

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04398

研究課題名(和文)皮膚変形・皮膚振動の同時計測に基づく時空間的に高解像度な触覚ディスプレイの構築

研究課題名(英文) Construction of spatiotemporally high-resolution tactile display based on simultaneous measurement of skin deformation and skin vibration

研究代表者

永野 光 (Nagano, Hikaru)

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：70758127

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)：本課題では、人の触知覚に対する皮膚感覚と深部感覚の複合的な寄与に着目し、複数の情報の同時計測の実施と、その知見を利用した複合的な情報提示による触覚再現手法を構築した。素材をなぞる際に指先皮膚で発生する高周波振動、なぞり時の指先速度、素材と指先の間で発生する接線力および法線力を同時計測可能なシステムを構築し、計測された値から抽出した特徴量間の関係をモデル化した。また、皮膚感覚情報としての振動触覚と、深部感覚情報としての力を複合的に伝送可能なシステムを開発し、それを用いた評価実験を実施した。その結果、多様な触感の伝送において適切な動作と提示情報の組み合わせが重要であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時空間的に高解像度な触覚ディスプレイは、高い臨場感を有するVRシステム、手術・触診シミュレータ、高度な遠隔操縦支援システムなどに貢献し得る重要な要素である。触覚は複数の感覚(深部感覚と皮膚感覚)の統合によって知覚される複雑な感覚であり、本研究の成果は、深部感覚と皮膚感覚を複合的に再現する手法を構築することで高い臨場感を達成するというエンジニアリング的な貢献を有するとともに、触覚がどのように統合されて知覚されるのかという人の知覚メカニズム解明に利用するというサイエンス的な貢献を有する成果である。

研究成果の概要(英文)：This project focused on the combined contribution of cutaneous and kinesthetic sensation to human tactile perception, and developed a method to reproduce tactile sensation using the findings based on simultaneously measurement of multiple information. We constructed a system that can simultaneously measure the high-frequency skin vibration, tangential and normal forces, velocity when tracing a material, and modeled the relationship between the features extracted from the measured values. We also developed a system that can transmit vibration tactile sensation as cutaneous information and force as kinesthetic information in a composite manner, and conducted evaluation experiments using the system. As a result, it was shown that the combination of appropriate motion and presentation information is important for the transmission of various tactile sensations.

研究分野：ハプティクス

キーワード：ハプティクス 触覚ディスプレイ 触覚センサ 遠隔操縦

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人は硬軟感や粗さ感などの多様な感覚の違いを把握することができ、また、それらを利用することで道具操作などの巧みな作業を実現している。近年、仮想・遠隔環境での指による物体操作やインタラクションの実現に向けた様々な触覚ディスプレイが数多く報告されている。しかし、触覚を高い解像度で提示することは難しい。これに対して、本課題では、触覚に対する皮膚感覚と深部感覚の複合的な寄与に着目し、複数の情報の同時計測の実施と、複合的な情報提示手法の構築が、高い解像度での触覚再現に貢献すると期待している。

2. 研究の目的

はじめに、計測に関わる研究として、人が素材の触覚を知覚する際に行うなぞる動作に着目し、なぞり時に指先皮膚で発生する高周波振動、なぞり時の指先速度、素材と指先の間で発生する接線力および法線力を同時計測可能なシステムを構築し、計測された値から抽出した特徴量間の関係を調査する。

つぎに、再現に関わる研究として、皮膚感覚情報としての振動触覚と、深部感覚情報としての力を複合的に伝送可能なシステムを開発し、それを用いた評価実験を実施する。素材の粗さ感と硬軟感という2種の触覚の知覚に着目し、それらの知覚において、振動触覚と力覚のいずれかの再現、もしくは、2種の複合的な再現のいずれが感覚の生起に重要であるのかを実験的に調査する。

最後に、応用的な研究として、仮想環境内での高い臨場感を有する触覚再現システムの構築を目指す。多数の実素材の巻取を利用した、新たな触覚提示手法とそれを利用した仮想体験システムの構築と評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 素材なぞり時の振動および力の複合的計測

高品位な摩擦感を提示する触覚ディスプレイの構築に向けて、指先皮膚表面上で計測される実際の Stick-slip 振動モデルの構築を目指す。Stick-slip 振動は法線力、なぞり速度および摩擦係数の影響を受けて変化すると予想される。そこで、法線力、なぞり速度および摩擦係数を入力とし、Stick-slip 振動の波形を出力とするモデルを構築する。提案するモデルを用いることで、仮想空間内で物体をなぞる際に、摩擦係数やなぞり速度に応じた振動提示が可能となる。そこで、皮膚振動および接触力を同時計測可能な計測システムの構築、および、計測量から抽出した特徴量間の関係の分析に基づく皮膚振動のモデル化を実施する。

(2) 振動および力の複合的伝送システムを用いた知覚的寄与の調査

遠隔操縦ロボットにおける高品質な触覚再現に向けて、振動と力の複合的な伝送システムの構築する。また、素材の粗さ感と硬軟感の2種の知覚に着目し、振動と力の複合的な伝送が粗さ感と硬軟感の生起にどの程度寄与するのかを実験的に調査する。振動のみ、力のみ、振動と力の複合、という3条件で、粗さと硬軟の異なる素材の弁別実験を実施し、いずれの条件において、弁別精度が高くなるのかを調査する。

(3) 実素材の巻取により多数の素材感提示を可能とする新たな触覚ディスプレイの構築

多数の素材の材質感を提示可能なハンドヘルド型触覚ディスプレイを提案する。多種の素材を貼り付けたテープ状接触部によって、素材をコンパクトに収納可能である。そして、VR 空間内のなぞり動作に応じて対象素材の切り替えと相対的ななぞり運動を提示する。また、直動機構による素材の上下によって接触・非接触状態を提示する。そして、テープを取り替えることで様々な VR コンテンツに対応する。

4. 研究成果

(1) 素材なぞり時の振動および力の複合的計測

なぞり時の法線力および接触力を計測するため図1に示す装置を構築した。装置下部の左右に3軸力覚センサを配置し、計測実験時は上部アクリル板になぞり対象の素材を貼り付ける。また、指先皮膚で発生する Stick-slip 振動を計測するために、加速度センサを指側部に固定した。天然ゴム、布テープおよび ABS 樹脂を対象に計測し、Stick-slip 振動が発生している区間を抽出した。結果の一例として ABS 樹脂の結果を図2に示す。なぞり速度および法線力に応じて振動が変化して

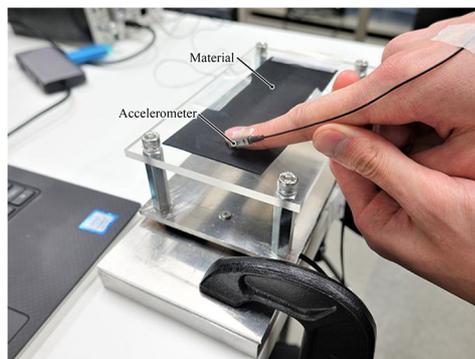


図1 振動と力の同時計測実験環境

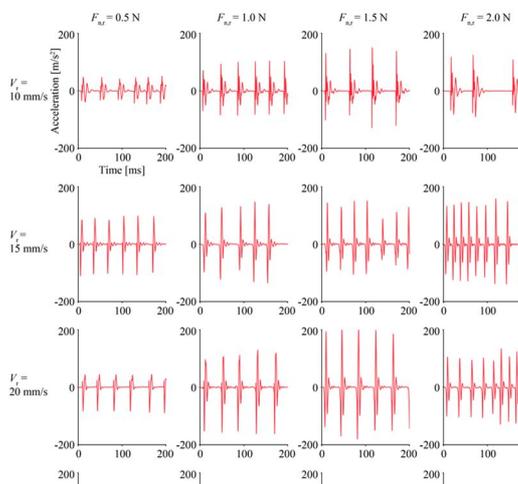


図 2 振動計測結果の一例

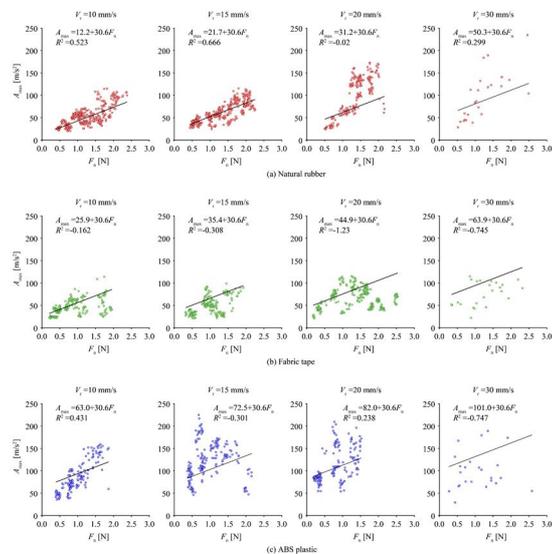


図 3 振動振幅と特徴量の関係

いることが分かる．モデル出力である振動波形の特徴量として，最大振幅，振動間隔，ピーク周波数，振動継続時間，振動減衰時間の 5 種を抽出した．その中で，特徴的な最大振幅に関する結果を示す．最大振幅と各パラメータの関係を表すモデルとして，最大振幅を目的変数，法線力，なぞり速度，動摩擦係数を説明変数とする多重回帰モデルを構築した（図 3）．モデルの当てはまりの良さを表す決定係数を求めたところ，なぞり速度が 10.0，15.0 の条件では，モデルは元のデータを良く表現しており，なぞり動作に応じた再現の精度が高いことを示している．一方，20.0，30.0 の条件では，モデルの精度は高くない．元のデータの点群はなぞり速度に応じて傾きが変化する傾向がみられるが，モデルの各説明変数の項が独立であるため，関数の変化率がなぞり速度の条件によらず一定である．このため，精度が高くない条件が存在すると考えられる．これは各説明変数がそれぞれ独立ではなく，影響し合うことを示唆している．したがって，各入力の変成項を加えるなどの改良が必要であると考えられる．また，今回のモデルでは，それぞれの項は全て 1 次としたが，摩擦係数との関係に関してそれを支持する知見は不足しているため，この点についても改良の余地が存在する．

(2)振動および力の複合的伝送システムを用いた知覚的寄与の調査

遠隔ロボットを介した高い臨場感を有する触覚伝送を実現するため，力と振動の複合的な伝送を可能とするシステムを構築した（図 4）．ロボット側には力覚センサと加速度センサを配置し，それらを介して取得した力と振動の情報をそれぞれ，オペレータ側に力覚インタフェースおよび振動アクチュエータを介して提示する．

このシステムを用いた実験の結果の一例として，粗さの異なる 4 種の素材の弁別実験の結果を図 5 に示す．振動提示，力提示，複合提示の 3 種の条件における弁別正答率を示している．粗さの大きな素材 2 種（#30，#240）においては，力だけの提示に対して複合提示における正答率が有意に高いことが示された．また，有意差は見られなかった結果もあるものの，全体的な傾向として，複合的な提示によって正答率が向上する傾向が見られる．この結果は，力と振動のいずれもが粗さの知覚において重要であり，それぞれは粗さの知覚において異なる役割を持つことを示唆している．硬軟感についても，力のみと複合提示の 2 種で比較実験を実施しているが，こちらの実験では，複合提示による弁別性能の向上は見られず，知覚対象によっても，振動と力の寄与は異なることが示唆された．

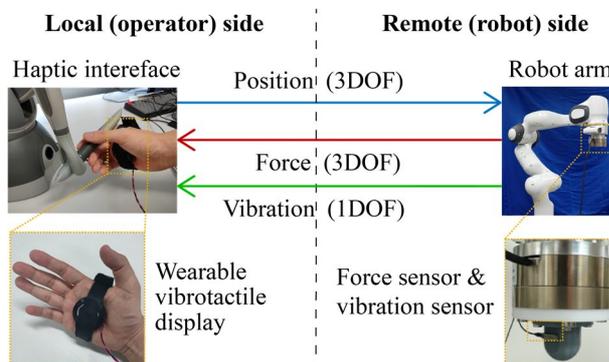


図 4 振動と力の複合的伝送

(3)実素材の巻取により多数の素材感提示を可能とする新たな触覚ディスプレイの構築

図 6 に製作した触覚ディスプレイを示す。素材を巻いていない状態での装置の重量は 475 g である。テープの移動方向は横方向とした。これは、直感的にも、指で物体をなぞる際は横方向が自然であると考えられるためである。また、自由に素材をなぞり、その移動方向や速度を計測した研究では、縦よりも横方向のなぞり運動をした試行の方が多かったことから妥当であると考えられる。テープの巻き取り・巻き出し機構について、下段のロータをサーボモータによって回転し、テープを巻き取り・巻き出しする。上段のプーリはシャフトに嵌められたベアリングによって、テープの移動に応じて滑らかに回転する。ベアリングはプーリとストップに挟まれて固定されている。グリップ部は、ラックアンドピニオンによる直動機構によって上下方向に 55 mm 移動可能である。左右のスライダによって、グリップ部が滑らかに昇降する。この機構は、素材と指の接触、非接触状態の提示に使用する。直動機構の駆動にもサーボモータを使用した。触覚ディスプレイの位置をトラッキングするために、持ち手の端部にトラッカーを取り付けられる構造とした。

装置の評価実験を実施した。材質感の知覚にはなぞり動作が必要であることと、装置がなぞり動作を再現することで、仮想環境でも実環境と同等の材質感を再現可能なことを調査するため、実環境で素材をなぞる場合およびなぞらずに触る場合、仮想環境で素材をなぞる場合での各素材の弁別精度を調査した。

各条件における提示された素材とサンプルを見て推測した素材の混同行列を図 7 に示す。実環境でなぞらずに触る条件では、なぞらずに触るだけでは弁別が困難と考えられる 5 種の素材(エナメル, 合皮, 不織布, フェルト, サテン生地) の内、フェルトと不織布以外の正答率が低くなった。一方、仮想環境, 実環境でなぞる条件では、全ての素材で高い正答率となった。

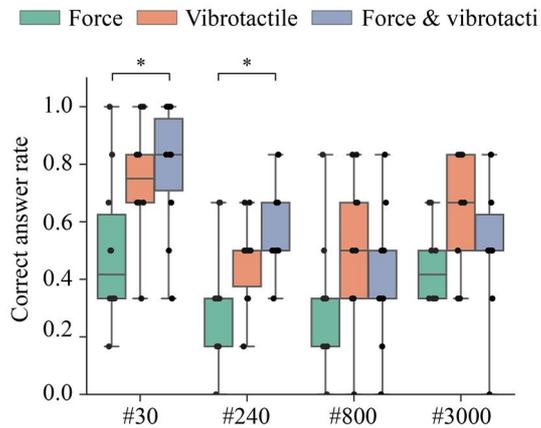


図 5 粗さの弁別正答率の比較



図 6 素材巻取型触覚ディスプレイ

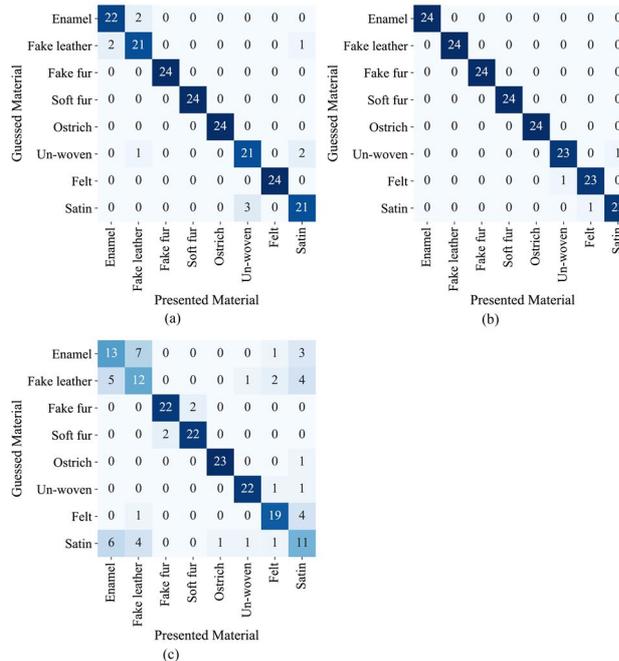


図 7 粗さの弁別正答率の比較

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 1件）

1. 著者名 Tawa Syunsuke, Nagano Hikaru, Tazaki Yuichi, Yokokohji Yasuyoshi	4. 巻 35
2. 論文標題 Extended phantom sensation: vibrotactile-based movement sensation in the area outside the inter-stimulus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 268 ~ 280
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2020.1854114	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 Takahashi Minami, Nagano Hikaru, Tazaki Yuichi, Yokokohji Yasuyoshi	4. 巻 4
2. 論文標題 Effective haptic feedback type for robot-mediated material discrimination depending on target properties	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Virtual Reality	6. 最初と最後の頁 1070739
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frvir.2023.1070739	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西野智貴, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 事前動作との類似性に基づき推定した目標軌道への力覚的追従支援
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 前園克哉, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 摩擦感提示に向けた指先皮膚振動の計測と分析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神田大河, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 ベルト型振動子アレイを用いた複数物体の位置情報提示-同時に知覚可能な物体数の調査-
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田和隼輔, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 広範囲での物体移動感を提示するためのファントムセンセーションの拡張
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田原幹久, 永野光, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 6自由度パラレルリンク機構を用いた指先装着型触覚ディスプレイの設計と試作
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下祐樹, 永野光, 佐瀬一弥, 昆陽雅司, 田崎勇一, 横小路泰義
2. 発表標題 吸引触覚・力覚統合ディスプレイを用いた硬軟感知覚における皮膚感覚と深部感覚の寄与の調査
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神田 大河, 永野 光, 田崎 勇一, 横小路 泰義
2. 発表標題 知覚強度に基づくキャリブレーションが多点振動刺激による二次元位置情報提示に及ぼす影響の調査
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前園 克哉, 永野 光, 田崎 勇一, 横小路 泰義
2. 発表標題 実素材の巻取・巻出によって多数の素材の材質感を提示可能な触覚ディスプレイの試作
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 南海, 永野 光, 田崎 勇一, 横小路 泰義
2. 発表標題 遠隔操縦ロボットののための力覚および振動触覚フィードバックシステムの構築と評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022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
---------	---------