点を抽出する。動脈瘤がない場合は、血管は分岐点で2つに分かれるが、動脈瘤があれば、分岐点に発生するため、極近くに2つの分岐点が隣接して生じることになる。そこで、分岐点間の距離に基づいて動脈瘤の候補を探索する。しかし、瘤は分岐点以外にも血管壁の脆弱な部分に発生する可能性があるため、血管系が周囲よりも増大している部分も瘤の候補となる。患者によっては、複数個の瘤があり得るが、最大の瘤を動脈瘤として検出した。

次に、造影剤を血管に注入し、造影剤が動脈から静脈へと拡散する時点での血管造影を行うことで静脈を抽出する。ただ、この手法では全ての静脈を検出するのは難しく、全ての静脈の検出はで

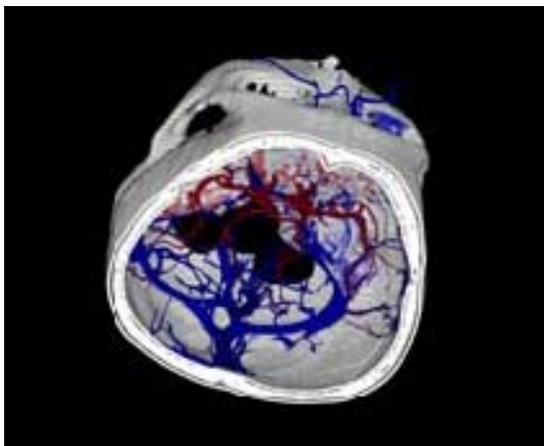


図1 復元された患者の仮想脳内モデル
きない、この後、脳本体、頭蓋骨を抽出し、統合することによって、図1に示すボクセルに基づく

脳内モデルが復元できた（図では、脳本体は消去している）。

(2) 復元されたボクセルモデルのままでは、変形に伴い4変形が歪んでGLによる描画が困難となるためボクセルを、3角形を要素とする四面体に分割したが、この変換によって描画要素は5倍に増加した。脳内全体のボクセルを四面体化すると描画に要する時間が5倍に増加すること、術具と脳内モデルとの接触検出時間も増大するため、四面体化する部分を制限した（実は、術具の近傍にあるボクセルの四面体への実時間変換を試みたが、後述のGPUによる変換が未達成のため変形か膿瘍域を事前に制約した。）。描画時間を更に短縮するために、変形は全ての四面体に対して行うが、描画は視点から可視か可能な部分だけに限って行った。力覚計算は以下に示す式に従って計算した。

$$F_i = \sum \left(\frac{l_{ij}}{|l_{ij}|} k_{ij} (|l_{ij}| - |l_{0ij}|) + c_{ij} v_i \right) \quad (1)$$

$$l_{ij} = x_i - x_j$$

F_i : Force of Point Mass i

C_{ij} : Coefficient of Viscosity form a Damper between Point Mass i and Point Mass j

l_{ij} : Length of Spring between Point Mass i and Point Mass j after moved

l_{0ij} : Length of Spring between Point Mass i and Point Mass j before moved

k_{ij} : Constant of Spring between Point Mass i and Point Mass j

v_i : Velocity of Point Mass i

x_i : Position of Point Mass i

x_j : Position of Point Mass j

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = ma = F \quad (2)$$

m : Mass of Point Mass

x : Position of Point Mass

α : Acceleration of Point Mass

As shown in the Eq. (3), we can obtain the imperceptible time (Δt) later position (x_{n+1}) and velocity (v_{n+1}) by using the acceleration (a_n) obtained from the Eq. (2). Then if we update each position of the Vertices, the object moves elastically.

$$v_{n+1} = v_n + a_n \Delta t \quad (3)$$

$$x_{n+1} = x_n + v_n \Delta t$$

術具と四面体の接触判定は、術具と四面体頂点でのみ行ったが、術具と複数の四面体頂点の接触

を判定するために、GPU を導入した並列計算を行っている。術具と接触した複数の頂点位置が移動することによって、四面体が変形して、その応力が haptic device に返される様に、各三角形の辺にバネとダンパーを与えた。

この結果、術具と組織の接触時に、組織が変形する様子を模擬することが可能となり、脳動脈流をハサミ状の術具で挟むことが可能となったが、実際のクリッピング操作の実現には至らなかった。

(3) 熟練外科医の技術継承支援に関する研究、及びコンピュータ医用画像診断支援に関する研究の基礎研究を行った。例えば、メス鉗子を用いた切開においても熟練外科医と研修医では切り口に大きな違いがある。熟練医は、鉗子から伝わる臓器感触を診ながら計画通りに鉗子を操作する。従って、鉗子操作の時系列データ、具体的には操作対象物を物理的な干渉を保持しつつ行われる鉗子位置および姿勢の時間変化を教師データとして取得し、ハプティックデバイス PHANTOM の力覚伝達機能を利用して、訓練中に教師データを再生する方法を試みた。その結果、立方体の仮想オブジェクトに対する他者の操作について、力覚伝達による継承支援の可能性を示すことができた。

患者胸部造影 CT 画像データを用いた大動脈瘤診断支援のために、三次元領域拡張法を用いた自動抽出手法について検討を行った。まず造影剤による高輝度領域に閾値を設定し、大動脈内部の血流領域を抽出することができたので、この情報を元に血管壁組織の抽出を再度領域拡張法を用いて抽出することを試みた。ここでは、健常な大動脈壁組織の大部分を抽出することに成功したが、大動脈瘤領域の抽出には至らなかった。放射線科医は、二次元造影画像から大動脈瘤領域を特定する技術を体験的に養っており、本研究は彼らの読影技術をファジィ推論の概念を用いてモデル化し、領域拡張法における画素判別に利用することを代替手法として考案し、現在ファジィ推論のベース構築と実装が必要になる。

(4) 遠隔地に、画像と術具の操作データと力覚値を実時間伝送する際の要点として、異なるモダリ

ティのデータの同期伝送が挙げられるが、画像は毎秒 30fps で良いが、力覚データは 1000HZ 送信する必要あるため、非同期送信を行い、結果としてそれらが送信側と同様な感覚で受信できればよいと考えられる。その際に問題となるのは、医用画像の分解能である。現在、ロボットなどによる画像認識では 200 x 200 程度の画像は実時間伝送可能となっているが、本研究の場合は、最低でも 500 x 500 が必要であるため、圧縮伝送を要する。そこで、先ず jpeg 圧縮を用いて 30fps の送信を試みたが、圧縮率を上げると、そのために要する計算時間が長くなるため、圧縮率を上げることができなくなったため、20fps 程度の伝送しか実現できなかった。

そこで、mpeg と同様に、初期画像を jpeg 圧縮で送信した後、前の画像と現在の画像との差分画像を送信して、元の画像を復元する方法を用いたところ、30fps の伝送に成功した。初期画像の伝送は、伝送開始時点に加えて、視点移動時には前画像データの電送が必要になるため、視点切り替えが頻繁に行われる場合、30fps の伝送は困難となるが、手術画像の視点切り替えが頻繁に行われる可能性は低いと考えており、問題はない。

画像や音声情報の伝送に比べ、力覚情報の伝達技術は未だ多くの問題点を抱えている。その一つとして遠隔地における情報の伝達時に、情報に欠落やノイズによるズレが生じることが挙げられる。画像や音声に多少のノイズが存在しても、人がこれを判別することは可能である。一方、力覚はノイズによって大きな違和感を生じる。ほんくんきゅうでは、欠落等を補う一般的な補間法として線形補間、ラグランジュ補間などの数式による補間がある。これらは数学的に滑らかな環境において非常に有効な手法である。しかし、数学的に滑らかでない環境、即ち与えられた点からそれらを通る関数を正確に推定することが出来ない時、この手法では正確な補間を行うことができない。そこで、音声や画像とともに、力感覚を伝送することによるマルチモーダル臨場感通信において、リアルタイムでの力感覚の伝送品質を上げる方式を考案した。力感覚の伝送中の欠落や誤謬の補

正・修正とデータのドリフトなどの値にオフセットが発生する場合に、事例ベースによる力感覚データの補完を行う方式を開発した。この方式により、従来困難であった非線形情報の補完も実現した。

(5) 上記の結果、以下の結論を得るに至った。本研究で明らかとなった問題点を挙げておく。

① 医用画像から修得できる情報以外のデータ獲得

静脈の完全なモデリング
神経、リンパ管などのデータ取得
組織同士の接着部位の特定
臓器の柔軟度の計測

② 仮想手術支援の技術要素の確立

1000 x1000 程度のモデルに対する実時間処理
変形だけでなく、切断操作の実現
複数術具と臓器モデルとの干渉検出
臓器の柔軟度に基づく正確な力覚復元
血流と出血のモデリング

③ 医師の動作情報の獲得

手指だけでなく、頭部や体勢の検出

④ 実際の手術で執刀医が操作するメスに掛かる力覚値の検出

メスに超小型フォーストルクセンサ(F/T)を付加して、力覚の真値を求めようとしたが、F/Tの雑音除去が困難で、正確な値を取り出し、PHANTOMに出力する予定であったが、果たせなかった。

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 8 件)

① Toshihide Miyagi, Norihiro Abe, Yoshimasa Kinoshita, Tatsushi Tokuyasu, Hirokazu Taki, Shoujie He, "Detection of brain aneurysm and route searching to brain aneurysm aim at the development of operation simulation system", International Journal on Artificial Life and Robotics, 2009, 査読有り. pp. 150-153-

② Hiroshi Takada, Norihiro Abe, Yoshimasa Kinoshita, Hirokazu Taki, Tatsushi Tokuyasu,

Shoujie He:, "Modeling and Deforming Virtual Dense Elastic Object with Haptic Device PHANTOM", International Journal on Artificial Life and Robotics, 2009, 査読有り. pp-237-241
[学会発表] (計 60 件)

① Hiroshi Takada, Norihiro Abe, Yoshimasa Kinoshita, Hirokazu Taki, Tatsushi Tokuyasu, Shoujie He:, "Modeling of Virtual Dense Elastic Object and Deformation using Haptic Device, WMSCI2009, (2009年6月11日), Orland, USA

② Toshihide Miyagi, Norihiro Abe, Yoshimasa Kinoshita, Shoujie He, Hirokazu Taki: "Use of the Structure of Blood Vessel for Detection of Brain Aneurysm and Route Search to Brain Aneurysm WMSCI2009, (2009年6月11日), Orland, USA

③ T. Tokuyasu, T. Shuto, K. Yufu, N. Abe, S. Kanao, A. Marui, M. Komeda "Detection of volume data of aortic tissues based on three dimensional domain growing, International conference on AROB, (2010年2月6日), Beppu, JAPAN

④ Takayuki Toki, Hirokazu Taki, Hirokazu Miura, Noriyuki Matsuda, Masato Soga, and Norihiro Abe, "Real time interpolation of haptic information using case base", International conference on AROB, (2010年2月4日, Beppu, JAPAN

⑤ Yasutaka Uchida, Norihiro Abe, Yoshimasa Kinoshita, Hirokazu Taki, Tatsushi Tokuyasu, and Shoujie He, "The construction of remote communication system between haptic devices", International conference on AROB, (2010年2月6日) Beppu, JAPAN

⑥ Norihiro Abe, Ryuichirou Mizomkami, Yoshimasa Kinoshita, Shoujie He: "Enactive interface in Simulation of Medical Manipulation ICSI", ENACTIVE07, pp.21-24, 2007, (2007年11月21日), Grenoble, France

⑦ Tetsuya Sato, Norihiro Abe, Yoshimasa

Kinoshita, Shoujie He: "Toward the Development of an Intelligent System for the Diagnosis of Multiple Organs and Diseases", The Second International Conference on Complex Medical Engineering CBM 2006, pp 359 - 364., 2006, (2006年5月7日), Salt Lake City, USA

[その他]

<http://www.sein.mse.kyutech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安部 憲広 (ABE NORIHIRO)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号: 00029571

(2) 研究分担者

瀧 寛和 (TAKI HIROKAZU)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号: 10304180

徳安 達士 (TOKUYASU TATSUSHI)

研究者番号: 50435492

(3) 連携研究者

小出 洋 (KOIDE HIROSI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号: 90333517

田中 和明 (TANAKA KAZUAKI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号: 70253565