

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：31302

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13731

研究課題名(和文) 力覚提示のための柔軟物体モデリングを自動化する三次元力覚スキャナ

研究課題名(英文) 3D haptic scanner to automate flexible object modeling for force sense presentation

研究代表者

佐瀬 一弥 (Sase, Kazuya)

東北学院大学・工学部・准教授

研究者番号：20805220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：触覚VRシミュレータのための柔軟物体モデリングを自動化する力覚スキャナの開発を行った。力覚スキャナは物体にプローブを押し当てるロボットと、測定データに基づき柔軟物体モデルを生成するソフトウェアからなる。柔軟物体モデルの生成では、真の材料特性を追求するのではなく、実時間計算可能な近似モデルを用い、測定した反力履歴を最もよく再現できるモデルパラメータを最適化アルゴリズムによって決定した。開発した力覚スキャナと最適化アルゴリズムを用いて柔軟試料のモデリングを試み、2次元弾性体の押し込み時の反力を、材料特性の公称値を用いた場合よりも高精度に再現可能な有限要素モデルを生成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果を応用することにより、触覚VRのための柔軟物体モデリングを効率化させることが期待される。工学分野では手術シミュレータにおける力触覚提示の研究が盛んに行われており、本研究成果はシミュレータ構築のための有用なツールとなる。触覚VRは教育やエンターテインメントに応用が進んでいるが、触覚モデルの構築のハードルは高く、本研究成果のようなモデリング支援が実用化することにより、さらに応用を促進することが期待される。

研究成果の概要(英文)：We developed a method to automate the modeling of soft objects for haptic simulator. This system consists of a scanning robot and modeling software. The robot scans the surface of a target object using a force sensor probe. The modeling software generates soft object model from the obtained measured data based on optimization algorithm. This modeling method aims to generate an approximate model that can be calculated in real time, rather than obtaining true material properties. We tried to model a flexible sample using the developed force scanner and optimization algorithm, and succeeded in generating a finite element model that can reproduce the reaction force when a two-dimensional elastic body is pushed in.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：バーチャルリアリティ 触覚 柔軟物体 最適化アルゴリズム 有限要素法 ハプティクス

1. 研究開始当初の背景

VR 触覚シミュレータにおける，大変形を伴う柔軟物体の力覚提示が実用的となってきた．従来，柔軟物の変形計算のために有限要素モデルなどの力学モデルが必要とされる（モデルベース手法）．しかし，実世界の柔軟物体は非線形粘弾性や材料不均質性など複雑な力学特性を持つことが多く，測定誤差・モデル化誤差・離散化誤差などが蓄積し，高精度かつ実時間計算可能なモデルの作成は難しい．これに対し，物体の詳細なモデリングを行わず，測定データに基づき力覚提示を行うデータ駆動型手法が提案されている．この手法では測定データに基づく提示反力の予測により高速に提示反力を計算する．しかし，データ駆動型手法は複雑形状物体同士の面接触や6自由度力覚提示が実現されておらず，この点でモデルベース手法に劣る．そこで，モデルベース手法のように応用範囲が広く，データ駆動型手法のように実測定データの忠実な再現が可能な手法の実現が望まれていた．

2. 研究の目的

本研究ではデータ駆動型手法のようなデータ収集に基づき，モデルベース手法で測定データによく適合する反力を生成することに焦点を当てる．すなわち，実際に力覚提示の対象となる物体を，様々な方向から触れた際の力覚データを記録し（力覚スキャン），それに基づいて有限要素モデルを構築する（図1）．本研究の特徴として，物質の正確な材料特性同定を放棄する．すなわち，最終的に使用する力学モデル（しばしば実時間計算が求められるので，例えば，計算コストの低い定ひずみ要素を用いたメッシュなど）を予め設定し，最適化アルゴリズムによってモデルのパラメータを決定する．この際，選ばれた材料特性が現実とかけ離れていたとしても，力覚提示が測定データをよく近似するものであればよいと考える．これにより，モデルベース手法で必要となる材料試験等の省略を狙う．このような方法を実現するために，本研究では（1）力覚スキャンを自動的に行うハードウェア（力覚スキャナ）の開発，（2）測定データを用いた最適化アルゴリズムによるモデル生成手法の開発を目的とする．

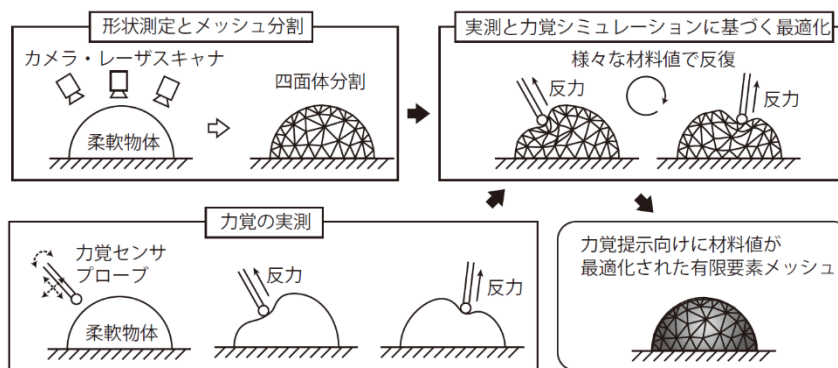


図1 力覚スキャンと最適化に基づくモデリング

3. 研究の方法

(1) 力覚スキャナの開発

力覚センサプローブを搭載した3軸自動テーブルを作成する．PCの指令により物体表面の反力分布を走査し，力覚スキャンを可能とする．また，より柔軟な方法としてモーションキャプチャ（MoCap）システムを用いた手動の力覚スキャンも検討する．

(2) 測定データに基づくモデル生成手法の開発

力学モデルは形状モデル（四面体メッシュ）と材料パラメータ（要素ごとの弾性など）によって表される．本研究では形状モデルは光学的計測に基づき，既存のメッシュ生成ソフトを用いて四面体メッシュを生成する．材料パラメータは記録した力覚データに基づき，最適化アルゴリズムによって決定する．最適化の決定変数は，主に各有限要素の材料特性である．例えば，静的線形弾性体モデルのヤング率を対象として考えると，決定変数は $e = \{E_1, E_1, \dots, E_n\}$ (n は要素数) となる．力覚スキャンでは，力覚センサプローブで物体表面を様々な方向から押し込み，その時のプローブ位置 p に対し，柔軟物体からの反力 $f_{real}(p)$ を記録する．このような押し込み操作と同様の力学挙動を再現可能なシミュレータを構築し，材料パラメータ e に対する反力 $f_{sim}(p, e)$ を計算可能とする．この時，次式のような最適化問題が考えられる：

$$\arg \min_e \sum_i |f_{real}(p_i) - f_{sim}(p_i, e)|^2$$

ここで， p_i は力覚記録時のサンプル i におけるプローブ位置を示す．これを解くことでモデルのパラメータを決定する．

4. 研究成果

(1) 力覚スキャナの開発

図2に力覚スキャナのセンサプローブの外観を示す。図2左は三軸直交ロボットの手先にプローブを搭載した状態であり、測定対象である柔軟物体を上方から押し込み測定している様子を示している(引用文献[1])。本研究では光学式モーションキャプチャシステム(MoCap)を用いて手動での測定も導入した。図2右はMoCap用光学マーカを取り付けたセンサプローブであり、手動でのデータ収集も可能である。

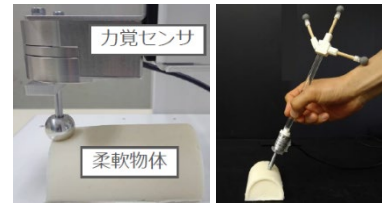


図2 力覚スキャナ
(左:ロボット 右:MoCap)

(2) 最適化力覚シミュレータの構築

本研究課題では単純な力覚シミュレータとして2次元線形有限要素法を用いた柔軟物体表現と、強制変位を入力とする力覚計算手法を導入した。また、本研究期間では最適化における利用に至らなかったものの、3次元力覚シミュレータも開発し、本研究成果の一部としてソフトウェアを公開した。同ソフトウェアはいくつかの他プロジェクトにおいて利用され有用性が示された(引用文献[2])。

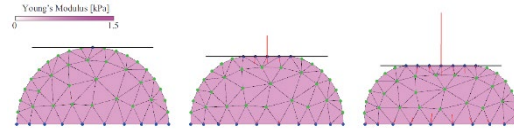


図3 2次元力覚シミュレータ。半円形の柔軟物体モデルを、黒線で示す剛体で上から押し付けた様子

(3) 測定データに基づくモデル生成手法の開発

柔軟物体モデルの生成手法を検討するにあたり、図3のような半円形状の2次元物体を市販のウレタンゲルを成形し、試料として用いた。図4に試料の上面を金属板で垂直に押し込んだ際の押し込み変位と反力の測定結果を示す。破線は材料特性の公称値を用いてシミュレーションを行った場合であり誤差が大きい。なお、高精度な材料特性同定のために材料試験を行っても、線形弾性体モデルを用いている限りモデル化誤差が生じる。前述のように力覚シミュレータでは計算速度を優先せざるを得ないのでモデル化誤差は避けられない。モデル化誤差がある中でも反力履歴の可能な限り高精度な再現を目指すため、提示反力指向の最適化により、最も測定データをうまく近似する材料特性を採用する。

前述の最適化問題を解くために、内点法による非線形計画ソルバ(MATLAB Optimization Toolbox fmincon)を用いた(引用文献[3])。このソルバでは決定変数が5次元程度であれば実用的な(局所)最適解が得られた。大域的最適解を求めるためにグリッドサーチによって最適な初期値を決定した。その結果、図5に示すように、測定データをよく近似する提示反力が計算可能であった。ここでは、決定変数を5次元程度まで削減するために、押し込み時に発生する主応力の向きが近い要素をグループ化し、これらの材料特性が同一と仮定することで実現した。このように、材料特性の公称値を用いた場合よりも提案手法の方が高精度な反力が生成可能であることが確認できた。ただし、この結果は単純な押し込み変位を最適化の入力とした場合のものであり、多方向からの押し込みには課題が残されている。

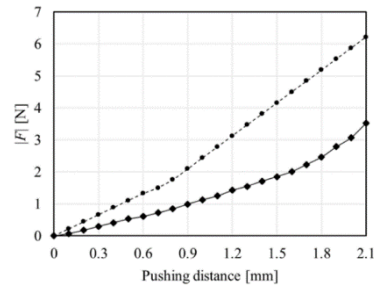


図4 反力履歴(実線:実測値 破線:材料特性の公称値を用いたシミュレーション結果)

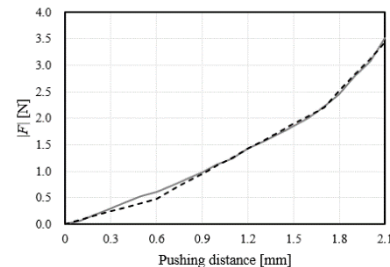


図5 反力履歴(実線:実測値 破線:最適化により決定された材料特性を用いたシミュレーション結果)

<引用文献>

- [1] 武田 賢, 鈴木 裕也, 佐瀬 一弥, “ロボットの先端接触力測定による柔軟物接触時反力データの収集とその視覚提示における利用”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 予稿集, 2P1-M09, 2020.
- [2] 佐瀬一弥, 陳曉帥, 辻田哲平, 近野敦, “柔軟物体の力覚提示に対応したゲームエンジンプラグインNamakoの開発”, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, 2020.
- [3] 佐瀬 一弥, “接触力測定に基づく材料特性推定および力覚提示の2次元数値実験による検討”, 日本バーチャリアリティ学会ハプティクス研究委員会第24回研究会予稿集, pp. 41-44, 2020.

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 佐瀬 一弥、陳 暁帥、辻田 哲平、近野 敦	4. 巻 25
2. 論文標題 柔軟物体の力覚提示に対応したゲームエンジンプラグインNamakoの開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 366 ~ 373
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.25.4_366	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10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木裕也、佐瀬一弥
2. 発表標題 測定反力と提示反力の誤差を最小化する柔軟物体モデリングの2次元数値実験による検討
3. 学会等名 第24回日本バーチャルリアリティ学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐瀬 一弥
2. 発表標題 接触力測定に基づく材料特性推定および力覚提示の2次元数値実験による検討
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会ハプティクス研究委員会第24回研究会予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田 賢、鈴木 裕也、佐瀬 一弥
2. 発表標題 ロボットのの手先接触力測定による柔軟物接触時反力データの収集とその視触覚提示における利用
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北学院大学 研究室Webページ
<http://www.ipc.tohoku-gakuin.ac.jp/saselab/>

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
---------	---------