

力覚のオーグメンテッドリアリティを用いた手術支援システムの研究

野嶋 琢也¹, 稲見 昌彦², 苗村 潔³, 川俣 貴一⁴, 伊関 洋^{3,4}, 舘 暲²

Research on surgery supporting system using augmented reality of haptics

Takuya NOJIMA^I, Masahiko INAMI^{II}, Kiyoshi NAEMURA^{III}, Takakazu KAWAMATA^{IV}, Hiroshi ISEKI^{III,IV} and Susumu TACHI^{II}

Abstract: As increasing Minimally Invasive Surgery, many researcher developed surgical navigation systems. These systems often visualize images that could not see directly, by superimposing images from MRI, CT, etc. to real patient's image. Such systems support the operator to know the relationship between the target area and the other vital area in the patient's body. However, they do not support the task itself because they only visualize the data. In this paper, we propose force navigation system, which generates appropriate force between the tool that the operator holds and the target area of the patient's body to navigate the tool. By using force sensation, the system could navigate the tool and support operator's task directly. Furthermore, we describe about the algorithms for generating appropriate force and about the experiment using phantoms for pituitary adenoma.

Keyword: force navigation, haptics, augmented reality, supporting system

1. はじめに

近年、低侵襲手術の増加に伴い手術ナビゲーションシステムが盛んに研究されている[1]。従来のシステムでは一般に、MRI等から得られた医用画像と実際の患者の体、あるいはその映像とを融合して視覚的に提示することで、通常見ることのできない領域（不可視領域）を可視化するというオーグメンテッドリアリティの手法が使われてきた。このような手法を用いることにより、術者が今現在操作を行っている部位と、その周囲にはあるが、直接見ることのできない組織との空間的な関係を、視覚的に把握することを可能にしている。しかし、従来のシステムは一般に視覚的な支援にとどまっており、保持している道具を目的の場所に直接誘導する、あるいは操作ミスによる事故を未然に防ぐといった意味においては術者の道具操作自体を直接的に支援することはない。これに対して我々は力覚のオーグメンテッドリアリティによる直接的な作業支援を提案してきた[3]。力覚のオーグメンテッドリアリティとは、実世界で得られる道具の操作感や手応えなどといった力感覚

に加えてシステムからバーチャルな触覚情報を出し、両者を融合して人に対して提示するものである。この力覚のオーグメンテッドリアリティを手術における作業支援に利用することを考えた場合、術者は従来の作業時に得られる操作感を損なうことなくそのまま感じることができ、さらにバーチャルな触覚情報を得ることが可能になる。このバーチャルな触覚情報として例えば患者体内の正常組織、腫瘍組織に関する情報を利用した場合、正常組織の周りにバーチャルに力の壁を作り出すことで正常組織を保護する、あるいは逆に腫瘍組織に向かうような吸引力を生成することで手術道具を目的とする腫瘍へと誘導することが可能になると考えられる。本報告ではこの力覚のオーグメンテッドリアリティを利用することで手術用の道具を操作、誘導するフォースナビゲーションのためのシステムを提案する。対象とする手術として経鼻腔脳外科手術を想定し、下垂体の腫瘍部位を道具が進入してもよい侵襲領域、それ以外の組織を道具が進入してはならない非侵襲領域として設定し、非侵襲領域内部に手術道具が侵入しないような反力を生成することで直接的に術者の作業支援を行うシステムを構築した。

2. 経鼻腔脳外科手術

経鼻腔脳外科手術とは主に下垂体に生じる腫瘍を摘出することを目的とした手術で、鼻腔を介して蝶形骨洞の壁面を切開し、下垂体に到達する経路をたどる。この時の作業は鼻腔を介して顕微鏡

¹ 東京大学大学院工学系研究科

² 東京大学大学院情報理工学系研究科

³ 東京女子医科大学大学院先端生命医学研究所先端工学外科学分野

⁴ 東京女子医科大学脳神経センター脳神経外科

^I School of Engineering, the University of Tokyo

^{II} School of Information Science Technology, the University of Tokyo

^{III} Faculty of Advanced techno-surgery(FATS) Institute of advanced Biomedical Engineering & Science(ABME&S) Graduate school of Medicine (R&D)

^{IV} Department of Neurosurgery, Neurological Institute, Tokyo Women's Medical University

下で行われるため術者の視野が限定され、さらに近傍に重要組織が存在する狭い領域での作業となることから、高度な熟練を要する術式となっている反面、傷が目立たない、入院期間が短いなど患者側には大きな利点がある。また、下垂体は主にホルモン分泌を司る器官で、その大きさは1[cm]程度となっており、その近傍には内径動脈や視神経などの重要器官が通っている。そのため、本術式に適用すべきシステムは1[mm]程度の精度をもつことが必要とされ、可能であれば1[mm]以下の精度が望ましい。

3. 力覚のオーグメンテッドリアリティを用いた手術支援システム

実際の操作力に加えてバーチャルな触覚情報を同時に人に対して提示することを提案する。オーグメンテッドリアリティとは現実の情報とバーチャルな情報を融合させたものをさすが、これを触覚において実現したものを、力覚のオーグメンテッドリアリティと呼ぶ。従来、遠隔手術システム等の研究においては力覚の必要性が指摘されており、多くの研究がなされてきた。そのようなシステムの多くは daVinci[4] のようにマスター・スレーブ方式を採用しており、医者がマスターシステムを操り、別の場所にいる患者の所にあるスレーブマニピュレータを操作する構造になっている。マスター・スレーブ方式を利用した場合、例えば心臓の拍動にスレーブシステムを追従させることで、バーチャルに心臓の拍動を止めた状態を実現し、手術の遂行を助けるといったシステム[2] のように、状況に応じて様な機能を付与することが可能になると考えられる。しかし、マスター・スレーブ方式を利用した場合の問題点として、以下の3点が考えられる。

- 術者に提示される触覚情報がシステムの提示能力により制限を受ける
 - システム誤動作時の危険性が大きい
 - 全体的のサイズが比較的大きいものになる
- まずマスター・スレーブ方式においては、術者に対して提示される力覚情報はすべてシステムを通じて提示されることになる。そのため、術者が感じることでできる触覚情報はシステムの能力により制限を受けることとなる。また、スレーブ側システムには自システムに搭載されているマニピュレータ自身を保持して、かつ精度を上げるために比較的強力なアクチュエータを必要とする。そのため、誤動作時には人が直接それらを制御することは難しい。また、結果的に全体のサイズも大きくなりがちである。そこで我々は、実際の力覚情報はシステムを介さずに人に対して直接伝達し、

その上でさらにバーチャルな力覚情報を提示することを考え、システムを構築した。今回構築したシステムの写真を図1に載せる。

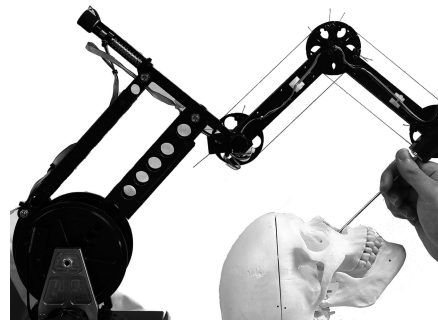


図1 システム全景

Fig. 1 A picture of the system

本システムではまず、実際の作業時の感覚を、計算機などを經由せずに人に対して直接提示することを可能にするために、システムに手術用の道具を搭載し、術者は従来の方式と同じように自らの手で道具を直接保持して作業を行う。そしてバーチャルな触覚情報は、システムから生成される。図1に示すように作業用の道具はシステムの末端部に搭載され、人によって直接操作される。平行リンクを利用してシステムのリンクを作業部位を迂回させることで、作業する空間を確保する。また、この平行リンクを利用したことにより、あたかも作業道具の先端、作業部位から直接力が生成されているかのような感覚を作業者は得ることになる。また、道具自体は術者が動作させるため、システムには自らを支え、人に対して力を提示するだけのアクチュエータが装備されていれば十分であり、これは先のマスター・スレーブシステムにおいてスレーブ側に搭載されるアクチュエータと比べると小さい出力のものですむ。術者は図1に示すようにシステムに搭載された道具を直接保持して作業を行う。そしてツール先端が予め設定された非侵襲領域の近傍に到達すると適切な反力が生成され、非侵襲領域を保護する。本システムは6自由度の動作自由度をもち、並進の3自由度の力を発生することができる。各軸にはロータリーエンコーダが配置され、それによるツール先端の作業部位におけるシステムの位置分解能はおおよそ0.1[mm]となっている。またアクチュエータとしてはMaxon社の10[w]エンコーダ付きDCモータを利用した。全体の制御はPC(OS:Microsoft Windows 2000 SP3, CPU: Pentium III 600MHz,

Memory: 384MB) で行い、その周期は力覚提示に必要とされる 1[ms]以下を実現している。

4. 力覚生成アルゴリズム

力覚のオーグメンテッドリアリティを用いる際、対象となる現実の物体と、力覚提示に利用されるデータとの間が時間的にも空間的にも整合性が保たれている必要がある。そのため、対象の情報をセンサでリアルタイムに計測しながら力情報を提示する方法が理想的であるが[3]、今回はMRIにより事前に患者体内の情報を得られ、かつOpenMRIにより適宜更新が可能であることから、データを利用して力覚提示を行う方式を採用した。事前に撮影したデータであることから、実際の手術時における患者の状態との間で差異が生じる可能性がある。例えば開頭手術時には一般に髄液流出によるブレインシフトが生じるため、事前撮影した脳の位置と開頭時の実際の位置との間には通常 cm の単位でずれが生じる。しかし今回想定している下垂体の経鼻脳外科手術においてはそもそもブレインシフトがほとんど生じないこと、またOpenMRIを利用することで術中の画像撮影およびデータ更新が可能であることから、データと実空間との間の時間的・空間的整合性がほとんど失われることなく作業を行うことが可能となる。

4.1. ボリュームデータに基づいた力覚生成

MRIのようなボリュームデータから力覚情報を再構成する手法としてはいくつかあり、表面の形状を陰関数で表記し、関数により表される曲面とツールとの干渉により力を生成する[5]、ボクセルデータをそのまま利用する[6]といった方法等がある。今回我々はボクセルデータをそのまま利用する方法を利用した。そのような方式においては、実際の組織の感触を再現する目的の研究も多数なされているが、今回必要とされるのは非侵襲・侵襲領域の境界部において、非侵襲領域からツールを遠ざけるような力が生成されれば十分であることから、橋本らのアルゴリズム[6]を基本とした。

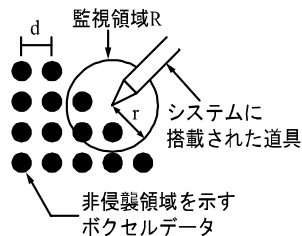


図2 ボクセルデータによる力覚生成

Fig. 2 Force generation based on voxel data

まずMRIにより対象となる領域を含んだボリュームデータを取得し、そこから腫瘍部位(侵襲領域)と正常部位(非侵襲領域)とを指定した上でデータの2値化を行う。図2は2値化したときのパラメータを示す。ボリュームデータ中の格子点間隔を d 、道具の先端の監視領域を R 、その半径を r とし、さらにツールの先端座標を \vec{P}_t とする。また、データ中のある格子点の番号を (i, j, k) で示したときの座標値を $\vec{P}_d(i, j, k)$ とすると、 \vec{P}_t において生成される力は以下の式により表される。

$$D(i, j, k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * \exp\left(-\frac{|\vec{P}_t - \vec{P}_d(i, j, k)|^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$\vec{F} = K_p * \sum_{P_d(i, j, k) \in R} V(i, j, k) * D(i, j, k) * \vec{n}(i, j, k)$$

$V(i, j, k)$ は (i, j, k) で示される格子点为非侵襲領域ならば1、そうでなければ0を返す関数で、 K_p は最大反力に関する係数である。 $\vec{n}(i, j, k)$ は次式で定義される単位ベクトルである。本アルゴリ

$$\vec{n}(i, j, k) = \frac{\vec{P}_t - \vec{P}_d(i, j, k)}{|\vec{P}_t - \vec{P}_d(i, j, k)|}$$

ズムを用いた時の1次元シミュレーションの結果を図3に示す。図3は上下図ともに横軸が位置

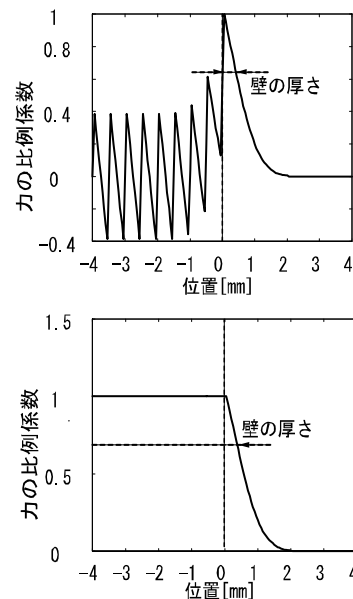


図3 ボリュームデータに基づいた力生成のシミュレーション

Fig. 3 Simulation of force generation

を示し、負側を非侵襲領域として設定している、そして縦軸が最大出力を1とした時の、各位置に

おける出力の比を示している．ここでは $d=0.5$ [mm], $r=2$ [mm], $\sigma=r/3$ とした．下垂体程度のサイズに本アルゴリズムを適用するためには監視半径を充分小さく取る必要があるが，境界面において生成される反力は監視半径に応じて急激に減衰するため，道具がその領域を突き抜けてしまう恐れが生じる（図3上）．また，非侵襲領域内部では格子点間隔と同じ周期の振動が生じる．そこで今回は非侵襲領域が閉曲面であると仮定し，道具が境界面を経由して非侵襲領域内部に侵入した際には，境界面で生成される力と同じ向き，同じ大きさの力を生成することで問題の解決を図った（図3下）．

5. シミュレーション

今回開発したシステムを用いて，半径 75[mm], 高さ 120[mm] の円筒形状を示すボクセルデータに対する動作シミュレーションを行った．実際の空間にこの円筒が存在するとし，システムを用いて実空間においてこの円筒に対する接触動作を行い，非侵襲領域への侵入が生じるかどうかを検証した．このときシステムに対して円筒データを示す2値のスライス画像群(512X512 pixel, 120 slices,

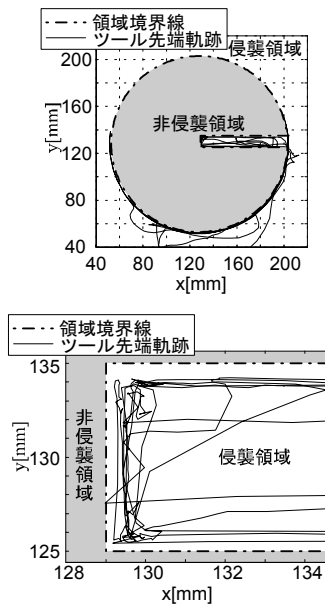


図4 円筒データへの接触動作における軌跡

Fig. 4 Touching to the cylindrical restricted area model

0.5[mm/pixel], 1[mm/slice])を与え，実空間とデータ空間との間のレジストレーションをとった上でこの円筒に対して接触動作を試みる．円筒内部は基本的にすべて非侵襲領域だが，経鼻腔脳外科手

術を想定して，円筒外部と，外部から中心部（下垂体部）へと到達する 75[mm]x10[mm]x60[mm]の部分に侵襲領域が設定されている．本シミュレーションにおける最大出力はおおよそ 2.5[N]とした．その結果を図4に示す．図4上は全体の軌跡の様子を示し，下はその中心部分における拡大図を示す．図4にあるようにツールは非侵襲領域へと突入することなく境界部に対して接触を行っている．

6. 考察

今回の力出力アルゴリズムは簡易的なものであるが，当初の目的である非侵襲領域の保護の達成はこの方式でも可能であるといえる．また，今回設定した最大出力はおおよそ 2.5[N]となっているが，これは主に制御上の理由から設定した値であり，実際の作業を想定して設定された値ではない．本来，境界面で出力される力の大きさは，道具を境界面で停止させるのには充分強い力ではあるが，術者が意識的に道具を非侵襲領域内部に進めようとした場合には，その力の壁を越えて内部に侵入し，且つ作業を行うことが可能になるような弱い力であることが望ましい．そしてその値は，対象となる術式により異なり，実際の手術の最中に術者が道具に対して及ぼす力，対象としている組織から得られる反力などから決定されるべきものであると考えられる．

7. おわりに

今回我々は直接的な作業支援を目標としたフォースナビゲーションの概念を提案し，経鼻腔脳外科手術を想定したシステムの提案を行った．今後は腫瘍ファントムを用いた実験を行い，臨床への応用を目指す予定である．

【参考文献】

- [1] 伊関, 堀, 高倉, 南部:”脳神経外科領域のナビゲーションサージャリー”, 手術, Vol.54, No.12, pp.1665-1673, 2000.
- [2] 川上, 中村:”画像処理を用いて拍動する心臓外科手術を支援するロボットシステム”, 第7回日本コンピュータ外科学会論文集, pp. 137-138, 1998.
- [3] 野嶋, 関口, 稲見, 館:”力覚提示を利用した実時間実環境作業支援システムの提案”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.2, pp193-199, 2002.
- [4] <http://www.intuitivesurgical.com/>
- [5] A. Petersik, B. Pflessner, U. Tiede, K.H. Höhne, R. Leuwer: “Haptic Volume Interaction with Anatomic Models at Sub-Voxel Resolution”, 10th symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.66-72, 2002.
- [6] 橋本, 岩田: “ボリュウムデータに基づく術中危険領域の力覚表現”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.3, No.4, pp.197-202, 1998.