

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：32508

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12113

研究課題名(和文) 技能伝承のための分散協調訓練での深層学習による触力覚再現の個人化と再校正への対応

研究課題名(英文) Personalization and recalibration of haptics interaction by deep learning in distributed collaborative training for skill transfer

研究代表者

浅井 紀久夫 (Asai, Kikuo)

放送大学・教養学部・教授

研究者番号：90290874

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)：体感的インタラクションを通して触力感覚を共有できるようにするため、触力覚インタフェースの再現精度を向上すると共に、対象を、視覚的臨場感を伴って提示するホログラフィの色再現特性を改善した。触力覚インタフェースでは、深層学習の手法を用いて筋電信号から手指動作や力の入れ具合を推定する精度を改善するため、センサの数を増やしたりモデルへの入力の変換方式を変えたり転移学習を適用したりした。提示システムの視覚的臨場性では、ホログラフィ再生像の色域を拡大することにより画質を改善した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

触力感覚を遠隔で共有する場合、その通信に伴う遅延が触力感覚の再現精度を低下させる。本研究はこの問題に、筋電信号が動作に先行するという特性を利用する。深層学習の手法が筋電信号に基づく手指の動きや力加減の推定において非固有特徴を捉えることにある程度機能したことはこの仕組みの有用性と応用可能性を示唆する。また、視覚的臨場性においてホログラフィ再生像の色再現性の向上はホログラフィのカラー再生によるディスプレイの普及へと一歩近づいたと言える。

研究成果の概要(英文)：In order to share tactile sensations through bodily interaction, we improved the reproducibility of the haptic interface and improved the color reproduction characteristics of holography, which presents objects with a sense of visual presence. In the haptic interface, in order to improve the accuracy of estimating finger movements and force input from myoelectric signals using deep learning techniques, we have increased the number of sensors, changed the conversion method of input to the model, and changed the transfer method. I applied my learning. For the visual realism of the presentation system, the image quality was improved by expanding the color gamut of the holographic reconstruction.

研究分野：ヒューマンコンピュータインタラクション

キーワード：触力感覚 立体像表示 畳み込みニューラルネットワーク インタフェース 情報可視化

1. 研究開始当初の背景

(1) 情報通信技術の導入によって製造過程の省力化や自動化が進み、モノづくりに必要な技能の継承が難しくなっている。また、技術者の高齢化と若年者の不在に伴って技術の継承がなされないまま、その技術が失われる事態が起きている。現場でモノの製造(加工、組立、検査など)に直接携わる従業員がいる企業に行ったアンケートでは、大多数の企業が技能継承を重要であると認識しているが、技能継承がうまくいっていると回答したのは半数弱にとどまる、という結果が出ている[1]。こうした事態を受け、技術としての知識である形式知をデータベース化し、その知識の共有や手続きをマニュアル化することによって直接見聞きする機会の減少が補完されてきた。実際、再雇用や勤務延長で高齢従業員に継続勤務してもらったり、継承すべき技能の見える化(テキスト化、マニュアル化など)を図ったりしている。しかし、職人技のような微妙な制御を伴う作業や操作では感覚情報が重要であり、主観的な経験や体験に基づく知識である暗黙知を扱う必要がある。

(2) 暗黙知は一般に長い間の経験や体験によって獲得され、表現が難しく、言語化しにくい情報であり、伝承が起こりにくい。暗黙知には、質的把握を行う判定型、量的把握を行う加減型、感覚機能に依存する感覚型、思考過程を含む手続き型といった種類があるとされる[2]。判定型暗黙知では事態を診断したり予測したりするもので、判定に必要な要素を明確にすることで継承可能である。加減型暗黙知ではある状態に対する行動を起こすときに必要な量的把握を行うもので、指標となる基準を確立することが重要である。感覚型暗黙知では実際に見たり触ったりした感覚に依存するもので、純粋な感覚や洗練された感性を獲得できるようにする。手続き型暗黙知では作業に含まれる過程の把握と制御、思考を行うもので、一連の物語や文脈として捉えることで細かな手続きを一つ一つ記述することは避けられる。

(3) こうした暗黙知を獲得するには、熟達者や熟練者を伴って専門的な訓練や実践的な経験を積むのが効果的であるが、その機会が十分に提供されていない。そこで、特に感覚型暗黙知に対応するため、熟達者と学習者が感覚情報を共有することによって技能伝承を行う訓練環境を整備したい。本研究課題では学習者が技能を習得するために、それに習熟した熟達者の動作や操作を触力感覚として体感できるようにする。

2. 研究の目的

(1) 体感的インタラクションを通して感覚情報を交換できるようにするため、触力感覚を再現するインタフェースを構築する。触力感覚を忠実に再現するには、遠隔通信による遅延を低減する必要がある。そのために、動作に伴う筋電信号を取得し、動作や力の入れ具合を推定することで触力覚インタフェースの制御を動作に先行するようにする。これによって触力覚インタフェースのフィードバック制御を緻密に行い、触力感覚を忠実に再現する。

(2) 体感的インタラクションを感覚情報として共有するためには、視覚的臨場感を高めることが重要である。視覚的臨場感を高める技術要素として映像の精細度のほか、3次元情報を立体的に提示する仕組みがある。ここでは、3次元情報を立体的に提示する仕組みを採用し、体感的インタラクションの対象を視覚的な臨場感を伴って提示するディスプレイを開発する。

3. 研究の方法

(1) 手指の動作に伴う筋電信号に基づいてその動きを高精度に推定する仕組みを構築する。動作に伴う筋電信号を複数の筋電センサによって取得し、そのときの動作や力の入れ具合を赤外線センサによって並行して記録する。この筋電信号とその動作や力の入れ具合との関係を機械学習の手法により学習し、動作や力の入れ具合を高精度に推定できるようにする。具体的には、筋活動と作業・力加減の間の関係を学習するモデルとして畳み込みニューラルネットワークを利用する。

(2) 視覚的臨場感を高めるため、3次元情報を立体的に提示するディスプレイとしてホログラフィを利用する。ホログラフィをカラーで再生する方法を構築し、その再生像の表示を高精細化したり色再現性を改善したりすることによって再生像の画質の向上を図る。

4. 研究成果

(1) 畳み込みニューラルネットワークを利用して筋電信号から手指の動作を推定するには筋電信号を画像に変換し、それを入力として画像認識のタスクとして学習する手法がよく用いられる。筋電位は、筋を収縮させる電気信号が筋に到達して測定される[3]。つまり、筋電位信号は筋を収縮させる刺激が筋に到達して、筋活動が開始され力の発生を経て減衰する。このため、表面筋電位信号には動作やその意図を表す情報が含まれ、これらに特徴的なパターンが現れる。こうした特徴的なパターンをうまくとらえれば、動作の推定が可能になると考えられる[4]。そこで、手指の動作に伴う筋電信号に基づいてその動作を推定する仕組みを構築した。手指の動作に伴う筋電信号を 2 次元の配列に変換して画像を生成した上で、これを畳み込みニューラルネットワークの入力とした。出力として手指の動作を設定し、画像認識のタスクとして学習することで手指の動作を推定するモデルを構築した。

これまでは手指の動作に基づく筋電信号を 8 個のセンサから取得していたが、センサの数を 16 個に増やして筋電信号を取得することとした。これは、多くのセンサを搭載したデバイスで高密度計測を行うと、ジェスチャ認識において高精度が得られたという結果を受けた措置である[5]。これと並行して手指の形状を赤外線センサから得られる骨格データとして取得し、筋電信号に対する教師信号として記録した。これまでと同様、骨格データの記録はその時点での手指の状態そのものではなく、手指の形状の時間変化による関節の動きに対して行った。ある時点での筋電信号はそのときの手指の状態を表すのではなく、その動きを表している点で筋電信号の発生メカニズムに整合したデータとなっている。

データはフレームを単位として記録される。このフレームを構成する信号の長さは変更可能であり、200 ms 程度に設定している。手指形状を細かく記録するにはフレーム長を短くしたいが、あまり短くすると信号の特徴が含まれず学習がうまくいかない。手指の形状の推定を単純化するため、手のひらの開閉判定に限定してラベルを作成した。学習を行う際の訓練データはこの手のひらの開閉ラベルと、複数チャンネルの筋電信号とを組で記録される。手のひらの開閉判定は各指の角度変化によって自動的に行われる仕組みとした。ただし、この開閉判定を間違う可能性があり、必要に応じて手動で誤判定の削除ができるようにした。

筋電信号を記録する際、2 次元の配列に変換し画像を生成する。どのような変換がよいのかはよくわかっていない。そこで、変換方法として筋電信号の振幅、周波数変換、ウェーブレット変換の 3 種類を用意し、分類の汎化性能に影響するかを検証した。筋電信号の振幅では左上から右下に順に振幅値を配置し画像を作成した。周波数変換ではフーリエ変換の係数を順に並べ、画像を作成した。ウェーブレット変換では横軸に時間、縦軸に周波数を取り、その変換に基づいて濃淡画像を作成した。濃淡画像はフレーム毎に生成され、一連の筋電信号に対する訓練データは複数のチャンネルを並べて配置することによって形成される。この画像が畳み込みニューラルネットワークの入力となる。

手指の形状の学習・推定に加え、手指による把持に伴う圧力の学習・推定を実施した。このために、筋電信号から把持の圧力を予測するモデルを構築した。圧力センサを手の指に配置して、把持した際に指にかかる圧力を電気信号として取り出す。ここでは圧力センサとしてフィルム状のセンサシートを利用し、これに加わる圧力変化を電気信号の系列として記録する。これによって、様々な物体の接触圧力を測定できる。学習モデルとして系列データを学習する LSTM (long-short term memory) を使用したが、結果として学習に時間がかかる割に汎化性能はよくならなかった。

畳み込みニューラルネットワークを使って筋電信号から手指の動きを予測するため、手指の動作に伴う筋電信号と、そのときの動きを赤外線画像から抽出した骨格データとを対応づけて訓練データとした。畳み込みニューラルネットワークの入力画像として筋電信号をどのように変換するかは自由度がある。また、腕の周りに配置した筋電センサからの信号について複数のチャンネルをどのように組み合わせるかが適切かはよくわかっていない。

そこで、まず、信号の振幅を時系列に並べたもの、周波数変換したもの、ウェーブレット変換したものを濃淡分布として 1 つの画像に変換した。これらの変換に基づく画像を入力としてモデルの汎化性能を比較した結果、ウェーブレット変換したものの汎化性能が最も高くなることが示された。このとき、筋電センサのチャンネル毎に取得された信号を正方形に成形し、これを順に配置して長方形に組み合わせていた。そこで、次に、成形形状やその組合せ方を変更し、同心円状の画像を構成してみた。その結果、汎化性能に大きな違いは見られなかった。これは、どの画像にも同じように、学習に必要な情報が埋め込まれているためだと考えられる。

畳み込みニューラルネットワークを適切に学習し高い汎化性能を得るには一般に、大量のデータセットが必要である。しかし、ここで扱う筋電信号とその手指形状を組としたデータセットは大量に存在するわけではないし、また、そのようなデータセットを大量に用意することは非現実的でもある。現に、筋電信号から手のジェスチャを認識する際に転移学習の手法を適用し、データセットの問題に対応しようとした研究がある[6]。しかし、この研究では筋電信号とその手指形状を組とした既存データセットを使って事前学習モデルを構築しているため、一般物体認識の問題に適用されたデータセットの規模に比べると圧倒的に小さい。

そこで、一般物体認識の大規模データセットを使った事前学習モデルに基づいて、筋電信号から手指形状を推定するタスクに転移学習を適用した。その結果、どの変換方式の画像入力に対してもある程度機能したが、実用に耐えうるような十分な汎化性能を得るには至らなかった。これは、訓練データと検証データとの特徴が異なっており、学習モデルが対象の特徴を十分に捉えることができていないためだと考えられる。

畳み込みニューラルネットワークには筋電信号を画像に変換して入力していた。そのために一定期間の筋電信号を切り出し、固定長のデータに対して変換処理を行っていた。しかし、手指動作の速さにばらつきがあると、推定精度が低下することが予想される。筋電信号はそもそも時系列データであり、学習モデルとして系列を学習する再帰型ニューラルネットワークや **LSTM** を採用することもできる。系列学習モデルの学習には時間がかかるため、これまで **LSTM** の処理負荷の軽減策を考案してきた。しかし、手指による把持に伴う圧力の学習及び推定に **LSTM** を利用したところ、学習に時間がかかる割に汎化性能はよくならなかった。

筋電センサの **16** チャンネルに対して筋電信号の **MAV (mean absolute value)** 及び **RMS (root mean square)** を入力として、把持した際に指にかかる圧力の圧力センサ出力値を出力とした。ネットワークの構成は次のように構成した。筋電センサの複数チャンネルを配列データとして入力、正規化、**LSTM** 層、**softmax** 活性化関数、全結合層、出力層である。**LSTM** 層は **LSTM** セルで構成され、一般的な忘却ゲート、入力ゲート、出力ゲートを持つ。今回は系列データを学習するために **LSTM** 層を考えたが、特徴抽出機能として畳み込み層を組み合わせたり [7]、**attention** 機構を組み入れたり [8] する試みもあり、そうした仕組みを導入することで汎化性能を改善できる可能性がある。

手指による把持に伴う圧力は、圧力センサを用いることで物体表面に加わる圧力変化を電気信号として測定される。ここで利用した圧力センサは直径約 **15 mm** の領域にかかる圧力を、**0.3 ~ 9.8 N** の測定レンジに対して $\pm 5\%$ の精度で検出する。電気信号はシングルボード・コンピュータに入力され、**TCP/IP** 通信により外部コンピュータに時系列データとして伝送される。**1** つのシングルボード・コンピュータには入力インタフェースが **2** つあり、圧力センサを **2** つ入力できる。実際の利用環境では把持する物体の両側に圧力センサを一つずつ設置し、**2** つ一組でその物体の把持に伴う圧力を測定することができる。また、この入力インタフェースは、サンプリングレート **100 data/秒** でデータを取得する。

外部コンピュータに伝送された時系列データは筋電信号と組にしてファイルに保存される。そして、このファイル群から訓練データを作成し、**LSTM** による学習を実行することで学習モデルを構築する。

(2) 体感的インタラクションの対象を視覚的に提示するディスプレイとして、**3** 次元情報を立体的に表示できるホログラフィを採用している。ホログラフィは空間内に全方向視差を持つ立体像を提示できる。空間投影方式では空間光変調素子を用いてホログラフィ立体像を表示し、サイズの大きな立体像を広い視野で観察できる。こうした立体像の表示では高い色再現性が要求されるが、立体像のカラー化は容易ではない。立体像をフルカラーで表示するには光の三原色である赤・緑・青の各色の光に対して像再生する必要がある。波長の長い赤や緑の光に対する像再生は比較的高精度に再現できるが、波長の短い青の光に対する像再生はその画質に課題があった。これは、波長の短い光を利用すると像再生の回折角が十分得られず、結果として多点の立体形状の再生が難しいためである。再生像の色域は再生に用いる光の色度に依存するため、光源の条件をどのように設定するかが重要となる。青い光に **473 nm** のレーザ光源を用いた手法は研究されてきているが、再生像の色域を拡大するためにはさらに波長の短い青紫の光を用いる必要がある。しかし、こうした可視領域の下限となる波長のレーザ光源を用いた再生像の特性や、そのカラー再生法については十分に研究されていなかった。そこで、青の再生像の再生条件に着目し、青紫の光と緑・赤の光とを多重化した再生像の色域特性を改善する。再生像の波長が短くなると、再生像の回折効率が低下するため、高速に応答する空間光変調素子を用いることで時分割処理による多重化を採用した。この時分割多重再生では再生システムが簡略であるという利点がある。

青紫の光における再生像の特性を調べた。一般に、ホログラムに記録される干渉縞は光の波長が短くなるほど、その間隔が狭くなる。つまり、短い波長の光源を使って点密度が高く、曲線を含む複雑な形状を再生するには画素間隔が狭く、画素数の多い空間光変調素子が必要になる。時分割多重再生を行わずに点の数の限界を調べたところ、青紫の光では約 **400** 点であることがわかった。また、時分割多重再生法を適用し再生可能な点の数を確認したところ、約 **1,200** 点まで向上した。

赤・緑・青紫の各色の光で多重再生したときに表示される色度を計測した。これは次の手順で実施した。**1)** 再生像の投影位置にセンサを設置し、再生像の波長分布を取得する。**2)** 波長分布を確認しながら、各色の光の強度比が条件を満たすように調整する。**3)** 対応する色度を取得する。その結果、単色光による再生像、多重による再生像ともに鮮明な状態となることがわかつ

た。赤・緑・青の各色の光で多重再生した結果と比較したところ、色域が拡大していることが認められた。

赤・緑・青紫の三色の光による再生像を重ねて表示し、複数の色の再生像を同時に表示した。その結果、次のことが確認できた。**1)** 赤・緑だけではなく、青紫の条件でも鮮明で明るい再生像が得られる。**2)** 緑・青紫の光による再生像を重ねることで、合成色を表示できる。一方で、緑・青紫の光による再生像には明るさのむらがあり、これらの表示位置をさらに微調整する必要があることがわかった。

<参考文献>

- [1] 労働政策研究・研修機構, ものづくり産業における技能継承の現状と課題に関する調査, **JILPT 調査シリーズ, no.194, 2020**
- [2] 森 和夫, 暗黙知の継承をどう進めるか, 知の継承, 特技懇誌, **no.268, 2013**
- [3] 木塚朝博ら (著), バイオメカニズム学会 (編), 表面筋電図, 東京電機大学出版局, **2006**
- [4] 吉川, 三河, 田中, 筋電位を利用したサポートベクターマシンによる手のリアルタイム動作識別, 電子情報通信学会論文誌 **D, J92-D, 93-103, 2009**
- [5] **W. Geng, Y. Du, W. Jin, et al., Gesture recognition by instantaneous surface EMG images. Scientific Reports 6, 36571, 2016**
- [6] **Ulysse Côté-Allard, Cheikh Latyr Fall, Alexandre Drouin, Alexandre Campeau-Lecours, Clément Gosselin, Kyrre Glette, François Laviolette, Benoit Gosselin, Deep Learning for Electromyographic Hand Gesture Signal Classification Using Transfer Learning, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 27(4):760-771, 2019**
- [7] **Cries Avian, Setya Widyawan Prakosa, Muhamad Faisal, Jenq-Shiou Leu, Estimating finger joint angles on surface EMG using Manifold Learning and Long Short-Term Memory with Attention mechanism, Biomedical Signal Processing and Control, Volume 71, Part A, 2022**
- [8] **Li Min, Wang Jiale, Yang Shiqi, Xie Jun, Xu Guanghua, Luo Shan, A CNN-LSTM model for six human ankle movements classification on different loads, Frontiers in Human Neuroscience, vol.17, 2023**

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 0件）

1. 著者名 高野邦彦, 横田和海, 笠井湧喜, 安藤香月, 川崎悠也, 佐藤甲癸, 浅井紀久夫	4. 巻 51
2. 論文標題 青紫色レーザー光源を用いたホログラフィックカラー再生について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 画像電子学会	6. 最初と最後の頁 157-163
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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kikuo Asai
2. 発表標題 Classification Performance of Transfer Learning in Estimating Hand Gesture from Arm's sEMG Signals
3. 学会等名 International Conference on Machine Learning and Human-Computer Interaction (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kunihiko Takano, Tetsushi Oiwa, Kaketu Fukushima, Itta Kajimura, Haruchika Ono, Kazuyuki Takasaki, Ryoji Wakabayashi, Tomohiro Endo, Koki Sato, Kikuo Asai
2. 発表標題 On a study of holographic image projection by blue-violet color laser light employed with an improved mist screen
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kunihiko Takano, Shinzaburo Iwanaga, Kentaro Sakai, Koki Sato and Kikuo Asai
2. 発表標題 On the colored holographic moving pictures employing the blue-violet color light source
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高野邦彦, 岩永慎三郎, 境健太郎, 佐藤甲葵, 浅井紀久夫
2. 発表標題 青紫色光でのホログラフィ動画像の再生特性について
3. 学会等名 画像電子学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kikuo Asai
2. 発表標題 Influence of Surface EMG Features on Accuracy of Hand Gesture Recognition Using CNN
3. 学会等名 International Conference on Machine Learning and Human Computer Interaction (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kunihiko Takano, Kazumi Yokota, Yuhki Kasai, Koki Sato, Kikuo Asai
2. 発表標題 A basic study of holographic image reconstruction in colors using blue-violet laser light
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高野邦彦, 横田和海, 笠井湧喜, 佐藤甲葵, 浅井紀久夫
2. 発表標題 ホログラフィ再生像の色域拡大に向けた基礎検討
3. 学会等名 画像電子学会年次大会
4. 発表年 2020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
研究 分担者	高野 邦彦 (Takano Kunihiko) (10353260)	東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授 (52605)	
研究 分担者	佐藤 誠 (Sato Makoto) (50114872)	東京都立大学・システムデザイン研究科・客員教授 (22604)	

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