

令和 3 年 5 月 20 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00270

研究課題名（和文）触感覚向上機能を有する手指運動学習システムの研究

研究課題名（英文）Training of fine motor skill in fingers with improved haptic sensation

研究代表者

遠藤 孝浩（Endo, Takahiro）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70432185

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：医療や製造分野における手指を用いた技能訓練では、VRの利用が期待される。特に指先力の伝達を含む運動学習では、指先力に関するフィードバック（訓練者に、動作修正のために与える訓練支援用の力情報）が重要である。触感覚の向上により、その検知能力を高めることが出来れば、運動学習を大いに向上させる可能性がある。本研究課題では、まず運動学習時における、手指の触感覚向上機能を実現した。さらに、その触感覚向上機能を用いてVR訓練システムを構築し、運動学習効果を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題のVR訓練システムでは、指先の触感覚向上を行い、学習に必須の力フィードバック情報を精度良く知覚できる。これにより学習効果を高め、指先力の伝達を含む正確で効果的な運動教示ができる点で、効果的な技能伝承が期待できる。また、本研究課題のVR訓練システムは、医療分野における触診訓練、製造現場や伝統的手工芸での手技に基づく熟練技能の伝達等に役立てることができる。これらを通し人類の技術伝承に貢献でき、社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：It is expected that the utilize of VR will increase among the skill training using fingers in the medical and manufacturing fields. Especially in motor learning for transferring the fingertip force, feedback on fingertip force, which is the force information to support training given to trainees, is essential. Improving the haptic sensation of the fingertips and enhancing their detection ability may significantly improve motor learning. In this research, we realized the function of enhancing the haptic sensation of fingers during motor learning. Then, we developed a VR training system using the function of improving the haptic sensation of fingers and verified the motor learning effect.

研究分野：ハプティクス

キーワード：技能訓練 運動学習 触力覚 バーチャルリアリティ

1. 研究開始当初の背景

医療や製造分野での熟練手技など、力を伴う技能では手指の感覚が重要である。しかしながら、模倣や言語による教示では正確な力や位置情報を伝達できず、その教育や訓練は困難である。このため人工現実感 (VR) 技術を用いた技能伝達の研究が活発に行われている。VR を用いた技能伝達 (運動学習) では、熟練者の手の軌道や力の記録が可能である。それらを訓練者に提示することで、言葉や映像では正確に伝えられない手の動きや力を教示でき、技能習得を効率化できる可能性がある。

本研究では、訓練環境を模擬したシミュレータではなく、手指技能の伝達に焦点を当てる。特に、指先力の伝達に着目した研究では、ハプティックインタフェースを用い、訓練支援用の力フィードバック情報を提示する運動学習法が提案されている。しかし、人間の知覚能力を陽に考慮した運動学習に関する研究は無い。運動学習は、自身の動作と目標との誤差を検知し、それを修正するプロセスであり、運動系 (動作修正) と知覚系 (誤差検知) の相互作用が重要である。このため、ヒトの触知覚感度を向上できれば、訓練支援用フィードバック情報 (特にハプティックインタフェースを用いて提示される力情報) の検知能力を高め、運動学習を大いに向上させる可能性をもつ。

他方、ヒトの指先における触感覚を向上させるものとして、確率共鳴現象 (Stochastic Resonance : SR) を用いた研究がある。これは、ヒトが検知できない信号でも、その信号にガウスノイズを重ねさせることで、ヒトがその信号を検知できるようになる現象である。例えば、手首等にガウスノイズを与えることで、指先での触感覚が向上することが知られている。

しかしながら、運動学習における触感覚向上機能の実現性やその効果は未知の部分が多く、触感覚向上を考慮した手指運動学習システムは実現できていない。

2. 研究の目的

本研究では、触感覚向上を考慮した手指運動学習システムを構築することを目的とする。特に、確率共鳴現象を用い、運動学習時における、手指の触感覚向上機能を実現する。さらに、その触感覚向上機能を用いて VR 技能訓練環境を構築し、指先力の伝達を含む運動学習効果を検証する。これにより、VR 技術を用いた次世代教育訓練システムの実現に向け、その基盤技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) 運動学習時における触感覚向上機能の構成法

本研究における手指運動訓練では、保存した熟練者のデータを初学者へ提示し、その情報をもとに、初学者が自身の動作を修正しながら訓練する。特に、指先にハプティックインタフェースを装着し、訓練支援用力フィードバック情報を提示する。他方、指先の触知覚向上のため、手首にガウスノイズを付加し、確率共鳴現象を発現させる。このため、指先に訓練支援用力フィードバック情報を提示しつつ、手首部にガウスノイズを付与するデバイス (図1) を構成する。従来研究とは異なり、指にホルダを装着し、さらに訓練支援用力情報を提示するため、その状況下におけるノイズの適切な提示法等を、被験者実験を通して明らかにする。



図1. 触感覚向上機能を有する、手指を用いた運動学習。「ノイズ付与による指先知覚の向上」と「ハプティックインタフェースによる、指先への訓練支援用力情報提示」から構成される。

(2) 指先触感覚向上機能を有する、運動訓練

触感覚向上機能下において、保存された熟練者の動作 (指先位置や力) に関する情報を初学者へ提示し、初学者が熟練者のデータと同じ動作を獲得できる運動訓練法を開発する。指先触知覚向上のためのガウスノイズを手首部に与えつつ、指先に訓練支援用力フィードバック情報を提示できるデバイスおよび仮想環境を用い、指先触感覚向上機能を有する、運動訓練法を検討する。指先の触感覚向上を行い、学習に必須の力フィードバック情報を精度良く知覚することで、指先

力等の伝達を含む正確で効果的な運動学習ができるかを検討する。

4. 研究成果

(1) 運動学習時における触感覚向上機能の構成法

運動学習における触感覚向上のためのノイズ提示法を検討した。まず、VR 技能訓練で使用するようになる、ノイズを提示できるデバイスおよび仮想環境の構築を行った。デバイスにおいては、確率共鳴現象を誘発することで指先の触知覚を向上させるため、振動子で手首部分にガウスノイズを付加する。指先に力を提示するハプティックインタフェースでは、一般に指先に指ホルダと呼ばれる指サックを装着する。このため SR 用のガウスノイズは、手首部に与える。使用する振動子はヒト指先部分における機械受容器の振動知覚特性を考慮し、 piezo アクチュエータを選定した。piezo アクチュエータによりガウスノイズを生成し、それをヒトの手首部分に付与した。これとヒトの指先に訓練支援用フィードバック情報を提示する力覚提示装置を統合し、デバイスを構築した (図 2)。



図 2. 指先触感覚向上機能を有する VR 訓練システム

他方、仮想環境内に仮想物体を生成し、開発デバイスによる触感覚向上機能を検討した。指に硬いホルダを装着すると、指先知覚が低下することが知られている。このように指先に指ホルダを装着し、知覚能力が低下した状態でも、SR による触感覚向上機能が有効であるかは未知である。そこでまず被験者実験を通して、このような状況下における SR の効果を検討する。システムの操作者 (被験者) は、図 2 に示す VR 環境に構築された仮想物体を示指で触る。この際、指先の触感覚として、スティッフネスの知覚 (JND) を取り上げた。実験では、被験者の手首にガウスノイズを与える。実験に先立ち、各被験者のガウスノイズの振幅 (強度) に対する閾値 (T) を計測した。その後被験者は、ガウス雑音の振幅が、0 T (ノイズが無い場合)、0.4 T (閾値の 40% のノイズ)、0.6 T (閾値の 60% のノイズ)、0.8 T (閾値の 80% のノイズ)、1.0 T (閾値と同じ大きさのノイズ)、1.2 T (閾値の 120% のノイズ) の 6 条件にて、柔らかさの識別実験を行った。12 名の被験者による JND の平均値を図 3 に示す。なお JND 値が小さい程、スティッフネスの識別感度が良いことに対応する。

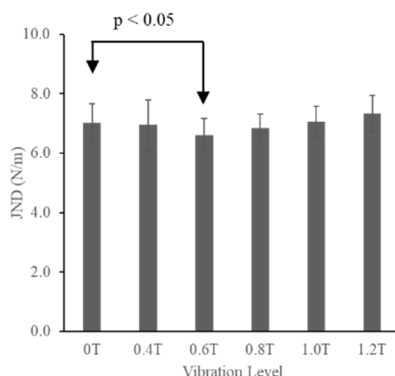


図 3. 指先に対するノイズレベルに対する JND の平均値

図より、閾値の 60% の振幅ノイズを与えた場合の感度が最も良く、ノイズを与えない場合に比べ有意差が認められた。これより、閾値の 60% の振幅ノイズを与えた場合、指先に指ホルダを装着した状態でも、SR による触感覚向上機能が最も有効であると考えられる。また、振動子の配置場所は、手首部分に限られるものではない。そこで振動子の配置箇所等に対する人間の知覚特性計測、指先へ伝搬されるノイズ強度の計測、操作性の評価等を行い、振動子配置箇所の解明について併せて研究を行った。

(2) 指先触感覚向上機能を有する、運動訓練

触知覚向上のためのガウスノイズを手首部に与えつつ、指先に訓練支援用力フィードバック情報を提示できるデバイスおよび仮想環境を用い、受動訓練法および能動訓練法の検討を行った。一例として、能動訓練の結果を示す。能動訓練は、熟練者との誤差を提示しそれを能動的に打ち消す訓練手法である。実験では、指先にハプティックインタフェースにて、ある目標力を提示した。学習者が目標力と同じ指先力を提示できれば、指は動かず、そうでなければ指が動く。このため学習者は自身の指先が動かないように訓練することで、目標力を提示できるようになる。そしてこの訓練支援用情報の検知能力をSRによって高めることで、運動学習を向上させる。

運動訓練実験では、被験者が示指で目標力を提示することが目的となる。実験においては、指先触感覚向上機能を有する手法（以後、SRありと呼ぶ）とノイズ提示がない場合（以後、SRなしと呼ぶ）の2つの方法の比較を行った。両手法において、目標力が被験者の示指に提示され、被験者は自身の指が動かないように指を動かす。これを繰り返すことで、被験者は指先力を学習する。SRありの手法では、前記において最適な値であった0.6 Tを振幅としたガウスノイズを手首に与えた。実験には10名の被験者が参加し、対応する手法を用いて15回（15試行）の実験を行った。そして各試行における、示指の指先力と目標力に関する平均二乗誤差（Root mean square error: RMSE）を算出した。

実験結果を図4に示す。横軸が試行回数を表し、縦軸が各被験者のRMSEの平均値を表している。濃い色の棒グラフがSRありの手法を用いた場合の結果、薄い色の棒グラフがSRなしの手法を用いた場合の結果である。両手法とも試行回数が増えるごとに、RMSEの値が減っている。SRなしの手法では、1回目の試行結果と4回目以降の試行結果の間に有意差（ $p < 0.05$ ）があり、また1回目の試行結果と6回目以降の試行結果の間に有意差（ $p < 0.01$ ）があった。他方SRありの手法では、1回目の試行と3回目以降の試行間に有意差（ $p < 0.05$ ）があり、また1回目の試行と5回目以降の試行間に有意差（ $p < 0.01$ ）があった。実験結果より、SRなしの手法に比べ、SRありの手法の方が速く誤差を減らすことが分かった。なお、十分学習が進んだ後では、両手法の結果には大きな違いは無かった。これは、ここで検討したタスクが簡単であったため、SRなしの場合でもSRありの場合でも十分な試行回数後には、学習が完了するためであると考えられる。なお最終的に誤差が残っているが、この誤差を減らすには、SRの有無ではなく、訓練支援用の力フィードバック情報を変更する必要があると思われる。SRの有無に焦点を当てれば、SRありの提案手法の方が、SRなしの手法に比べ、速く誤差を減らすことができ、確率共鳴現象を用いることで、指先力の学習パフォーマンスが良くなると考えられる。

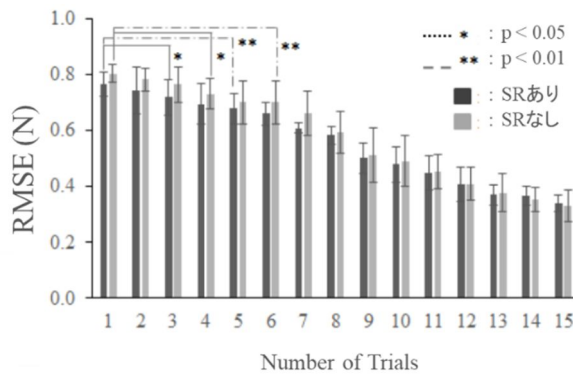


図4. 指先力の学習結果

触感覚向上機能下において、初学者に熟練者との力誤差を提示し、初学者がそれを打ち消すように指を動かすことで、熟練者から初学者への指先力の伝達が可能であることが分かった。特に、ガウスノイズを手首部に与える触感覚向上機能を付与した場合、それを付与しなかった場合に比べ、力の伝達が速く行われることが見受けられた。

なお、指先力の伝達のみではなく、視覚情報による位置伝達性も併せた指先位置・力の訓練システムも併せて研究開発を行い、その有効性を検証した。

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 Chamnonghai Komi, Endo Takahiro, Matsuno Fumitoshi, Fujimoto Kenta, Kosaka Marina	4. 巻 50
2. 論文標題 Two-Dimensional Fingertip Force Training With Improved Haptic Sensation via Stochastic Resonance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Human-Machine Systems	6. 最初と最後の頁 593 ~ 603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/THMS.2020.3022859	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5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 K. Chamnonghai, T. Endo, S. Nisar, F. Matsuno, K. Fujimoto, and M. Kosaka
2. 発表標題 Fingertip Force Learning with Enhanced Haptic Sensation using Stochastic Resonance
3. 学会等名 2019 IEEE World Haptics Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤孝浩, チャンムノンタイ コーミー, 池村翔平, 松野文俊
2. 発表標題 確率共鳴を用いた指先力の学習
3. 学会等名 電気学会 メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Komi Chamnonghai, Takahiro Endo, Shohei Ikemura, and Fumitoshi Matsuno
2. 発表標題 Stiffness Discrimination by Two Fingers with Stochastic Resonance
3. 学会等名 EuroHaptics 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 湊真司, Komi Chamnongthai, 遠藤孝浩, 藤本堅太, 奥田晴久, 松野文俊
2. 発表標題 遠隔操作における物体把持のための振動提示手法の開発
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI ' 18)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠藤孝浩
2. 発表標題 ロボット研究(ロボット群の制御とハプティクス技術)について
3. 学会等名 電気学会東海支部学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

(1) アウトリーチ活動情報 遠藤孝浩、「ハプティックインタフェースと運動学習への応用」、先端技術活用セミナー「ヒトとロボットが共生する社会」、2018年8月23日、京都大学大学院工学研究科イノベーションプラザ(京都)
--

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