

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501
研究種目：若手研究
研究期間：2018～2019
課題番号：18K13722
研究課題名（和文）巧みなハンドリングに寄与する触覚機能の解明：皮膚変形の時空間分布再現を起点に

研究課題名（英文）The study of the sense of touch that contributes to skillful human handling: Starting with the reproduction of the spatio-temporal distribution of skin deformation

研究代表者
永野 光 (Nagano, Hikaru)
神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：70758127
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、仮想・遠隔環境における人の手の巧みさに対する皮膚・深部感覚の寄与を明らかにすることを目的に、高解像度な触覚ディスプレイの開発およびそれを用いた評価を実施した。吸引圧分布刺激を用いた皮膚変形提示方法を構築し、指先に装着可能な小型軽量の装置でありながら指先皮膚上に多数の吸引圧力分布を生成可能な触覚ディスプレイを構築した。また、刺激分布を実時間で計算するシミュレータとの統合も実施し、構築したシステムによって皮膚刺激を介して硬軟感の提示が可能であることを示した。また、吸引圧力分布ディスプレイと力覚ディスプレイの統合を実施し、硬軟感知覚への寄与を調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高い臨場感を有する触覚再現は、手術・触診シミュレータの開発や、高度な遠隔操縦支援システムの構築などに必要な要素である。特に本研究において再現対象として着目した物体の硬軟感は触覚においても主要な要素であり、複数の感覚（深部感覚と皮膚感覚）の統合によって知覚される複雑な感覚である。本研究の成果は、深部感覚と皮膚感覚を独立して高精度に再現可能なシステムであり、高い臨場感のある硬軟感再現を実現するというエンジニアリングの貢献を有するとともに、硬軟感がどのように統合されて知覚されるのかという人の知覚メカニズム解明に利用するというサイエンス的貢献を有する成果である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a high-resolution haptic display and clarify the contribution of cutaneous and kinesthetic sensation to the skillfulness of human hands. We developed a method for presenting skin deformation using suction pressure distribution stimuli, and constructed a tactile display that can generate a large number of suction pressure distributions on the fingertip skin. The system was also integrated with a simulator that calculates the stimulus distribution in real time, and it was shown that the constructed system can present hardness and softness. In addition, the integration of the suction pressure distribution display and force display was performed to investigate their contribution to the perception of hardness and softness.

研究分野：ハプティクス

キーワード：触覚ディスプレイ 皮膚感覚ディスプレイ 力覚ディスプレイ 皮膚変形

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人は、指先を介して知覚する力の大きさや方向、硬軟感などの多様な感覚の違いを把握し利用することで道具操作などの巧みな機能を実現している。

近年、仮想・遠隔環境での多指による物体操作/インタラクションに向けた自然な触動作を妨げない小型軽量の装着型触覚ディスプレイが数多く報告されている。しかし、多自由度の皮膚変形(刺激の空間分布)を高い解像度で提示することは実現しておらず、弾性体把持時の接触面積変化を再現するような触覚ディスプレイは実現できない。高い臨場感を有する触覚の再現を実現することができれば、ヒトの巧みさにつながる手術・触診シミュレータの開発や、ヒトの巧みさを表現できる高度な遠隔操縦システムの構築などにつながると期待できる。

触覚を構成する要素の1つに硬軟感がある。硬軟感は複数の感覚情報(深部感覚情報と皮膚感覚情報)の統合によって知覚される複雑な感覚である。つまり、高精度な硬軟感再現を実現するためには、深部感覚と皮膚感覚を独立して再現可能なシステムが必要であり、深部感覚と皮膚感覚がどのように貢献するのかを調査することも必要となる。

2. 研究の目的

はじめに、高密度吸引圧刺激による皮膚変形の空間パターン提示手法の構築する。高空間解像度の知覚である圧覚(硬軟感、マクロな凹凸・形状知覚)や、皮膚変形を介した力覚(方向、大きさ)を提示するため、皮膚接触面に成形した微細な吸引口群からの吸引圧分布刺激によって皮膚変形の空間パターンを提示する触覚ディスプレイを構築する。吸引圧分布刺激による面知覚という新たな触錯覚現象に取り組む点において、既存の触覚提示に関する研究にない学術的独自性を有するとともに、知見を利用し小型・軽量ながら強度・面積を制御可能な2次元触感提示システムを確立するという創造性も有する課題である。

つぎに、空間的に高解像度な皮膚感覚を提示する吸引圧触覚ディスプレイと、深部感覚を提示する力覚ディスプレイを統合し、硬軟感知覚における皮膚感覚と深部感覚の寄与を調査する。対象物体との接触においては、押し込みに伴って接触面積(面内圧力分布)と反力が変化するが、異なるヤング率を有する物体では、それらの振る舞いが変化する。皮膚感覚と深部感覚を独立に制御可能なシステムを構築することで、皮膚感覚単体、深部感覚単体、そして、皮膚感覚と深部感覚を統合した条件で知覚する硬軟感が変化するのかを調査する。

3. 研究の方法

(1)吸引圧分布刺激の形状最適化

先行的に、微細な吸引口を複数有する皮膚接触部の作製に成功しており、それを用いた疑似的な力覚提示(方向知覚)は実現している。装着型吸引触覚ディスプレイの重要な設計要素として、指腹に接する吸引口群の口径および口間距離がある。吸引口間距離を十分小さくし、空間的に高解像度な口群を設計することで、圧点群ではなく面状の圧覚が生起すると期待できる。また、この関係が吸引口径に影響される可能性も存在する。そこで、指腹に接する吸引口群の口径および口間距離が生起する面状圧覚に及ぼす影響を調査することで、装着型吸引触覚ディスプレイの設計要素を最適化する。

(2)装着型吸引圧分布触覚ディスプレイの構築と評価

触感の知覚においては、自らの触動作に応じて刺激が得られるという状況が重要である。例えば、硬軟感の知覚においては、対象物を押し込む動作(押し込み変位)に応じて、反力や圧力分布、接触面積が変化する振る舞いが重要となる。つまり、触覚ディスプレイを用いた触感の再現においても、装着者自らの触動作に応じた刺激の提示が必要となる。吸引圧分布刺激を用いた高解像度な触覚ディスプレイの実現のためには、触動作を妨げない装着型での実装が必要となる。となり、それらの有効性を検証する必要がある。

(3)吸引圧触覚ディスプレイと力覚ディスプレイの統合に基づく硬軟感知覚の調査

硬軟感の知覚においては、皮膚感覚情報と深部感覚情報の双方の情報が利用される。つまり、硬軟感の複雑な感覚を再現するためには、皮膚感覚を提示するシステムと、深部感覚を提示するシステムの双方が必要であり、それらをどのように統合し利用するのかを調査する必要がある。

4. 研究成果

(1)吸引圧分布刺激の形状最適化

手法

装着型吸引触覚ディスプレイの設計要素を最適化するための実験を実施する。

実験環境を図1(a)に示す。複数の吸引口を有する吸引刺激提示部が指先皮膚に接する。押し付け力によって感覚閾値が変化することを避けるため、装置下に力覚センサを配置する。レギュレータへの指令

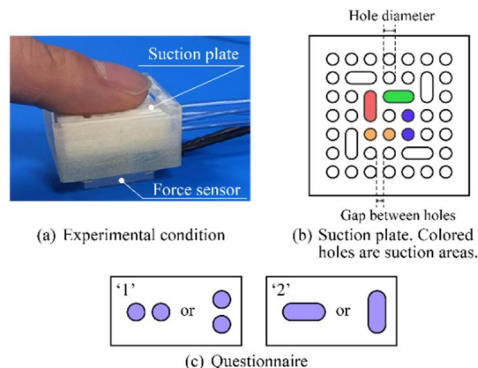


図1 分布最適化実験の環境

電圧を制御することで各吸引口からの圧力を制御する。

吸引装置の概要上面図を図 1(b)に示す。吸引装置は、図 1(b)中で色付けされた四箇所の吸引部と、多数の凹円柱形状の非吸引部で構成される。四箇所の吸引部は、二個の円形吸引口が内部で空気室を共有するもの（縦・横配置各一箇所）と、円形吸引口が平行線で結合された角丸長方形の吸引口を有するもの（縦・横配置各一箇所）である。円形吸引口の口間距離が十分小さい場合、角丸長方形と二個の円形の知覚が等しくなり、口間距離が大きい場合、2種の知覚に差異が生じ易いと推測する。また、これらの関係は口径の影響も受けることが考えられる。参加者が指を吸引装置の上に置く際に形状を判断することを避けるため、吸引部配置の組み合わせは2種用意した。実験に用いた吸引口径および口間距離の組み合わせは、(吸引口径, 口間距離)=(1.5, 1.1), (1.5, 1.7), (1.5, 2.3), (1.7, 1.1), (1.7, 1.7), (1.7, 2.3), (1.9, 1.1), (1.9, 1.7), (1.9, 2.3)の9種である。実験参加者は男子学生3名である。全ての参加者は、傷や火傷などを指に有しておらず、また、実験の目的を知らされていない。

実験手順として、はじめに、吸引装置の上に指を置き力覚センサの値が1-3 Nに入るように調整する。その後、四箇所の吸引口のいずれかから刺激が提示される。吸引圧刺激としてステップ状の刺激を用いる。一定圧の刺激(1 s)が提示された後、大気圧に開放(1 s)するという刺激が、参加者が回答するまで、繰り返される。回答項目は、図 1(c)に示すように、知覚形状が角丸長方形と二個の円形のうちいずれであったのかという項目である。これを一試行とし、四箇所の吸引部ごとに三試行実施する。12 試行が終了した後、吸引口径や口間距離の異なる吸引装置に取り換える。12 試行の吸引刺激および吸引装置の提示順はランダムである。組み合わせごとに2種の吸引装置を実験に用いたため、組み合わせごとに24 試行を実施する。

結果

正答率を図 2 に示す。平均正答率に併せて参加者ごとの正答率を示す。吸引口間距離に関して、口間距離の増加に伴い正答率が高くなる傾向が見られた。口間距離が 2.3 mm のように大きい場合、二点での吸引刺激を面状の圧覚と区別し易いことを表している。口間距離に関する三条件の中では、吸引口間距離が 1.1 mm の条件で、高い空間解像度の面状圧覚提示が実現された。吸引口径に関して、口径が小さいほど、正答率は低い傾向があり、二点吸引刺激を面状の圧覚と知覚しやすいことが示された。しかし、口径が 1.5 mm の条件では、多くの参加者より、刺激強度が小さいという報告が得られ、強度の大きな力覚提示を実現するためには、吸引口径を大きくする必要があると推察できる。提示可能な力覚の範囲もディスプレイを設計する上での重要な要素の一つであるが、この点に関しては、知覚強度の測定を交えた今後の調査が必要となる。

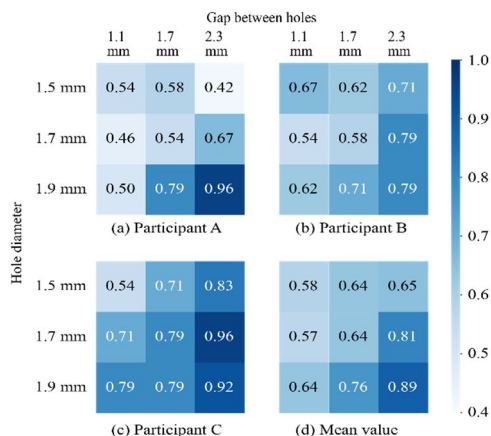


図 2 分布最適化実験の結果

(2) 装着型吸引圧分布触覚ディスプレイの構築と評価手法

最適化された吸引パラメータに基づき製作した装着型吸引触覚ディスプレイ(図 3)を用いて、皮膚感覚情報(吸引圧刺激)の提示によって硬軟感の再現が可能であるのかを調査する。

製作した装着型触覚ディスプレイの指先装着部は2層構造であり、接触する内層は柔軟な材料とすることで指先形状の個人差を緩和するとともに接触面を可能な限り密に保つことで空気漏れを割ける設計である。エアチューブを除く先端部の重量は5 g と非常に軽量であり、自然な触動作を妨げない。

硬軟感の再現が可能であるのかを調査するための実験を実施する。実験参加者は、5名の男性(22-24歳、全員右利き)であり、実験の目的は事前には知らされていない。参加者は、モニタの前に座り、人差し指に触覚ディスプレイを装着した。また、周囲の雑音を隠すために、ヘッドフォンでピンクノイズを提示した。指の位置および姿勢は、光学式のモーションキャプチャ(Leap Motion、Leap Motion、Inc.)を用いて計測した。異なるヤング率(5.0, 1.0 および 0.015 MPa)を持つ3種の刺激がランダムな順序で提示された。参加者は、知覚されたヤング率に基づき刺激を順位付けした。参加者は人差し指を垂直方向に自由に動かすように指示され、対象に複数回触れることを許可された。3種の刺激を体験した後、再度刺激を選択し触れることができた。以上のタスクは、視覚および触覚フィードバック条件の

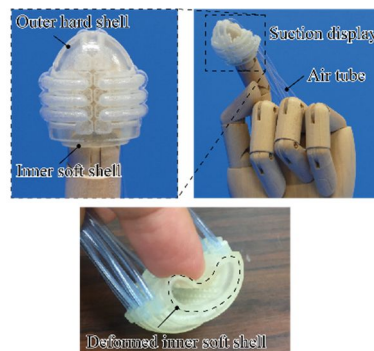


図 3 装着型吸引圧触覚ディスプレイ

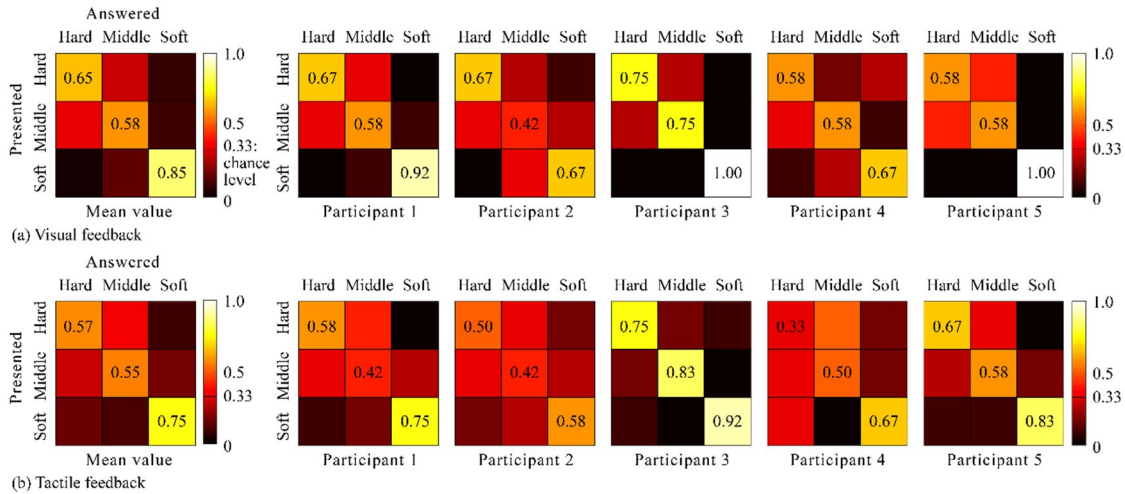


図4 硬軟弁別実験の結果

2条件下で実施した。視覚フィードバックの際は、変形する対象物体と模擬指モデルが参加者にモニタを介して提示された。触覚フィードバックの間は、指先の現在位置および変形しない対象物体の初期状態がモニタを介して提示された。各条件に対して12試行、合計で24試行が参加者ごとに実施された。

結果

図4(a)および(b)はそれぞれ、視覚および触覚フィードバック条件における参加者ごとの混同行列および平均を示す。平均に関して、視覚条件では3種の刺激(硬い, 中間, 柔らかい)に対する正答率はそれぞれ65, 58および85%となった。触覚条件では3種の刺激(硬い, 中間, 柔らかい)に対する正答率はそれぞれ57, 55および75%となった。この結果は、構築したシステムによって視覚に整合した触覚提示が実現できていることを示唆している。

参加者ごとの結果に関して、参加者3および5は視覚および触覚条件のいずれにおいても3種の刺激を高い精度で弁別できている。一方、他の3名の参加者はhardとmiddleの対象を区別し難い傾向が示された。

また、視覚条件と触覚条件の関係には個人差が示された。参加者3は、視覚条件とは対照的に、触覚条件において高い正答率を示した。一方、参加者4は触覚条件では視覚条件よりも低い成績を示した。

以上の結果は、個人差はみられるものの、構築したシステムが触察対象物のヤング率の違いに起因する圧力分布の違いを表現できていることを支持する結果である。

(3) 吸引圧触覚ディスプレイと力覚ディスプレイの統合に基づく硬軟感知覚の調査

手法

皮膚感覚を提示する装着型吸引触覚ディスプレイと、深部感覚を提示する力覚ディスプレイ Touch USB と統合する。そして、物体の硬軟(ヤング率)に応じた深部感覚情報(反力)と皮膚感覚情報(圧力分布)の押し込み変位に対する振る舞いを、ヘルツの接触理論に基づき計算し、それらを提示するシステムを構築する。

構築システムを用いることで硬軟感知覚における皮膚感覚と深部感覚の寄与の調査が可能であるのかを調査するための実験を実施する。実験参加者は6名である。参加者の利き手の示指に装置を取り付けるが、参加者は全て右利きであった。実験では、素材の順位付けを行う。仮想物体の硬さの領域を、ヤング率のオーダーを基準に3種のグループ(soft, medium, hard)として設定した。各グループは異なる3種のヤング率で構成される。皮膚感覚のみを提示する条件(C: cutaneous), 深部感覚のみを提示する条件(K: kinesthetic), 皮膚感覚と深部感覚を複合的に提示する条件(I: integrated)について比較する。各参加者は9試行(3種のヤング率範囲×

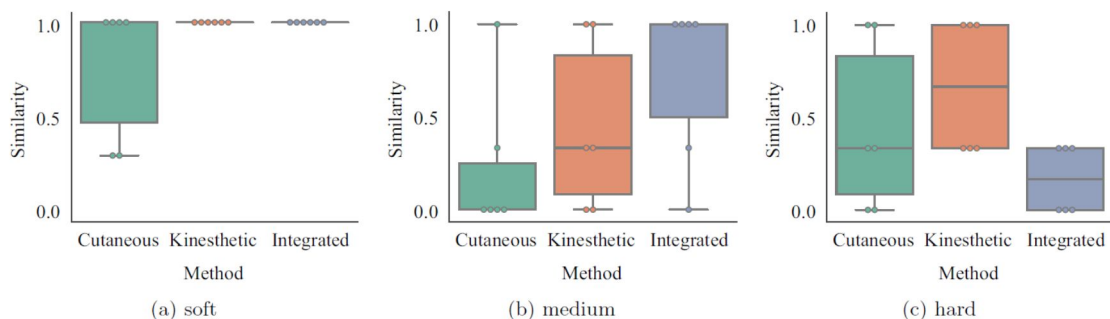


図5 硬軟感寄与率調査実験の結果

3種の提示手法)順位付けを行う。提示手法の順序はランダムとした。また、作動音によるバイアスを避けるため、参加者は実験中はヘッドフォンを装着しピンクノイズを聴いた状態で実験を行う。

結果

提示した刺激の順位と回答した順位の類似度を表す指標を算出した。3種のヤング率範囲ごとの類似度の違いを図5に示す。

図5(a)に示すように、softの領域では、3種の手法全てにおいて高い類似度を示した。これは、実験に用いたヤング率の幅が大きかったため、多くの参加者が硬軟の違いを容易に判断できたことを表している。つぎに、図5(b)にmediumの条件の結果を示す。この条件では、統合システムにおける類似度に比べて、皮膚感覚単体や深部感覚単体で提示した条件での類似度が低くなった。また、皮膚感覚単体に比べて深部感覚単体での類似度が高く、このヤング率範囲では深部感覚の寄与が高いことを示唆された。図5(c)の条件では、深部感覚情報がサチュレーションしてしまい、安定した提示ができなかったため、統合条件における類似度が低いという不自然な結果が得られた。

以上のように、深部感覚と皮膚感覚を独立して提示可能なシステムが構築されたことで、今後より詳細な条件での比較検討を行うことが可能となった。これらの成果は、より精度の高い硬軟感の再現や、その他の応用システム(手術シミュレータや遠隔操縦システム)への展開につながる成果である。

<引用文献>

Minamizawa, K., Fukamachi, S., Kajimoto, H., Kawakami, N., & Tachi, S. (2007). Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies (pp. 8-es).

Prattichizzo, D., Chinello, F., Pacchierotti, C., & Malvezzi, M. (2013). Towards wearability in fingertip haptics: a 3-dof wearable device for cutaneous force feedback. IEEE Transactions on Haptics, 6(4), 506-516.

Fujita, K., & Ohmori, H. (2001, July). A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control. In 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (pp. 78-82).

永野 光, 昆陽 雅司, 田所 諭, 指腹における吸引圧力の空間分布制御に基づく多指装着型触覚ディスプレイ-多自由度の方向知覚の検証-, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 1D4-05, 2017

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 Nagano Hikaru, Sase Kazuya, Konyo Masashi, Tadokoro Satoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Wearable Suction Haptic Display with Spatiotemporal Stimulus Distribution on a Finger Pad	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/WHC.2019.8816156	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4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 永野 光, 齋藤 薫, 昆陽 雅司, 佐瀬 一弥, 田所 諭
2. 発表標題 指腹における吸引圧力の時空間分布制御に基づく多指装着型触覚ディスプレイ -吸引圧分布による面状圧覚生起条件の調査-
3. 学会等名 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐瀬 一弥, 永野 光, 昆陽 雅司, 齋藤 薫, 田所 諭
2. 発表標題 吸引圧力の時空間分布制御に基づく装着型触覚ディスプレイ -柔軟物接触時に生じる力分布の実時間計算法-
3. 学会等名 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤 薫, 永野 光, 昆陽 雅司, 田所 諭
2. 発表標題 手掌部への吸引圧刺激による把持感の提示
3. 学会等名 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齊藤 真也, 永野 光, 昆陽 雅司, 田所 諭
2. 発表標題 高周波振動を用いた触覚提示による建設ロボットの遠隔操縦支援
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----