

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K02923

研究課題名(和文) 粒子法によるバーチャルリアリティ医療触診訓練システムの開発

研究課題名(英文) Development of virtual reality palpation training system using particle method

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：病変の触診感覚を手指で体験的に学ぶことができるVR触診訓練システムの開発研究を行った。力覚インターフェースとして、新たに人工生体人肌モデルを用い、内部しごりは、形状と硬さが自由に可変できる負圧粒子剛性要素を用いた。触診指の位置は、静電容量式センサ(I-SCAN)およびwebカメラでリアルタイム検出し、コンピュータ上のVRモデルと連動して表示可能である。さらに、大変形弾性解析プログラムとして、粒子法計算プログラムを作成し、有用性を確認した。特に、これまで不明であった応力について、独自の手法によりFEM解析と比較可能とした。開発したシステムは、医学生の触診教育などに有用であることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本粒子法計算と既存の計算法(FEM)とで、独自の手法により応力の比較を可能とした。微小変形(1mm～3mm程度)の触診で、変形や応力の計算精度の比較を行い、本計算は、微小変形触診に対応できる精度であることを示した。さらに、人工生体モデルに負圧による硬さ制御が可能なしごりを埋め込んだ力覚センサを開発した。このセンサをVRシステムに組み込むことにより、指で触る感覚を伴うVR医療触診訓練が可能になる。さらに、システムを発展させれば、コロナ禍で顕在化した人との接触を避けること、つまり医学生の触診教育時において患者との直接接無しの実習、触る感覚が伴う新たなリモート診療などが期待される。

研究成果の概要(英文)：A VR medical palpation training system is developed to learn through the experience of the touching sensation such as lumps with fingers. A haptic force sensor interface is newly developed, which is consisted of artificial living body human skin model and lumps of a negative pressure particle rigidity element whose shape and hardness can be freely changed. The position of the palpation finger can be detected by an electrostatic capacity pressure sensor (I-SCAN) and a web camera. In addition, the position displayed in conjunction with the VR model on the computer in real time. Furthermore, a large deformation elasticity analysis program based on the particle method is developed. The practical usability is confirmed. In particular, the accuracy of stress can be examined by original method. The developed system is expected to be useful for palpation education of medical students.

研究分野：工学

キーワード：計算医療工学 教育工学 VR触診 粒子法 弾性変形 医療シミュレータ MPS

### 1. 研究開始当初の背景

触診は初期診断の一助となり重要な医学教育項目のため、指導医から様々な症例に対応できるバーチャルリアリティ触診訓練システムの導入が強く望まれている(以後、バーチャルリアリティ触診訓練システムを「VR触診システム」と呼ぶ)。さらに、VR触診システム構築においては、触診行為に対する患部の変形をコンピュータシミュレーションできることが必要である。この技術は、手術前の訓練や病気の診断においても有用で、今後の飛躍的な発展が期待できる。

研究実施者は、これまでに、図1(上)に示すVR触診システムを構築した。このシステムは、PCとペン型力覚インターフェース(PHANToM Omni)で構成される。画面上のVR力学モデル(ばね要素で近似)に対して、押す(触診)行為を行うと、リアルタイムで変形や反力を操作者に提示できる。しかし、しこりを含む患部モデルの硬さの非一様性を再現すること、変形や応力の計算精度に難点があった。また、力覚インターフェースはペン型であり、実際の指で触る触診に対応しておらず、感覚が大きく異なる問題があった。

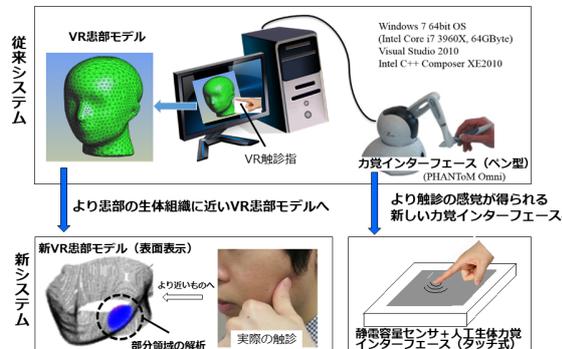


Fig. 1 従来の触診システムと本研究で新たに取り組み内容

### 2. 研究の目的

前述の1で述べた背景と研究実施者のこれまでの成果を踏まえ、図1(下)に示すように、患部の形状を点群でモデル化すること、患部の弾性係数分布を点群モデルに直接組み込み可能なメッシュレス計算法を開発すること、新たな力覚インターフェースとして、触診感覚に近い応答が得られるタッチ式力覚インターフェースシステムを製作すること、さらに、開発した新力覚インターフェースをVR触診システムに組み込み、その有用性を明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

「力覚システム」「点群モデル化」「粒子法解析」の3項目について以下の研究を行う。

- (1) **力覚システム**: 従来使用していたペン型力覚インターフェース(PHANToM Omin)に変えて、よりリアルな触診感覚が得られる静電容量式圧力センサー(NITTA株式会社I-SCAN)を用いたタッチ式力覚インターフェースを製作し、新力覚システムを構築する。
- (2) **点群モデル化**: リンパ節癌患者の顎顔面患部触診訓練を想定し、CT画像から点群で計算モデルを作成する。
- (3) **粒子法解析**: 基本形状点群モデル(半球+円柱, 直方体など)に対して、メッシュレス計算法として粒子法を採用し、触診部の微小および大変形計算プログラムを作成する。
- (4) **粒子法解析**: モデルの点群の粗密, 触診圧力, 位置に対する変形量および応力の計算精度について検討する。
- (5) **粒子法解析**: 実際の頭頸部点群モデルに部分領域を設定し、実際の変形状態を解析する。さらに、医師が変形を認識しやすい3DのVR立体表示を行う。

### 4. 研究成果

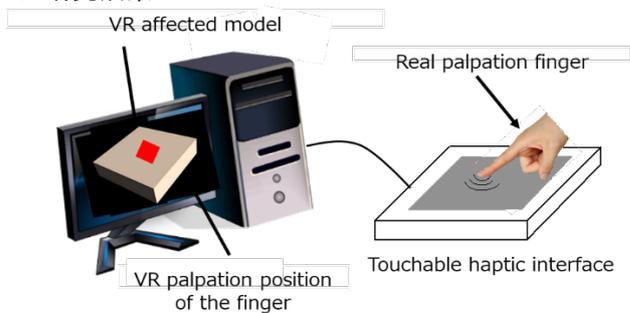


Fig. 2 開発したVR触診システム

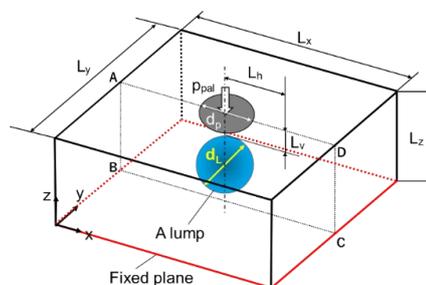


Fig. 3 タッチ式力覚インターフェースの模式図(直方体形状)

本研究で構築した触診システムの概要を図2に示す。本研究では、基礎研究として新開発のタッチ式力覚インターフェース(以後、「タッチIF」と呼ぶ: 図2右)を直方体人工生体モデル(図3)で製作した。具体的には、実際の指(Real palpation finger)の位置と触診圧を検知し、PC上のVR直方体モデル(VR affected model)と触診仮想位置(赤いマーク, VR palpation position of

the finger) が同期して動くもので、任意のタイミングでしこりの有無を変化させ、しこりの感覚を指に伝えることができる。

【力覚システム】

タッチIFは、人工生体モデルの上面に静電容量式圧力センサー（NITTA株式会社I-SCAN）を配置した、内部にしこり（Lump）を埋め込んだものである。しこりは、負圧粒子剛性要素<sup>[1]</sup>を用いており、空気圧制御システムにより硬さを変化させることができる。この方式は、これまでに無いものであり、形状も任意の形状にすることが可能で、実際の症状に合わせることが可能である。加えて、従来の空気加圧方式しこりは、装置破裂の危険があったが、本方式は負圧のため破裂の危険が無い安全なものである。

【点群モデル化】

図4に点群モデル化における各ステップを示す。頭頸部モデル(a)のマルチスライス CT 撮影を行い、512×512[pixels]、スライス枚数 481 枚、スライス幅 0.8mm で構成される 12bit の DICOM 画像(b)を取得する。次に、DICOM 画像(b)に二値化の処理を行い、3D 頭頸部モデルを作成する。作成したモデルに画像処理を行い、等間隔の三次元の点群データ(c)を取得する。これをもとに、OpenGL を用いて患者モデルを作成する。この方法を用いれば、臨床で取得される任意の CT, MRI の画像から点群モデル化が可能であり、様々な症例をモデルできることが期待される。

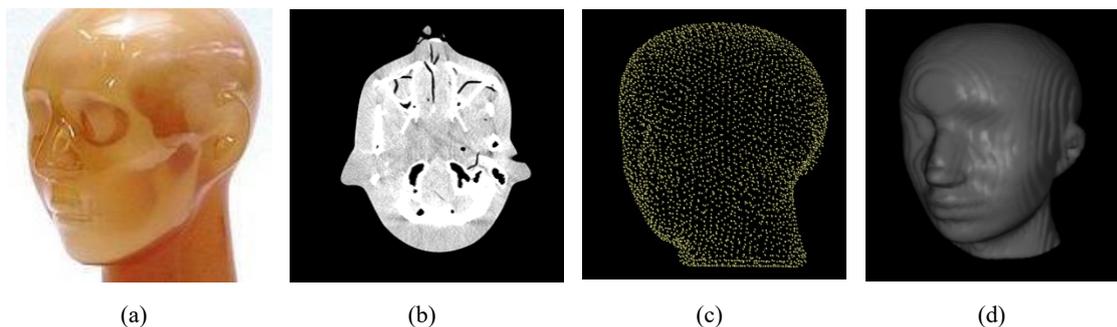


図4 点群解析モデルおよび表示VRモデルの作成

【粒子法解析】

陽的 MPS 法<sup>[2]</sup>に基づき、厚肉弾性体を基礎方程式とする解析プログラムを Fortran で開発した。以下に示す解析モデルに対して、汎用 FEM 解析ソフトおよび実験値と比較を行い、計算精度の検討を行った。

(1) 直方体力覚センサーを対象とする「しこりが内在する直方体モデル」の解析<sup>[3]</sup>

図3に示すタッチIFを点群データでモデル化する。粒子法で用いる解析モデルは、表1に示す直方体で、粒子間距離 2mm、直方体の底面を固定するためダミー粒子を最底部 2 層、その上 1 層は固定粒子とし、総粒子数は 12493 個 (31×31×13 個) とする。影響半径は、粒子間距離の 2.1 倍とする。モデルの縦弾性係数は実際に製作した人工生体モデルの実測値を用いた。

● 微小変形での変形精度の検討

まず、微小変形 (2mm 程度までの押込量) において、本粒子法計算の妥当性を有限要素法解析 (FEM 解析) による計算結果との比較により検証した。FEM 解析は、汎用解析ソフトウェア (SolidWorks Research Premium) を用いた。触診に相当する触診圧  $p_{pal}$  は、SolidWorks で解析できる上限に近い  $p_{pal} = 20 \text{ kPa}$  とし、粒子法では、0.05sec~0.1sec で、線形増加で負荷を加える。一様および非一様剛性モデルの比較として、しこりなしとありについて比較する。

表2に、しこりありとしこりなしでの、最大変位 (触診中央位置) の本粒子法と FEM の結果を示す。粒子法は FEM より 0.3~0.4 mm 大きい。触診においては、この程度の差はほとんど指先で感じる事ができないので、許容される差であると考えられる。したがって、本粒子法は微小変形において、十分な変形精度で計算可能であると言える。

● 微小変形での von Mises 応力の検討

次に、微小変形での応力について検討する。これまで、MPS 法と FEM では応力定義が異なる

Table 1 タッチ式力覚インターフェースの特性値

$L_x \times L_y \times L_z$	60×60×20 mm	
$L_v$	3 mm	
$d_L, d_p$	$d_L = 10 \text{ mm}, d_p = 14 \text{ mm}$	
density	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$	
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.45	
Elastic modulus	Normal ( $E_N$ )	$1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$
	Lump ( $E_L$ )	$2.6 \times 10^5 \text{ Pa}$

Table 2 本粒子法と FEM により最大変位値の比較

	Particle method	FEM	Difference
No lump	1.97	1.64	+0.33
With lump	1.72	1.30	+0.42

Unit: mm

るため比較することができなかつた。この点を研究実施者らは、von Mises 応力を用いる独自の比較法を提案し、可能とした<sup>[4]</sup>。応力分布の一例として、しこり有り ( $L_v = 3\text{ mm}$ ) のしこり真上を押した場合の ABCD 断面 (図 3) の von Mises 応力分布を図 5, 6 に示す。触診表面での von Mises 応力は粒子法および FEM が約 6kPa~8kPa で分布する (触診面中央点では、粒子法が約 6kPa, FEM が約 8kPa)。位置により約 2kPa の差はあるものの両者はほぼ一致した。触診表面での von Mises 応力がほぼ一致し、触診指が主に感じる圧力は本粒子法で十分計算できると言える。

一方、モデル全体での最大 von Mises 応力は内部しこりの上側で発生し、粒子法, FEM でそれぞれ約 12kPa, 18kPa で約 6kPa 粒子法が小さい。すなわち、患部の内部応力の計算では粒子法の計算精度が少し不足していると考えられる。しかしながら、最大の von Mises 応力はしこり内部の上側で発生することは定性的に一致する。

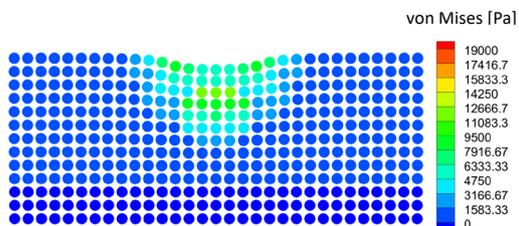


Fig. 5 本粒子法による図 3 の ABCD 断面での von Mises 応力分布:  $p_{pal} = 20\text{ kPa}$ ,  $L_v = 3\text{ mm}$  and  $L_h = 0\text{ mm}$

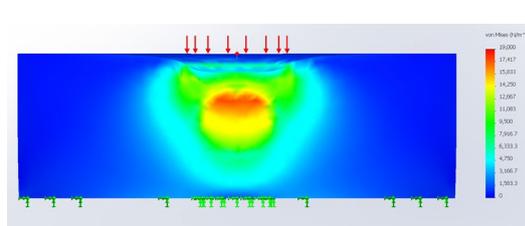


Fig. 6 FEM による図 3 の ABCD 断面での von Mises 応力分布:  $p_{pal} = 20\text{ kPa}$ ,  $L_v = 3\text{ mm}$  and  $L_h = 0\text{ mm}$

### ● 大変形での変形精度の検討

実際の触診に対応する大変形に対して、本粒子法の適用性を検討するため、しこりの真上を直径 14mm の円平面で力 0.5N (3.2kPa) ~ 7N (45kPa) で押す場合について、実験と計算で比較する。図 7 に示すように、押込力 (palpation force) が 5.9N 以下では、実験値より計算値が小さく、5.9N 以上では逆に実験値より計算値が大きくなり、最大約 2 mm の差が生じる。この違いは、今後の課題である。この差の原因は、主に①材料非線形性と②粒子法のモデル化における粒子間距離であると考えられる。

以下、特に、実際の生体でも生じる①材料非線形性について述べる。実験により求めた縦弾性係数の応力-ひずみ ( $\sigma - \epsilon$ ) 関係を図 8 に示す。本粒子法では、縦弾性係数  $E$  はフックの法則にしたがう弾性体として黒破線の線形近似 ( $\sigma = E\epsilon = 1.0 \times 10^5 \epsilon$ ) とした。しかし、図 8 の正常組織 (Normal bio-tissue) の  $\sigma - \epsilon$  の関係は、赤破線の 2 次曲線 ( $\sigma = 3.7 \times 10^5 \epsilon^2 + 4.6 \times 10^4 \epsilon$ ) で非線形近似の方がより実験値を再現できると考えられる。今後、①, ②の 2 点を計算で検討し、改良することで、実験値に近い変位量を計算できると期待される。

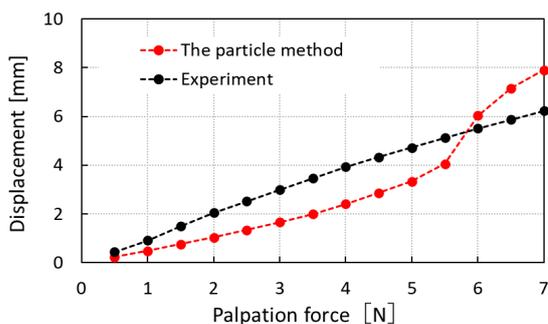


Fig. 7 触診位置における変位量の実験値と本粒子法との計算値との比較:  $L_v = 3\text{ mm}$  and  $L_h = 0\text{ mm}$ .

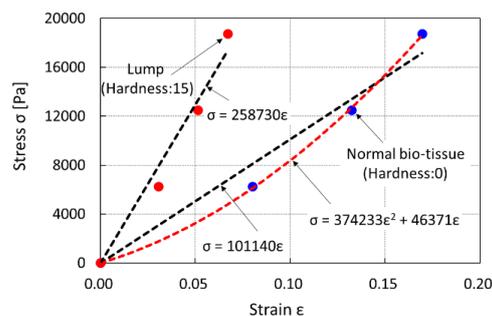


Fig. 8 実験に用いた人工生体モデル応力-ひずみの測定値。

### (2) 頭頸下部触診を対象とする。しこりが内在する局所計算領域 (円柱+半球形状)<sup>[4]</sup>

頭頸下部の触診を行うことを想定して、図9に示す計算モデルについて計算する。モデルは、粒子間距離2mmの点群で表し、全粒子数は95242である。この粒子数による解析は、現在のPCでは計算時間が非常に長くなる。そのため、触診時の患部組織の変形は触診位置から限定されると仮定して、触診位置から一定範囲内の領域 (局所領域: 図9(b)の青と赤で示す粒子) で解析する。解析に使用する正常生体組織 (脂肪) およびしこりの物性値は、正常組織 (脂肪) の縦弾性係数  $E_a = 1.0 \times 10^3\text{ Pa}$ , しこりの縦弾性係数  $E_b = 1.0 \times 10^4\text{ Pa}$ , ポアソン比  $\nu = 0.45$ , 密度  $\rho = 960\text{ kg/m}^3$ , 動粘性係数  $1.0 \times 10^{-2}\text{ m}^2/\text{s}$  とした。計算の妥当性は、触診部の変形変位と von Mises 応力について、汎用構造解析ソフトウェア (ANSYS Mechanical 16.1) の計算結果と比較・検討した。結果は、研究実施者論文<sup>[4]</sup>に詳述しており、紙面の都合でここでは主な成果のみ示す。

円柱と半球を組み合わせた局所領域モデルの場合の計算で以下の結論を得た。

- 触診圧力が 200 Pa, 300 Pa の場合の微小変形では、変位および von Mises 応力分布は粒子法

とFEMで、触診面の一部を除きほぼ定量的に一致する。

- 触診位置に近いしこり表面部分で、大きなvon Mises応力が生じる。したがって、強い力で触診を行うと、触診部に近いしこりの表面部分に大きな応力が生じるため、痛みが生じたり、症状を悪化させる要因となることを示唆する。
- 実際の医療触診への適用例として、頭頸下部モデルを用い、頬を触診圧400 Pa, 600 Paで押す計算を行った。その結果、触診圧600 Paで触診に適する約6.5 mmの押込量が得られることを確認した。
- フリーソフトMeshLabを使用して、図10のような操作者に分かりやすいVR表示を可能とした(図10)。

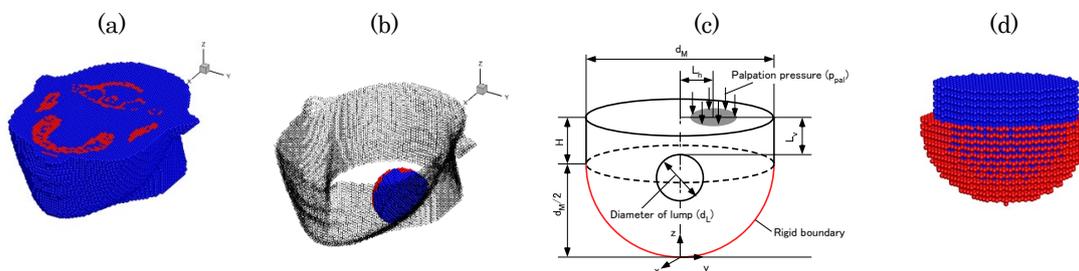


Fig. 9 頭頸下部モデルと局所計算領域(粒子数95242, 粒子間距離 2mm, 赤粒子は骨, 青粒子は生体組織), (a) 全体モデル, (b) 表面形状表示粒子と局所計算領域(青と赤粒子), (c) 局所領域の模式図, (d) 局所領域粒子モデル(粒子数5382, 粒子間距離 2mm)

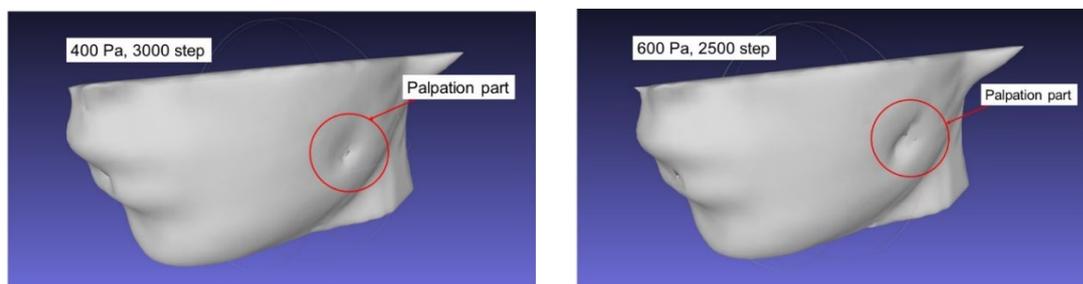


Fig. 10 操作者に分かりやすいVR表示: 左図  $p_{pal} = 400$  Pa at the 3000-th step, 右図  $p_{pal} = 600$  Pa at the 2500-th step.

MPSに基づく本粒子法は、適切な局所計算領域(全粒子数3000~6000)を用いて、対象となる医療行為に要求される精度(本研究では触診)での計算が可能であり、かつ大変形計算の場合でもロバストに解析可能である。したがって、本研究において開発した粒子法解析は、医療における大変形を伴う生体変形計算に有用な計算法であると言える。加えて、触診訓練者が実際にVR触診システムを使用することを想定して、触診システム使用者にとって変形が認識しやすいなめらかな頭頸下部表面変形表示を行った。

触診システムの課題としては、触診感覚が静電容量式センサーより若干影響をうけることの指摘があり、直接指で感じることができるよう改善の要望があった。これについては、今後、センサー部をウェアラブル力触覚センサーに変更し、指の位置はカメラで検知する新たな力触覚インターフェースの開発を行う予定である。また、VR患者モデルも数値計算で行った頭頸部や変形が大きい乳房など、実際の医療の要望を考慮したものに展開する予定である。さらに、これに伴い本粒子法解析に材料非線形の効果を導入し、大変形の計算精度をより向上させ、その検証を実験および非線形FEM計算でおこなう予定である。

#### 文献

- [1] 北川・満田, 粒子凝集による可変剛性要素, 日本機械学会論文集, 83(851), No.17-00107, 2017.
- [2] 越塚誠一, 粒子法, 丸善, 2012 (第10刷) .
- [3] 杉山智美, 利光和彦, 窪 蒼史, 日高雄也, 福田裕一, 粒子法によるVR触診訓練システムのためのしこりが内在する直方体生体モデルの弾性解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021 (大阪) 講演論文集DVD, 1P2-C03, 2021.
- [4] 利光和彦, 吉岡好一, 徳安達士, 岡村和俊, 吉浦一紀, 頭頸部触診のための粒子法による非一様弾性生体変形解析, 日本機械学会論文集C, Vol. 87, No.894, Paper No. 20-00339, 2021, DOI: 10.1299/transjsme.20-00339.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 利光和彦, 吉岡好一, 徳安達士, 岡村和俊, 吉浦一紀	4. 巻 87-894
2. 論文標題 頭頸部触診のための粒子法による非一様弾性生体変形解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集C編	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉山智美, 利光和彦, 窪 蒼史, 日高雄也, 福田裕一
2. 発表標題 粒子法によるVR触診訓練システムのためのしこりが内在する直方体生体モデルの弾性解析
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021（大阪）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤 桜, 利光和彦
2. 発表標題 がん検査のための非一様弾性半球モデルを用いた粒子法による変形解析
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021（大阪）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡好一, 利光和彦, 徳安達士, 山本貴弘
2. 発表標題 しこりを含む生体変形のための局所解析モデルの基礎的検討
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2019（広島）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------