

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01052

研究課題名(和文)点群モデルに基づく簡易非線形解析を用いた新バーチャル医療触診訓練教育装置の開発

研究課題名(英文) Development of maxillofacial palpation training system using simplified mesh free method with a spring element

研究代表者

利光 和彦 (Toshimitsu, Kazuhiko)

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号：10180150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、PC上で患部をVR再現し、力覚伝達装置によって触診の感覚や知識を学ぶシステムの基礎研究である。患部モデルは、医療画像の位置情報(点群)を用いて作成する。触診による変形や力覚の計算は、以下の2通りで行った。第1は、簡易ばね要素によるメッシュレス数値解析、第2は、患部を厚肉弾性体微分方程式でモデル化した粒子法である。前者では、システムのリアルタイム作動を可能とした。後者では、線形・非線型弾性計算が可能となった。粒子法とFEM解析結果を比較し、変形は定性的に一致した。しかし、応力分布は異なることが分かった。したがって、粒子法の計算スキームの検討が必要であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The research is a fundamental study on the development of a VR palpation training system, which can produce deformation and reacting force on the affected part by PC and a haptic interface in order to learn the palpation skill. We focus on elastic deformation analysis for the system. The numerical model can be constructed of point data through CT or MRI images. We use two numerical simulation methods. One is a meshless analysis with a simple spring element. Another is particle method that is based on an elastic body. In the former, we success to operate the system in real time. In the latter, the particle method is applied for deformation of soft tissue with homogeneous and nonhomogeneous stiffness. The numerical results are verified by Finite Element Method (FEM). As a result, the both of deformations are qualitatively agree with. However, there is some difference of stress distribution between MPS and FEM analyses. Hence, we should improve the numerical scheme of MPS.

研究分野：計算医工学

キーワード：計算医工学 生体変形 触診 メッシュレス解析 粒子法

1. 研究開始当初の背景

医工学の分野において、生体をモデル化して医療に援用する研究は、術前や診断における今後の飛躍的な発展が期待できる重要な技術で、2つの方向性に大別される。一つは、すべての過程を計算機で行うもの、例えば、有限要素法で非線形解析を行うものである。もう一つは、得られた患部医療画像 (CT, MRI など) から、3D プリンターを用いて固体モデルで再現するものである。前者は、きわめて精緻な予測が可能であるが、専門家による長時間のモデル化作業とスーパーコンピュータ (京など) による膨大な計算量が必要となる。後者は比較的簡単に 3D モデルが作製でき、医師が実際に見て触ることができるが、患部のしこり硬さや触診に対する力覚がモデルの素材に依存する。

本研究は、この両者のエッセンスを取り出したバーチャル医療触診訓練装置に関する基礎研究に位置付けられる。数値解析として点群計算モデルおよび簡易非線形解析法の提案および触るという感覚を PC レベルのコンピュータでバーチャルリアリティ (VR) を用いて実現することを目指すものである。

生体をコンピュータ上で VR 再現し、その変形や挙動を解析することは、医工融合のテーマとして、鋭意研究が進められている。前述の有限要素法による患部解析としては、久田ら^[1]のバーチャル心臓シミュレータ (UT-heart) が代表例としてあげられる。これは、非線形有限要素法と分子生物学の細胞挙動などを解析モデルに組み込んだマルチスケールマルチフィジックスの大規模解析で、きわめて精緻であり、術前シミュレーションなどに成功している。しかし、患部のモデル化 (メッシュ分割など) には高度なスキルと時間を必要とし、解析もスーパーコンピュータによる膨大な計算量が必要となる。一方、近年発展しているメッシュレス解析法としては、越塚らの MPS (Moving Particle Semi-implicit Method) 法があり、弾性解析として、乳房の自重変形などに適用されている^[2]。しかし、しこりを含む非一様な硬さ (非一様剛性) の生体への適用性や応力分布計算の妥当性が不明であり、今後の課題とされている。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、触診が必要な患者の症例を、仮想現実 (VR) を用いてコンピュータ上で再現し、そのモデルを力覚伝達装置で触診して技術を学ぶことができる「VR 触診訓練システム」の構築にある。

本研究では、主な目的は以下の 4 項目である。

(1) 市販の PC と力覚伝達装置を用いて、「VR 触診訓練システム」を構成し、作動を確認する。

(2) メッシュレス (点群) モデルを実際の患部に適用する手法を確立する。

(3) 患部をばね要素でモデル化し、変形解析を行う手法を確立する。この際、「VR 触診訓練システム」がリアルタイムする速度を実現できることを重視する。

(4) ばね要素での解析より、より精度の高い粒子法での解析法を検討する。

3. 研究の方法

本研究では、図 1 に示す触診訓練システムを構築する。歯学教育で使用される人骨入り頭頸部のマルチスライス CT 画像からコンピュータ内の VR 患者モデルを作成し、力覚伝達装置 (PHANToM Omni) を用いて擬似的に触診を行なうものである。

メッシュレスな解析として

1. ばね要素による解析、
2. 粒子法による解析

の 2 通りとし、線形および非線形 (大変形) の弾性解析を VR 患者モデルに適用し、触診部の変形量と手元へ伝わる反力を計算することで、触診訓練が可能かを検討する。

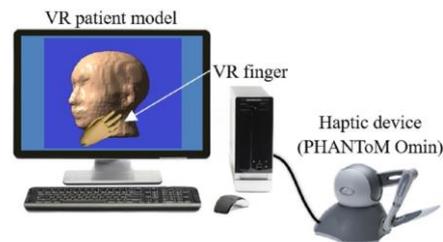


Fig.1 Schematics of VR palpation system

4. 研究成果

4.1 ばね要素によるモデル化と解析法

メッシュレス法は有限要素法 (FEM) と異なり、モデルをメッシュに分割することなく解析を行なう手法である。

図 2 に、仮想患者の FEM モデル [(a) 節点数 5921, 要素数 28153] と、節点数を約 3 倍に増やした点群モデル [(b) 点数 18821] を示す。本研究では、図 2(b) の点群モデルにおいて、図 3 に示すように、任意の触診点を中心に予め設定した範囲内の座標同士のみをばね要素で関連付けし、この領域を「局所簡易メッシュレス領域」とする。本研究では、影響半径 $r=2.5\text{cm}$ 、約 $MN=200$ 点を局所領域として設定し、1 点から他の点へのリンク数を $NI=30$ とした。この局所簡易メッシュレス領域内に対して、触診点から与えられた強制変位に対応する反力を線形弾性解析で計算する。

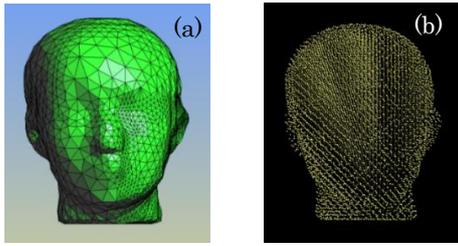


Fig.2 Virtual maxillofacial model: (a) FEM model (5921 nodes, 28153 tetrahedral elements); (b) only nodes model (18821 nodes)

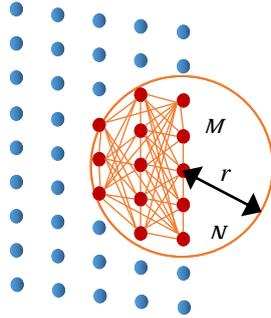


Fig.3 Simplified mesh free method and local area

4.1.1 システムの検討と課題

簡易メッシュレス法を用いて仮想患者モデルを構築し、力覚伝達装置 (PHANToM Omni) を使用することで力覚応答と仮想患者モデル表面の変形を視覚的に確認することができた。同時に、創案した局所簡易メッシュレス法によって 20msec まで高速化でき、スムーズな力覚応答を実現できた。さらに、力覚装置の作用点を 1 点から複数点とする面接触にすることで現実感のある触診を表現した。

このシステム改良課題として以下のことがあげられる。

局所簡易メッシュレス領域において、局所領域のサイズ、ばねリンクの数、剛性パラメータの決定は極めて重要である。現在は、試行錯誤でこれらのパラメータを設定しているが、このパラメータ (影響半径、節点数、局所ネットワーク数、ばね剛性) の選定に対して、触診変位や感覚に対応するように適切なものを推定する手法の開発が必要である。特に、ばね剛性は患部の硬さの違いを表現する支配的因子である、この触診訓練システムをより患者のモデルに近づけるためには、モデル部位によって弾性係数を細かく変更する必要がある。

4.2 粒子法による弾性解析

ばね要素による解析において明らかとなった、医療データに基づく患部弾性係数の容易な組込と解析精度の向上を行うため、越塚らの提案する粒子法 (MPS 法) ^[2,3] を用いて解析を行う。その利点として、以下があげられる。

- メッシュの生成が不要であり、モデル作成が容易である。
- 大変形 (幾何学的非線形性あり) の場合でも、メッシュの移動などが必要なく、解析がロバストかつ容易である。
- 手術による切断への適用などの拡張性が高い。
- 一方、その欠点として、以下がある。
- 一般的に、計算時間が有限要素法に比べて大きくなる。
- 一般的に、FEM より計算精度が低くなる。

4.2.1 解析対象領域

解析対象としては、頸部のリンパ節癌を対象として、頭頸部マルチスライス CT 画像 (DICOM データ) から、2mm の等間隔で頭頸部の下部を取り出した三次元点群モデル (図 4 左) を VR モデルとする。例えば、解析は 図 4 右の青い部分で示すような触診位置に対応する局所領域で行う。

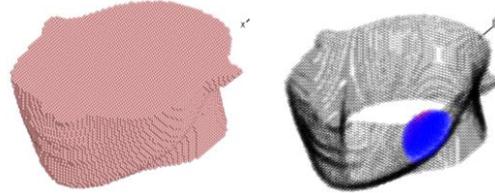


Fig.4 Virtual maxillofacial model for Particle Method with 95242 points: the left and right figures show a whole analysis model and local analysis region respectively.

4.2.2 解析

(1) 解析モデルと解析条件

第 4.2.1 項で述べたように、計算時間の短縮のため、触診位置周辺の局所領域を解析領域とする。本報では、試験的解析として、図 5 に示す直方体 (40mm×40mm×20mm) を解析モデルとする。粒子法でのモデルの離散化は、 x, y, z 軸方向に 2mm 間隔の点群データで行う。ダミー粒子を最底部 1 層とし、その上一層は固定粒子とし総粒子数は 5292 個 ($12 \times 21 \times 21 = 5292$ 個) である。計算の妥当性を検討するため、汎用ソフトウェア SolidWorks Simulation を用いる。解析は、4 面体 (三角錐) ソリッド要素でメッシュを作成する (図 6)。解析モデルとして、モデルの中央に直径 10mm の球形のしこりありとなし (一様な脂肪の組織) の 2 ケースを考える。材料定数は、縦弾性係数は $E_F = 1.0 \times 10^3 \text{Pa}$ (脂肪)、しこりはその 10 倍の $E_L = 1.0 \times 10^4 \text{Pa}$ で、ポアソン比、密度はそれぞれ 0.45, 960kg/m³ とする。

触診に相当する荷重は、SolidWorks Simulation で線形解析できる上限に近い 200Pa と非線形解析しか適用できない 300Pa とし、モデルの上面を直径 10mm の円で押す。

触診中心（押す）位置は、A点を $x = 0\text{mm}$ としてAD上を6mm~20mmを2mm間隔で変化させる。

(2) 応力分布の検討

MPSとFEM解析による応力分布の比較の一例として、触診圧力200Paでモデル上面中央を押した場合の図3のABCD断面応力分布を図7および8に示す。ただし、MPSによる解析は粒子に垂直に働く応力で、FEMによる解析はVonMises応力である。このため、両者を直接定量的には比較できないが、定性的に同じ傾向を示しており、粒子法は妥当な応力分布の計算が可能であることを示唆する。

(3) 変位の検討

図5の上面A点を $x = 0\text{mm}$ として、ADに沿って6mm~20mmを2mm間隔で触診中心を変化させ、触診圧力は200Paと300Paの2通りとし、しこりありとなしの直方体モデルでMPSとFEMで計算した変位量の比較を図9~12に示す。定性的には、しこりありの場合、しこりから触診位置が離れるほど変形量は大きくなる。線形変形である200Paの場合、しこりありとしこりなしでは、しこりありの方が変形量はMPSとFEMとで一致する傾向にある。非線形（大変形）範囲である300Paの場合、200Paの場合と同様に、しこりありの場合、しこりから触診位置が離れるほど変形量は大きくなり、しこりありの方が変形量はMPSとFEMとで一致する傾向にある。MPSとFEMの差は、最大でしこりありの場合が約1mm、しこりなしの場合が約1.1mmとなる。この差が、触診に及ぼす影響は不明で、今後システムを実際に動かして、医師の使用感などから検討する必要があると考えられる。

4.3 研究成果のまとめ

4.3.1 ばね要素によるモデル化と解析

本研究では、通常のPC (Intel Core i7) および力覚伝達装置 (PHANToM Omni) を用いて、バーチャル触診教育訓練システムを構築した。触診対象である患部のバーチャルモデル再現のために、モデルを点群（節点）で表わす点群モデルを作成した。さらに、触診部分を中心とした局所領域を設定し、単純ばね要素でネットワーク化する局所簡易メッシュレス法を提案し、線形解析で弾性力（反力）計算した。システム作動およびモデル化などにおいて、得られた結果は以下の通りである。

- (1) 点群モデルを使用することで、マルチスライスCT画像から作成するコンピュータ内の仮想患者モデルの構築が容易となった。
- (2) 仮想患者モデルで触診を行なう際に、触診面においては、局所簡易メッシュレス領域を構成することで、計算時間を大幅に削減

できた。例えば、従来のシステム（FEM解析）で弾性解析計算時間が500msecであったものが1/25の20msecとなった。この結果、PHANToM Omniでモデルに触診するシステムの動作において、リアルタイムでのスムーズな力覚応答が実現できた。

- (3) 触診を、点接触から面接触に変更し、画面上での自然な変形状態を実現した。

4.3.2 粒子法によるモデル化と解析

医療データから容易に生体組織の弾性係数を解析モデルに組み込み、変形計算を行うため、脂肪組織の直方体中央に直径10mmの球形しこりがある場合とない場合のモデルで、粒子法（MPS）を用いて弾性変形解析を行った。結果は、汎用ソフトウェアSolidWorks Simulationの有限要素法による解析と比較し検討した。MPSおよびFEMで線形および非線形計算の結果の比較から以下の結果を得た。

- (1) MPSとFEMでは、応力分布は定性的に一致する。しかし、定量的には一致しないため今後の検討が必要である。
- (2) 変形量は線形、非線形（大変形）、しこりあり・なしの全てのケースで定性的にほぼ一致する。
- (3) モデル中央での触診による変形は、触診圧力200Pa（線形変形範囲）、「しこりあり」でMPSとFEMは一致するが、「しこりなし」ではMPSは1.6mmでFEMは1.3mmで約20%小さい。一方、触診圧力300Pa（非線形変形範囲）で、「しこりあり」より「しこりなし」の方が差は大きい。その差は、200Paの場合より大きくなる。なお、この差が触診システムの使用感に及ぼす影響については不明であり、今後の検討が必要である。

参考文献

- [1] 佐山, 鷲尾, 杉浦, 久田, ヒト心臓の僧帽弁開閉シミュレーション, 日本機械学会, 第20回計算力学講演会 CMD2007.
- [2] 志野, 越塚, 伊藤, 小笠原, 劉, 乳がん検査のための乳房変形のMPS弾性解析, 計算工学講演論文集, Vol.17 (2012年5月)
- [3] 越塚, 粒子法, 丸善 (2012).

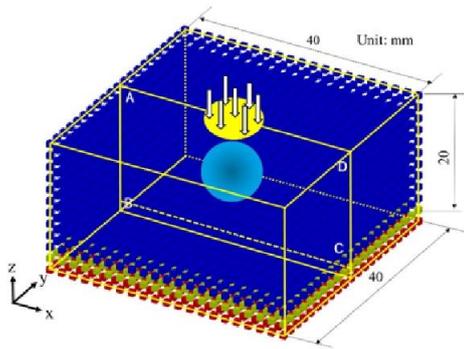


Fig. 5 MPS Particle model with 2mm particle distance

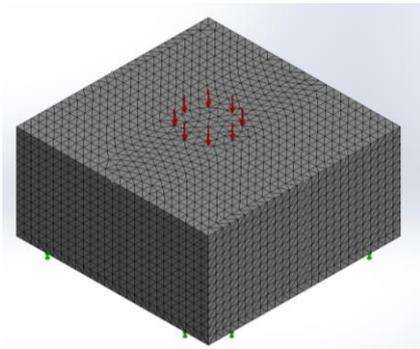


Fig. 6 FEM model by SolidWorks simulation

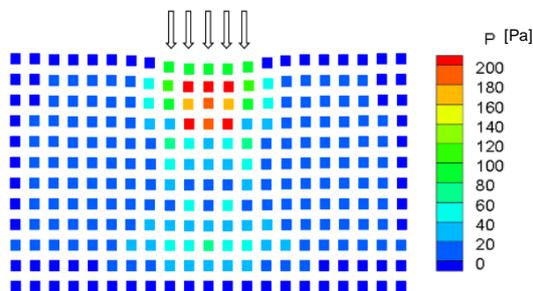


Fig.7 Pressure distribution on cross-section ABCD by MPS

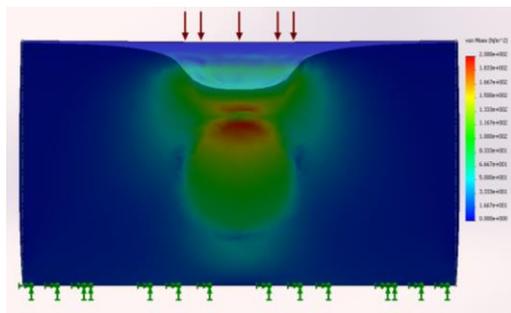


Fig.8 Von Mises stress distribution on cross-section ABCD by FEM

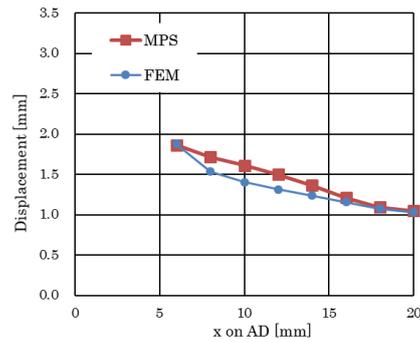


Fig. 9 Comparison of displacements at center of palpation by MPS and FEM with lamp under applying load 200 Pa.

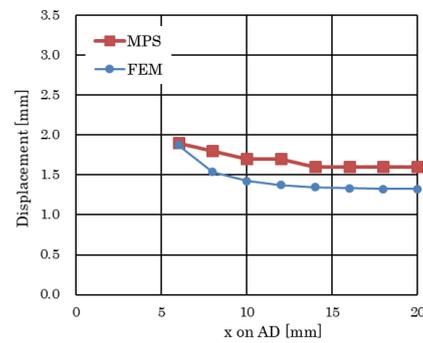


Fig.10 Comparison of displacements at center of palpation by MPS and FEM without lamp under applying load 200 Pa.

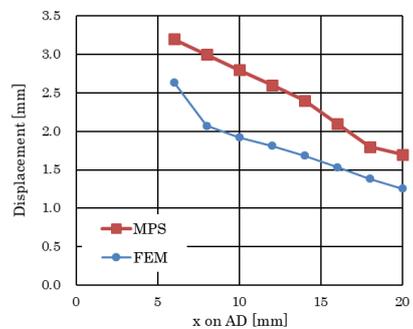


Fig.11 Comparison of displacements at center of palpation by MPS and FEM with lamp under applying load 300 Pa.

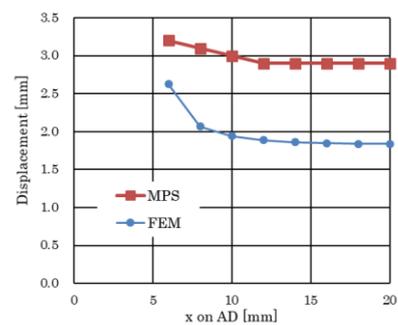


Fig.12 Comparison of displacements at center of palpation by MPS and FEM without lamp under applying load 300 Pa.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. 徳安達士, 丸山翼, 山本貴弘, 利光和彦, 岡村和俊, 吉浦一紀, メッシュフリー法による歯科触診訓練用仮想患者モデルの構築, 電気学会論文誌 C, 138 巻 7 号(電子ジャーナル), 査読有, 2018 (掲載決定).

[学会発表] (計 4 件)

1. 菊池美郁, 利光和彦, 松田千尋, 宮原 舞, 徳安達士, 山本貴弘, 岡村和俊, 吉浦一紀, VR 頭頸部触診訓練システムのための MPS 弾性解析に関する基礎的研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (北九州), (4 pages), 2018 年 6 月 2-5 日.
2. T. Tokuyasu, K. Yoshitomi, H. Kikuchi, M. Miyahara, T. Yamamoto, K. Toshimitsu, K. Okamura, K. Yoshiura, Development of Virtual Face Model for Palpation Training - Construction of dynamic model with particle method -, Proceedings of the 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, GS4-2, Jan. 18, 2018.
3. 吉富健二, 徳安達士, 利光和彦, 中山貴彰, 岡村和俊, 吉浦一紀, ばね要素を用いた簡易メッシュフリー法による頭頸部触診訓練システムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (横浜), 1A1-20a1 (3 pages), 2016 年 6 月 8-10 日.
4. K. Yoshitomi, T. Tokuyasu, K. Toshimitsu, T. Nakayama, K. Okamura and K. Yoshiura, Improvement of Mesh Free Deforming Analysis for Maxillofacial Palpation on a Virtual Training System, Proceedings of the Ninth International Workshop on Frontiers in Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (FCISIS-2016), FCISIS-S1-3, July 6-8, 2016, Fukuoka, Japan.

[その他]

ホームページ等

<http://www.fit.ac.jp/~toshimitsu/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

利光和彦 (Toshimitsu, Kazuhiko)

福岡工業大学・情報システム工学科・教授

研究者番号：10180150

(3) 連携研究者

徳安達士 (Tokuyasu, Tatsushi)

福岡工業大学・情報システム工学科・教授

研究者番号：50435492

岡村和俊 (Okamura, Kazutoshi)

九州大学・歯学研究科・助教

研究者番号：20346802