

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：32508

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00493

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感覚再現の高度化

研究課題名(英文) Improving tactile sensation reproduction by deep learning in distributed cooperative 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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：技能を習得するには、それに習熟した人の技術を体感する必要がある。本研究では、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と共に、体感的インタラクションを共有するための提示システムの視覚的臨場性を改善した。触力感覚を再現するインタフェースでは、遠隔通信による遅延を低減するため、深層学習の手法を用いて筋電信号から手指動作を予測した。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画質を改善した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

体感的インタラクションを遠隔で共有する際、その通信に伴う遅延が問題になっていた。本研究はこの問題に対して、筋電信号が動作に先行するという特性を利用することにより対処しようとした。畳み込みニューラルネットワークを用いた学習を行うことにより、動作を高い精度で予測できるようになったことは様々な応用を期待させる。また、視覚的臨場性の改善においてホログラフィ再生像の性能向上はホログラフィによる3Dテレビの社会実装へと一歩近づいたと言える。

研究成果の概要(英文)：In order to acquire a skill, it is necessary to experience the skill of a person who is proficient in it. In this study, in order to exchange sensory information through sensory interaction, we constructed an interface that reproduces the tactile sensation and improved the visual presence of the presentation system for sharing sensory interaction. In the interface that reproduces the tactile sensation, in order to reduce the delay due to remote communication, the finger movement was predicted from the myoelectric signal using a deep learning method. In the visual realism of the presentation system, the image quality of the holographic reproduction image was improved.

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 インタフェース 情報可視化 立体像表示

1. 研究開始当初の背景

(1) 最新技術の導入及び職人の高齢化によって技術・技能の継承が難しくなっている。そのため、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。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) 暗黙知は一般には長い間の経験や体験によって獲得され、表現が難しく、記述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[1]。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のが現状である。

2. 研究の目的

(1) 技能を習得するために、それに習熟した人の技能を体感できるようにする。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。触力感覚情報を共有するには、遠隔通信による遅延を低減する必要がある。そのため、手指の動作に伴う筋電信号を取得し、手指の動作や力の入れ具合を推定する仕組みを構築する。

(2) 体感的インタラクションを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、後者の3次元情報を立体的に提示する仕組みに取り組み、体感的インタラクションの情報共有において視覚的臨場感を高める。

3. 研究の方法

(1) 触力感覚を円滑に共有できるようにするため、手指の動作に伴う筋電信号を取得し、手指の動作や力の入れ具合を推定する仕組みを組み入れることによってインタフェースの通信遅延を補完する。筋電信号と手指の動作や力の入れ具合との関係を機械学習の手法を使って学習し、精度よく予測できるようにする。

(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仕組みとしてホログラフィ再生像の利用を検討する。ホログラフィをカラー表示する方法や高精細に提示する方法を構築することによって再生像の再現性を向上させる。

4. 研究成果

(1) 手指の動作を推定するには画像認識による手法が主に用いられる。カメラ映像が得られない場合などに表面筋電位から推定することが行われる[2]。筋電位信号は筋を収縮させる刺激が筋に到達して検出され、筋活動開始から力発生を経て減衰する。表面筋電位信号には動作や動作意図の情報が含まれ、これらに特徴的な形状パターンが現れる。こうした特徴的なパターンをうまくとらえれば、手の動作の推定が可能になると考えられる。ここでは、手指の動作に伴う筋電信号の周波数解析を2次元面に表示した画像を入力として、畳み込みニューラルネットワークを用いた学習による画像認識により手指の動作を推定する。手指の形状に基づいて、筋電信号が8個のセンサから取得される。同時に、筋電信号に対する手指形状の教師信号として赤外線センサから得られる骨格データを取得する。骨格データはその時点での手の状態そのままではなく、手形状の時間変化によって得られる各関節の動きを採用しており、ある時点での筋電信号が、そのときの手指の状態を表すのではなく、動きを表していることになる。データは、フレーム単位で記録される。手指の形状の推定を単純化するため、手指の形状の指ごとに開閉の判定を行い、これらを組み合わせラベルを作成し、学習を行う際の教師信号とした。手指の形状と筋電信号を記録したデータを基に、学習データを作成する。手指の形状について手の開閉判定は指の角度変化によって自動的に行われるが、間違える可能性があり、学習に入る前に、必要に応じて編集できるようにした。筋電信号を記録する際、Gabor-wavelet変換による周波数解析を行い、その結果から横軸に時間、縦軸に周波数を撮った濃淡画像を作成する。1つのフレームに対して1つの濃淡画像が生成され、一連の筋電信号に対する学習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。そして、畳み込みニューラルネットワークによって手指の形状の学習・推定を行う。

触力覚インタフェースでは、複数の糸に張力を与えてフィードバックを提示する仕組みを採用している。導入の容易性やコストを考慮し、三次元空間内での仮想物体どうしの接触を、二次元的な反力フィードバックで構成している。手の動作に伴う筋電信号と、そのときの手の動きを赤外線カメラで抽出した骨格データとを対応づけて記録し、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の動きを予測する機能を実装した。

畳み込みニューラルネットワークの入力データとしてどのような特徴量を選択するかは自由度がある。そこで、腕の周りの筋電信号を複数チャンネルで計測し、その信号強度を濃淡として組み合わせた画像を入力データとして学習を行った。その結果、筋電信号計測デバイスを着脱せずに学習と評価を行えば、**90%**程度の精度が得られることがわかった。

筋電信号は時系列データであるため、ニューラルネットワークとして **LSTM**（長短記憶）を採用することを考え、出力として手の動きの状態を **binary** 信号として割り当てることにした。**LSTM** の学習には時間がかかることが懸念され、その処理負荷の軽減を検討した。隠れ層における出力とリカレント項の役割を考察し、**LSTM** 派生型ネットワークについて隠れ層重み行列の簡略化を図り、損失関数値の収束が促進されることを確認した。

予測手法として畳み込みニューラルネットワークを採用し、その入力として表面筋電信号をどのような形態で割り当てるのが適切かを調査した。信号は複数チャンネルで計測され、濃淡情報として **1** つの画像に変換される。振幅強度の時系列を並べたもの、周波数変換したもの、時系列情報を保持した周波数変換を比較した結果、時系列情報を保持した周波数変換が手指の動きの特徴をよく抽出することが示唆された。

(2) ホログラフィには全方位視差で立体像を表示する特徴がある。光空間変調素子を用いることが一般的であり、その中でもサイズの大きな立体像を広い視野で観察できる空間投影型による立体像表示法が注目されている。この方法によるカラー化が望まれる。表示像のフルカラー化には、赤色や緑色の光に対する像再生だけでなく、青色光での再生が必要である。しかし、短い波長の光を利用した場合、像再生に必要な回折角が得られず、結果的に点数の多い物体や立体図形の再生を難しくする。また、光線追跡型の計算機合成ホログラムは点の集合体から構成される **3** 次元物体の表示には向いているが、面状物体の表現には課題が残されている。こうした問題を解決する手段の一つが、時分割多重再生法の利用である。そこで、青紫色のレーザ光を利用して、点数の少ない格子状図形を再生したときの特性を検討する。複雑な図形を自在に再生するため、時分割多重再生法を用いた場合の像再生特性を吟味する。また、光空間変調素子によるホログラム再生の特性を補うために、空間スクリーンを利用した空間投影法がある。水中でマイクロバブルを発生させ、空間投影用のスクリーンとして利用する方法を提案した。表示像の揺らぎは低減されたが、スクリーン上の散乱光強度の変動に伴うちらつきがある。そこで、フォグを利用した空間スクリーンを構成した。その結果、光学的特性が改善されることが示された。

三次元情報を立体的に提示する仕組みとして、ホログラフィ再生像を提示する方法について検討した。時分割多重再生法においてカラーホログラムを再生するため、赤、緑、青の三色光で時分割多重を行った。物体点の間隔や数を適切に調整し、良好な再生像を表示している。また、表示領域を拡大するために、空間スクリーンにホログラフィ再生像を投影することを検討した。マイクロバブルを用いて再生像を投影し、長時間安定した像を形成している。

空間投影による立体像表示では、大きなサイズの立体像を広い視野で観察できる。しかし、空間投影型ではカラー化が難しく、特に青色光での再生像の再現性がよくなかった。そこで、青紫色光を導入し、青色光での再生像の特性改善を図った。その結果、立体像の再生可能な色範囲を拡大できることが示された。また、全方向視差で立体像を表示するため、空間スクリーンとしてフォグを利用し、散乱光強度の変動に伴うちらつきの低減を図った。

フォグを空間スクリーンに利用する表示法では、表示像の揺らぎが問題となっていた。これに対してフォグを容器内に閉じ込め、表示像のフリッカ軽減と解像度向上を実現した。また、面状物体を表現する方法として時分割再生法を採用し、青紫色光での像再生の画質改善を行った。

<参考文献>

[1] 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

[2] 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. 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 高野邦彦, 富永俊太郎, 池内達哉, 佐藤甲斐, 浅井紀久夫	4. 巻 48
2. 論文標題 フォグスクリーンを利用したホログラフィ立体像投影法におけるフリッカの低減法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 画像電子学会誌	6. 最初と最後の頁 258-262
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 高野邦彦, 須賀凜太郎, 今野哲史, 佐藤甲斐, 浅井紀久夫	4. 巻 47
2. 論文標題 キャビテーションバブル方式を利用した投影型ホログラフィ装置	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 画像電子学会誌	6. 最初と最後の頁 228-233
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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kikuo Asai, and Norio Takase
2. 発表標題 Comparing MAV, Frequency Spectrum, and Wavelet Spectrum of sEMG Signal as Feature for Simple CNN in Finger Motion Estimation
3. 学会等名 International Conference on Digital Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K.Takano, K.Audo, M.Osaka, Y.Kawasaki, K.Sato, K Asai
2. 発表標題 An approach to the multiplex reconstructing process for spatially multiplex projected holographic colored images using blue-violet laser light
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 櫻井孝憲, 浅井紀久夫
2. 発表標題 単一重み行列を含む多層化リカレントニューラルネットワークの研究
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 櫻井孝憲, 浅井紀久夫
2. 発表標題 LSTM派生型リカレントニューラルネットワークにおける隠れ層重み行列について
3. 学会等名 第18回情報科学技術フォーラム (FIT2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高野邦彦, 安藤香月, 川崎悠也, 大坂美夢, 佐藤甲癸, 浅井紀久夫
2. 発表標題 カラー再生に向けた時分割多重再生法利用による青紫色での面状物体のホログラフィック投影像の画質改善
3. 学会等名 画像電子学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kikuo Asai, Norio Takase
2. 発表標題 Finger Motion Estimation Based on Sparse Multi-Channel Surface Electromyography Signals Using Convolutional Neural Network
3. 学会等名 International Conference on Digital Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Takano, S. Tominaga, T. Ikeuchi, K. Sato, K. Asai
2. 発表標題 Projecting Technique of Holographic 3D images With the Use of Fog Screen
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高野邦彦, 富永俊太郎, 池内達哉, 佐藤甲葵, 浅井紀久夫
2. 発表標題 フォグ封入型によるホログラフィック3Dディスプレイシステムの提案
3. 学会等名 画像電子学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高野邦彦, 遊馬稔, 井田翔, 佐藤甲葵, 浅井紀久夫
2. 発表標題 青紫色レーザー光によるホログラフィ再生像特性
3. 学会等名 画像電子学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kikuo Asai ¹ , Norio Takase
2. 発表標題 Finger Motion Estimation Based on Frequency Conversion of EMG Signals and Image Recognition Using Convolutional Neural Network
3. 学会等名 International Conference on Control, Automation and Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K.Takano, R.Suga, S.Kon-no, K.Sato, K.Asai
2. 発表標題 On a Screen Utilizing Cavity Bubble as a Display of Holographic Projected Images
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅井紀久夫, 杉本裕二
2. 発表標題 没入環境における立体視の主観評価
3. 学会等名 電気学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高野 邦彦, 須賀 凜太郎, 今野 哲史, 佐藤 甲葵, 浅井 紀久夫
2. 発表標題 キャビテーションバブル方式を利用した投影型ホログラフィ装置の検討
3. 学会等名 画像電子学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高野 邦彦, 今野 哲史, 須賀 凜太郎, 佐藤 甲葵, 浅井 紀久夫
2. 発表標題 ホログラフィック投影像のカラー化に向けた多重再生法について
3. 学会等名 画像電子学会
4. 発表年 2017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
---------	---------