

仮想環境における脳手術シミュレーション

青野雅樹, 大淵竜太郎, 宮澤達夫
日本アイビーエム(株), 東京基礎研究所

脳腫瘍の手術シミュレーションを仮想環境において実時間で行なうシステムを報告する。手術シミュレーションの対象となる物体は、表皮、頭蓋骨、及び脳表である。これらのモデルとして従来は、ボクセルを用いる手術シミュレーションシステムが多かったが、大量のメモリが必要であったり、面的な物体（表皮など）の切除などの処理が困難であったり、ボクセルからの面的な表示アルゴリズムが低速あるいは低品質であったりした。本報告では、Triangular Doubly-Connected Edge List (TDCEL) と呼ばれるトポロジーを有するデータ構造をサーフェイスモデルに付加した。これにより上位グラフィック装置上で物体の操作及び表示が実時間（毎秒 10 フレーム以上の速度）で可能な手術シミュレーションを実現にした。

A Neurosurgery Simulator in a Virtual Environment

Masaki Aono, Ryutaro Ohbuchi, and Tatsuo Miyazawa

Tokyo Research Laboratory, IBM Japan Ltd.

1623-14 Shimotsuruma, Yamato-shi, Kanagawa-ken 242 Japan

This paper presents a neurosurgery simulator in a virtual environment, in which operations on 3D models of the skin, skull, and brain tissue can be performed in real time. This is in sharp contrast to the previous surgery simulators in which 3D voxels have been employed for manipulating and displaying the data. The problems with such voxel-based surgery simulators include the need to store a huge amount of data, the difficulty in simulating the surface operations such as cutting the skin, and the inefficiency of the rendering which involves the generation of surface data from voxels. Our neurosurgery simulator avoided these problems by attaching topological data, called Triangular Doubly-Connected Edge List (TDCEL), to the surface models of the skin, skull, and brain tissue, all of which are initially given by polygonal data. By taking advantage of the topological data, we have achieved a real-time response of more than 10 frames per second for manipulating and displaying the data on a high end graphics workstation.

1 はじめに

仮想環境における計算機支援外科手術シミュレーション (Computer Assisted Surgical Simulation in a Virtual Environment: 以降、“CASS-VE”と呼ぶことにする)は、近年注目を集めてきている。CASS-VEの究極のゴールは、仮想環境の中での3次元のモデリング、視覚化、シミュレーションを通じて、外科医及び外科医を目指す人たちが、外科手術を学んだり、計画したり、リハーサルしたりするのを支援することにある。CASSそのものの概念は、かなり古くからあったが、これを仮想環境で、しかも、対話的に手術シミュレーションを行なうシステムは、近年の高速な上位グラフィックス装置の開発(例えば、SGIのReality Engine [1]やUNCのPixel-Planes 5 [4])に伴って出現してきた。

このようなCASS-VEの例としては、北川らの骨の切削手術シミュレーション [5]、Coverらの胆嚢の開腹手術シミュレーション [3]、Sagerらの眼の手術シミュレーション [10]、Lorenzenらの脳外科手術を実写のビデオと合成する拡張現実シミュレーション [7]などが代表的である。

しかし現在のCASS-VEシステムには解決せねばならない問題が多い。問題点は世界のモデリング(モデルを用いたシミュレーションも含む)とそのレンダリングに大別できる。レンダリングの質と速度は上位グラフィックス装置の登場により徐々に向上している。これに比べ、モデリングの質と速度の改善は遅れているようである。例えば現在までのCASS-VEの場合、切開などの操作がモデリングされレンダリングされて表示されるまでの時間が長く、その結果、シミュレーションに現実感が欠けるのである。

本報告では、モデリングの工夫により、仮想環境の物体(ヒト)に対する脳外科手術オペレーションのモデリングとレンダリングの双方を実時間で(ここでは秒10フレーム以上のものを呼ぶ)実現したCASS-VEシステムについて述べる。このCASS-VEシステムと仮想的な脳と脳腫瘍のデータを使った場合、脳外科医やこれを目指す人々が脳腫瘍摘出手術の手順を何度となく練習で

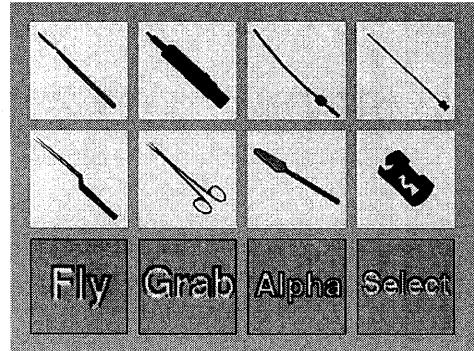


図 1: 脳外科手術シミュレーション用のメインメニュー (3次元メニューとして使用)

きる。また、特定の患者の3次元画像から脳のモデルを作ることにより、その患者に対する手術の計画及び予行が行なえる。

2 仮想脳外科手術オペレーション手順

仮想脳外科手術のオペレーション手順を述べる。全体の手術シミュレーションのシナリオは以下のものである。目的は、最小の開頭領域と最小の脳切除で、腫瘍を取り除くことである。ただし、手術の対象となるヒトの頭は、ここでは3つの独立したオブジェクト、表皮、頭蓋骨、及び脳表からなるとする。

使用者はまずスタイラスのボタンをクリックして、仮想空間内の任意位置にメインメニューを出す(図1参照)。そこから“Alpha”を選択し、頭を構成する3つのオブジェクトの不透明度(opacity)を変化させて腫瘍の位置を確認し、これを基に切開する頭皮の領域を決める。通常約10cm四方程度の矩形に近い領域で頭皮及び頭蓋骨を切開する。

メインメニューからメスを選択すると、仮想器具がメスに変わる。スタイラスのボタンをクリックすると、メスがactive状態になり、頭皮が切れる状態になる。頭皮を切開するには、いわゆ

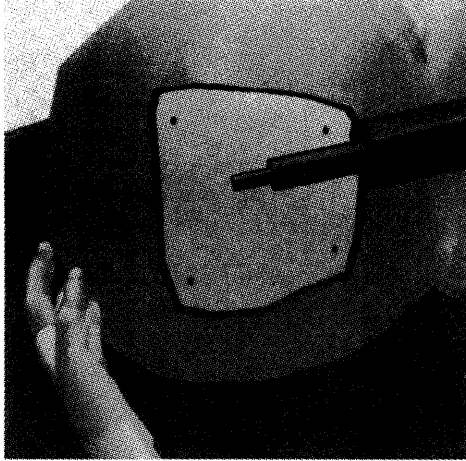


図 2: エアドリルでの穿孔

る「一筆書き」の要領でメスを動かす。この際、フォースフィードバックの代わりに、「シューッ」という効果音でメスが頭皮に触れていることを確認する。メスの動きにつれて切開線が描かれ、次いでスタイラスのボタンをクリックすると切開線が囲む領域の頭皮が消えて穴があき、領域内の頭蓋骨が現れる。

次に、メインメニューからエアドリルを選択し、頭蓋骨の切開を行なう。エアドリルを active 状態にし、ドリルの先端が頭蓋骨に触れると、その位置が穿孔される(図 2 参照)。穴をあけたい矩形に似た領域の隅を 4 箇所程度穿孔し、スタイラスのボタンをクリックすると領域内の骨が消え、開頭された領域内に脳表が現れる。

脳表が現れたらメインメニューから、吸引管を選択する。脳腫瘍に到達するためには、吸引管で脳質を吸い出す必要がある。吸引管を active 状態にしたら、その先端をドリルと同じ要領で脳表に近づけ、先端が脳に触れると脳質が吸い出される。この操作は、腫瘍が現れるまで続ける。

最後に、メインメニューから穿刺針を選択し、これを用いて腫瘍内容物を吸い出し、ついで除去する(図 3 参照)。以上が仮想空間における標準的な脳外科手術シミュレーション手順である。

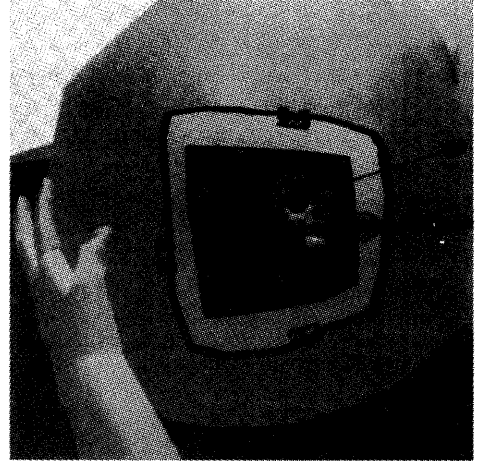


図 3: 穿刺針での腫瘍の吸引

3 効率的な仮想脳外科手術の実現法

従来の CASS-VE システムの多くは、仮想空間での手術オペレーションの対象であるオブジェクトのモデルとして、ボクセルを用いていた [5, 7]。ボクセルは、3 次元空間を離散的な配列で近似したものであり、各配列要素に適当な値を持たせることで、3 次元データ間の集合演算や、ダイレクトポリウムレンダリングが簡単に行なえるという特長がある。しかしながら、配列のサイズを大きく取るとデータ量が膨大になる。更に、ボクセルデータを基にしたサーフェスレンダリングはサーフェスの生成が高価で、上位グラフィックス装置上でも実時間応答を達成することは難しい [6]。

我々は、仮想手術オペレーションにおいて実時間応答を達成させるため、ボクセルでなく、ポリゴンデータにトポロジーデータを付与させるデータ構造を用いた。具体的には、TDCEL (Triangular Doubly-Connected Edge List) と呼ばれるデータ構造をポリゴンデータに付与させた。TDCEL は、計算機幾何学で知られる DCEL に似たデータ構造で、ポリゴンとして三角形に限定したものである [8]。TDCEL データ構造に基づいて (1) 仮想

切開オペレーションと(2)仮想吸引オペレーションという代表的な脳外科手術オペレーションを仮想空間でインプリメントした。仮想脳外科手術オペレーションの対象となる3つのオブジェクト、表皮、頭蓋骨、及び脳表をそれぞれTDCELデータで表現し、このうち表皮と頭蓋骨には仮想切開オペレーションを適用し、脳表には仮想吸引オペレーションを適用した。

以下で上の2つの仮想脳外科手術オペレーションの実現法を述べる。

3.1 仮想切開オペレーション

TDCELデータ構造で表現された表皮あるいは頭蓋骨に対する仮想切開オペレーションは次のような3つの手順で実現される。

1. 手術器具で対象となるオブジェクトを触る。
2. オブジェクトの幾何データとトポロジーデータを更新する。
3. 更新されたオブジェクトデータを表示する。

ステップ1では、IRIS Performer[9]の提供する高速な交点計算ツールを用いて、手術器具とオブジェクトの衝突チェックをする。

ステップ2では、ステップ1で得られた交点情報を基に、オブジェクトの幾何データやトポロジーデータを更新する。今、ステップ1で、N点の交点データ(必ずしも同一3角形上とは限らない)が与えられたとする。我々の切開オペレーションのアイデアは、これらの交点を結ぶ線分で囲まれる領域(開口部)で、オブジェクトに「穴」を開けるといふものである。しかしながら、これらN点の入力順序をオペレータに強要させるわけにはいかない。例えば、図2の4点の入力順序は、右回りでも左回りでもない可能性がある。そこで我々は、まず、開口部を構成するポリゴンの頂点に対して適当な射影平面上で凸包アルゴリズムを適用し、頂点をソーティングした。次に、隣接する頂点ごとに、それらを通り開口部にはほぼ垂直な平面を与え、この平面と3角形との間の交点を次つぎに計算し、結果として図4に示すような開口部を示すTDCELデータ構造を構成する。TDCEL

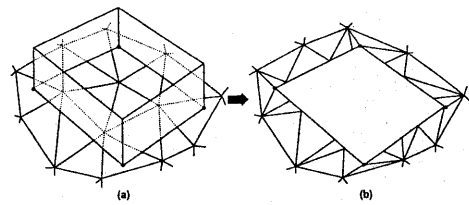


図4: 開口部の作成: (a) 穴開け前 (b) 穴開け後

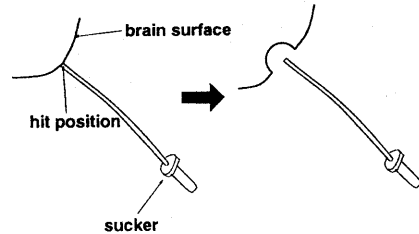


図5: 仮想吸引管で触れた部分に半球状の「へこみ」を発生させる

は隣接する3角形間のトポロジーデータを有するので、交点計算の手間は高々交わる3角形の数で済む。

ステップ3では、ステップ2で得られた新しいTDCELデータをトラバースしてこれをグラフィックスハードウェアに送る。

3.2 仮想吸引オペレーション

実際の脳腫瘍摘出手術での最も重要なステップは、脳質を吸引しながら、腫瘍まで到達していくプロセスである。理想的には、脳の機能を壊さないように最小限の脳質の吸引で腫瘍まで到達したい。

我々は、この脳質の吸引オペレーションもTDCELを基に以下のように実現した。すなわち、仮想吸引管で触られた部分に図5に示すような幾何学的に半球状の「へこみ」を発生させて脳質が吸引されたように見せるのである。

「へこみ」の進む方向は吸引管の方向に一致

し、半球表面は TDCEL を構成する 3 角形で近似する。「へこみ」の半径は「吸引力」の大小によって異なる。「へこみ」を半球らしく見せるにはその部分の 3 角形が十分小さい必要がある。そこで、適当な閾値を設け、3 角形の面積がそれよりも大きい場合に「へこみ」部分の 3 角形を再分割する。この再分割では、幾何データのみならずトポロジーデータも変化する。再分割により 3 角形の数は増えるが、ローカルな処理なのでデータ量の急激な増加は起こらない。再分割の手間は高々再分割される 3 角形の数に比例する。これは TDCEL に付随するトポロジーデータを使った近傍の探索が可能なのである。

「へこみ」の内側に見えるはずの脳質を表現するため、MRI データをソリッドテキストチャーとしてポリゴンデータにマッピングした(図 3 参照)。ソリッドテキストチャーにより、ボクセルモデルの利点のひとつをサーフェイスモデルに加えたことになる。我々の用いたソリッドテキストチャーと脳表のポリゴンデータは、実際のヒトの MRI データから以下のプロセスを経て作成された。生成されたポリゴンデータとソリッドテキストチャーは、その位置とスケールを合わせてある。

脳表のポリゴンデータ生成：

1. ClipSS [11] により、MRI のポリウムデータのうち、脳表と脳質部分を切り出す。
2. Gaussian ローパスフィルタをかけ、切り出されたポリウムデータをダウンサンプリングする。
3. AVS¹を用いて等値輪郭曲面を近似するポリゴンを生成する。
4. 縮退した多角形(2 角形や 3 頂点が同一の 3 角形)を除去する。

脳質のソリッドテキストチャー生成：

1. ClipSS により、MRI のポリウムデータのうち、脳表と脳質部分を切り出す。
2. Gaussian ローパスフィルタをかけて、切り出されたポリウムデータをダウンサンプリングする。
3. ダウンサンプリングされたポリウムデータに擬似カラーを着ける(元のデータは白黒階調画像である)。

¹AVS is a registered trademark of Advanced Visualization Systems, Inc.

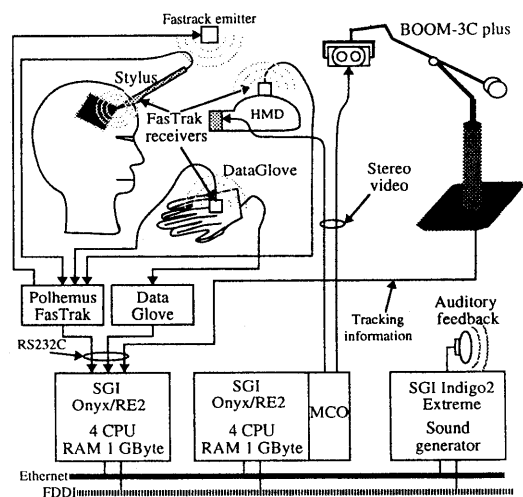


図 6: ハードウェア構成

4 システム構成

図 6 は、我々の仮想脳外科手術シミュレーションシステムのハードウェア構成を表し、図 7 は、ソフトウェア構成を表す。我々の CASS-VE システムは、独自に開発した MTV (Minimal Toolkit for Virtual environment) と呼ばれる仮想環境でのオブジェクト及び動作を記述できる汎用のソフトウェアに基づいている。オブジェクト及び動作を直接記述するのは、VEF (Virtual Environment File) と呼ばれる外部ファイルである。MTV の下では、IRIS Performer[9] 及び、VR-DECK[2] が動いていて、それぞれ、グラフィックのシミュレーションと入出力を含む様々なハードウェアのコミュニケーションの制御を担当している。

5 おわりに

本論文では、我々の構築した仮想環境における計算機支援脳外科手術シミュレーション (CASS-VE) システムの機能及び特長について述べた。

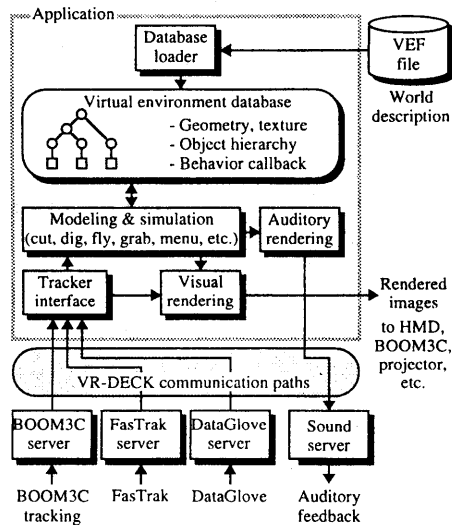


図 7: ソフトウェア構成

我々のシステムの第一の特長は、モデルの変形操作とそのレンダリングの双方で秒 10 フレーム以上の実時間応答を得たことである。例えば、表皮、頭蓋骨、及び脳表が、それぞれ、約 2400、2500、及び、7200 の 3 角形から成るとき、図 2 の仮想切開オペレーション及び、図 3 の仮想吸引オペレーションは、それぞれ 1 回につき約 100 ミリ秒以下で済んだ。これは、我々のシステムが、トポロジーを持つデータ構造 TDCEL を付加したサーフェスモデルを用いたことによる。

第二の特長は、3 次元 MRI データをソリッドテクスチャーとしてサーフェスモデルに付加したことである。その結果、比較的低いポリゴン数の脳表モデルの現実感の向上、及び脳質の「へこみ」内側の表示を実現した。

第三の特長は、他の没入型 CASS-VE が人工的モデルを使ったのに対し、当システムでは実際の 3 次元医用画像を基にして生成したモデルを使用した点である。これにより、実際の手術の計画に用いることができる。このシステムは現在、国立がんセンターで稼働している。

謝辞

本報告に述べた CASS-VE システム構築を支援された、国立がんセンターの小山博史先生及び日本シリコングラフィックス社の須田進氏に感謝する。

参考文献

- [1] K. Akeley, "RealityEngine Graphics," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '93)*, pp. 109-116 (1993)
- [2] C. Codella, R. Jalili, L. Koved, and J. Lewis, "A Toolkit for Developing Multi-user, Distributed Virtual Environments," *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'93)*, Seattle, WA (1993)
- [3] S. A. Cover, N. F. Ezquerro, J. O'Brien, R. Rowe, T. Gadacz, and E. Palm, "Interactively Deformable Models for Surgery Simulation," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 13, No. 11, pp. 68-75 (1993)
- [4] H. Fuchs, J. Poulton, J. Eyles, T. Greer, J. Goldfeather, D. Ellsworth, S. Molnar, B. Tebbs, and L. Israel, "Pixel-Planes 5: A Heterogeneous Multiprocessor Graphics System Using Processor-Enhanced Memories," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'89)*, Vol. 23, No. 3, July, pp. 79-88, (1989)
- [5] E. Kitagawa, T. Yasuda, S. Yokoi, and J. Toriwaki, "An Interactive Voxel Data Manipulation System for Surgical Simulation", *Proc. IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, Nagoya, Japan (1994)
- [6] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH'87)*, Vol. 21, No. 4, July, pp. 163-169 (1987)
- [7] W. Lorensen, H. Cline, R. Kikinis, D. Altobelli, and L. Gleason, "Enhancing Reality in the Operating Room," *Proc. IEEE Visualization '93*, San Jose, CA., pp. 410-415 October (1993)
- [8] F. P. Preparata and M. I. Shamos, *Computational Geometry - An Introduction*, Springer-Verlag, New York, NY (1985)
- [9] J. Rohlf, and J. Helman, "IRIS Performer: A High Performance Multiprocessing Toolkit for Real-Time 3D Graphics," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '94)*, Orlando, FL, pp. 381-394 (1994)
- [10] M. A. Sagar, D. Bullivant, G. D. Mallinson, P. J. Hunter, and I. W. Hunter, "A Virtual Environment and Model of the Eye for Surgical Simulation", *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '94)*, Orlando, FL, pp. 205-212 (1994)
- [11] R. Yoshida, T. Miyazawa, T. Otsuki, and A. Doi, "Clinical Planning Support System - CliPSS," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 13, No. 6, pp. 76-84 (1993)