

指操作に基づく形状モデルの質感設定法に関する研究

朝倉 輝[†]

包 躍[‡]

後藤 敏行[†]

[†] 横浜国立大学大学院工学研究科

[‡] 横浜国立大学工学部

筆者らは、再構築処理後の3次元医用画像を対象とし、ユーザがあたかも組織を手の上でさまざまな方向から照明をあてながら観察できるようなヒューマンインタフェースの実現を目指している。この一環として、立体ディスプレイを用いて3次元立体像をユーザの手元に表示させ、ステレオカメラで計測した手袋と指示棒に装着した指標の3次元情報に基づいて立体像を操作するためのシステムを試作した。本稿では、3次元領域分割を行った各組織について、各組織に反射・透過率を考慮した質感属性を付与するとともに、組織や光源を様々な位置や方向に置いて観察するための手法と試作したシステムの構成について報告する。

A Prototype of User Interface for Modeling Material Properties Based on Finger Motion Detection

Akira Asakura[†],

Yue Bao[‡],

Toshiyuki Gotoh[†]

[†] Graduate School of Engineering, Yokohama National University

[‡] Faculty of Engineering, Yokohama National University

This paper describes an interactive user interface method for modeling the material properties of three-dimensional geometric models based on user's finger motion, and the developed prototype user interface system. The system consists of a binocular stereo display, a set of TV cameras, and a couple of Workstations. One of Workstations inputs the images of the user's fingers from the cameras, and estimates the three dimensional finger's motions. Based on the detection of the finger instructions, another Workstation interactively controls the three-dimensional motions, material and lighting properties of objects' geometric models, and presents them to the user through the binocular display. The experimental results using the system have also been shown here.

1. まえがき

計算機の普及にともない、幅広い分野のユーザが3次元形状データを取り扱う機会が急増している。たとえば、医療の分野ではCTやMRIにより撮像される3次元ボクセル画像は診断に不可欠なものになっている。これにともなって、ボクセル画像から人体の各組織を分離するための再構築処理を対話的に行うシステムが普及するとともに、画像処理を用いた再構築処理の自動化に関する研究も進められている[1][2]。

このような状況のもとでは、単に従来の2次元インタフェースの延長でなく、3次元データを円滑かつ人間の主観に一致した直観的な方法で操作するためのヒューマンインタフェースの実現が今までも増して重要になってきている。このような背景から、これまでに3次元ヒューマンインタフェースに関するさまざまな研究が行われている。たとえば、ステレオカメラやデータグローブにより入力した3次元情報に基づいてグラフィックディスプレイやヘッドマウントディスプレイ上に物体と指カーソル(仮想的な手)を表示し、3次元物体を3次的に移動・回転操作する方法

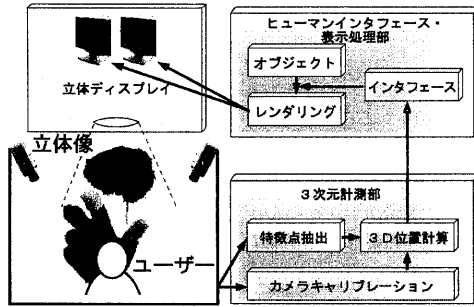


図1 システム構成

[3][4]や、ソリッドモデルの形状を操作する方法[5]などが研究されている。

本研究では、特に再構築処理後の3次元医用画像を対象とし、ディスプレイ上に提示された仮想的な手ではなく、医師があたかも組織を自分の手で種々の方向から照明をあてながら観察できるようなヒューマンインタフェースの実現を目指す。具体的には、立体ディスプレイにより、3次元立体像をディスプレイの前方(ユーザの手元)に表示させるとともに、手袋に装着した指標をステレオカメラで計測することにより立体像を直接操作するものである。特に本論文では、3次元領域分割を行った各組織について、各組織に反射・透過率を考慮した質感属性を付与するとともに、組織や光源を様々な位置や方向に置いて観察するための手法と試作した質感設定システムについて述べる。

2. システム基本構成

図1に示すように本システムは、表示・ヒューマンインタフェース処理用WS、立体ディスプレイ、3次元計測用WSおよび2台のTVカメラで構成されており、それぞれのWSはネットワークを介して連携動作するようになっている。ユーザは色指標が指先に塗布されグローブを装着し、2台のTVカメラで観測した画像をもとに、3次元計測用WSで各指標の3次元位置を検出する。表示・ヒューマンインタフェース処理用WSには2台の3次元グラフィックプロセッサ(富士通製AG-10)が装備されており、3次元計測部で検出された各指標の3次元計測結果に基づいて、各組織の形状モデルの位

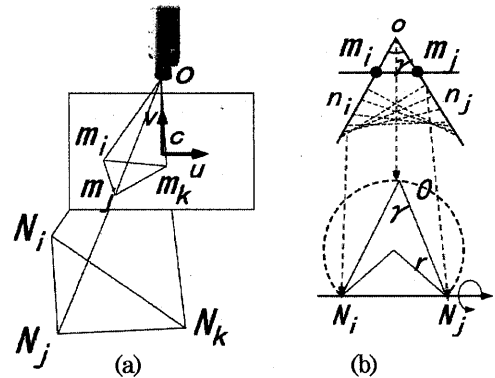


図2 キャリブレーション

置・方向・質感パラメータを操作するとともに、両眼の位置に応じた視差像を生成し、立体ディスプレイを用いて立体像を表示するようになっている。なお、本システムに用いたWSは3次元計測用が日本電算機製U2/1200E、表示・ヒューマンインタフェース用が富士通製S-4/20Hであり、Solaris 2.5.1の配下でXIL、XGLライブラリを利用してプログラム開発を行っている。

3. 3次元計測部

3.1 本手法におけるキャリブレーションの考え方

カメラキャリブレーションについては、さまざまな研究があるが、その多くは実空間上に配置された物体を観測し、その画像上の特徴点の位置に基づいて、世界座標系におけるカメラの3次元的位置・方向[6]や、カメラ間の相対関係[7]を推定する方法などが用いられている。

しかし、本システムでは、立体ディスプレイで生成された立体像をユーザが自分の手を用いて操作するために、ユーザが知覚する3次元空間とカメラの相対関係を求める必要が生じる。この場合、立体ディスプレイにより生成された立体像は物理的に実在する実像や虚像ではなく、人間の認識過程で生成された仮想的な立体像であるために、従来のような実在の空間におけるキャリブレーションではなく、人間が知覚する主観的空間を基準とした校正が必要となる。

そこで、本手法では図1に示すように、最初に立体ディスプレイを用いて立方体を表示しておき、指標を

用いてユーザが知覚するその立方体の各頂点を順次に指示し、それをTVカメラにより観測することによってカメラとディスプレイの校正を行うようにしている。

3.2 カメラとディスプレイの校正

ここで、立体ディスプレイを用いて人間が知覚する主観的空間を仮想ディスプレイ座標系、TVカメラを中心とした座標系をカメラ座標系と呼ぶことにする。ここでは、カメラを焦点距離は既知の理想カメラで近似できるとの仮定し、仮想ディスプレイ座標系における左右とTVカメラに対応したカメラ座標系の位置と方向を推定する。

ここで、図2(a)に示すように、カメラのレンズ中心を O 、画像中心を C 、画像の縦および横ベクトルをそれぞれ U 、 V 、仮想ディスプレイ座標系の上の提示された基準点の座標値 N_i 、 N_j 上の指標を観測したカメラ座標系の上の像を m_i とする。なお、本稿では仮想ディスプレイ座標上の点を大文字、カメラ座標系の点を小文字により表記するものとする。この際、焦点距離 OC および仮想ディスプレイ座標系上の N_i 、 N_j は既知、また、 N_i と N_j を見込む角 γ は観測値 m_i および m_j から算出できるので、レンズ中心 O は図2(b)で示すように基準点 N_i および N_j を通る半径 r の円を N_iN_j を軸として回転させた3次元曲面上に存在する。

$$r_i = |N_i N_j| / 2 \sin \gamma \quad (1)$$

この関係からカメラ原点 O は N_i と N_j を観測した複数の3次元曲面の交点として求めることができる。本手法では、ディスプレイおよびカメラ系の設計情報に基づいて初期値を設定し、この非線形方程式の解を探索的手法により求めている。

カメラ座標系の原点 O が決定できると、焦点距離 $|OC|$ は既知、光軸と N_i のなす角度 ϕ_i は観測値 m_i から算出可能であるから、カメラの光軸方向の OC については各基準点に対する次式を連立させることで算出できる。

$$ON_i \cdot OC = |OC| |ON_i| \cos \phi_i \quad (2)$$

また、 $m_i = (m_{ix}, m_{iy})$ と表記すると、

$$OM_i = (|om_i| / |ON_i|) \cdot ON_i \quad (3)$$

の関係から、仮想ディスプレイ座標系における画像平面上の U 軸 V 軸ベクトルは、

$$CM_i = OM_i - OC = m_{ix} \cdot U + m_{iy} \cdot V \quad (4)$$

$$\begin{cases} U = m_{iy} \cdot CM_i - m_{iv} \cdot CM_j / m_i \times m_j \\ V = m_{ix} \cdot CM_i - m_{ix} \cdot CM_j / m_j \times m_i \end{cases} \quad (5)$$

を用いて決定できる。

3.3 指標の検出

今回の実験ではステレオ画像の対応探索を回避するために4色(赤・黄・緑・青(図3))の指標を用い、背景は黒色の均一背景とすることにより画像処理の軽減を図っている。各カメラでYUV信号として、入力された画像は、各プレーンの閾値処理により分割し、それぞれの領域の重心位置 p を指標位置として検出する。

一方、前述のキャリブレーションにより、仮想ディスプレイ座標系における各カメラの画像中心 C と画像の縦および横ベクトル U 、 V はすでに決定されるので、仮想ディスプレイ座標系におけるそれぞれの指標位置 P は、2台のカメラの観測値(p_x, p_y)より、それぞれの観測方向 OP を

$$OP = p_x U + p_y V + OC \quad (6)$$

算出した後に、2台のカメラからの観測ベクトル OP の交点として求めることができる。

4. インタフェース・表示処理部

4.1 指標操作と形状モデルの変換

形状モデルの移動にもなうヒューマンインタフェースとしては、物体の把持・開放、移動・回転、2つの機能から成り立っている。これらはいずれも3次元計測部で検出された第1～3指の先に配置された3つの色指標の重心位置に基づいて操作するようになっている。

(1) 把持・開放

物体の把持については、あらかじめ提示する形状モデルの外接球を求めておき、その球内に上記の3

つの指標が入った場合に、物体が把持されたものと判断する。同様に、物体の開放については、3点のいずれかが外接球の表面からあらかじめ設定した閾値以上離れた場合に開放されたものと判断する。

(2) 移動・回転

物体の平行移動については、把持された位置を基準位置として、3点の重心位置の移動を物体の移動量とする。一方、回転については図4に示すように、3つの指標点で構成される平面において、把持された位置における姿勢を基準として、平面の重心を中心とした法線ベクトルの回転と、法線ベクトルを軸とした3つの指標点の平均回転角を算出し、形状モデルの回転を行う。

4.2 質感設定制御

先端部分に色指標を配置した指示棒を用いて、光源方向、環境・拡散・鏡面反射率($\omega_e, \omega_d, \omega_s$)、鏡面反射の拡散乗数 n の設定を行う。反射モデルとしては次式のPhongのライティングモデルを用いる。

$$I_i = D_i(\omega_e + \omega_d \cdot \cos\theta) + S_i \cdot \omega_s \cdot (\cos\alpha)^n \quad (i = r, g, b) \quad (7)$$

ここで、 D_i は物体色のRGB成分、 S_i は鏡面反射光のRGB成分である。また、 θ は法線方向とz軸(視線方向)との角度、 α は鏡面反射方向とz軸との成す角度である。質感パラメータの指定は、物体中心と指標の距離がそれぞれのパラメータの大きさを表わし、指標から物体中心への方向が光の向きを示しており、環境・拡散・鏡面反射率、拡散乗数 n の順で順次設定を進めるようにしている。

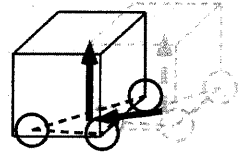
5. 実験結果

5.1 指標位置の検出精度

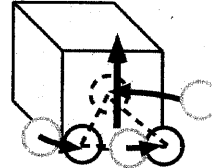
立体ディスプレイを用いて、図5に示すように仮想ディスプレイ座標系に配置された立方体の像を表示し、その頂点をユーザが順次指示することにより、キャリブレーションを行った。この際、ユーザの視点から仮想ディスプレイ座標系の原点までの距離は約560mm、表示された立方体像の実空間



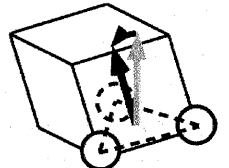
図3 指標



(a) 重心の平行移動



(b) 法線回りの回転



(c) 法線ベクトルの回転

図4 指標操作と形状モデルの変換

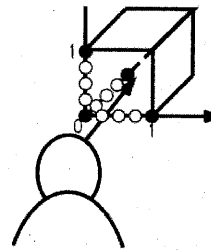


図5 指標検出精度の実験

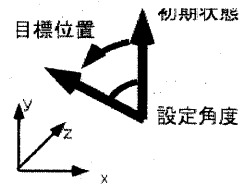


図6 回転操作に関する実験

における長さは116mmとなっている。

キャリブレーションにより、カメラパラメータを決定後、指標の検出精度を確認するために、仮想ディスプレイ座標系のxyz軸上に29mm間隔で参照点を提示し、それぞれの点上に指標を置いたときの検出結果を図6に示す。図6において、横軸は指標の位置、縦軸は検出結果を示している。また、各データ点(□、△、○)は各試行で得られたxyz座標の検出結果であり、データ点の重なりを避けるために左右に移動して表示している。図6の結果より、z座標の検出精度について誤差が大きいこと、z軸方向移動におけるx座標の推定値に定常誤差が表れる傾向はあるが、全体としてほぼ良好な結果を示していることが確認できた。

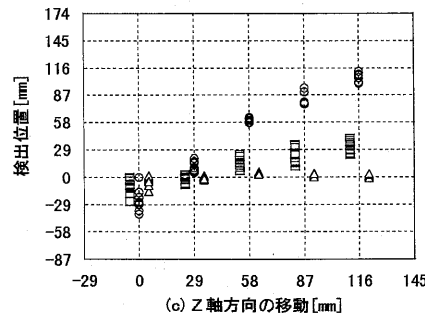
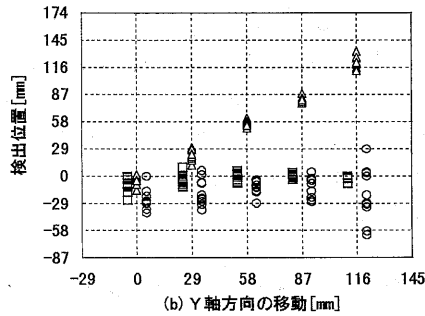
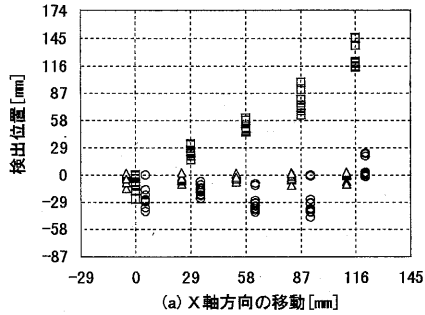


図7 ディスプレイ座標系における指標検出位置

5.2 物体の回転操作

仮想ディスプレイ座標系の上で、表示物体の回転操作にともなう誤差を確認するために、図6に示すような棒状の物体を指定された角度に回転させる実験の結果を図8に示す。同図において、横軸は提示物体の初期位置からz軸回りに回転させた目標の角度、縦軸は回転の操作結果との誤差を示しており、○印は目標方向と操作結果の3次元的角度差、×印は仮想ディスプレイ座標系のxy平面上での誤差を示している。この結果より、z軸回りには対象を比較的精度良く制御できるのに対して、奥行き方向の誤差が大きくなっている。

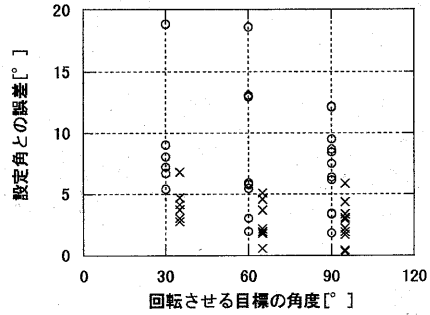


図8 回転操作に伴う設定角の誤差

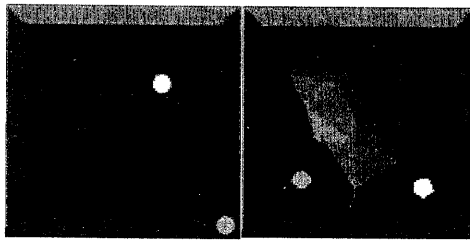
5.3 質感操作

頭部の形状モデルに対して、光源位置、環境・拡散・鏡面反射率、透過率などの質感パラメータの設定実験を行った。図9にその過程の一例を示す。なお、本実験で使用した形状モデルは、MRIで撮像したボクセル画像を領域分割後に、各部分をポリゴン近似したものであり、最初に近似精度の低い形状モデルを用いることにより、質感設定操作の応答の改善を図っている。

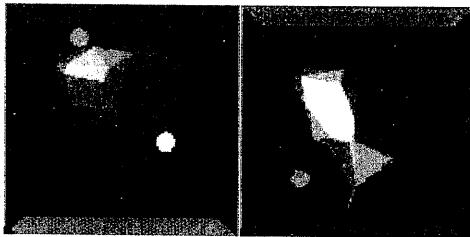
図9において、(a)は環境光強度の設定結果、(b)は拡散反射率および光源方向の設定結果、(c)は鏡面反射率の設定結果であり、(d)に示すように鏡面反射方向の広がりを制御する反射乗数と光源方向を3次元位置に応じて変化させながら確認することができる。また、(e)は設定され条件で高精度の形状モデルを表示した結果であり、(f)は頭蓋骨部分と腫瘍を重ねて、半透明表示を行った結果である。

6. 考察

指標位置の検出精度については、z軸方向の検出誤差が大きいこと、z軸方向の移動にともなってx軸方向の推定値に定常誤差が表れる傾向があった。また、物体の回転操作についても、特に奥行き方向の誤差が大きいことが確認された。これらの原因として、人間の奥行き感覚自体の認識精度がそれほど高くないこと、ユーザの頭部の動きにともなって観測される立体像が世界座標系の上で相対的に移動することなどが影響しているものと考えられる。また、今



(a)環境光の設定 (b)拡散光の設定



(c)反射光の設定 (d)反射乗数の設定



(e)詳細表示結果 (f)透過率を設定した最外角と腫瘍

図9 質感設定

回の実験では、キャリブレーションにおいて一回の試行データからカメラパラメータを算出したが、この点の改善も必要と考えられる。

しかし、システムの観点から考えると、本システムでは、各指標の検出結果が3次元物体の移動・回転や質感の変化として、ユーザの視覚系にフィードバックされるために、人間も含めたフィードバック系としての精度は検出部単体の精度よりも改善することが期待できる。この点の評価については引き続き検討したい。

7. まとめ

筆者らは、再構築処理後の3次元医用画像を対象とし、ユーザがあたかも組織を手の上で種々の

方向から照明をあてながら観察できるようなヒューマンインタフェースの実現を目指している。本論文では、特に3次元領域分割を行ったMRI像の各組織について、各組織に反射・透過率を考慮した質感属性を付与するとともに、組織や光源を様々な位置や方向に置いて観察するための手法と評価実験のために試作した質感設定システムについて述べた。このシステムは、立体ディスプレイを用いて3次元立体像をユーザの手元に表示させ、ステレオカメラで計測した手袋と指示棒に装着した指標の3次元情報に基づいて立体像を操作するものである。評価実験により、基本機能の有効性が確認できたが、3次元計測処理部の精度向上や、人間も含めたフィードバック系として動作するシステムの評価方法の検討などについては今後の課題である。

謝辞 頭部断層像の撮像やシステムの機能要件の検討などの面でご協力頂いた横浜市立大学医学部放射線科の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] 立野玲子, 他, "複数の平行断層像に基づく高品質ボリュームデータの再構成", 情報処理学会研究報告, 98-CG-89, グラフィックスとCAD研究報告no.89, pp.23-30, 1998.
- [2] 梶谷暢之, 他, "三次元画像の領域分割に関する研究", 映像情報メディア学会年次大会講演予稿集, 1998.
- [3] 舟橋健司, 他, "3次元仮想空間における仮想手による物体操作モデルと一実現法", 信学論(D-II), vol.J81-D-II, no.5, pp.822-831, 1998.
- [4] Y.Kuno, et.al., "Human-centered human-computer interface using multiple view invariance," Proc. Int. Workshop on Automatic Face- and Gesture-Recognition, pp.266-271, 1995.
- [5] 遊佐博幸, 他, "手の大きさ, 方向の変化に対応可能な手形状認識方法の一提案", 信学技報, vol.HC94-93, pp.47-54, 1993.
- [6] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, no.4, pp.323-344, 1987.
- [7] O. Faugeras, "What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?," In Computer Vision - ECCV'92, LNCS-series, vol. 588, pp.563-578, 1992.