

ボリュームデータに基づく術中危険領域の力覚表現

橋本 渉*¹ 岩田 洋夫*²

Haptic representation of non-invasive region for surgery based on volumetric data

Wataru Hashimoto *¹and Hiroo Iwata*²

Abstract - Micro surgery needs adequate navigation by using virtual reality technology. This paper proposes method of haptic representation of non-invasive area for support system of micro surgery. An operator of our system holds 6 DOF force display and sees volume graphics. In case the virtual treatment tool approaches non-invasive area, force is applied to the operator's hand in order not to invade the area. Generated force is determined by volume data of CT image. Through the evaluation of the basic performance of this method, we applied our algorithm to experiment of navigation in human gullet.

Keywords : haptic sensation, force guided surgery, non-invasive region

1. はじめに

外科手術に計算機を利用する際、画像誘導外科と呼ばれる手技が活用されている。これは患者の医用画像より仮想空間を生成し、施術者にとって直感的で有益な情報を提供したり、適切な判断を引き出すものである。このイメージ空間を構成するための必要条件として、伊関らはイメージ空間と実空間との間で位置の対応づけ (registration) による融合が重要であると指摘している [1]。術中において患部とモニターを交互に見ているようでは都合が悪いというわけである。本研究では、このような手術環境を想定し、視覚情報だけでなく力覚情報を導入することを提案している。ここでは力覚情報を危険領域の表現に用いることを試みている。すなわち、処置具の先端が近づいた場合に反力が還ってくることによって、接触する前に危険を感じることができるわけである (図 1)。このような力覚呈示を行うことにより、術時の安全性が向上することが期待できる。またこの手法は手術計画や訓練用シミュレータへの応用も有効であろう。本論文では以上のような論点から、フォースディスプレイを用いて危険領域の力覚呈示の実現方法について述べている。

2. 手術支援環境の技術課題

手術支援における力覚表現に求められる条件として、本研究では以下の点を構築課題としている。

(1) 高速に演算を実行できる

力覚更新速度が遅いと、マニピュレータの発振するお

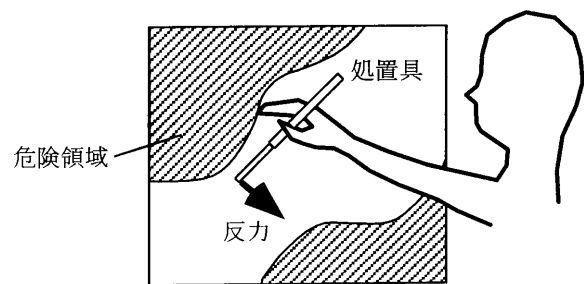


図 1 危険領域の力覚表現

Fig.1 haptic representation of non-invasive area

それがある。発振によって違和感や誤操作を招く可能性が十分考えられる。これを回避するため干渉処理、力覚演算等を可能な限り簡略化する必要がある。また実際の処置具は体積を持つため、危険領域と処置具との干渉点が複数存在することもある。あらかじめ干渉点が多数になることを想定して、手順が簡略で効率的な手法が望まれる。

(2) 侵襲不可領域の設定

侵襲してはならない危険領域を設定し、これを力覚呈示によって術者に触れさせないようにする。

3. 力覚表現

3.1 力覚レンダリング

昨今、力覚呈示に関する研究が急速に浸透し、要素技術が熟成されつつある。現在のところ、種々の力覚呈示方式はその様相からサーフェスレンダリングとボリュームレンダリングとに大きく分けることができる。サーフェスレンダリングとは計算機上でサーフェスモデルを

*1 筑波大学大学院 工学研究科

*2 筑波大学 構造工学系

*1: Graduate School, Univ. of Tsukuba

*2 Institute of Engineering Mechanics, Univ. of Tsukuba

定義し、それにしたがって力覚を呈示するものである。サーフェスに弾性モデルを適用し、自律的な曲面を表現した例 [2]、仮想の臓器の表現を想定しサーフェスの内部に弾性モデルを適用した例 [3] 等、応用範囲が広い。しかしながら、サーフェスレンダリングではモデル数が増加するにしたがって干渉処理が増加し演算処理能力が低下する。一方ボリュームレンダリングとは、空間内に分布するスカラーデータやベクトルデータを格子空間に置き、それらを参照しながら力覚として呈示するものである。局所的な干渉処理によって、実行速度を短縮できる反面、データ空間は膨大なものになり、データの変更が困難であるため、データに対する相互作用は期待できない。本研究では医用画像を扱うという性格から、スカラーデータに基づくボリュームレンダリングによって力覚表現をおこなうことになる。

3.2 ボリュームデータの力覚表現の先行研究

ボリュームレンダリングは元来可視化の分野で用いられてきた言葉で、可視化に伴う様々な呈示技法が研究されてきている [4]。Hong らは人間の結腸を可視化する Virtual Voyage を開発し、危険領域を避けながらの腫瘍の探索を目指している [5]。

力覚によるボリュームレンダリングの研究分野は、可視化に比べると後発である。力覚のボリュームレンダリングにおいて最も基本的な手順は、力覚呈示装置の操作点の位置から線形補間等によって該当ボクセルを算出し、該当ボクセルの値より呈示力覚を算出する、という極めて単純なものである。スカラー値をベースとしたボリュームレンダリングによる力覚表現についての研究を省みると、ボリュームハプタイゼーションの概念を掲げた岩田らは、ボリュームデータを勾配によってベクトルデータに変換する方法、スカラー値を回転トルクに与える方法について言及している [6]。一方、手術シミュレータにおける力覚呈示として、Mor らは医用画像の力覚呈示時に、前処理として全体を平滑化する手法、ガウス分布を利用する手法、操作点の位置を 3 次元線形補完する手法について整理し、実データによって検討している [7]。また、ボリュームデータをサーフェスデータに変換することも考えられる。アイソサーフェシング (isosurfacing) という操作をおこなうことによって、ボリュームデータから等値面を抽出し、サーフェスモデルとして扱うことができる。

3.3 危険領域の力覚表現

本研究では危険領域の力覚呈示を目的としていることから、前述の呈示をおこなうことは必ずしも最適とはいえない。2 章で掲げた技術課題を実現するためには、より効率的に呈示を実現できるものが求められる。本研究では実画像から危険領域を 2 値化することと、危険領域への干渉処理を力覚の作用点周囲で監視する方法に着目

し、効率的な呈示方法を模索した。

(a) 危険領域の 2 値化

通常のボリュームレンダリングでは元データを忠実に再現するという性質上、情報を損なうことなく 3 次元格子空間に格納していく。しかし本研究は危険領域の呈示を目的としているため、必ずしも全データを格納する必要はない。むしろ危険領域かそうでない領域かを明確に区別しておくほうが計算機上の処理効率の点から望ましい。したがって画像データから危険領域に該当する部分を抽出し、2 値画像として 3 次元格子空間に格納すればよいことになる。局所的な干渉処理をおこなう限り、格子空間を大きくしても処理速度に影響はないという点を利用すれば、格子の解像度を力覚呈示装置の位置精度程度に設定できる。元画像の解像度が低い場合には 2 値化処理前に内挿しておく必要がある。

(b) 操作点周囲の干渉処理

ユーザの操作点が、(a) で設定した危険領域に近づいてくると、危険領域を避ける方向に反力を呈示し、被験者に警告を与えなければならない。そこで、操作点から危険領域の監視をおこなうために、操作点の周囲に球状の格子テーブルを用意しておき、この格子に危険領域が重なった場合、力覚が生成されるようにすればよいことになる。

また操作点が危険領域に近づくほど、操作点が領域を侵す危険が増すわけであるから、反力もそれに応じて大きくすることによって、危険領域の近接を表現することも可能となる。これに対しては操作点近傍の格子に重みを付けておくことで実現できる (図 2)。

本研究では操作点の中心を $R(0, 0, 0)$ にとり、監視領域の相対的な格子の位置を $R(i, j, k)$ とするとき、

$$D(i, j, k) = A \cdot \exp\left(\frac{-(i^2 + j^2 + k^2)}{r}\right)$$

として重み付けにガウス分布を利用している。 A, r は定

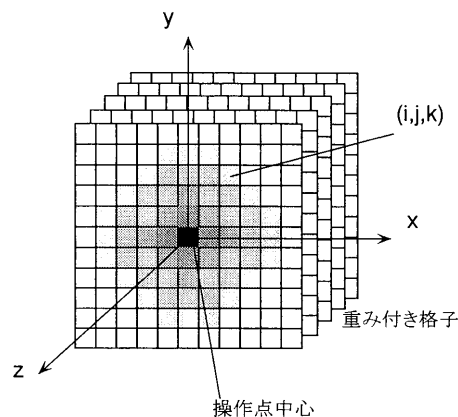


図 2 操作点近傍の格子テーブル
data table of neighboring with users hand

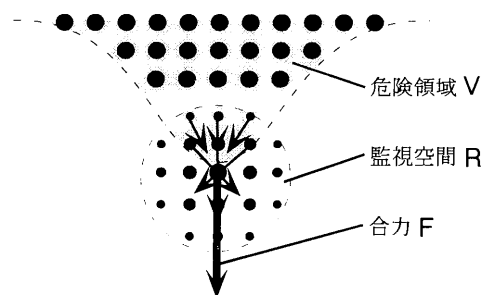


図3 生成される力覚
Fig. 3 generated force

数である。すると、データ空間における操作点の位置が (l, m, n) にあるとき、格子テーブルによって生成される力覚 \vec{F} は、

$$\vec{F} = -k_p \cdot \sum_{R \ni (i, j, k)} D(i, j, k) \cdot V(l+i, m+j, n+k) \cdot \frac{(i \cdot \vec{e}_x, j \cdot \vec{e}_y, k \cdot \vec{e}_z)}{\sqrt{i^2 + j^2 + k^2}}$$

で表される。V は危険領域を 1 で表わす 2 値画像で、 $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ は格子の間隔を表わすベクトル、 k_p は最大反力に関する定数である。図 3 は危険領域と監視領域によって生成される力覚の平面的な模式図である。

この操作点周囲で監視する範囲 R とそれにとりまう定数については、呈示の精度と危険とのトレードオフにある。つまり、監視半径を小さくすることは呈示精度の向上につながるが、危険領域との距離の余裕が小さくなるため、侵襲が生じやすくなる。短距離で極端な反力の変化が発生するため、発振も生じやすい。逆に監視半径を大きくすると危険領域との距離が大きくなり安定するが、呈示精度が低くなる。格子テーブルの格子数は監視半径の 3 乗のオーダで増加するため、更新速度の点から自ずと監視半径の上限値が制限される。このトレードオフについては実装環境と呈示データに依存するため、実装段階で妥協点を見いだす必要がある。

4. 実装

4.1 実装環境

本研究では力覚呈示装置として日商エレクトロニクスの HapticMaster と呼ばれる 6 自由度の平行リンクマニピュレータを用いている。HapticMaster を用いたシステムについては文献 [8] [9] を参照されたい。リンクの 9 つの角度センサと DC モータによって、リンク先端の把持部の位置計測および力覚呈示を可能としている。この装置の有効操作範囲は上下動が約 40cm、前後左右が約 70cm の半球で、量子化誤差は最悪のケースでおよそ $\pm 0.25\text{mm}$ である。角度センサから得られた計測情報は PC9801 による量子化を経て、計算機 (Onyx

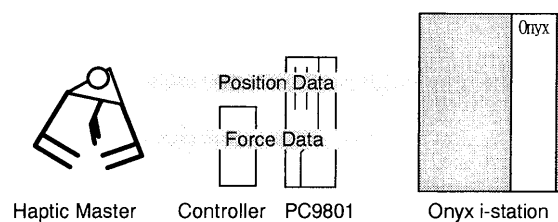


図4 実装環境
Fig. 4 system configure

R10000-196MHz, SGI) によって処理される。ここで CT 画像による格子空間から呈示反力が算出され、PC9801 を経て DC モータに出力される (図 4)。なお、力覚更新速度は干渉処理がない状態で約 120Hz である。

4.2 実装方法

ここでは 3.3 で述べてきた方法を実装するにあたって、本システムで安定した呈示を実現するための具体的な方法について述べる。

(a) 格子空間の設定

最初に危険領域を定義する格子空間の大きさと格子間隔について決める。本研究で用いた力覚呈示装置の位置精度から格子間隔を 1mm とし、実際にデータが存在する操作空間を 200x200x200mm の 20cm 四方とした。

(b) 監視領域の大きさの決定

3.3 で述べたように、監視領域の大きさを決めるためには精度と安全性、計算機の処理能力から妥協点を探る必要があった。そこでまず、監視領域をどの程度まで大きくする必要があるかを調べた。監視領域が小さすぎると、ガウス分布による重み付けが意味をなさなくなるため、定数の調整の余地がなくなってくる。つまり定数に関わらず、必ず危険領域に侵入したり撃力によって発振したりする状態ができるわけである。監視領域の重み付けには、危険領域と操作点との間で緩衝的の役割が求められるため、この状態は避けなければならない。ここでは実際に壁面状のモデルデータを用いて、監視領域の半径を 1mm から徐々に大きくしていき、定数を調整しながら呈示の状態を観察した。著者による試行の結果、監視領域の半径が 3mm 程度あれば定数調整の余地があり、重み付けが緩衝の役割を果たすことがわかった。

次に本実装システムでの処理能力を測定するため、監視領域の大きさと力覚更新速度の関係を調べた。表 1 は監視領域の半径の大きさと、そのときの格子点数、力覚更新速度の実測値である。

監視領域の大きさの上限は、設計課題の力覚更新速度の点から、100Hz 程度を更新速度の許容できる下限値とし、この値から最大値として半径 6mm を導いた。結果として、監視領域の半径は 3mm から 6mm の間であればよいことになる。監視領域が大きいほど緩衝地帯が大

半径 [mm]	格子数 [個]	力覚更新速度 [Hz]
1	7	117
2	33	115
3	123	110
4	257	109
5	515	102
6	925	101
7	1419	97
8	2109	89

表1 監視領域の大きさと力覚更新速度の関係
Table 1 Relationship between range of supervision and force servo rate

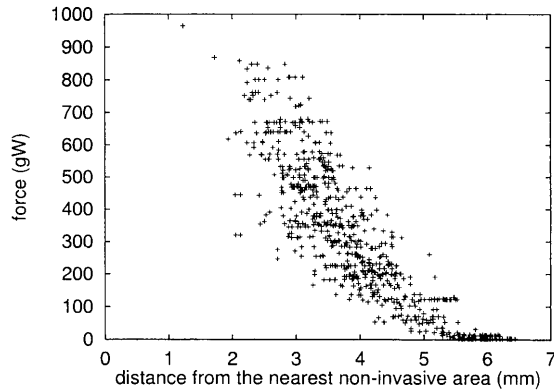


図5 危険領域への距離と呈反力
Fig. 5 Relationship between distance and force

きくなるため、危険領域への侵入が生じにくくなる。安全面を鑑み、呈示精度は後に改めて計測することにして監視領域を6mmとした。

(c) 反力の定数の設定

これまでの試行は著者の操作によるものであったが、著者以外の操作でも、また実データに対しても、危険領域に侵入しない安定した呈示が求められる。そこで、研究室の学生3名に実際のデータを呈示し、最大反力などのパラメータを繰り返し変更しながら、監視空間の重み付け定数を算出した。素材としたデータは人間の頭部のCTデータで、2値化の際危険領域として空洞部を除く頭部全体を定義した。図5は試行によって淘汰された定数 ($r = 35.0$, $A = 0.017$, $K_p = 500$) を利用し、比較的なだらかな頭部外周部をなぞった時に生じた反力で、横軸は操作点と最も近い危険領域との距離、縦軸は発生している反力ベクトルの大きさである。危険領域に近づくほど大きな反力が発生している。

5. 呈示性能実験

実験目的

前章で決定してきた定数を利用すると、比較的なだらかな表面をもつ危険領域に対して侵襲しないように力覚を呈示することが可能となった。しかし、監視領域の大きさがあるため精度の面から問題が出てくる。つまり

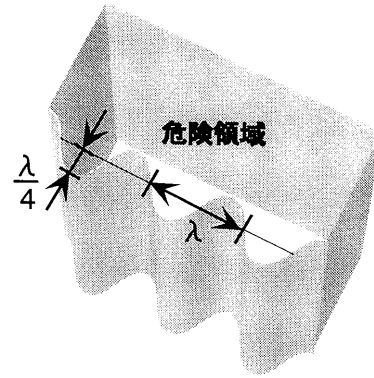


図6 本実験で用いた危険領域
Fig. 6 non-invasive area of this experiment

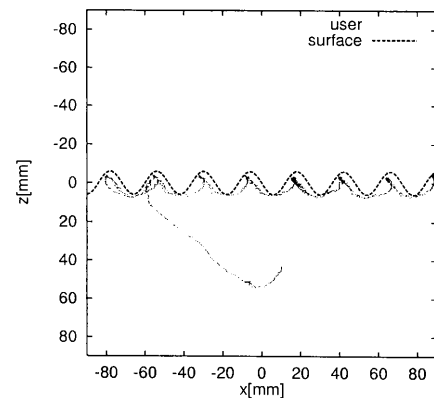


図7 軌跡と危険領域の壁面(波長 24mm)
Fig. 7 locus of the users hand and wall of non-invasive area

尖った形や細かい形は鈍って呈示されたり、わずかな力で誤って危険領域に侵入してしまうからである。ここでは前章で決定してきたパラメータ等を用いて、どの程度の空間周波数をもつ形状を安全に呈示できるかを測定することを目的としている。

実験方法

実験は、断面が正弦波である図6のような危険領域のデータをあらかじめ用意しておき、被験者の正面に呈示して表面をなぞってもらおうというものである。データには半径6mmの監視領域に対し、波長が12,18,24,30,36[mm]で振幅が波長の1/4の正弦波を用い、正弦波を境界として危険領域を格子空間に格納する。被験者には実験前に危険領域呈示の主旨を伝えておき、反力に逆らったなぞりかたをなるべく避けるように心掛けてもらう。学生8名の被験者に、5種類の壁面に対して順番を変えながら3度ずつ呈示した。

実験結果

図7は波長が24mmのときの軌跡データと呈示領域を表わしている。この図は危険領域の壁面の俯瞰図で、点線よりZ軸負方向に危険領域が定義されている。こ

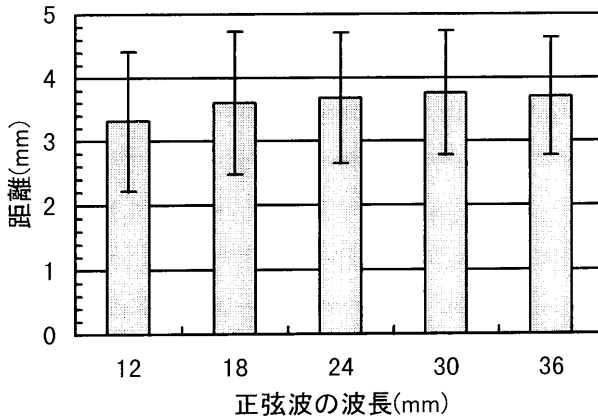


図8 危険領域の表面波長と表面に対する操作点の距離

Fig. 8 distance between users hand and surface of non-invasive area

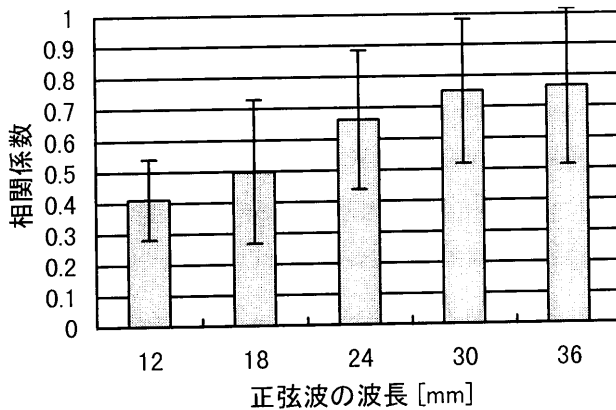


図9 危険領域の表面波長と表面に対する軌跡との相関係数

Fig. 9 correlation between locus of the users hand and represented surface

の被験者の場合、危険領域に侵入することなく表面をなぞっていることが観察できる。

図8は危険領域を被験者がなぞっているときの危険領域までの距離の平均と標準偏差を示している。なお、監視領域が危険領域と干渉せず安全な方向に大きく離れている場合は、力覚には関係ないためデータより除いている。標準偏差は波長が大きくなるほどわずかに小さくなる傾向にあった。これは表面形状がなだらかになると、力の変化が緩やかになり、操作点が境界に対して安定して移動できることを意味している。また波長が大きくなるにつれて危険領域への侵入確率が小さくなることがグラフから読み取れる。安全性の指標となる 3σ (49.865%点)を用いると、平均から 3σ の位置はいずれの波長においても0.0以上であり、確率的には安全であることが確認できた。

危険領域への侵入の安全性は確認できたが、危険領域

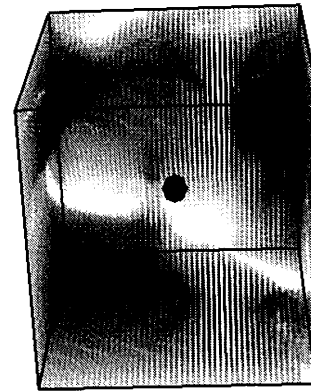


図10 危険領域の可視化

Fig. 10 visualization of non-invasive area

の境界をどの程度認識し、境界に沿って正確になぞれたか、という評価も安全性を議論するために必要な項目である。図9は操作点の軌跡と壁面表面の形状の相関係数である。解析に用いた操作点の軌跡は、監視領域が危険領域に干渉し始めてから試行が終了するまでを含んでいる。ピアソン相関係数 r は、軌跡の位置を (x_i, z_i) 、表面の位置を (x_i, Z_i) とするとき、

$$r = \frac{n \cdot \sum_i (z_i \cdot Z_i) - \sum_i z_i \cdot \sum_i Z_i}{\sqrt{n \cdot \sum_i z_i^2 - \sum_i Z_i^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum_i Z_i^2 - \sum_i z_i^2}}$$

で算出できる。波長が大きくなるほど正の相関が強くなり、特に波長が30mm以上の時には相関係数が0.7以上であることから強い相関があると言える。つまり表面波長が大きくなるにしたがって、危険領域の境界をなぞりやすくなることを意味している。

6. 危険領域の力覚表現によるナビゲーション実験

実験目的

危険領域を力覚表現することによって得られるメリットは、危険領域を侵すことなく安全に所定の位置に処置具を移動することにある。これは実際の手術時、手術計画、手術シミュレータにおいて有効な手法になると考えられる。ここでは人間の脳のCTデータを用いて、口から食道にかけての空洞部分を誘導するというナビゲーション実験をおこない、危険領域を力覚表現することの有意性を検証している。

視覚呈示

ナビゲーション実験では力覚呈示に加え視覚呈示もおこなった。危険領域を表す2値画像から、ポリウムグラフィックスの技法を応用して危険領域の様子を立体的に可視化するものである。図10はその表示画面例である。中央に表示されている黒丸が操作点で、操作点を中心とする周辺部分が局所的に表示されるようになっている。

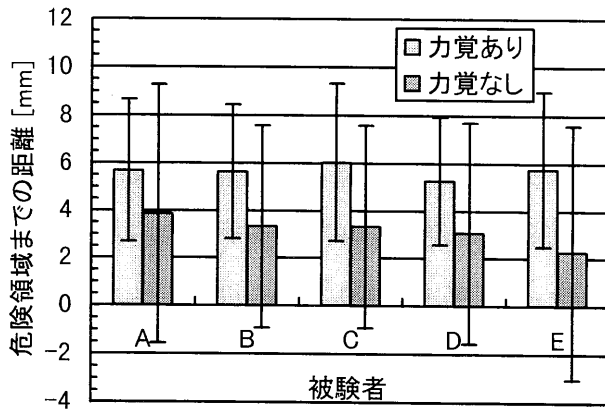


図 11 ナビゲーション実験における危険領域と操作点との距離

Fig. 11 Result of distance between users hand and non-invasive area through experiment of navigation

これはあたかも操作者が小さくなって患部を立方体のセルで切出し、操作点を俯瞰する視点に似ている。なおボリュームグラフィクスによる視覚呈示は計算機に負荷を与えるため、局所的な表示は力覚更新速度の低下をおさえるのにも都合が良い。実験ではこの可視化情報を立体視で呈示する。

実験方法

実験に用いた素材データは 3.3 で用いたものと同じ頭部 CT 画像である。画像の精度に対して本装置の呈示精度が低くなるため、頭部の一部を拡大し、元データから線形補間することで、格子空間の解像度を得ている。ナビゲーション実験に利用した経路には人間の口から食道にかけての空洞部で、被験者には実験前にあらかじめ経路の説明をしておく。被験者は学生 5 名で力覚と視覚によるナビゲーションと、比較対照実験として用意した視覚のみによるナビゲーション実験とを交互に 3 度ずつ試行してもらった。

実験結果

5 人の被験者による操作経路を解析し、最も近い危険領域までの距離を平均したものを図 11 に示す。力覚と視覚呈示によるナビゲーションでは、5 名の被験者全員が危険領域に侵襲する確率が明らかに小さくなっていることがわかる。逆に視覚呈示のみによるナビゲーションでは、危険領域までの距離にばらつきがみられ、侵襲確率が大きくなっている。なお力覚がある状態とない状態での距離の平均の検定をおこなったところ、 t 値は 8.88、危険率 1% の t 値が 3.74 であり、有意差が見られた。

7. 考 察

ボリュームデータから力覚表現することの利点は、サーフェスモデルでは定義できないような複雑な形状を呈示

することができるという点である。本研究では医学上の危険領域の表現という目的で呈示をおこなってきた。しかし医療応用分野に限らず、複雑な形状の力覚呈示を必要とする分野は少なからずあるはずである。例えばデザインに応用する場合、危険領域の表現を物体として表現し、2 値画像を作用するような仮想の工具を作るだけで、自由自在に 3 次元の形状を作ることができるだろう。

8. ま と め

本研究では危険領域を 2 値画像で表現し、その領域が操作点周辺の監視領域に侵襲するとき、近接覚によって操作者に警告を伝えるとともに、物理的に侵襲できなくなるような力覚表現の方法について述べてきた。実装の際に問題になるのが、呈示精度の向上と安全性は排他的であることである。安全性を損なわず呈示精度を向上させるには、装置自体の位置入力精度が必要となってくる。

参考文献

- [1] 伊関洋 他, 3 次元画像術中ナビゲーションシステム, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 Vol.1, pp107-108, 1996
- [2] Hiroo Iwata et.al, Interaction with Autonomous Free-form Surface, Proceedings of ICAT'94, pp27-32, 1994
- [3] 広田光一 他, 仮想物体の弾性モデルに関する検討, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, Vol.11, pp521-526, 1995
- [4] Arie E.Kaufman, Volume Visualization: Principles and Advances, COURSE NOTES 31/32. Siggraph97, 1997
- [5] Lichan Hong et.al, Virtual Voyage: Interactive Navigation in the Human Colon, Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH 97, pp27-34, 1997
- [6] Hiroo Iwata et.al, Volume Haptization, Proc. IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality, 1993
- [7] Andrew B.Mor et.al, Interacting with 3-Dimensional Medical Data Haptic Feedback for Surgical Simulation, Proc. The First PHANToM User's Group Workshop, 1996
- [8] 矢野博明 他, 自律的自由曲面を用いた仮想環境における協調作業: 電気学会論文誌 C 編 115 巻 2 号 pp245-252, 1995
- [9] Hiroo Iwata et.al, HapticWeb: ACM SIGGRAPH '96 "Digital Bayou" Visual proceedings of SIGGRAPH'96 pp71, 1996