

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26730104

研究課題名（和文）複数指での柔軟感伝達が可能な次世代技能訓練システムの構築

研究課題名（英文）Development of a haptic training system for transferring softness at fingers

研究代表者

遠藤 孝浩（ENDO, TAKAHIRO）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：70432185

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目的は、複数指における柔軟感の伝達が可能な技能訓練システムを構築することである。このため、5指に柔軟感を提示可能な多指ハプティックインタフェースを用い、柔軟感を伝達できる技能訓練法の開発を行った。特に、学習者の観察・体験に重点を置いた受動訓練法、修正に重点を置いた能動訓練法の2段階の訓練方策を提案した。これにより、効果的で信頼性の高い、柔軟感伝達が可能な訓練システムに関する研究開発を行った。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to develop a haptic training system for transferring softness sensation at fingers. To accomplish this aim, we have improved a multi-fingered haptic interface to a haptic interface, which can present softness sensation at fingertips, and we have proposed a skill training method for transferring softness at human fingertips. In particular, we have realized a passive training methodology focusing intensively on learner's observation/experience, an active training methodology focusing on correction, and an integrated training method which integrates both methods.

研究分野：工学

キーワード：技能伝承 ハプティックインタフェース 触力覚 バーチャルリアリティ 教育工学

## 1. 研究開始当初の背景

医療分野、製造業分野、そして伝統工芸分野における熟練手技など、力を伴う技能では、手指の感覚が重要である。しかし、徒弟制度における模倣、本や口頭など言語による教示では、初学者は正確な力や位置情報を捉えることができず、その教育・訓練は非常に困難である。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 を用いた技能伝達では、仮想空間内に訓練モデルを生成し、ハプティックインタフェースを用いることで、その仮想物体に触りながら訓練を行える。また、熟練者の手の軌道や力情報を記録可能であり、それ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、技能習得を飛躍的に効率化できる可能性がある。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た研究はいくつか行われている。しかしながら、筆記訓練、背中への触診訓練など 2 次元平面に限定された作業における、位置や力の情報伝達しか取り扱っていない。

特に、医療分野における触診のような柔軟物を対象とする手技の教育・訓練では、複数指における柔軟感の伝達が重要である。人間の指先における柔軟感の知覚では、力より、力の空間的分布 (対象物の変形により指先の接触面積が変化することで生じる) の寄与率が高いと言われており、位置や力情報に加え、力分布の伝達が必須である。しかし、従来の VR を用いた手指技能伝達の研究は、2 次元空間における指先の力や位置の伝達に限られており、3 次元空間内での柔軟感を含めた技能伝達は未だ実現できていない。3 次元空間において、複数指における柔軟感の伝達・教示ができる教育訓練システムが実現されれば、医療ミスの危険性の回避、実験動物愛護の観点から訓練機会が減少している医学生・医学生・看護学生などの医療手技訓練・学習が可能となる。このため、その教育・訓練システムは社会的意義が大きく、実現が望まれる。

## 2. 研究の目的

上述の研究背景を踏まえ、本研究課題では、人間の 5 指に柔軟感を提示する多指ハプティックインタフェースを用い、複数指における柔軟感の伝達が可能な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、訓練前に熟練者の動作を観察・体験すること、訓練時には教示が重要であることが知られている。このため、観察・体験に重点を置いた受動訓練法、修正に重点を置いた能動訓練法の 2 段階の訓練方策を取り入れることで、効果的で信頼性の高い高度技能訓練システ

ムを構築することを目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 概要

複数指における柔軟感の伝達が可能な技能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 指に柔軟感を提示可能な独自の多指ハプティックインタフェース (図 2) と仮想環境から構成される。

柔軟感提示用ハプティックインタフェースは、5 指に 3 次元の力覚を提示可能な、多指ハプティックインタフェースと柔軟感提示用指ホルダで構成される。多指ハプティックインタフェースを使用する場合、操作者は指ホルダと呼ばれる指サックを指に装着して装置と接続する。この指ホルダには柔軟シートが装備され、シート両端から張力を与えることで、シートと対象柔軟物のヤング率が等しくなるよう制御 (シートの張力制御) される。すなわち、この指ホルダには、柔らかさが可変な柔軟シートが埋め込まれている。そして、力を多指ハプティックインタフェースで提示し、それに加え、柔軟物に触れた際の指における皮膚変形を柔軟感提示用指ホルダで与えることで、5 指に柔軟感を提示する。

訓練システム (図 1) において、方法 ① が、学習者の観察・体験に重点を置いた受動訓練法である。保存された熟練者の動作へ初学者をガイドし、初学者が熟練者の動作を観察および体験する。他方、方法 ② が修正に重点を置いた能動訓練法である。初学者が訓練する際、熟練者の動作を初学者へ提示する。初学者は自身の動作を修正しながら訓練する。そして、訓練前の受動訓練と、訓練中の能動訓練

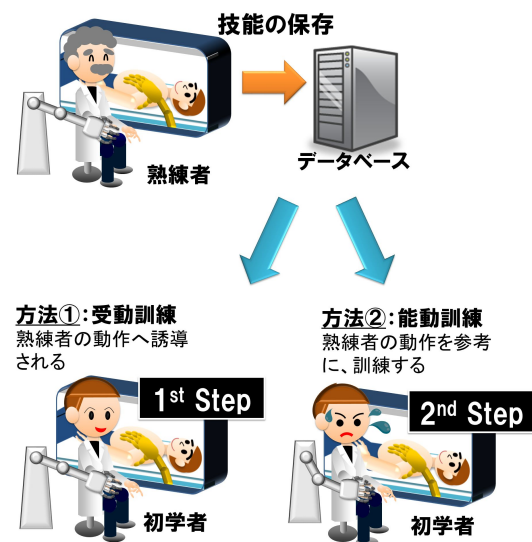


図 1 柔軟感の伝達が可能な手指技能教育訓練システム

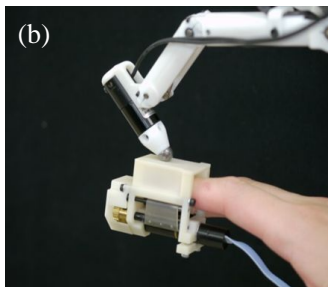
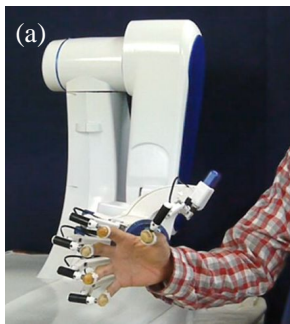


図2 柔軟感提示用ハプティックインタフェース。5指へ力覚を提示可能なハプティックインタフェース(a)と柔軟感提示用指ホルダ(b)から構成

練を組み合わせ、2段階の訓練方策を取り入れることで、効果的で信頼性の高い、柔軟感伝達が可能な訓練システムを構築する。

#### (2) 受動訓練法

受動訓練においては、初学者が熟練者の動作を観察・体験することが目的である。このため、熟練者の指先位置、力、力分布の保存と、初学者の指をそれらデータへ誘導することが求められる。

初学者を熟練者のデータへ誘導する場合、多指ハプティックインタフェースを用い、初学者の指先を熟練者の指先へ位置制御することで、指先位置の誘導が達成される。ただし、1台のハプティックインタフェースでは位置と力を同時に提示できない課題がある。そこで、柔軟感提示用指ホルダのシート高さをモータで制御できるように新規試作する。初学者の指先力が熟練者と等しくなるよう柔軟シートを押し付け制御(ハンド指先の力センサを用いた力制御)することで、力の誘導を行う。これらにより、受動訓練が可能なシステムを構築する。

#### (3) 能動訓練法

能動訓練では、保存した熟練者のデータを初学者へ提示し、提示された情報をもとに、初学者は自身の動作を修正しながら訓練する。

前年度研究開発した受動訓練システムを改良し、初学者への熟練者データの提示法として、熟練者の指先位置を球でモニター表示し、初学者には自身の指先を熟練者の指先に合わせるよう動かしてもらう。また、熟練者

の力の反力を初学者へハプティックインタフェースにて提示し、初学者には反力を打ち消すように動かしてもらう。初学者の指先位置、力が熟練者のそれらと等しくなれば、その際の接触面積も等しくなり、動作の伝達が達成されると考える。

#### (4) 2段階訓練法

受動訓練および能動訓練法の結果を統合し、訓練前の受動訓練と、訓練中の能動訓練を組み合わせた、より効率的な2段階訓練法を確立する。

### 4. 研究成果

#### (1) 受動訓練法

##### 受動訓練システムの開発

初学者を熟練者のデータへ誘導する際、指先押し付け制御をするため、柔軟感提示用指ホルダ内のシート高さをモータで制御できるように、指ホルダを新規に開発した。概略図を図3(a)に、開発した指ホルダを図3(b)に示す。

本ホルダは従来のホルダを基とし、出来る限り大型化を避けつつ柔軟シートガイド軸の上下機構を搭載することを目指した。ホルダ内の柔軟シートは、シート両端がシートガイド軸を介してモータに接続され、モータの回転によりシート両端から張力を与えることで、シートと対象柔軟物のヤング率が等しくなるよう制御される。他方、シートガイド軸は、歯車機構を介して別のモータに接続され、そのモータによりシートガイド軸が上下に移動できる。これにより、初学者の指先力が熟練者と等しくなるよう柔軟シートを押し付け制御することで、力の誘導を行う。

以上より、多指ハプティックインタフェースにより、初学者の指先を熟練者の指先へ位置制御し、柔軟シート高さを制御可能な柔軟感提示用指ホルダにて、指先力を誘導する受動訓練システムを開発した。

##### 受動訓練システムの評価

受動訓練法として、次の訓練法を提案した。データ保存に関しては、仮想環境内で操作している熟練者の指先位置・力を多指ハプティックインタフェースで取得し、力分布は、ヘルツの接触理論により力と位置から計算する。またデータへの誘導に関しては、多指ハプティックインタフェースを用いることで、初学者の指先位置を熟練者の指先位置へ誘導し、柔軟感提示用指ホルダ内のシート高さを、初学者の指先力が熟練者と等しくなるよう制御することで、指先力を誘導する。なお接触力の誘導に関しては、ヘルツの接触理論および柔軟シートの張力制御を行い、その有効性を検討した。

#### (2) 能動訓練法

受動訓練法による柔軟感の伝達では、仮想



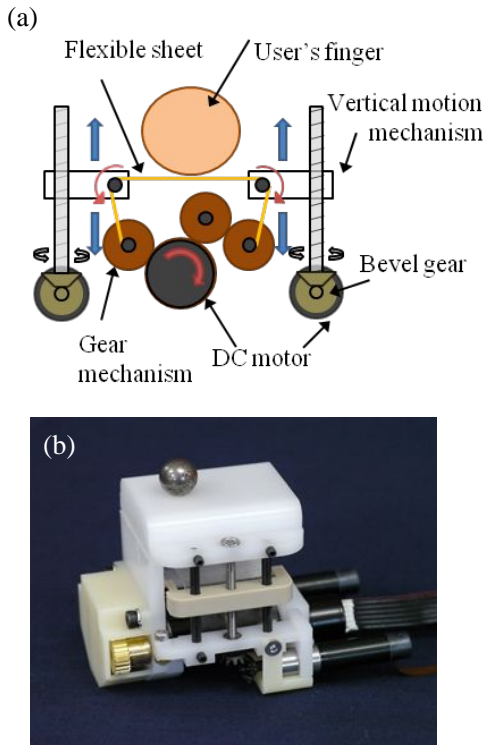


図3 ホルダ内に装備された柔軟シートの高さを制御可能な柔軟感提示用指ホルダ。(a) 概略図、(b)実デバイス

空間上で訓練中の初学者に、保存した熟練者の動作を提示し、初学者が自身の動作を修正しながら訓練する方法である。熟練者が作業時に感じる柔軟感を初学者へ伝達するためには、保存した熟練者の指先位置、指先力、力分布を、初学者が訓練する際に提示することが求められる。受動訓練法の際に開発した柔軟感提示用指ホルダとハプティックインタフェースを組み合わせ、これを実現するための方策を提案した。

具体的には、指先位置の伝達に関しては、熟練者の指先位置を球でモニターに表示し、初学者には自身の指先位置を球にあわせるように動かしてもらう。また、ハプティックインタフェースを介して、熟練者の力の反力を初学者へ提示し、初学者には反力を打ち消すように指を動かしてもらう（初学者へ提示すべき力は2種類ある。1つは熟練者の保存した力であり、もう1つが、初学者が仮想物体に触れることで得られる反力である。このため、5. 主な発表論文等〔雑誌論文〕で提案した方法により、それら2種類の力を交互に初学者へ提示する）。指先位置および力が熟練者のそれらと等しくなれば、その際の接触面積も等しくなる。これにより、修正に重点を置いた能動訓練法が可能となった。

### (3) 2段階訓練法

受動訓練法と能動訓練法を組み合わせた2段階訓練法の構築を行った。

受動訓練法は、保存された熟練者の指先へ

初学者をガイドし、初学者が熟練者の動作を観察および体験するものである。他方、能動訓練法は、仮想空間上で訓練中の初学者に、保存した熟練者の動作を提示し、初学者が自身の動作を修正しながら訓練する方法である。人の指先に柔軟感を提示可能なハプティックインタフェースを用い、訓練前に熟練者の動作を観察・体験する受動訓練と、訓練中の修正に重点を置いた能動訓練法を組み合わせることで、動作の観察・体験と修正を行える、2段階訓練システムを構築した。このような観察・体験と教示による技能伝達の効果は、学習心理学の観点からは、訓練前に動作を観察・体験すること、訓練時には教示が重要であることが知られており、この2段階の訓練方策を取り入れた本手法は、効果的で信頼性の高い訓練システムであると考えられる。

### (4) 柔軟梁による柔軟感提示

柔軟感を伝達する技能訓練システムにおいては、人間に柔軟感を提示できるハプティックインタフェースが重要な役割を果たす。柔軟感を提示できるハプティックインタフェースは様々なものが研究開発されているが、その中でも、柔軟梁を用いた柔らかさ提示デバイスでは、柔軟梁がもつ柔らかさを利用することで、操作者に柔軟感を提示するハプティックインタフェースである。機構構造が非常にシンプルであり、小型化に適しているなどの利点がある。

そこで、柔軟感を提示するハプティックインタフェースの研究として、柔軟梁の力制御に関する研究も併せて行った。柔軟梁のモデルとしては、ティモシェンコ梁を採用し、それによる力制御問題について検討した。ティモシェンコ梁はオイラー・ベルヌーイ梁より広い応用範囲を持つため、ティモシェンコ梁による力制御問題は、実用の観点からも重要な問題である。なお、システムのダイナミクスは、柔軟梁を表す偏微分方程式 (PDE) とアクチュエータのダイナミクスを表す常微分方程式 (ODE) から構成される混合定数系である。有限次元化を導入すると、剰余モードによりシステムが不安定になる危険性や、制御器の高次元化が想定される。そこで、対象を無限次元のまま取り扱う、エネルギーに基づいた制御器設計により、簡便な制御器を設計した。ヒルベルト空間上でシステムを定式化することで、システムの安定性証明し、また、関数空間上でスペクトル解析を行うことで、制御性能について明らかにした。さらに、数値シミュレーションによりその有効性を示した。

なお、本研究課題で得られた成果をまとめ、学術雑誌への論文投稿を行い、成果の普及に努めた。

また、これまでの VR 技能伝達法では、2次元作業における位置や力の伝達に限定さ

れていた。本研究の教育訓練システムでは、3次元空間において、複数指への柔軟感（位置・力・力分布）の伝達を含む正確で効果的な技能教示ができる点で、従来研究と一線を画す独創的なものである。さらに、本研究では、受動訓練と能動訓練という2種類の技能訓練が可能である。このような観察・体験と教示による技能伝達の効果は、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、効果的な技能伝承が期待できると考える

#### 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6件)

Takahiro Endo, Minoru Sasaki, Fumitoshi Matsuno, “Contact-Force Control of a Flexible Timoshenko Arm”, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.62, No.2, pp.1004-1009, 2017, (査読有),

DOI: 10.1109/TAC.2016.2569432

Takahiro Endo, Minoru Sasaki, Fumitoshi Matsuno, Yingmin Jia, “Contact-Force Control of a Flexible Timoshenko Arm in Rigid/Soft Environment”, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.62, No.5, pp.2546-2553, 2017, (査読有),

DOI: 10.1109/TAC.2016.2599434

Takahiro Endo, Ayaka Kusakabe, Yuta Kazama, Haruhisa Kawasaki, “Haptic Interface for Displaying Softness at Multiple Fingers: Combining a Side-faced-type Multi-fingered Haptic Interface Robot and Improved Softness-display Devices”, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol.21, No.5, pp.2343-2351, 2016, (査読有), DOI: 10.1109/TMECH.2016.2567453

Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, “A fine motor skill training system using multi-fingered haptic interface robot”, International Journal of Human-Computer Studies, Vol.84, pp.41-50, 2015, (査読有),

DOI: 10.1016/j.ijhcs.2015.08.006

遠藤 孝浩, 川崎 晴久, 中川 志信, 山下 誠治, 土屋 陽太郎, 石樽 康彦, “側面設置型多指ハプティックインターフェイス”, 計測自動制御学会論文集, Vol.51, No.4, pp.251-259, 2015, (査読有),

DOI: 10.9746/sicetr.51.251

遠藤 孝浩, 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

学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.134, No.10, pp.913-920, 2014, (査読有),

DOI: 10.1541/ieejias.134.913

##### 〔学会発表〕(計3件)

Takahiro Endo, Fumitoshi Matsuno, “Force Control of a Flexible Timoshenko Arm for Softness Display”, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2016), 2016年3月8日, 成蹊大学(東京)

遠藤 孝浩, 松野 文俊, “Timoshenko アーム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, 2015年8月6日, 芝浦工業大学(東京)

Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, “Collision Avoidance and its Experimental Investigation for a Side-Faced-Type Multi-Fingered Haptic Interface”, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC2014), 2014年10月8日, San Diego (USA)

##### 〔その他〕

###### (1)アウトリーチ活動情報

遠藤 孝浩, “ロボット研究、特にロボット群、ハプティクス(触感覚)技術”, 京都産学公連携フォーラム 2017, 2017年3月2日, 京都パルスプラザ(京都)

###### (2)ホームページ等

<https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/hk2nZ>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

遠藤 孝浩 (ENDO, Takahiro)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 70432185