

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 25 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700143

研究課題名(和文) 手指技能の伝承を目指した、次世代高度訓練システムの構築

研究課題名(英文) Development of a haptic training system for fine motor skills using multiple fingers

研究代表者

遠藤 孝浩 (ENDO, Takahiro)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：70432185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、3次元空間での手指を用いた技能訓練システムの構築を目的とし、5指に3軸の力覚を提示可能な独自の多指ハプティックインターフェイスを用いた技能訓練法の開発およびそれを用いた訓練システムの構築を行った。特に、学習心理学に基づき、フィードフォワード型訓練法(自習に対応)、およびフィードバック型訓練法(指導に対応)という2つの訓練方法を新規に提案し、指導と自習を行える信頼性の高い次世代高度教育訓練システムについての研究開発を行った。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on a haptic training system for fine motor skills using multiple fingers in three-dimensional space. To accomplish this aim, we have studied skill transfer method and realized skill transfer system using a multi-fingered haptic interface, which can present three-directional forces at user's five fingertips. In particular, based on the psychology of learning, we proposed a feedforward-type training method for a self-instruction and a feedback-type training method for a coaching, and we developed a fine motor skill training system which can perform coaching and self-instruction.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：技能伝承 ハプティックインターフェイス バーチャルリアリティ 情報システム 教育工学

## 1. 研究開始当初の背景

熟練者の減少や訓練機会の減少から、製造業分野や医療分野など様々な分野において、熟練技術の伝承が最重要課題となっている。特に力を伴う技能、例えば手技や道具の使い方の伝承では、手指の感覚が重要であり、手の動き、指先での力の使い方の教示が必要不可欠である。しかし、徒弟制度における弟子が師匠の動きを見て真似する方法、本や口頭など言語による教示では、初学者は正確な力情報や位置情報を捉えることができず、その伝承は非常に時間のかかるものとなり、困難である。

このため、人工現実感技術を用いた技能伝達の研究がこれまでに活発に行われてきている。これらの研究では、仮想空間内に訓練モデルを生成し、操作者がその訓練モデルに触れた際、力覚提示装置にて反力を提示することで、操作者が実際にモデルに触って訓練する感覚を与えることができる。また、熟練者が仮想空間で操作した際の手の軌道や、力情報を記録することが可能であり、それを初学者が訓練する際に提示することで、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、技能習得を飛躍的に効率化できる可能性がある。しかしながら、多くの研究では、筆記訓練、背中の触診訓練など2次元平面に限定された作業しか取り扱っていない。また、3次元空間での作業としては、臓器圧排を扱った研究がある。しかし、4本指へ1軸方向の力覚提示しかできず、3次元の力覚を提示できないため、現実での力の使い方と大きな差異がある。このため、3次元空間において、人間の手指を用いた正確な技能教示は、未だ実現できていない。

## 2. 研究の目的

上記で述べた研究背景を踏まえ、本研究課題では、人間の5本指に3次元の力覚を提示できる、独自の多指ハプティックインターフェイスを用い、3次元空間での手指を用いた技能訓練システムの構築を目的としている。

学習心理学の観点から、技能習得には反復練習(自習)だけではなく、指導者による適切な教示(指導)が必要であることがよく知られている。このため、

- ・熟練者の技能(指先位置や指先力)を保存し、初学者へ提示するフィードフォワード型訓練法(自習に対応)

に加え、

- ・熟練者が初学者の指先位置や力を観測し、適宜修正するフィードバック型訓練法(指導に対応)

の2つの方法を新規に提案する。これにより、3次元空間において、人間の手指を用いた正確で効果的な技能教示が可能になる指導・自習訓練システムを構築し、指導と自習を行え

る信頼性の高い次世代高度教育訓練システムの確立を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 概要

3次元空間において、人間の手指を用いた技能教示が可能になる指導・自習訓練システムとして、図1に示す訓練システムを構築する。本訓練システムは、5指に3次元の力覚を提示可能な独自の多指ハプティックインターフェイス(図2)と仮想環境から構成する。図1において、方法①が、熟練者の技能(指先位置や指先力)を保存・提示するフィードフォワード型訓練で、与えられた手本を真似て訓練を繰り返す自習に対応する。方法②が、熟練者が初学者の指先位置や指先力を観測し、適宜修正するフィードバック型訓練で、指導に対応する。そして、フィードフォワード型訓練法、フィードバック型訓練法、および、それらを組み合わせたハイブリッド型訓練法を確立することで、人間の手指動作の伝達を目指した、指導と自習を行える訓練システムを開発する。

### (2) フィードフォワード(FF)型訓練法

熟練者の指先の動き、力の使い方を初学者に伝達するため、熟練者の指先位置・姿勢を動画として保存し、没入型立体視ディスプレイ

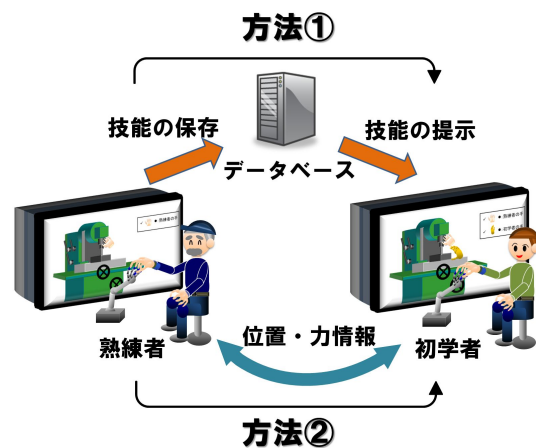


図1 3次元空間での手指動作の伝達を目指した訓練システム



図2 多指ハプティックインターフェイス



図3 没入型立体視ディスプレイ。なお、画面は触診訓練システムの例である。

イ(図3)を用いて初学者に提示する。同時に、多指ハプティックインターフェイスによって、熟練者の指先力と、訓練者が物体に触って感じる力を交互に提示し、FF型訓練法の確立を目指す。人間の力に関する知覚特性は、提示される映像に大きく影響される。このため、手の映像表示下における、熟練者の力を提示する時間、最適な提示周期の知覚実験を行い、最適な力覚提示法を決定する。

### (3) フィードバック(FB)型訓練法

まず、FB型訓練法のための実験設備を構築する。既存設備である多指ハプティックインターフェイスを2台利用して、システムの構築を図る。

FB型訓練法では、熟練者側、初学者側双方について、システムがある。そして熟練者が初学者の操作を観測し、初学者が誤った操作をした場合、適宜修正する必要がある。熟練者が初学者に技能動作を教示する場合、一般的な方法として、熟練者が初学者の手を取り、力の使い方や動きを教える方法がある。この伝統的な方法に倣い、熟練者側、初学者側の力覚提示装置にて、仮想環境からの反力に加えて、それぞれの指先位置が等しくなるように、それぞれの指先位置のPD制御で構成された牽引力を追加し、FB型訓練教示法を確立する。

### (4) ハイブリッド型訓練法

FF型訓練法およびFB型訓練法の結果を統合し、自習と訓練を実行可能な、より効率的なハイブリッド型訓練法を確立する。

## 4. 研究成果

### (1) FF型訓練法

FF型訓練法として、次の訓練法を提案した。手指位置の伝達については、熟練者の手の映像を動画として保存し、初学者(訓練者)が訓練する際に提示する。また、記録しておいた熟練者の指先力と、初学者が仮想物体に触って感じる力を、多指ハプテ

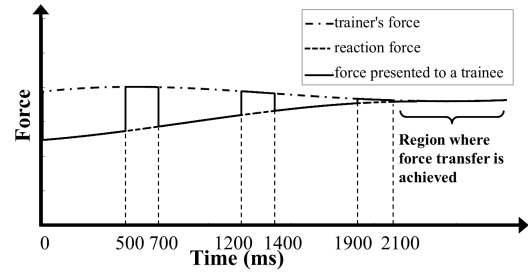


図4 初学者への提示力

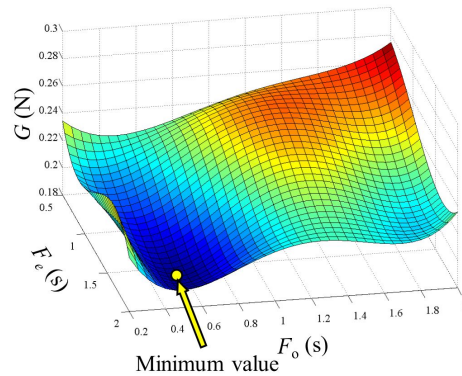


図5 熟練者の力の提示時間、反力の提示時間、および力誤差の関係

ティックインターフェイスにより訓練者へ交互に提示し、力の伝達を行う(熟練者の力を提示する時間を  $F_e$  [s]、仮想物体の反力を提示する時間を  $F_o$  [s]とする)。図4に初学者へ提示される力の一例を示す。一点鎖線が熟練者の力、点線が仮想物体からの反力であり、初学者へ提示される力は実線となる。このため、初学者はパルス状の力を感じ、それが無くなるように指を動かすことで、力の伝達が達成される。なお同図では、 $F_e=200$  [ms]、 $F_o=500$  [ms]の場合を示している。この際、熟練者と訓練者の力を提示する提示時間(提示周期)によって、技能伝達精度が大きく変化すると考えられる。そこで被験者実験を行い、最適な提示周期を導出した。すなわち、様々な熟練者の動作周期、力の提示周期、訓練者の力の提示周期に対して、最も力誤差が小さくなる最適提示周期を決定した。一例として、図5に様々な  $F_e$  および  $F_o$  に対する力誤差を示す。これより、記録しておいた熟練者の指先力と、初学者が仮想物体に触って感じる力を、多指ハプティックインターフェイスにより訓練者へ交互に提示する場合、 $F_e=1.64$  [s]、 $F_o=0.54$  [s]と設定することが最適であることが明らかとなった。また導出された最適な力覚提示法を用いたFF型訓練手法の評価実験を行い、その有効性を確認した。

### (2) FB型訓練法

FB型訓練システムとして、技能を学習中である初学者の動作(指先位置や指先力等)を

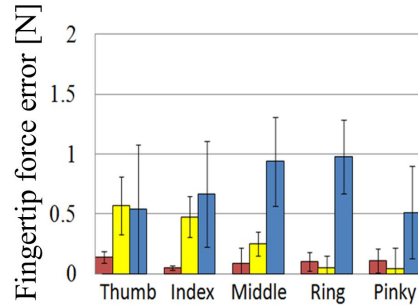


図6 フィードバック型訓練システム

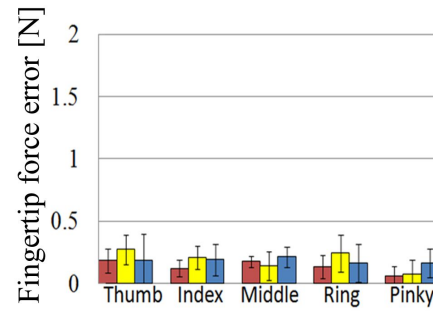
熟練者がリアルタイムで感じ、学習中の初学者の動作において、どこをどのように修正しながら学習すれば良いか教示できるシステムを研究開発した。

開発したシステムを図6に示す。本システムは、2台の多指ハプティックインターフェイスおよび仮想環境から構成される。熟練者および初学者は、それぞれの多指ハプティックインターフェイスに接続される。そして、熟練者と初学者の指先情報は、中央にある仮想環境を介して、それぞれの相手側に送られる。

熟練者が初学者へ技能を教示する際、伝統的な方法として、熟練者が初学者の手を取り、力の使い方や動きを教える方法がある。そこで、初学者が仮想環境内にある仮想物体を操作している最中、熟練者が初学者側に牽引力を与え、正しい動作を教示できるFB型訓練システムを実現し、実験により検討した。実験には、5名の被験者および熟練者役の1名が参加した。まず、初学者に目標力とVR上の物体の触れる位置を口頭で伝え、熟練者の牽引力が無い状態で、初学者が自身の感覚のみを頼りに目標力としてZ軸方向に1Nを出力するタスクを3回行った。この結果を図7(a)に示す。次に、FB型訓練法にて10回練習を行った。練習後に、練習前と同じ状態で、目標力を出力するよう初学者に伝え、仮想物体に触れてもらう。その結果を図7(b)に示す。FB型訓練では、初学者が誤った操作をしたときに、熟練者がそれに対する修正量を加えることができるため、熟練者が初学者の誤りをリアルタイムで修正し、初学者の技能習得における精度を向上させることが可能となった。また、初学者が自分の訓練を第一に行いたい場合は、牽引力が小さくなるよう、パラメータ値を小さく設定し、他方、熟練者の教示効果を大きくしたい場合は、その値を大きく設定することで、様々な要望にあった教示が可能となることが確認できた。ただし、ここでは力覚情報のみの伝達を検討した。位置情報に関しては、仮想環境上に、初学者と熟練者の位置を球で表示し、それぞれ等しくなるよう動作してもらった。このため、力覚情報と位置情報のFB型訓練については、今後の課題である。



(a) 訓練前



(b) 訓練後

図7 フィードバック型訓練の実験結果。5本指の力誤差応答の平均値を表す。図中、赤色がX軸、黄色がY軸、青がZ軸、ひげ付きバーが標準偏差を表している。実験では、仮想物体をZ軸方向から触ってもらうため、Z軸の応答値が他の軸に比べて大きくなっている。

### (3) ハイブリッド型訓練法

これまで研究開発した、記録しておいた熟練者の指先位置・指先力を初学者へ提示するFF型訓練法、および、仮想環境において技能を学習中である初学者の動作を熟練者がリアルタイムで感じ、初学者が誤った操作をした場合、適宜修正することができるFB型訓練法を組み合わせることで、自習と指導を行える、3次元空間でのハイブリッド型手指技能訓練システムを構築した。また、市販のシリコン製乳癌触診訓練モデルと同程度の柔らかさをもつ仮想モデルを仮想環境上に再現し、手指技能訓練システムの評価を行った。技能習得には、反復練習(自習)だけではなく、指導者による適切な教示(指導)を組み合わせることが重要であると知られており、これらを行える本提案システムは、効果的で信頼性の高い高度技能訓練システムであると考えられる。

また、本提案課題で得られた研究成果をまとめ、国内外での研究発表、学術論文誌への論文投稿を行い、成果の普及に努めた。

なお、これまでの人工現実感技術を用いた技能伝達法では、2次元作業に限定されており、3次元空間での正確な技能伝達に関する研究は未だなされていない。本研究課題の教育訓練システムでは、世界に例がない多指ハプティックインターフェイス(図2)を用い、

3次元空間において、人間の手指を用いた、指先の姿勢情報を含む正確で効果的な技能教示ができる点で、従来研究と著しく異なる位置づけと独創性を有するものと考えられる。また本研究では、FF型とFB型の技能伝達訓練が可能である。このような指導と自習による技術伝達の効果は、学習心理学に基づく信頼性が高い手法であり、このような高度教育システムは効率良く、効果的に技能伝承ができると考える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計3件)

Takahiro Endo, Mana Kobayashi, Haruhisa Kawasaki, "A Finger Skill Transfer System Using a Multi-Fingered Haptic Interface Robot and a Hand Motion Image", *Robotica*, Vol.31, No.8, pp.1251-1261, 2013, (査読有), DOI: 10.1017/S0263574713000465

Takahiro Endo, Masayuki Yasue, Haruhisa Kawasaki, "Experimental Investigation of a Collision Avoidance Controller for a Bimanual Multi-Fingered Haptic Interface", *Journal of the Franklin Institute*, Vol.50, No.9, pp.2664-2677, 2013, (査読有), DOI: 10.1016/j.jfranklin.2013.06.004

Takahiro Endo, Satoshi Tanimura, Haruhisa Kawasaki, "Development of Tool-Type Devices for a Multi-Fingered Haptic Interface Robot", *IEEE Trans. on Robotics*, Vol.29, No.1, pp.68-81, 2013, (査読有), DOI: 10.1109/TR0.2012.2212831

##### [学会発表](計7件)

松田貴宏, 遠藤孝浩, 川崎晴久, "側面設置型多指ハプティックインターフェイスによる干渉回避", 日本機械学会東海支部第63期総会・講演会, 2014年3月18日, 大同大学

遠藤孝浩, 谷村聡史, 風間祐太, 川崎晴久, "側面設置型多指ハプティックインターフェイスによる柔らかさ提示", 電気学会メカトロニクス制御研究会, 2013年11月22日, アオーレ長岡

遠藤孝浩, 川崎晴久, "側面設置型多指ハプティックインターフェイスによる力提示", 日本機械学会 2013年度年次大会, 2013年9月11日, 岡山大学

野坂竜也, 遠藤孝浩, 川崎晴久, "多指力覚提示装置を用いた指先位置・指先力の

学習法", 日本機械学会東海支部第62期総会・講演会, 2013年3月18-19日, 三重大学

谷村聡史, 遠藤孝浩, 川崎晴久, "多指ハプティックインターフェイスを用いたピンセット型デバイスの力覚提示", 日本バーチャルリアリティ学会第17回大会, 2012年9月12-14日, 慶応義塾大学

Takahiro Endo, Hisashi Aoyama, Sinobu Nakagawa, Haruhisa Kawasaki, "Haptic Display by a Side-Faced-Type Multi-Fingered Haptic Interface", 10th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO2012), 2012年9月6日, Dubrovnik (Croatia)

Takahiro Endo, Satoshi Tanimura, Haruhisa Kawasaki, "Development of a Tweezers-type Device for a Multi-Fingered Haptic Interface Robot", 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SI2011), 2011年12月21日, 京都

##### [図書](計1件)

Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, "Force Perception of Human Finger Using a Multi-Fingered Haptic Interface", Book title: *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development*, Edited by R. Balasubramanian and V. J. Santos, Springer, pp. 345-361, 2014.

##### [その他]

##### (1) 解説記事 (計1件)

遠藤孝浩, 川崎晴久, "多指ハプティックインターフェイスロボット", *ロボコンマガジン* 2014年1月号, pp.104-107, 2013.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

遠藤孝浩 (ENDO, Takahiro)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号: 70432185