

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04234

研究課題名(和文) 実測に基づくヒト指先の精緻な実時間変形・接触シミュレータ構築と触感情報提示

研究課題名(英文) Construction of an elaborate real-time deformation and contact simulator for human fingertips based on measurements

研究代表者

田川 和義 (Tagawa, Kazuyoshi)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：40401319

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヒト指先(複雑な表面・解剖構造を有する)が凹凸物体をなぞる際に指腹に発生するStick-Slip現象と、それと同時に凹部へのめり込み状況をも観測することが可能な計測システム(高速度カメラを2台使用)の構築と、これに基づいてシミュレーションの精緻化を行っていくための評価・改良手法(評価実験の複雑度を上げながら段階的に行う方法)の提案、構築したシミュレーションモデルの高速計算を可能とする変形・接触シミュレーション手法の考案・実装を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実世界では、手と対象物との触覚を伴う様々なインタラクションが発生する。例として、手術、触診・按摩、嚙下、陶芸、製菓等があげられる。本研究の基盤技術が確立され、精緻な柔軟手シミュレータが実現すれば、医療や、伝統工芸、遠隔ショッピングなどの様々な分野への応用が期待される。また、ヒトの触覚の知覚メカニズムはまだ完全には解明されていない。本研究にて指の計測・モデル化を進める過程で得られる知見により、メカニズム解明の一助となることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a measurement system (using two high-speed cameras) that can observe the Stick-Slip phenomenon that occurs on the human finger pad (with a complex surface and anatomical structure) while tracing rough surfaces (periodic gratings), and at the same time, can also observe the situation when the finger pad sinks into groove parts of the surfaces. We also developed and implemented a deformation and contact simulation method that enables fast computation of the simulation model.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：指 モデリング 変形シミュレーション 触覚

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

指先で物体をなぞると、指紋も含めて指先には振動（指表面の皮膚が固着と滑りを繰り返す stick-slip 現象）が発生する。これを指紋に沿って配置された触覚受容器で検出することで、ヒトは皮膚感覚を得ている。このため、現実と整合した皮膚感覚情報を生成するためには、指紋を有した指先の stick-slip シミュレーションを行う必要がある。しかしこのようなシミュレーションは、非リアルタイムでのシミュレーションであれば各所で実施されているが、その多くは触覚受容器周りの応力集中等を解析することで受容器の発火メカニズムを解明する事を目的としており、実時間での触覚情報生成を目的としていなかった。

さらに、指先の実時間 stick-slip シミュレーションを実現しようにも、シミュレーションの精度評価を行うための比較用実測データがほとんど無く（液体中での指先の計測など、限定された条件下でのデータであれば報告がされている）、皮膚感覚情報生成のためのエッセンスは何か、どこをそぎ落とすことが可能かも不明であり、モデル改良の指針を得ることさえ難しいのが現状であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、複雑な表面・解剖構造を有するヒト指先の精緻なモデル化を実測（高速度カメラ・MRI を使用）に基づき複雑度を上げながら段階的に行うとともに、構築した仮想柔軟手モデルの実時間変形・接触シミュレーションを可能とする独自手法を考案・実装することである。

3. 研究の方法

複雑な表面構造と解剖構造を持つ柔軟体であるヒトの指と他の物体との、仮想空間での精緻な実時間力触覚インタラクションを可能とする基盤技術を確立するため、4年間（コロナ禍に起因するやむを得ない事情により1年間の延長を行っている）の研究期間の間に、【I. 柔軟指の計測とモデリング】、【II. 仮想柔軟指の実時間変形・接触シミュレーション】の2つの研究項目に取り組んだ。

I では、実指の解剖構造および動的挙動を MRI と2台の高速度カメラで計測し、変形・接触のモデル化を行った。II ではI のモデルを実時間実行可能なシミュレータを考案・実装した。

4. 研究成果

【I. 柔軟指の計測とモデリング】の研究項目においては、実験用 MRI を用いて被験者2名の手指のボリュームデータを取得した。MRI のメーカ（シーメンス）の技術者にも協力を仰ぎ、最適な撮像シーケンスを設定、計測を行った。計測中に手指が動くときブレが含まれてしまうため、固定用の治具（非磁性体）を作成し、手指に取り付けて計測した。手指のボリュームデータを取得後、セグメンテーション等の処理を行い、手指の解剖構造をモデル化した。指紋については、MRI の解像度での取得は難しいことから、手作業でモデル化を行った（図1）。

その後、実指の腹側にマーカを着色（油性インクを使用）し、片面に凹凸状の加工を施した透明アクリル板を触れた状態で、爪側から一定の押下力を与えながら、透明アクリル板を接線方向に移動させ、その際の実指の動的な挙動を透明アクリル板の裏から高速度カメラで撮影する実験を行った。凹凸形状を有する透明アクリル板越しで撮影を行うため、アクリル板と空気の屈折率の違いに起因する像の歪みが問題となり、光線追跡による補正処理を行うことで解決を試みたが、指の皮膚が鉛直方向に浮いた場合の補正は困難であった。

そこで、スプレー塗料を用いて実指の腹側にごく小さなマーカを多数着色後、拭き取りを行うことで、指紋の谷の部分（皮膚小溝）に残されたマーカのみを追跡を試みた。これにより、指本来の摩擦特性をほぼ維持したままの計測が可能となるのではないかと考えた。さらに、高速度カメラのレンズをテレセントリックレンズに変更することで、透明アクリル板の凹凸表面の法線がレンズの光軸と一致する状況（例えば矩形の凹凸形状、図2）であれば、光線追跡等の補正がなくても計測が可能となる環境を整えた。

続けて、1. 空気中での凹凸面なぞり時における指腹部に生じる変位の計測精度向上のために、黒色スプレーを用いて汗腺孔のみを着色し、これをテンプレート画像とした追跡への変更（図3）、2. 計測中（なぞり中）における指のぶれを軽減するために、3D プリンターにより作成した治具を用いて、示指の爪部分からMIP 関節部分までを可能な限り固定する設計へと変更（指と治具の固定にはネイルチップとネイルチップ用両面テープ、マジックテープを使用）、3. 指先の押

下力および凹凸透明体の凹部の幅を変更した際の凹凸面なぞり時の指腹部挙動の計測の実施、4.、凹凸面なぞり時の指腹部表面のめり込みも含む挙動の計測システムへの変更を行った（図4）。その結果、本システムでは、様々な押下力における、Slip時の減衰振動の挙動をも捉えることができ、凹部の幅が広いほど指腹部表面の「なぞり方向の振動」および「凹部へのめり込み量」が大きいことがわかった（図5）。

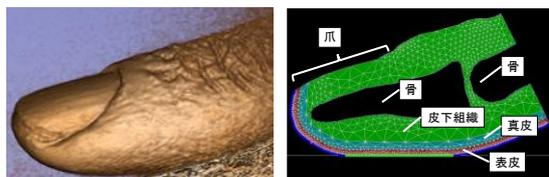


図1 MRIによる計測結果（左）とモデリング結果（右）

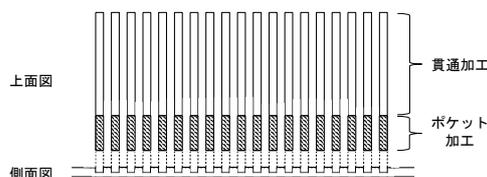


図2 凹凸透明体

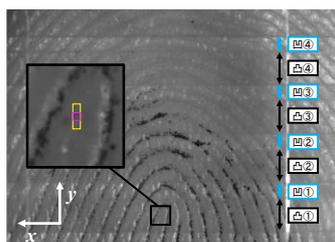


図3 追跡のテンプレートとした汗腺孔の例

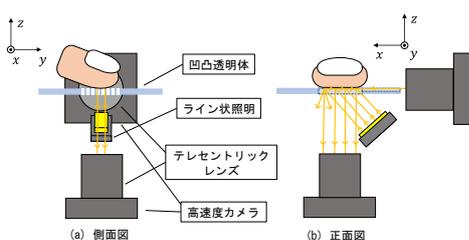


図4 計測システムの光学設計（左）と全体構成（右）

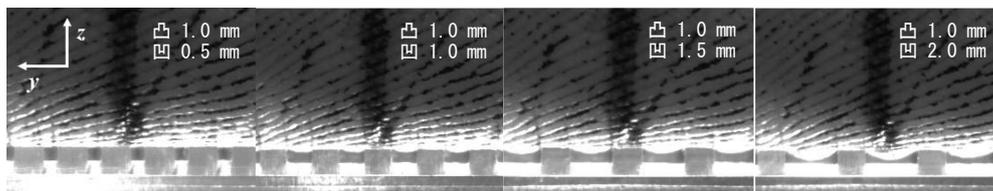
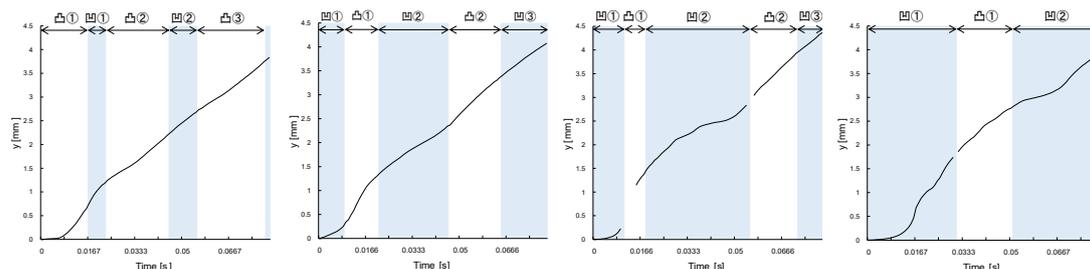
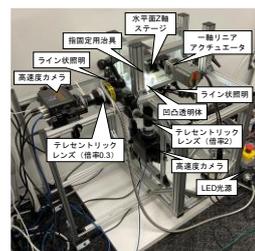


図5 凹凸透明体の凹部幅を変更した際の凹凸面なぞり時の指腹部挙動の計測結果（上段：テンプレートとした汗腺孔の変位の時間変化，下段：凹部へのめり込みの様子）

【Ⅱ. 仮想柔軟指の実時間変形・接触シミュレーション】の研究項目においては、示指の側面側から見た際の中央断面の変形・接触シミュレータを構築した。幾何学的非線形性を考慮するために、共回転系有限要素法を用いた。接触については、各ノードに非接触/固着/滑りの3つの状態を設け、有限要素法で計算された垂直抗力と接線力の大きさにより状態遷移させた。これにより、stick-slip現象を再現した。さらに、これに加えて、記録再生型のstick-slipシミュレーション手法の検討も同時に行った。

続けて、指シミュレーションモデルを段階的に精緻化する方法を考案した。まず、ステージ1はヤング率・ポアソン比のみを評価するための、接触面の静的押し込み時の計測である。ヒトが触察をする際の押付力は約30~60gであり、その範囲でのヤング率・ポアソン比の最適値を求める。ステージ2は、粘性係数を評価するための減衰振動の計測である。Stick-Slip現象による接線方向の振動が発生した際の歪み速度の範囲内での、減衰振動のパラメータを求める。ステージ3は摩擦係数の評価のための計測である。ヒトが触察をする際の押付力の範囲内での最適な摩擦モデルや摩擦係数を求める。ステージ4は、モデルおよびパラメータの総合的な評価である。このうち、本研究課題では、ステージ1と2の実験を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Tagawa, C. Kuyama, M. Yamamoto, H. T. Tanaka	4. 巻 308
2. 論文標題 A visual attention guidance approach for minimally invasive VR surgery training	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Innovation in Medicine and Healthcare	6. 最初と最後の頁 221-225
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuyoshi Tagawa, H.Tanaka N.Tani, H.T. Tanaka	4. 巻 Vol.15
2. 論文標題 Fast collision detection approach for elastic embedded objects using dual graph	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery	6. 最初と最後の頁 S62
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 1件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮澤 美,境 侑里,田川 和義
2. 発表標題 柔軟シートとエアジェットを用いた線状しこり感ディスプレイの提案
3. 学会等名 電気学会 知覚情報研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 境 侑里,田川 和義,広田 光一,井上 康之,唐山 英明
2. 発表標題 凹凸面なぞり時における指腹部表面の挙動の計測と考察 - 指固定方法の改良と凹部幅のみの変更が挙動に与える影響 -
3. 学会等名 第31回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 境 侑里, 田川 和義, 広田 光一, 井上 康之, 唐山 英明
2. 発表標題 凹凸なぞり面における指腹部表面の変位分布のマーカレス計測システム
3. 学会等名 第28回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松井 佐耶香, 田川 和義, 加藤 央昌
2. 発表標題 VRリハビリコンテンツ開発に向けたUnityを用いたHCVEプラットフォームの構築
3. 学会等名 令和4年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大石 萌佳, 加藤 央昌, 田川 和義
2. 発表標題 アバタの腕の関節角増幅が操作者の腕の身体所有感に与える影響
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門 知覚情報研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井 佐耶香, 加藤 央昌, 田川 和義
2. 発表標題 VRリハビリ開発に向けた遠隔協働環境の構築
3. 学会等名 バーチャル学会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森下 雄介, 田川 和義
2. 発表標題 腹腔鏡下胆嚢摘出術における熟練者の視線傾向分析
3. 学会等名 令和3年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤木 惣一, 田川 和義
2. 発表標題 しこりを有する柔軟物のなぞり感覚提示を可能とする小型触覚デバイスの提案
3. 学会等名 令和3年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田川 和義
2. 発表標題 手術手技の能動的な視力覚教示手法の開発と低侵襲VR手術訓練への応用
3. 学会等名 公益財団法人大川情報通信基金2021年度研究助成オンラインフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田 佳久, 田川 和義
2. 発表標題 テレセントリック光学系レンズおよび凹凸透明体を用いた指先滑りの歪み無し計測法の提案
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門 知覚情報研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田 佳久, 田川 和義
2. 発表標題 空気中における凹凸面に対する指先変形の計測システム
3. 学会等名 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木田 昌希, 田川 和義
2. 発表標題 MR画像に基づくヒト指先のモデリングと物理パラメータ同定
3. 学会等名 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長澤 海斗, 田川 和義
2. 発表標題 実指先のStick-Slip現象の計測環境の構築 - 凹凸面への対応化 -
3. 学会等名 令和2年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川 水規, 田川 和義
2. 発表標題 指先の固着・滑り制御型触覚ディスプレイの検討
3. 学会等名 令和2年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田川 和義, 大野 高椰, 山本 雅也, 小森 優, 来見 良誠, 田中 弘美
2. 発表標題 腹腔鏡下胆嚢摘出術の注視行動におけるコツの解析とそれに基づく教示
3. 学会等名 第29回コンピュータ外科学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 名波 聖矢, 田川 和義
2. 発表標題 低侵襲手術における力覚フィードバックを用いた鉗子速度の能動的かつ段階的な教示法の提案
3. 学会等名 令和2年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野 高椰, 田川 和義, 山本 雅也, 小森 優, 来見 良誠, 田中 弘美
2. 発表標題 低侵襲手術における聴覚を用いた視線の教示法とVR訓練システムへの応用
3. 学会等名 令和2年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩瀬 優一郎, 田川 和義
2. 発表標題 魚を捌く疑似体験のための埋め込み表現された仮想柔軟物の高速な切断表現法
3. 学会等名 令和2年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田川 和義
2. 発表標題 腹腔鏡下胆嚢摘出術のためのVR教示システムの開発
3. 学会等名 第30回日本シミュレーション外科学会（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田川 和義, 田中 弘美	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 576
3. 書名 VR/AR技術における感覚の提示、拡張技術と最新応用事例	

〔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
研究分担者	広田 光一 (Hirota Koichi) (80273332)	電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授 (12612)	

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