原著

力覚提示に基づく触診 VR シミュレーションフレームワーク

黒田嘉宏¹⁾, 中尾 恵²⁾, 黒田知宏³⁾, 小山博史⁴⁾
小森 優⁵⁾, 松田哲也¹⁾

1. 背景

近年の医用画像取得装置の発達や様々な検査法の発達など診断技術の向上には目覚ましいものがある。

しかし、X 線 CT のように侵襲的である検査や、手間や時間を要する検査も多い。一方、視診や触診などの身体的検査は、簡便で非侵襲的であることから、現在でも重要な役割を果たしている。しかし、触診には有効な教育方法や訓練環境がなく、また、

Framework of VR Palpation Simulation based on Force Display

Yoshihiro KURODA, Megumi NAKAO, Tomohiro KURODA, Hiroshi OYAMA,
Masaru KOMORI, Tetsuya MATSUDA

Abstract :

Palpation has no standard education system and effective methods of training in internal medicine and surgical procedures. This paper proposes an advanced and integrated VR simulation framework supporting palpation that makes importance of force sensation. The framework enables palpation of a beating aorta in cardiovascular surgery and indirect palpation for breast and prostatic cancer. Applying blood pressure to inner wall represents beat and enables users pinch beating organs. Interaction model between elastic objects simulates collisions of multiple organs and enables indirect palpation, in which doctors palpate the tissue of interest by touching interposing tissue. The system supports pre-processing procedures, in which elasticity and physical constraints of virtual organs are set for subsequent physics-based simulation, as well as real-time simulation procedures. Since palpation requires high resolution of haptic feedback, deformation and reaction forces are calculated based on finite element methods with several optimization methods. Users can palpate virtual organs with haptic devices and perceive stiffness of tissue. The evaluation with medical experts and students confirmed the developed system be useful for the experience, education and training of many kinds of palpation diagnosis.

Key words :

Palpation, Beating organ, Indirect palpation, Finite element method, Procedural training

- 1) 京都大学大学院情報学研究科, Graduate School of Informatics, Kyoto University
- 2) 京都大学大学院医学研究科, Graduate School of Medicine, Kyoto University
- 3) 京都大学大学院医学部附属病院医療情報部, Medical Informatics, Kyoto University Hospital
- 4) 東京大学大学院医学研究科, Graduate School of Medicine, University of Tokyo
- 5) 滋賀医科大学生命情報学, Computational Biomedicine, Shiga University of Medical Science

近年、実際の患者や動物を用いた訓練がますます困難になりつつある。

それに対して、VR 技術を応用した触診シミュレーションシステムは、仮想臓器に対して繰り返し触診訓練が可能であり、また、希少な症例に対する患者データに基づいた触診体験が可能となる。触診シミュレーションでは、ユーザによる押す、なでる、把持するといった操作に対して、仮想臓器モデルが変形し、反力が提示される。これまでも触診シミュレーションシステムの開発例はあるが、心臓や大動脈など自律的な運動によって圧変化を生じる組織に対する触診や、乳がんや前立腺がんの検査のように直接触ることができない組織への間接的な触診を忠実にシミュレートした例は少ない。

本論文では、上記の触診を可能とし、かつ、仮想臓器モデルの構築を支援する環境を含む統合的な触診シミュレーションシステムの開発と機能の検証について報告する。

2. 触診シミュレーションに対する要求

2.1 訓練対象とする触診

医学百科事典¹⁾によると、「触診とは、身体的検査で用いる、手によって触れて診断する方法。診察者は、患者の体の部位に手で触れて、器官または体の部位の大きさ、硬さ、手触り、位置、圧痛を診断する。」とある。

組織の「硬さ」、「形状」、「位置」の触知は、病変の発見、適切な手術法の選択、治療部位の特定を行うために重要な要素であり、様々な病変モデルを用いたトレーニングによる触知技術の向上は適切な診断につながる。一方、「圧痛」は患部を触ったときに痛みを感じるかどうかを診るものであり、多くの検査で行われるが、力覚的なトレーニングの必要性はそれほど高くない。また、「手触り」については、組織を触ったときの「手触り」が病変によって変化することもあるが、硬さの変化も同時に起こることが多いことから、「手触り」の触診技術の向上の重

要性は比較的低いといえる。以上の理由から、本研究では、組織の「硬さ」、「形状」、「位置」に関する触知技術の向上を目指す触診シミュレーションフレームワークを提案する。

2.2 実時間性

触診シミュレーションを目的とするにあたって実時間性は必須であり、医療現場でのシステム利用を考えると、PC ベースのシステム上で実時間処理を行う必要がある。

従来、軟組織のための力学モデルとしてばね質点モデルや境界要素法などが多く用いられてきた^{2,3)}。しかし、高い精度の反力算出が求められる触診シミュレーションでは、有限要素法に基づいた計算が望ましい。一方、有限要素法は計算量が多く、実時間処理を行うためには、各種の高速化手法の適用や前処理計算による実時間処理の削減が求められる。

2.3 統合的なシステム

触診シミュレーションを行うためには、医用画像集合から仮想臓器モデルを構築する必要がある。また、上述の有限要素法を用いる場合、前処理を行う必要がある。したがって、計算力学手法の前処理も含めた臓器モデリング環境は、触診シミュレーションシステムに有用である。

これまでも多数の触診シミュレータが開発されたが、多くは肝臓など静的な臓器を対象としたものであり⁴⁾、拍動を伴う心臓や大動脈の触診を可能としたシステムはほとんど報告されていない。また、これまでの前立腺触診シミュレーションの多くは、直腸の存在を無視しており⁵⁾、直腸を介した前立腺の触診を現実にも忠実にシミュレートした例はない。心臓血管外科において非常に重要とされる心臓や大動脈など圧変化を伴う組織を対象とした触診や、隣接臓器との接触を考慮したより高精度な力覚提示を行う触診、乳がん検診や前立腺検診など間接的な触診をサポートしたシステムの実現が望まれる。

以上より、触診シミュレーションシステムがもつ

べき機能，満たすべき要件は以下ようになる。

- ・ 仮想臓器モデリングの支援環境
- ・ 拍動状態の提示
- ・ 間接的な触診のサポート
- ・ PC ベースシステム上での実時間処理（変形計算に 30 Hz，反力計算に 1000 Hz のリフレッシュレートを満たすこと）

3. 触診シミュレーションシステム

2. で述べた触診シミュレータの要件を満たすシミュレーションフレームワークを図 1 に示す。

処理は大きく前処理系とリアルタイム処理系に分かれる。

前処理では，力学計算に基づくシミュレーションを行うために必要な臓器のモデリング作業が行われる。まず，CT や MRI で得られた 2 次元画像集合に対して対象とする臓器の領域が抽出され，四面体充填を行うことで四面体メッシュが生成される。これらの処理は市販の製品を用いて行うことができる。作成された四面体メッシュは，シミュレーションにおける臓器形状データとして用いられる一方，図に示す力学計算用仮想臓器モデリングを経て，力学計算で用いられる逆剛性マトリクス作成にも用いられる。様々な病態や症例を対象とした触診シミュレーションを行ううえで，力学計算に必要な設定や処理を支援する仮想臓器モデリング環境は有用である。本システムに組み込んだ力学計算用臓器モデリング支援環境の詳細については，4. で述べる。

リアルタイム処理では，ハプティックデバイスを介して操作者の指先の位置が取得され，臓器モデル群に対して行われた力学計算結果が反力や画像として出力される。ハプティックデバイスには，PHAN-ToM (SensAble Technologies Inc.) を用い，二指による把持や二横指による触診はデバイスを複数台用いることでサポートする。

干渉計算は，操作点の 3 次元座標と仮想臓器の形状データから，操作者の指が臓器モデルに触れたか

図 1 触診シミュレーションフレームワーク

Fig. 1 Palpation simulation framework

どうかを判定する。干渉計算のアルゴリズムは 6)，7) において提案された手法に基づく。操作点と臓器モデルとの接触が検出されると，接触点と現在の操作点の位置から押し込み（変位）が得られる。変形や反力の算出には，8) で開発した力学計算ライブラリを用いる。

本システムは，心臓や大動脈などの拍動を伴う臓器の触診や，乳がんや前立腺がんの検査といった間接的な触診もサポートする。拍動状態の臓器モデルへの対話的な触診を可能とする手法については，5. で詳細を述べる。複数の臓器同士が接触する環境において臓器間に生じる力学的相互作用を処理する手法については，6. で述べる。

4. 力学計算用臓器モデリング支援環境

本システムは，人体組織の弾性率や物理的な拘束条件など，力学計算に必要な設定を対話的に行う環境を提供する。本研究では，弾性率の設定から逆剛性マトリクスの自動計算までを支援する環境として，MatrixBuilder というソフトウェアを開発し

図2 力学計算用臓器モデリング支援ソフトウェア (MatrixBuilder) のユーザインターフェース

Fig.2 User interface of MatrixBuilder, which is software to support modelling of virtual organs for subsequent physics-based simulation

た。

本ソフトウェアの特徴は以下のとおりである。

- ・ 仮想臓器の全体あるいは一部に対して任意の弾性率を設定可能
- ・ 仮想臓器への内壁情報の付加やその他の拘束条件の設定が可能
- ・ 設定した弾性率や拘束条件に基づいて剛性マトリクスを自動的に生成

図2は、MatrixBuilderのユーザインターフェースを示す。本ソフトウェアの使用方法については8)を参照。

4.1 パラメータ設定部と前処理部

本ソフトウェアでの処理は、手動で行うパラメータ設定部と、自動で行われる力学計算用の前処理計算部とに分けられる。

パラメータ設定部では、四面体メッシュ化された仮想臓器の3次元形状をGUIを通して参照しながら、対話的に人体組織の弾性率や物理的な拘束条件を任意に設定することが可能である。

前処理計算部では、設定された情報に基づいて変形・反力計算に用いられる逆剛性マトリクスが自動計算される。コンデンセーション手法⁹⁾は、物体内

部のノードの振る舞いを表面ノードに帰着させる手法であり、変形に関して通常の計算方法と等価な解を導出する。本手法は、触診シミュレーションのように物体内部の変位を表示する必要がないシミュレーションに対して、物体内部に対応した剛性マトリクスを縮小することで処理を高速化する手法である。また、逆剛性マトリクスを用いた変形、反力の算出方法の詳細については10)を参照。

4.2 大動脈弓部分硬化モデル

心臓血管外科における大動脈弓全置換術では、触診により大動脈弓の部分硬化の位置を特定する必要がある。図3は、本ソフトウェアで構築された仮想大動脈弓モデルを示す。部分的に濃い色が塗られている箇所は、高い弾性率を与えることで部分硬化をモデル化した箇所であり、3つの図はそれぞれ異なる部位の部分硬化をモデル化したものである。被験者に硬化部位と正常部位の境界を大動脈モデル上で指定してもらい実験を行い、システムが臓器モデルの硬さの違いを提示可能であることを確認した。また、指定された境界点の位置にはばらつきが見られ、システムを用いた反復練習によって、より正確に境界を特定する技術を習得する必要があることが判明した。実験の詳細については8)を参照。

このように、本ソフトウェアを用いることで、人体組織モデルの作成が容易となり、様々な病態や症例を対象としたシミュレーションが可能となる。

図3 MatrixBuilderを用いて構築された大動脈弓部分硬化モデル

Fig.3 Aorta sclerosis model produced by using MatrixBuilder

5. 拍動状態の提示

心臓や大動脈など内腔を持つ拍動臓器に対して、押し込みや把持などの操作による臓器の変形と反力提示を力学的にシミュレートする。拍動臓器モデルを開発するにあたって考慮した要件を以下に挙げる。

- ・有限要素法に基づいた高精度な変形・反力計算
- ・仮想臓器内壁への時系列的な圧の適用による自律的な拍動の表現
- ・実時間性

本モデルの特徴として、大動脈の(1)形状、(2)弾性率、(3)血圧を考慮し、リアルタイムに有限要素法に基づいた計算を行うことが挙げられる。この3つの要素がリアルな拍動感の再現に有効であることは、これまでの研究¹¹⁾で明らかになっている。

図4は、3次元大動脈モデルの断面のイラストを用いて、触診の際の変形・反力導出の流れを示す。図4の一番左は、大動脈の内壁に血圧が与えられ、変形計算によって全体が少し拡張した大動脈を示している。内壁に適用される血圧値が高くなると、さらに拡張が大きくなる。このことによって、大動脈の自律的な拍動を表現する。また、触診によって外部から大動脈に変位が与えられた場合は、全体の変形に加えて反力が計算され、力覚提示デバイスを通してユーザの手に伝達される。ただし、外圧の血流への影響や大動脈壁の粘性による時間遅れは無視できるほど微小であると仮定する。反力の計算手法の詳細は12)を参照。

作成した正常・硬化大動脈モデルに対して、特定の表面を等しく変位させることによって提示される反力を定量的に確認した。正常部位には1.0 MPa、硬化部位には3.2 MPaのヤング率を与えた。図5は、測定の結果得られた大動脈圧と反力の関係である。両モデルともに内圧の変化に応じて反力がなめらかに変化し、自律的な拍動が表現されている。硬化部位に対する押し込みでは反力は相対的に増加す

図4 拍動臓器に対する力学計算モデルの概念図

Fig.4 Concept of computation model for beating organs

図5 大動脈圧と反力の関係

Fig.5 Relation between blood pressure of an aorta and produced reaction force

図6 拍動臓器の把持シミュレーション

Fig.6 Pinch simulation of beating organs

るが、拍動はあまり伝達されていないことがわかる。また、図6は触診のつまむ動作に対して動脈壁がリアルタイムに変形する様子を示している。このように、本システムは、拍動感の提示に加えて、二指での操作の結果生じる臓器の力学的な振る舞いを実時間でシミュレートすることができる。

6. 間接的な触診機能

本システムは、直接触れていない仮想臓器の硬さを反映した反力を提示し、乳がん検査や前立腺検査などの間接触診のシミュレーションを可能とする。仮想臓器同士の接触を実現する弾性体間相互作用モデルを開発するにあたって考慮した要件を以下に挙げる。

- ・接触物体の力学特性を反映した相互作用
- ・十分な視覚的リアリティを満たすこと
- ・実時間性

図7に、開発した弾性体間相互作用モデル¹³⁾の概要を示す。

相互作用モデルは、力学的性質・状態を反映する垂直応力に基づいた変位を接触要素に与える。垂直応力は、一方の弾性体を剛体であると仮定して他方の弾性体に仮の変位を与えることで得られる。

図8に、間接触診の一例である前立腺検査のための直腸指診シミュレーションの様子を示す。直腸モデルの内壁を押すことで間接的に前立腺モデルを押す操作を行ったときの変形と反力が提示される。

前立腺モデルの条件として下記を用意し、直腸モデルを介して前立腺モデルを押したときの反力を調べた。

- ① 提示しない（直腸モデルのみ提示）
- ② ヤング率 1.0 MPa を設定
- ③ ヤング率 5.0 MPa を設定

操作点を自動で移動させるシミュレーション実験では、間接的に触る前立腺モデルの硬さの違いを反映した反力が得られることが判明した⁷⁾。図9に得られた反力値を示す。

さらに、被験者実験の結果、前立腺モデルの硬さの違いをヒトが認識できることが確認された。また、泌尿器科医により、直腸モデルを介して前立腺モデルを押したときの力感が、現実の前立腺を押したときの感覚に近いという主観的な評価を得た。

図7 相互作用モデルの概要
Fig. 7 Concept of interaction model

図8 前立腺の間接触診シミュレーション
Fig. 8 Simulation of indirect palpation of a prostate

図9 操作点における反力値
Fig. 9 Reflection force at a manipulating point

7. 考察と今後の課題

本論文が提案した触診シミュレーションフレーム

ワークは、人体組織の「硬さ」、「位置」、「形状」の触知技術の習得を重視したものであり、技術習得が望まれる要素の主要な部分をカバーしている。一方、組織の「手触り」は2次的な判断材料ではあるが、違和感を与えない環境を提示するという点では、サポートすることが望ましい。しかし、これを実現するためには、高精度な触覚情報や材質の質感の伝達が可能な触覚提示デバイスの開発や、圧力分布算出アルゴリズムの開発など、まだ多くの課題が残されており、これらの技術開発は今後の研究課題の1つである。

また、様々な触診における本システムの教育、訓練効果について、今後も引き続き調査を行っていく予定である。

8. まとめ

本論文では、力学計算に必要な仮想臓器モデリングの支援環境を含んだ統合的な触診シミュレーションフレームワークの提案を行った。開発したシステムは、これまで困難であった拍動状態にある臓器の触診や、乳がんや前立腺検査にあるような間接的な触診を可能とする。本システムは、内科検診から外科手術の術中にいたるまで多様な環境における触診をサポートし、様々な病態や症例を想定した触診の体験、訓練を容易に行うことを可能とする。本システムは、より適切な診断を可能とするにとどまらず、これまでの触診技術では困難であった臓器内部のがん病変を検出する技術の習得等への貢献が期待される。

文 献

- 1) (株) オーロラシステム設計事務所：インターネット医療カウンセリングシステム「病院に行く前に…」, <http://www.city.naze.kagoshima.jp/HouseCall/encyc/>
- 2) H. Delingette: Toward Realistic Soft Tissue Modeling in Medical Simulation. In Proceedings of the IEEE: Special Issue on Surgery Simulation. Vol.86, No.3: pp.512-523. 1998

- 3) S. F. F. Gibson and B. Mitrich: A Survey of Deformable Modeling in Computer Graphics. Technical report, <http://www.merl.com>, TR-97-19, MERL, 1997
- 4) M. Dinsmore, N. Langrana, G. Burdea et al.: Virtual Reality Training Simulation for Palpation of Subsurface Tumors. In Proceedings of IEEE VRAIS, pp.54-60, 1997
- 5) G. Burdea, G. Patounakis and V. Popescu: Virtual Reality Training for the Diagnosis of Prostate Cancer. In IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.46, No.10: pp. 1253-1260, 1999
- 6) C. B. Zilles and J. K. Salisbury: A Constraint-based God-object Method for Haptic Display. IROS 95, pp. 141-151, 1995
- 7) D. Ruspini, K. Kolarov and O. Khatib: The Haptic Display of Complex Graphical Environments. ACM SIGGRAPH, pp.345-52, 1997
- 8) 中尾恵, 黒田嘉宏: 実時間力学計算手法のライブラリ化と手術シミュレータの開発, IPA 2002 年度成果報告 CD-ROM 論文集内, 2003
- 9) M. Bro-Nielsen: Finite Element Modeling in Surgery Simulation. Journal of the IEEE, Vol.86, No.3: pp.490-503, 1998
- 10) 広田光一, 金子豊久: 柔らかい仮想物体の力覚表現, 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 12: pp. 3261-3268, 1998
- 11) M. Nakao, H. Oyama, M. Komori et al.: Haptic Reproduction and Real Time Visualization of a Beating Heart for Cardiovascular Surgery Simulation. International Journal of Medical Informatics (Elsevier Science), Vol.68, Issue 1-3: pp. 155-163, 2002
- 12) 山本恭弘, 中尾恵, 黒田知宏他: 心臓血管外科における拍動を伴う大動脈触診シミュレーションシステム, 電気学会論文誌 E, Vol. 123, No. 3: pp. 85-92, 2003
- 13) 黒田嘉宏, 中尾恵, 黒田知宏他: 複数臓器間の接触シミュレーションを実現する弾性体間の相互作用モデル, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 2: pp. 155-162, 2003