

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H05875

研究課題名（和文）同調型ロボットハンドのための電氣的触覚リンクの形成

研究課題名（英文）Development of Electrical Tactile Link for Cooperative Robotic Hand

研究代表者

吉元 俊輔 (Yoshimoto, Shunsuke)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：00646755

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,800,000円

研究成果の概要（和文）：遠隔ロボットハンドのための触覚インタフェースにおける機械的干渉の解決に関する新たな技術開発を進めた。特に、電氣的な計測と提示を指針とし、機械的制約のない手指の動作・力計測、神経束の電氣刺激における多自由度触覚生成、導電性材料を用いた圧力の時空間分布計測に関する技術開発を通して、同調型ロボットハンドのための電氣触覚リンクの設計論を探求した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、手指の自由な動作に基づくロボットハンドの制御とそれに伴う触覚フィードバックを可能にした。特に、指腹の触覚の空間分布を制御することで、微細な物体の把持感覚の表現が可能となった。開発した計測・提示技術は、機械的制約が極めて少なく、様々な同調型ロボットに組み込むことが可能であり、導入コストも低い。例えばロボット手術における操作感を術者の動きを制約することなく提示することができる。また、身体動作計測、圧力分布計測、触覚提示に関する要素技術については産業・医療・娯楽などへの応用展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：To overcome the mechanical interference of tactile interface for the teleoperation of robots, we developed novel electrical sensing and display technologies as follows: measurement technologies of the hand motion and contact force without mechanical interference, display technologies for multi-degree of freedom tactile sensation using electrical stimulus of the nerve fiber, and measurement technologies of spatial-temporal distribution of the pressure using conductive materials. Finally, a design theory of the electrotactile link for the teleoperation of the robotic hand was investigated.

研究分野：生体医工学，メカトロニクス

キーワード：電氣刺激 触覚イメージング 触覚フィードバック 遠隔操作 ロボットハンド

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

遠隔ロボットハンドの高精度かつ効率的な操作を実現するために、身体動作に同調した自由の高い動きと、形状や操作力を知覚可能な多自由度な触覚フィードバックの実現が望まれている。従来からも、遠隔操作ロボットのための触覚インタフェースが開発されてきたが、装置が機械的な制約をもたらし、操作性や滑らかな動作に課題があった。

一方、研究代表者らはこれまでに、電気的な手指の動作計測、電気接触抵抗に基づく力計測、神経束の電気刺激による受容器部位への触覚生成技術の開発に取り組み、電気的な手法により機械的干渉なしに計測や提示を実現できる可能性を見出してきた。本研究課題ではこれらの背景を踏まえ、遠隔ロボットハンドのための触覚インタフェースにおける機械的干渉の解決に関する新たな技術開発を進めた。

2. 研究の目的

ユーザの動作に同調して操作が可能なロボットハンドにおける、非高速な動作計測と多自由度な触覚フィードバックの実現を目標とし、(1) 手指の動作・力計測技術、(2) 神経束の電気刺激による受容器部位への触覚生成技術、(3) ロボットハンドにおける触覚情報の計測技術を培い、同調型ロボットハンドのための電気触覚リンクの設計論を確立する。

3. 研究の方法

研究目的の達成に向けて、内容を以下の4つの要素に分割することで研究を行う。

(1) 機械的制約のない手指の動作・力計測

手首の形状の電気的計測に基づいて手指の動きを推定する手法の開発に取り組み、従来の計測手法と比較することで計測システムの特長・精度・応答性を明らかにする。また、手指の動作のみならず物体に加えた力や対象物の硬さを推定する手法についても模索し、体系的な技術開発を行う。

(2) 神経束の電気刺激における多自由度触覚生成

指中節への電気刺激により指先に触覚を提示する技術について、多チャンネル電気刺激装置を作製、基本性能を調べる。また、提示される触覚の知覚位置に対して最適な電気刺激パラメータを決定する刺激調整方法について検討する。

(3) 圧力の時空間分布計測

電気接触抵抗の計測に基づき、圧力の時空間分布を可視化する技術を開発する。特に、ロボットハンドに共存させるため、薄くて柔軟かつ多様な形状に適用可能で、少ない配線で実装可能な触覚センサの電気機械設計を明らかにする。

(4) 同調型ロボットハンドのための電気触覚リンクの構築

まず、手の精巧な動きを反映したロボットハンドシステムの構築を行う。次に、ロボットハンドの指先に開発した触覚センサを搭載するとともに、推定した圧力分布を電気触覚によりユーザに提示する、触覚の伝送システムの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 機械的制約のない手指の動作・力計測

手首形状の変化からの手指の動作を推定に着目し、16チャンネルの電極から構成される装着型の電気接触抵抗計測装置を開発し、機械学習により指の関節角度を29 - 34 degで推定可能であることを示した(図1(a))。特に、従来の筋電(EMG)による推定方法よりも再現性が高いことを明らかにした。

次に、指先接触力の計測として、指の血流変化に着目した手法の開発を行った(図1(b))。提案手法では、指の中節に装着した2チャンネルの光電容積脈波計測装置により取得した脈波信号からそれぞれ8個の特徴量を抽出し、回帰モデルにより指先の三次元接触力を推定する。11種類の接触力の印加条件に対して評価を行い、印加方向と接触の判別ができる可能性を示した。

さらに、物体の硬さの計測として、指先による対象物の押下動作をデブスカメラにより捉え、ヤング率を推定する手法の開発を行った(図1(c))。提案手法では、デブスカメラで取得した指の3次元位置と、接触力に伴う爪領域の色変化の情報を解析することで変位と力の情報を取得し、ヤング率を算出する。5種類のヤング率の異なる物体に対して評価を行ったところ、0.12-5.6 MPaの範囲において誤差55%で推定できることが明らかとなった。

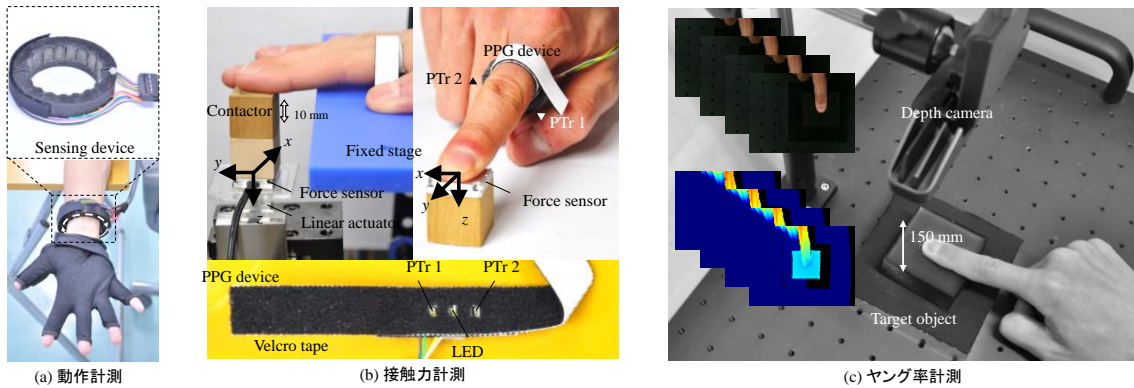


図 1 動作・接触力・対象の計測方法

(2) 神経束の電気刺激における多自由度触覚生成

神経束の電気刺激により生成される受容器部位の制御のため、 8×8 の 64 チャンネルの刺激が可能なアレイ型の柔軟な電極シートおよび電気刺激システムの作製を進めた。電極シートは指関節部の神経束を刺激するよう装着し、各電極の刺激パルス进行调整することで触覚の知覚部位を変えることができる。

研究代表者が開発した電気刺激による触覚提示手法においては、刺激した部位と異なる部位に感覚が生成されるという特長があるが、知覚位置の調整が難しい。機械的刺激と感覚を比較しながら刺激パラメータを自動調整できるように、刺激位置を指定可能なピンアレイ型の触覚提示装置を開発した。開発した刺激提示装置では、超音波モータにより駆動可能な 16 本のピンが $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ の空間に配置され、各ピン変位 3.5 mm で周波数 5 Hz までの刺激提示が可能である。これにより刺激部位を設定し、電気刺激による知覚部位との比較に利用することができる。

(3) 圧力の時空間分布計測

柔軟で多様な形状に適用可能な触覚センサの実現方法として、電気接触抵抗と逆解析技術を利用した接触圧力分布の計測手法を開発した。提案手法では、圧力分布に応じて接触状態が変化する 2 層の導電体間に電圧を印加し、検出層となる導電体の周囲に取り付けた複数の電極により電位を取得する。取得した電位に基づいて逆問題を解くことで圧力分布を推定することができる。

計測性能の評価として接触位置および圧力の計測精度について調べたところ位置に関して検出領域の 1 辺の長さの 5%、最大接触圧力の 5% 程度の精度で圧力中心の計測が可能であることが明らかとなり、従来の関連技術よりも優れた位置・圧力推定性能が得られることが示された(図 2)。特に、開発した手法は、計測性能に優れているだけでなく、電気を通す材料に電極を取り付けるだけで接触圧力分布を計測可能にする技術であり、触覚センサの自在な形状と機能の設計への貢献が期待できる。

これらの成果については特許出願を行ったほか、ニュースリリースの配信を行い、国外の Web メディアを中心に多数の掲載があった。

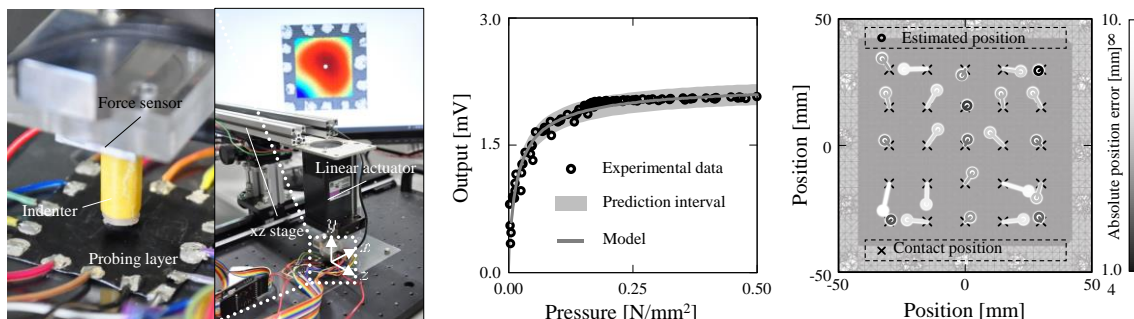


図 2 圧力分布センサの実験装置と評価結果

(4) 同調型ロボットハンドのための電気触覚リンクの構築

開発した要素技術を活用し、遠隔操作における触覚フィードバックシステムを構築した。特に、3 種類の異なる触覚伝送システムを構築し、多様な視点で手法の有用性を調査した。**広帯域多チャンネルの実現**：多チャンネルな刺激を伝送する技術として、プロジェクタ光を利用して触覚刺激を伝送する方法について検討を行った(図 3(a))。特に、振動刺激分布の再現のため、駆動信号となる光のエンコード方法を探索し、 $40\text{--}1000 \text{ Hz}$ の広帯域な刺激信号を

送信可能であることを示した。

複合的な刺激の実現：示指と母指に力を与える把持型の力覚提示装置と、空気圧により接触面積を調整可能なエンドエフェクタを開発し、マルチモーダルな触覚刺激が可能な力触覚提示装置を実装した(図3(b))。特に、装置と皮膚の接触部に開発した圧力計測技術を導入することで力と接触面積のフィードバック制御を実現し、高品質な刺激提示のための設計を検討した。開発したシステムでは、ユーザの動作により操作可能な遠隔ロボットと対象物の干渉に基づき、柔軟物体の触感提示が可能であることを確認した。

機械的制約の解消：3Dプリントしたロボットフィンガーに導電性塗料を塗布することで前述の触覚センサを実装し、圧力分布の計測を可能にした(図3(c))。次に、電気触覚提示技術と統合することで、加えた圧力分布に応じた触覚刺激を提示可能にした。特に、計測した分布に応じて、電気触覚提示における刺激パラメータを設定することで、所望の提示位置に感覚が生成されることを示した。最後に、身体動作に同調したロボットハンドに統合し、電気触覚リンクの実装を行った(図3(d))。

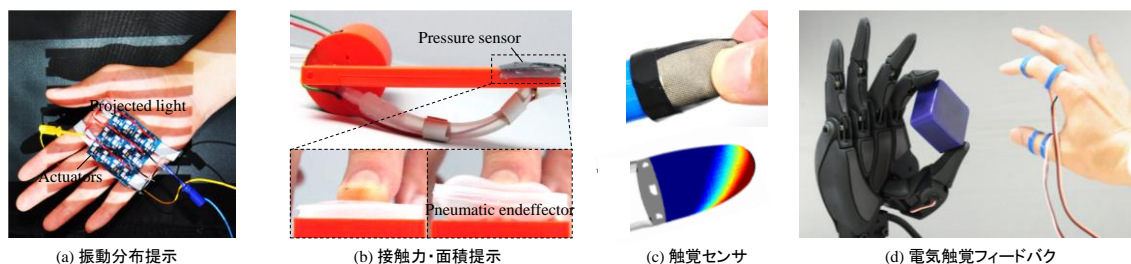


図3 触覚伝送システムの実装

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- [1] S. Yoshimoto, Y. Kuroda, and O. Oshiro, Tomographic Approach for Universal Tactile Imaging with Electromechanically Coupled Conductors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. XX, No. XX, pp. XX-XX, 2018 (in print), 査読有.
- [2] S. Yoshimoto, S. Hinatsu, Y. Kuroda, and O. Oshiro, Hemodynamic Sensing of 3D Fingertip Force by using Non-pulsatile and Pulsatile Signals in the Proximal Part. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, Vol. 12, No. 5, pp. 1155 - 1164, 2018, 査読有.
- [3] S. Yoshimoto, Y. Kuroda, and O. Oshiro, Estimation of Object Elasticity by Capturing Fingernail Images during Haptic Palpation. IEEE Transactions on Haptics, Vol. 11, No. 2, pp. 204-211, 2018, 査読有.
- [4] 日夏俊, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, 基節部における脈波計測を利用した指先接触力推定. 生体医工学, Vol. 55, No. 3, pp. 115-124, 2017, 査読有.
- [5] J. Kawaguchi, S. Yoshimoto, Y. Kuroda, O. Oshiro, Estimation of Finger Joint Angles Based on Electromechanical Sensing of Wrist Shape. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 25, No. 9, pp. 1409-1418, 2017, 査読有.
- [6] J. Kawaguchi, S. Yoshimoto, M. Imura, O. Oshiro, Finger Joint Angle Estimation from Electrical Contact Resistance. Electronics and Communications in Japan, Vol. 100, No. 6, pp. 35-44, 2017 (translated from Denki Gakkai Ronbunshi), 査読無.

[学会発表] (計12件)

- [1] 坂口真央, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, “柔軟感再現のための指腹部の接触面積と力の計測と提示手法の検討”, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会講演論文集, pp. 157-161, 大阪, 2019.
- [2] 北川湧麻, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, “可視光通信による触感再生のための広帯域な振動提示”, ハプティクス研究会, pp. 7-10, 高松, 2018.
- [3] 北川湧麻, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, “可視光通信による触感再生のためのシステム同定”, 日本バーチャルリアリティ学会大会, 22A-3, 仙台, 2018.
- [4] S. Yoshimoto, Y. Kuroda, O. Oshiro, EmBIT: Electromechanical Boundary Impedance Tomography for Soft Tactile Sensor. In Proc. IEEE Haptics Symposium, 134, San Francisco, USA, 2018.
- [5] 北川湧麻, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, “プロジェクタ光による多チャンネル触刺激装置の制御”, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会講演論文集, pp. 27-31, 吹田, 2018.
- [6] 山田恵之, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理, “高精細凹凸提示のための電気的変位計測に

基づく超音波モータ制御”, 力触覚の提示と計算研究会, 名古屋, 2017.

- [7] S. Yoshimoto, S. Hinatsu, Y. Kuroda, O. Oshiro, Hemodynamic Sensing of 3D Fingertip Force using PPG device on Proximal Part. In Proc. IEEE International Engineering in Medicine and Biology Conference, 3289-3292, Jeju, Korea, 2017.
- [8] S. Yoshimoto, Y. Yamada, Y. Kuroda, O. Oshiro, Compact and Largely Displaceable Tactile Shape Display using Arrayed Ultrasonic Linear Actuator. In Proc. IEEE World Haptics Conference, Work In Progress, 5:1-2, Fürstenfeldbruck, Germany, 2017.
- [9] 山田恵之, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城 理, “形状ディスプレイのための超音波リニアモータによる ピン変位制御の応答性評価”, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会講演論文集, pp. 33-37, 吹田, 2017.
- [10] 日夏俊, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城 理, “指先接触力の推定性能向上のための高相関な脈波特徴量の検討”, パターン計測シンポジウム, vol. 98, pp. 1-8, 徳島, 2016.
- [11] 日夏俊, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城 理, “基節部における脈波計測を利用した指先接触力推定”, 生体医工学シンポジウム, p. 96, 旭川, 2016.
- [12] 川口純輝, 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城 理, “手首形状の電気機械計測に基づく指運動の推定”, 日本生体医工学会大会, vol. 54, Supp. 1, p. 135, 富山, 2016.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 触覚センサ

発明者: 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 大城理

権利者: 大阪大学

種類: 特許

番号: 2018 - 054266

出願年: 2018/3/22

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

該当なし

〔その他〕

ホームページ等

触覚センサの開発に関するニュースリリース

https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20181114_2

6. 研究組織

(1) 研究分担者

該当なし

(2) 研究協力者

該当なし