

研究報告書

「触知覚の内的特性に基づく技と感性の共有支援技術の創成」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成26年10月～平成30年3月

研究者: 田中 由浩

1. 研究のねらい

触覚の共有の実現とそれがもたらす社会像

人類が言語を獲得したことで反映してきたように、情報の共有は適切に活用されれば持続的発展をもたらす。現代は多様な情報がデジタル化され、共有可能になっているが、未だ触覚は共有されていない。視覚や聴覚と比べると、触覚は極めて主観的で曖昧であり、各人の解釈に留まっている。多くの知覚メカニズムは未解明で応用による価値創造も途上にある。一方、我々は豊かな触覚の世界を持っている。触覚を通じて繊細な動作の実現や多様な質感を感じ取ることができる。



図1 開発する触覚共有支援技術と社会との関係

触覚を正確に共有できるようになれば、各人に応じた触感の評価やデザイン、効果的な技の伝承ができるようになる。感性の共有は、システムティックな触感のデザインを実現し、高齢者を始め様々な人の快適性や安心、QOLの向上に繋がる。技の共有は、医療・福祉、産業の高精度化や効率化を拡充させる。さらに、触覚は原始的な感覚であり、安心感や心地よさ等の情動とも関係する。他の人が感じている触覚の世界を共有できれば、他者への理解や思いやりを育み、多様性を尊重する人に優しい社会の実現に貢献できる。

本研究のアプローチと達成目標

触覚の定量化は対象の形状や硬さ等の物理情報を基に試みられることが多かったが、知覚している情報は、我々自身の皮膚で起こる変形や熱の移動である(自己言及性)。ここで、皮膚の特性(厚みや剛性など)は人によって異なる。さらに、触るという動作と触覚の受容は不可分であり、人は触覚に応じて運動を適切に調節できる(双方向性)。したがって、同一の対象でも皮膚への入力刺激は人によって異なる。本研究では、このような触知覚の内的特性に注目した。皮膚特性や運動などの個人差と得ている触覚の因果関係を明らかにすれば、触覚の正体を捉え、触知覚メカニズムの解明に繋がる。さらに内的特性に働きかけ個人差を補正し、皮膚への刺激を同一にできれば、ある種の触覚の共有が可能になるのではないかと考えた。そこで本研究では、上述した触覚の共有による社会像の到達に向けた技術創出として、(A)皮膚特性および触覚受容と運動の関係を調べることで人の触知覚メカニズムを明らかにし、得られた知見に基づき、(B)対象と皮膚の直接の接触に干渉せず触覚を変化させる感覚支援技術を開発し、これらを応用して、(C)技や感性を伝える触覚コミュニケーションの支援技術基盤を確立することを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、研究テーマ A: 皮膚特性および触覚受容と運動の関係から明らかにする人の触覚メカニズム、研究テーマ B: 触覚を変化させる感覚支援技術の開発、研究テーマ C: 技や感性を伝える触覚コミュニケーションの支援技術基盤の確立、について取り組み、触覚を情報化し共有するための要素技術の開発やその応用、関連する触覚メカニズムの解明を行ってきた。以下に各テーマにおける主要な成果の概要を示す。

研究テーマ A(触覚)では、各人が得ている触覚情報を取得するために、自然な触覚を保ったまま対象に触れた際に皮膚を伝搬する振動を検知するウェアラブル皮膚振動センサを開発した[4]。これを用いて触覚メカニズムについての研究を進め、主観粗さと皮膚振動が従来の表面粗さなどの物理量よりも良好な関係を示すこと[1]や、皮膚の振動特性の個人差や、触動作による特性変化、また、ものの表面をなぞる際に使用する押しつけ力の個人差などを明らかにした。

研究テーマ B(触覚変化)では、対象と皮膚との直接の接触に干渉せず触覚を変化させる技術として、爪を内側に屈曲変形させることで、指先の触覚感度を変化させる触覚ネイルチップの開発や、テープを接触領域以外に適切に貼り付けることで皮膚を伝搬する振動を増幅し、振動感度を向上する研究[5]に取り組んだ。また、指先に入力された振動を基に、前腕に振動をフィードバックすることで、特定の振動知覚が鈍くなる現象を発見し、「触覚フィルタ」として研究を行った[3]。

研究テーマ C(触覚伝達)では、皮膚の振動特性を基に、ウェアラブル皮膚振動センサで取得した信号を比較的リアルに振動子により再生できる技術を開発し、複数人での触覚共有を実現した。さらに、本技術を深めて、相手の皮膚振動を自身の指に再現する無人称化の研究に取り組み、その可能性を示した。また、本技術を応用させて、理学療法士の触診の伝達や、自身に適切に触覚フィードバックして脳卒中などで感覚が鈍磨した患者の感覚リハビリテーションへの応用に取り組みその可能性を示した。特に、ウェアラブル皮膚振動センサと触覚伝達技術は、触覚を情報化する新しいツールとして製品化され販売が始まった。

(2) 詳細

各テーマについての主要な研究成果の詳細と研究目的の達成状況について述べる。

研究テーマ A(触覚)

・ウェアラブル皮膚振動センサの開発: 皮膚を伝搬する振動を検知するベルトタイプのウェアラブル皮膚振動センサを開発した[4]。センサは高分子圧電フィルムからなり、図2に示すように、指の第1関節と第2関節の間に巻きつけて使用する。対象に触れる指先に干渉しないため、使用者は直接対象に触ることができ、自然な触覚と運動を保つことができる。また、加速度センサと異なり、圧電フィルムの曲げに応じた出力を得ることから、皮膚の振動のみを検知し、使用者の皮膚特性や運動を反映した触覚情報を取得できる。



図2 ウェアラブル皮膚振動センサ

- ・粗さの知覚メカニズムの研究: 上記の皮膚振動センサを用いて、様々なテクスチャ(78種類)をなぞった際の粗さ感とセンサ出力強度を比較した結果、図3に一例として被験者1名の結果を示すように良好な対応関係を得ることができた[1]。表面粗さなどの従来の物理量と比較すると、粗さ感の官能評価値と推定値との差も少なく、振動強度からの推定近似式も1以上のべき指数となった。特に、表面粗さが小さい試料は振動強度および粗さ感も個人差が大きい、これを反映でき、皮膚振動の主観的な触覚情報の数値化への有効性が示された。

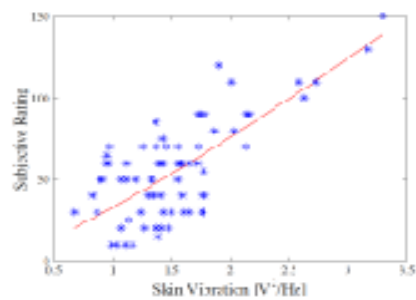


図3 粗さ感と皮膚振動強度一例

- ・皮膚の振動特性の研究: 指先に低周波から高周波までのスイープ振動を入力し、皮膚を伝搬する振動を上記の皮膚振動センサで取得することで、皮膚の振動特性を求め解析した。得られた結果は、先行研究と類似して 100-300Hz 程度に共振周波数を持つことを示し、個人差も示すことができた。また、押し付け力を変化させることによって、皮膚振動の強度や共振周波数が変化することを示し、0.5N 程度より小さいとその変化が顕著なことを示した。
- ・押し付け力やなぞり速度の個人差: 様々なテクスチャーを触る際の押し付け力を皮膚振動と同時に計測した結果、押し付け力の個人差は大きく、0.2-2N 程度まで差があることが分かった。さらに、様々なテクスチャーに対し必ずしも一定の押し付け力を使用しておらず、ある程度の広がりを持つことが分かった。皮膚振動は押し付け力によって変化するが 0.5N 以上ではその変化は大きくなく、得られた結果から、押し付け力の使用の傾向はある程度合理的であることが示唆された。また、マイクロフォンを用いた類似の皮膚振動センサで、細かいテクスチャーに対してはなぞり速度に応じて皮膚振動があまり変化しないことを示した[2]。
- ・研究目的の達成に対して、ウェアラブル皮膚振動センサを開発した寄与は大きい。各人が触覚を得ながらその時の皮膚振動を収集し、定量的に比較検討できる点は、触覚メカニズム研究への大きな活用可能性を示した。得られた知見はまだ断片的であるが主観的な触覚を示すものであり、今後の触覚研究に対しインパクトのある一視点を示すことができた。

研究テーマB(触覚変化)

- ・簡易型触覚ネイルチップ: 以前から開発していた爪を屈曲して触覚を変化させるデバイス「触覚ネイルチップ」を発展させ、簡易的に屈曲の強弱を変更して爪を曲げられるデバイスを開発した(図4)。指先の触覚感度を変化させることができることを示すが、個人差が大きく、マグニチュード推定法を用いた簡便な触覚評価を通して触覚の調整を行う方法を提案した。基礎的な実験結果は、触覚ネイルチップを用いることにより、他の人と同等の粗さ感を得ることができるよう調整できる可能性を示した。



図4 簡易型触覚ネイルチップ

・ テープによる振動知覚増強: 医療用の非伸縮テープを指根元から先に向かって貼り付けることで、皮膚振動を増強させ、振動知覚を向上させられることを明らかにした[5]。皮膚振動と感度の増強には量的に相関関係も確認することができ、感度調整の制御可能性を示すことができた。

・ 触覚フィルタ: 図5に示すように、指先の振動と同じ振動を前腕にあたえることで、指先の振動感覚が消える現象を発見した[3]。異なる周波数を提示した場合は消去が起こらない。これは特定の周波数成分のみの消去・鈍磨を示唆するものであり、指先の触覚を鈍磨させたり、フィルタをかけたようにして変化させたりできる可能性を示した。

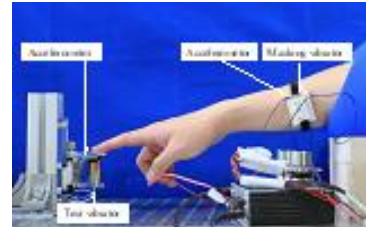


図5 触覚フィルタ

研究目的に対しては、感度を変化させられるデバイスの開発や現象を発見し、おおよそ達成できたが、触覚を調整できる範囲はまだ十分大きくはなく、変化の程度にも個人差があり、皮膚特性に加え認知特性も反映して、研究を進めることで活用を広げることができる。

研究テーマ C(触覚伝達)

・ 皮膚振動伝達: ウェアラブル皮膚振動センサにより取得した触覚情報を振動子により再生する技術を開発した。当該情報には皮膚の振動特性が含まれており、この伝達関数の逆関数で取得した信号をイコライジングすることで、比較的リアルな触覚を提示できる(図6)。

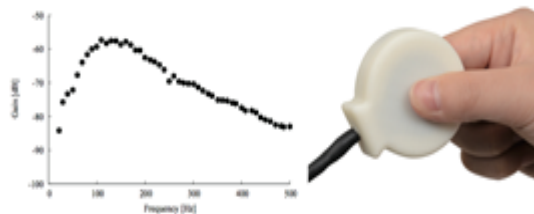


図6 皮膚の振動特性(左)と触覚伝達用振動子(右)

シンプルなシステムであり複数人への

同時提示も行うことができる。皮膚振動センサと組み合わせて本システムは、学会や科学館などで度々デモ展示された。触覚を記録・変調・提示できることから、製品の触り心地の解析や評価、VRなどでの触覚提示への活用など、様々な用途への応用が期待され、製品化され平成29年9月から販売が開始された。

・ 無人称化: 上記伝達技術を発展させ、振動子を持つ人の皮膚の振動特性の逆関数を用いて、センサを装着した人の皮膚振動を再現する方法を提案した。機械刺激のレベルであるが、自身を無人称化し、他の人の感覚を味わうことができる技術であり、触覚共有の向上や技能の伝承などへの応用が期待できる。

・ 感覚代行リハビリテーション: 脳卒中では触覚が鈍くなるケースがある。そこで、触覚伝達技術を感じ覚のリハビリテーションに活用する試みを、国立障害者リハビリテーションセンター研究所の研究者と協働した。鈍磨している手の指に皮膚振動センサを装着し、いくつかのテクスチャーをなぞった際のセンサ情報を増強して、健側の手や患側の手や腕などに提示する。検証中であるが、リハビリテーションツールとして有効な可能性が見られた。特に触覚は運動と密接であり、運動への作用の可能性も見られた。

・ 触診の数値化と伝承: 拘縮治療では理学療法士が患側に手を添えて腕などを動かすと、振動感から癒着部位を鑑別できるが、感覚の伝達や技能伝承は難しい。そこで上記伝達システムを活用し、触覚伝達や数値化に取り組んだ。図7に示すように、患側と健側で差があり(高周波振動の有無)、理学療法士が得ている触覚とも対応しており、有効性が示された。

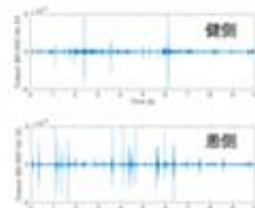


図7 理学療法士による触診の数値化と共有

研究目的に対しては、共有技術を構築し、いくつかの活用可能性も示し、おおよそ達成できたが、テーマBの活用に至らなかった。触覚の共有は様々な領域に応用が期待でき、同時に適切な可視化技術や、振動に加え圧分布や他の感覚との統合を進める必要がある。

3. 今後の展開

本研究を通じて開発したウェアラブル皮膚振動センサや触覚伝達技術は、製品化され販売が始まったが、収集したデータをどのように評価・活用していくかはまだ発展途上にある。触覚メカニズムの研究および応用技術の開発を進めながら、得られた知見などを公開し、同じデバイスを使用している研究者や企業と共有し、触覚の応用を進めたい。センサを活用した触覚情報のデータベースの構築も行いたいと考えている。触覚の評価やデザイン、VRなど、多くの領域で有用である。感覚リハビリテーションツールについても共同研究を通じて製品化を実現したい。

また、本研究期間では触覚情報として皮膚振動を中心に扱ったが、他に圧や温度もある。特に低周波の機械刺激では空間的分布も重要である。これらは、形状や柔らかさの知覚と密接であり、情報化されれば触覚の研究や応用はさらに広がるだろう。内的特性を反映した触覚情報化技術を検討したい。

さらに、触覚の情報化や応用技術の開発に加えて、深層学習なども活用し、触覚情報の編集や他の情報(個人識別や情動、個性)との関係について分析を深め、触覚情報を介した他の領域への応用も進めたい。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

研究目的の達成状況: 注目した内的特性を基にした触覚情報化ツール(皮膚振動のセンシングと提示)を開発し、関連する触覚メカニズムの解明や感度調節や共有技術を開発でき、技の伝承やリハビリテーションなどいくつか具体的研究も推進できたことから、研究目的全体に対してはおおよそ達成できたと考えている。また、主要な成果は製品化・販売開始に至っており、応用をさらに促進する必要があるが、社会への技術展開の観点では計画以上の成果を得ることができた。なお、感覚共有による行動や情動の変容、皮膚振動以外の触覚の情報化についてはさらなる研究が必要であり、今後進めていきたい。

研究の進め方:研究補助員を加えたことで、実験や解析の効率化のみならず、デバイスの製作協力により多くのテーマに開発デバイスを活用でき、研究を円滑かつ効率的に広く展開することができた。また、適切に購入した機器は有効利用され、旅費も学会発表に加え、関連する国内外の研究者や企業を訪問するために使用され、研究の深化と展開に役立った。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果:科学技術的には、触覚の情報化と応用に加え、触覚の主観性や人の多様性を示しその必要性や有用性も示したことで、触覚の研究開発に新たな視点や活用法を与えることができた。得られた成果を基にした共同研究も本研究期間中に一層増え、今後さらなる研究や技術開発の進展および波及効果が期待できる。社会・経済へも、これまで情報化されていなかった触覚を一部の成分ではあるが、記録・編集・提示可能とし、開発したデバイスも製品化され、インパクトを与えられたと考えている。産業的に、触覚は製品の高付加価値付与や新規事業にその応用技術が期待されており、情報化を支援するツールは有効であり、大きな波及効果を有している。

その他:海外ショートビジットや政策立案者との意見交換、企業向けのプレゼンテーション、科学館におけるサイエンスコミュニケーションなどを通して、研究成果の社会実装やビジネスモデル、社会との調和について、知識や経験、洞察を養うことができた。多様な展開方法があり、ビジョンの提示や対話、学際性と協働性の必要性を一層感じ、共同研究の一層の展開、複数企業との創造的研究会の運営、地元科学館へのワークショップ提案と実施などにも結びついた。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

手の指先の触覚を測定するベルトタイプのウェアラブル皮膚振動センサおよび簡易型触覚ネイルチップを開発し、同時に開発した触覚情報伝達振動子と組み合わせて、指先の感触をかなりの精度で観測、伝送、蓄積、再生する技術を確立した。モノの表面の粗さ感を指先が感じる基本的な仕組みを解明し、それをもとに触覚の共有を可能とする技術開発に成功している。すでに実用化や商品化に至った技術もあり、企業や異分野の研究者との共同研究も幅広く進めている。医学、工学、スポーツ科学などその応用範囲は極めて広く、今後の視覚、聴覚に続く第3のデジタル化可能な感覚として触覚を位置づけることに大きな貢献をしている。また、他分野の研究者と幅広く交流し、共同研究を進めて、研究成果を社会情報基盤とすることに大きく貢献している。日本が得意とする微細な加工技術や繊細な指技などを着実に記録し社会的に共有するために利用できる革新的な技術である。常に社会的なインパクトを考えて研究テーマを設定し、着実に解決していく姿勢は、今後のこの分野の世界的な研究リーダーとなる資質を備えており、すでに大きなプロジェクトをリードしている。国家的な大型の研究プロジェクトのリーダーとしての飛躍を期待する。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. Makiko Natsume, Yoshihiro Tanaka, Wouter M. Bergmann Tiest and Astrid M. L. Kappers, Skin Vibration and Contact Force in Active Perception for Roughness Ratings, 2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, Lisbon, Portugal, pp. 1479–1484, 2017.
2. Yoshihiro Tanaka, Yuichiro Ueda, Akihito Sano, Roughness evaluation by wearable tactile sensor utilizing human active sensing, Mechanical Engineering Journal, Vol. 3, No. 2, 15–00460 (12 pages), 2016.
3. Yoshihiro Tanaka, Shota Matsuoka, Wouter M. Bergmann Tiest, Astrid M. L. Kappers, Kouta Minamizawa, Akihito Sano, Frequency-specific masking effect by vibrotactile stimulation to the forearm, Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications, Volume 9775 of the series Lecture Notes in Computer Science, UK, London, pp 156–164, 2016.
4. Yoshihiro Tanaka, Duy Phuong Nguyen, Tomohiro Fukuda, and Akihito Sano: Wearable skin vibration sensor using a PVDF film, Proc. IEEE World Haptics Conference, Evanston, IL, USA, pp. 146–151, 2015.
5. Yoshihiro Tanaka, Yuichiro Ueda, Akihito Sano: Effect of skin-transmitted vibration enhancement on vibrotactile perception, Experimental Brain Research, Vol. 233, No. 6, pp.1721–1731, 2015.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

製品化: 開発した皮膚振動センサを発展させ、企業との共同研究を通じて、指先の触覚の計測と提示を行う「ゆびレコーダー」を開発し、当該企業から販売が開始された(2017年9月18日)。

受賞: 31st Annual Conference of the International Society for Computer Aided Surgery, ISCAS-CARS Best Poster Award(2017.06.23)
第17回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会優秀デモンストレーション賞最優秀賞、ウェアラブル皮膚振動センサの応用展開(2016年12月16日)。

アウトリーチ: 名古屋市科学館の企画展「さわってビックリ! 見てフシギ? 人間の皮膚」に、開発した皮膚振動センサや関連する実験機器を貸し出し展示協力した(2017.9.16-24)。また合わせて、サイエンストーク「さわりごこちのサイエンストーク-触覚研究者と見る皮膚の世界」を行なった(2017年9月23日)。

報道: NHK E テレ サイエンス ZERO「驚異の体感！“触覚テクノロジー”最前線」
(2016 年 11 月 20 日)
「見る、聞く」とは違う、「触覚」がもたらす価値とは 日経 Xtech(web 版)
(2016 年 2 月 17 日)

招待講演: Subjective haptics: technologies for communication、 design and expansion of touch sense、 1st IEEE International Conference on Agents 2016、 Matsue、 Japan (2016 年 9 月 30 日).

解説記事: 田中由浩、振動に関わる皮膚特性、触知覚、運動特性、
バイオメカニズム学会誌 41 巻 (2017) 1 号 p. 21-26 (2017 年 5 月 1 日)