

内部構造を考慮した力覚表現手法

中島佳衣[†] 渡辺大地^{††}[†]東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科 ^{††}東京工科大学メディア学部

1 はじめに

近年触り心地を体感できる力覚デバイスが開発され、反力によってヒトの触感覚である圧覚を刺激し仮想物体に触れている感覚を表現することが可能になった。このような力覚デバイスを用いた力覚提示は、医療やエンタテインメントの分野を中心に多くの表現手法が提案されている。

力覚提示の研究の多くは材質が均質な物体を対象としており、複数の材質で構成される非均質な物体における力覚提示手法では用いられているデータ構造が物体の変形に適したものではない。内部構造を有する非均質な物体の力覚提示には、ボクセルデータを用いたものが多い。ボクセルデータは、単位立方格子に濃度や密度などの情報を格納することで物体形状を表現する技術だが、そのデータ構造上対象とする物体の部位同士の接続状態を記述するのは困難である。力覚提示を行う際には、物体の変形と力覚提示を同時に表現することにより現実的に即した物体の挙動を体感することが可能となる。また、均質な素材の物体だけではなく非均質で様々な組織によって構成された物体の力覚提示を実現することで、力覚提示表現の幅を広げることが可能となる。

そこで本研究では、変形が容易なデータ構造を用いて、内部構造を有する非均質な物体の力覚提示を実現する。データ構造として、メッシュ構造を用いて容易な変形を実現する。メッシュ構造は主に物体の表面形状を表現するために用いられることが多いが、内部に階層を持たせることで表面だけではなく、その内部の構造も記述することが可能である。本研究では、内部構造を持つ非均質な物体として、人体の前腕を対象とする。人体の前腕は、腱や骨などの内部に存在する物体に触れる箇所と触れない箇所が混在しているため、内部構造を持つ非均質な物体の変形と力覚提示手法の有用性を検証することが可能である。

2 人体の皮下組織と内部構造の表現

本研究で対象とする人体の皮下組織は、人体表面から表皮・真皮・皮下脂肪・筋肉層・骨という階層構造になっている。これらの組織は、互いの組織同士のつながり

りや結合組織によって結びつき変形等の際に互いに影響し合っている。人体において変形から元の形状に復元するのは、結合組織のひとつである弾性繊維によるものであり、人体を強く引っ張った際に生じる張力は膠原繊維によるものである。また、皮下組織構造を構築するそれぞれの組織は、各々異なったやわらかさを有する。このやわらかさの違いが、触れた部位による触覚の違いに影響しており、このような物性値の違いにはヤング率の違いが関係している。

本研究では物体の内部構造を表現する手法として、土屋 [1] の研究で用いられている多階層三角柱モデルを用いる。図 1 は、多階層三角柱モデルの模式図である。多階層三角柱モデルでは、上部から表皮部・皮下脂肪部・筋肉層部・骨部を表現している。真皮は表皮とほぼ一体となっているため、多階層三角柱モデルでは表皮と真皮は統合している。これらの異なる組織を各階層に対応させて、階層間を接続することで人体の皮下組織の階層構造を質点と稜線からなるトラス構造のモデルとして構築する。多階層三角柱モデルを用いることで、各階層間の接続を保持した状態での変形が可能となり、他の階層からの影響も反映した変形や力覚提示を実現することができる。

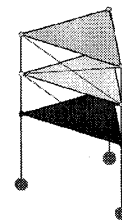


図 1: 皮下組織構造 多階層三角柱モデル

3 変形と力覚提示手法

力覚デバイスを用いた力覚提示を実現するためには、形状に触れた際の力や形状表面からめり込んだ距離に応じた反力を計算で求め、力覚デバイスに適用しアームなどの動きを制御することが必要である。本研究で対象とする弾性体等の柔物体の表現には、質点バネモデルや有限要素法を用いて物体の変形と力覚提示を実現する手法が多い。質点バネモデルは、計算速度が比較的高速なため力覚提示を行う際に多く用いられる手法である。

Force feedback method of Internal structure

[†] Kei NAKAJIMA^{††} Taichi WATANABEGraduate School of Bionics, Computer and Media Science, Tokyo University of Technology ([†])Faculty of Media Science, Tokyo University of Technology (^{††})

しかし、複雑な形状を構築する際は質点数が増えることによる力の伝播の遅延が生じる点や、強い力が加えられた際に形状が破たんしてしまう点が問題である。一方の有限要素法は、計算速度がかかるという点から力覚提示に用いられることは少ないが、物体の物性値を反映した計算が可能であり、また物体の形状を保持した状態での変形を実現可能である。本手法では、計算が安定し力の伝播状態が瞬時に定まる点を重視し、有限要素法によるリアルタイムな変形を伴った力覚提示を実現した。

多階層三角柱モデルにおいて、隣接する質点でつながる稜線を 1 つの要素として有限要素法を適用し、変形と力覚提示手法を実現した。各要素に対しては、階層ごとに人体の組織の物性値に即したヤング率を設定することで、その階層における組織の性質の違いによる挙動の変化を表現する。有限要素法では、対象物体全体の変形と外力の関係を剛性方程式によって表現する。

$$\mathbf{F} = \left[\mathbf{K} \right] \delta \quad (1)$$

ここで式 1 において、 \mathbf{F} は物体に与えられる外力であり、 δ は変位を表す。 $\left[\mathbf{K} \right]$ は物体の柔らかさを決定する剛性行列である。本手法では個々の要素を立体トラスとして扱う。この時の剛性行列は、3 次元空間においてトラスが向いている各軸方向での方向余弦と、要素ごとに設定した物性値を用いて剛性行列を求めた [2]。作成した剛性行列に対して、変形が生じない個所に対して拘束条件を設定した。本研究で用いる多階層三角柱モデルでは、階層のうち最下層は骨部のため弾性的な変形は生じないものとし、この骨部を表わす質点を拘束した。計算のステップごとにおける各質点の変位は、現在の座標値と 1 ステップ前の座標値の差を取る事で算出した。ここで求めた変位を適用し式 1 を用いて求めた応力は、力覚デバイスに適用する反力として保存し、拘束をかけている質点に対しては力を 0 に補正を行った。剛性行列 $\left[\mathbf{K} \right]$ の逆行列を求め、補正を行った応力ベクトルと乗算し、変形状態を表わす変位を求めた。本研究では逆行列の算出には LU 分解を用いた。求めた変位を各質点の座標値に加算する事で、変形を完了するものとした。有限要素法による変位を求めた際に解が定まらない場合は、質点バネモデルを適用することで変形処理を継続的に行い、有限要素法が再び適用できる状態になるまでの代替処理を行った。

4 検証と評価

前節までのアルゴリズムをもとに力覚提示を行うアプリケーションを構築し検証を行った。本研究では、力覚提示を行うデバイスとして Novint 社の Falcon を利用した。Falcon は 3 自由度のアームを持つ力覚デバイスであり、アームを操作して画面上の仮想物体に触れる

ことのできるアプリケーションを開発した。アームで仮想物体に触れた際の変形処理には有限要素法による計算を適用し、アームに対して設定する反力は形状変形後の操作点の応力によって決定した。

開発には FalconSDK と OpenGL ベースの 3DCG ツールキットである FK System を使用した。開発環境は CPU:Core2Duo E8400(3.0GHz)、RAM:4GB、GPU:GeForce9800GTX+である。図 2 は、構築したアプリケーションの実行画面である。図中の黒い質点が操作点であり、赤い線は変形時の力の方向と大きさを表す。

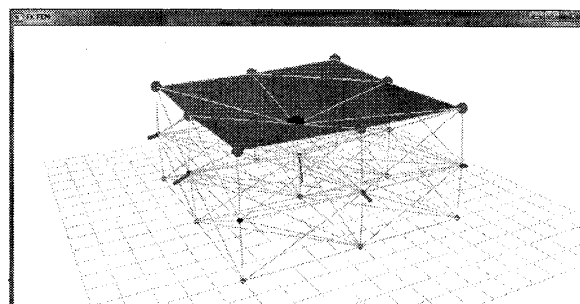


図 2: アプリケーション実行画面

力覚デバイスを用いた操作を行い、図中に示された力の方向と大きさに即した力覚提示がおこなわれた事を確認した。実行速度は、形状の質点数が 27 の場合は 64FPS であり、質点数が 48 の場合は 16FPS であった。

5 まとめ

本研究では、組織構造を表すモデルとして多階層三角柱モデルを用い有限要素法による計算を行い形状に触れた際の力覚提示を行った。本手法を用いることにより、不均一な硬さをもつ部位で構成された物体に対して、その構造に即した力覚を提示することができるようになった。本手法を応用することで、人体の他の部位における力覚提示も実現可能である。

今後の課題として、有限要素法の高速度化によって複雑な形状に対してもリアルタイムな力覚提示を可能にすることが挙げられる。物体の物性値の設定をより簡易に行えるようにすることで、乳がん検診における胸の触診シミュレータへの応用も考えられる。

参考文献

- [1] 土屋裕一, "軟部組織手術シミュレーション", 共立出版, Bit6 月号, pp11-18, 2000.
- [2] 堀北忠志, "Visual Basic でわかるやさしい有限要素法の基礎", 森北出版, 2008.