

力覚重畳呈示技術を用いた 腹腔鏡下手術用トレーニングシステム 心拍の再現

大鶴 佳秀^{†1,a)} 川口 孝二^{†2} 服部 稔^{†3} 恵木 浩之^{†3} 大段 秀樹^{†3} 永田 和之^{†4} 辻 敏夫^{†5}
栗田 雄一^{†5}

概要：我々は、目標物体に似た力覚特性を持つ実物体（補助物体）の反力にハプティックデバイスの仮想力を重畳する力覚重畳呈示を提案している．本研究では、力覚重畳呈示技術を用いた腹腔鏡下手術用のトレーニングシステムを開発することを目的とし、補助物体に三次元形状の実物体を利用する．本稿では、提案システムの構成と、力覚重畳呈示に三次元補助物体を用いる場合の接触判定および仮想力計算の手法について説明する．また、心電図を元に仮想力を生成し心臓の模擬臓器に重ね合わせることで心拍の再現を行なった結果について報告する．

キーワード：ハプティックディスプレイ, 手術シミュレータ, 力覚重畳呈示

1. はじめに

近年、人へ情報の伝達を行なう際に、より直感的に伝えるための手法として力覚呈示を用いた情報伝達技術が注目されている．このような力覚を人間に呈示する装置はハプティックデバイスと呼ばれ、ハプティックデバイスを用いて人間に仮想的に力覚を呈示するハプティック VR (Haptic Virtual Reality) の研究が盛んに行われている．このハプティック VR による力覚呈示は航空宇宙分野や医療分野など様々な分野で応用されている．特に医療分野では手術シミュレータに力覚呈示機能を付与することでトレーニングの質の向上が期待されており、LapSim や LapVR など、実際に製品として販売されているものもある．しかしながら、臓器の粘弾性などの複雑な力覚応答を再現するために

は、力覚呈示システムが高性能である必要性からコストが高くなる問題があり、呈示される力覚についても十分であるとは言えない．そのため、低コストで実物体に近い力覚を呈示できるシステムが求められている．

そこで、Kurita ら [1] によって目標物体に似た力覚特性を持つ実物体（補助物体）の反力にハプティックデバイスの仮想力を重畳する力覚重畳呈示 (Haptic Enhanced Reality) が提案され、力覚重畳呈示では簡単なモデルでも粘弾性物体の力覚呈示が可能であることを示している．また、Jeon ら [2] は力覚重畳呈示の基本アルゴリズムを提案し、実物体に力覚デバイスの仮想力を付加することで実物体とは異なる物体として呈示できることを示している．

本研究では、力覚重畳呈示技術を用いた腹腔鏡下手術用のトレーニングシステムを開発することを目的とし、補助物体には三次元形状の実物体を利用する．本稿では、提案システムの構成と、力覚重畳呈示に三次元補助物体を用いる場合の接触判定および仮想力計算の手法について説明する．また、心電図を元に仮想力を生成し心臓の模擬臓器に重ね合わせることで心拍の再現を行なった結果について報告する．

2. トレーニングシステム

2.1 システム概要

図 1 に作成したトレーニングシステムの概要を、図 2 に

^{†1} 現在、広島大学大学院工学研究科
Presently with Graduate School of Engineering, Hiroshima University

^{†2} 現在、中電病院
Presently with Chuden Hospital

^{†3} 現在、広島大学大学院医歯薬保健学研究院
Presently with Institute of Biomedical Sciences, Hiroshima University

^{†4} 現在、産業技術総合研究所
Presently with National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{†5} 現在、広島大学大学院工学研究科
Presently with Institute of Engineering, Hiroshima University

a) y-otsuru@bsys.hiroshima-u.ac.jp

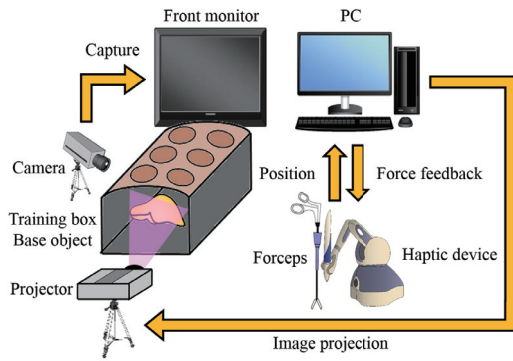


図 1 提案システムの概要

Fig. 1 Overview of the proposed system

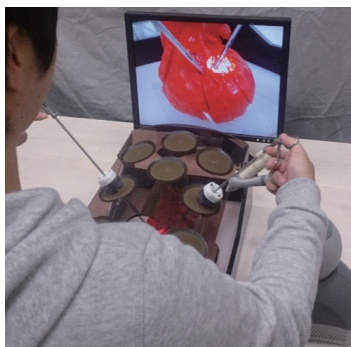


図 2 システムの動作風景

Fig. 2 System overview

システムの動作風景を示す。本システムはハプティックデバイス (3D, Geomagic Touch), モバイルプロジェクタ (DELL, M115HD), カメラ (Logicool, HD Pro webcam C920t), 補助物体として用いるモックアップ臓器, 腹腔鏡下手術用の鉗子および腹腔鏡下手術用トレーニングボックス (京都科学, エンドワークプロ) で構成される。

まず, 鉗子をハプティックデバイスのマニピュレータに取り付ける。次に, 補助物体をトレーニングボックスの中に設置し, モバイルプロジェクタを用いて補助物体に臓器のテクスチャ画像を投影する。そして, カメラで鉗子のワークスペースを撮影し, その映像を使用者の正面に設置したモニターに表示する。また鉗子の押し込み動作に合わせて力覚デバイスで仮想力を出力することで力覚重畳呈示を行なう。

2.2 力覚重畳呈示

力覚重畳呈示の特徴は, 再現する対象に近い物体特性をもつ補助物体を用意し, これにハプティックデバイスより出力された力を重畳することにある。力覚重畳呈示ではハプティックデバイスによって生成された仮想力 F_{dev} が, 補助物体の反力 F_{base} で増強され, その合計

$$F_{user} = F_{dev} + F_{base} \quad (1)$$

が使用者に呈示される。

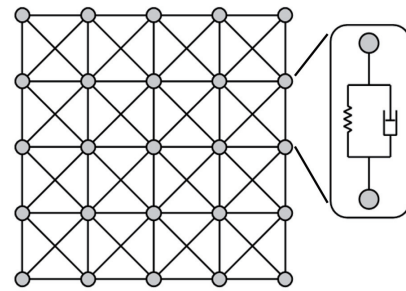


図 3 質点バネモデル

Fig. 3 Mass-spring network model

本システムではプロキシメソッドと質点バネモデルを組み合わせることでデバイスの仮想力の算出を行なう。プロキシメソッドとは, 仮想空間内に点状の物体 "プロキシ" を仮定することで, 侵入量に応じて仮想力を計算する方法である [3]。プロキシは使用者の操作するツールが仮想物体外部にある場合には, ツールとともに仮想空間内を移動する。そして, ツールが仮想物体内部に侵入したときにプロキシを侵入点にとどめておき, ツールとプロキシ間の差を求めることで仮想物体への侵入量を取得することが可能である。次に, 取得した侵入量を接触面に形成した質点バネモデルに適用することで仮想力の算出を行なう。質点バネモデルは, 仮想空間内で柔軟な物体の物理シミュレーションを行なう方法として, 仮想力計算に用いられている [4]。本システムでは, 図 3 に示すようにシート状に質点を配置し, 各質点間をバネとダンパで連結したモデルを用いた。連結方法としては正方形の頂点に質点を配置し, 辺上および対角線上を結ぶようにバネ・ダンパを配置した。質点 m_i が質点 m_j から受ける力および質点 m_i が受ける外力の総和は以下の式 (2) および式 (3), 質点 m_i の位置 x_i は式 (4), (5) により計算した。

$$F_{ij} = -k_{ij} \left(1 - \frac{L_{ij}}{|x_{ij}|} \right) x_{ij} - D_{ij} \dot{x}_{ij} \quad (2)$$

$$F_i = \sum_j F_{ij} - c \dot{x}_i \quad (3)$$

$$\dot{x}_i(t + \Delta t) = \dot{x}_i + \frac{F_i(t)}{m} \Delta t \quad (4)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i + \dot{x}_i(t) \Delta t \quad (5)$$

ここで, m_j は m_i と連結を持つ質点であり, x_{ij} , L_{ij} , k_{ij} および D_{ij} はそれぞれ質点 $m_i - m_j$ 間の距離, バネの自然長, バネ定数, およびダンパ定数, c は減衰要素である。

2.3 補助物体との接触判定

力覚重畳呈示を行なう場合, 補助物体の反力に仮想力を重ね合わせるために, 補助物体との接触判定を行なう必要がある。本システムでは, モックアップ臓器などの三次元形状の補助物体との接触判定を行なうために力センサを利

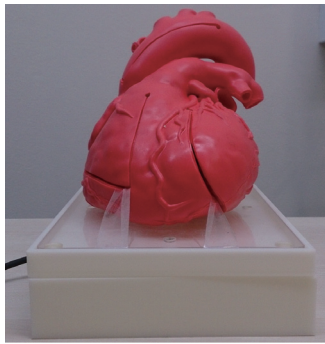


図 4 カセンサを取り付けたステージに固定された補助物体
Fig. 4 The base object fixed on a stage with a force sensor

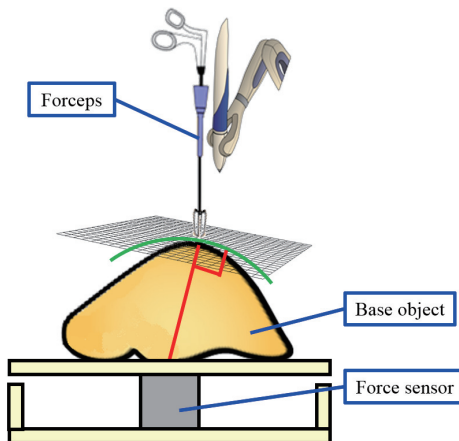


図 5 補助物体との接触判定と質点バネモデルの形成
Fig. 5 Contact determination for the base object and formation of mass-spring network model

用した。まず、図 4 に示すように、補助物体を 6 軸力センサ (Leprino, CFS018CA101U) を取り付けた台に固定する。そして、補助物体に加わる力を計測し、補助物体に接触して力センサの値が閾値以上となったときの点を侵入点としてプロキシを設置する。また同時に接触面に質点バネモデルの形成を行なうが、このとき接触面の法線ベクトルが必要となる。そこで本システムでは、補助物体には凹みがないものを使用すると仮定して、力センサと接触点を結ぶ線を半径として補助物体を半球で近似した (図 5 参照)。仮想力計算において、この近似は補助物体に接触する度に行なわれる。そしてその半径を法線ベクトルとして接触点を中心に質点バネモデルを形成し、物体への侵入量を質点バネモデルに適用することで仮想力の計算を行なう。

3. 心拍の再現

提案システムを用いて心臓のモックアップ臓器に力覚重畳を行うことで心拍の再現を行なった。重畳する仮想力は心電図を元に生成した。まず、生体モニタ (BP-608 Evolution IICS, オムロンコーリン) を用いて心電図を取得し、正規化を行なう。図 6 に心電図の一例を示す。

次に式 (2) および式 (3) によって計算される仮想力に正

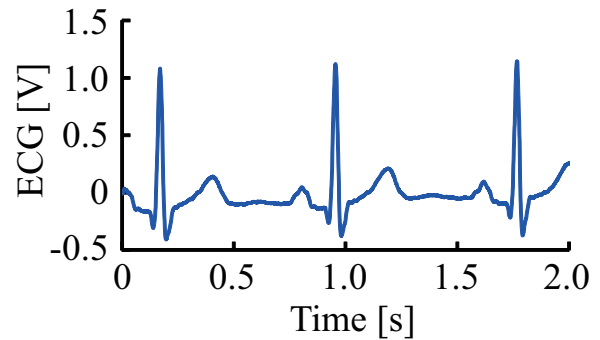


図 6 心電図
Fig. 6 Electrocardiogram

規化後の心電図を掛け合わせることによって、仮想力を時間的に変化させる。これにより、心拍の周期に合わせて時間的に変化する仮想力を生成することができる。また、仮想力の最大値はモックアップ臓器への押し込み量に依存する。以上の手法により生成した仮想力を鉗子に装着した力覚デバイスで出力し心臓のモックアップ臓器の反力に重ね合わせることで、拍動感が呈示可能なことを確認した。

4. おわりに

本稿では、力覚重畳呈示技術を用いた腹腔鏡下手術用トレーニングシステムを提案し、力覚重畳呈示に三次元補助物体を用いる場合の接触判定および仮想力計算の手法について説明した。また、心電図を元に仮想力を生成し心臓の模擬臓器に重ね合わせることで、拍動感が呈示できることを確認した。しかし、実際の拍動の力覚との比較はできていない。

そのため、今後は実際の拍動の力覚との比較を行い、よりリアリティの高い力覚を呈示するための仮想力の計算手法について検討する必要がある。また、投影方法および接触判定の方法などシステムの改良を行ない、腹腔鏡下手術トレーニングへの応用を目指す。

参考文献

- [1] Kurita, Y., Ikeda, A., Tamaki, T., Ogasawara, T. and Nagata, K.: Haptic augmented reality interface using the real force response of an object, *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, ACM, pp. 83-86 (2009).
- [2] Jeon, S. and Choi, S.: Modulating real object stiffness for haptic augmented reality, *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, Springer, pp. 609-618 (2008).
- [3] Ruspini, D. C., Kolarov, K. and Khatib, O.: The haptic display of complex graphical environments, *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 345-352 (1997).
- [4] Basafa, E. and Farahmand, F.: Real-time simulation of the nonlinear visco-elastic deformations of soft tissues, *International journal of computer assisted radiology and surgery*, Vol. 6, No. 3, pp. 297-307 (2011).