

「ぬくもり」の相互伝達が可能な遠隔コミュニケーションによる 生きがい創出

代表研究者	佐藤 克成	奈良女子大学	研究院工学系	准教授
共同研究者	寺岡 伸悟	奈良女子大学	研究院人文科学系	教授
共同研究者	水垣 源太郎	奈良女子大学	研究院人文科学系	教授

1 はじめに

本研究では、高齢者が生きがいを持って暮らせる社会の実現を目指し、高齢者が遠隔地の家族や知人と触れ合うことを可能とする、高齢者が使いやすい触感の相互伝達システムを実現する。

高齢化社会の進む現代において、高齢者の社会的孤立が問題となっている。高齢者単身世帯の数は増加しており、2020年には700万世帯を超えると推定されている（高齢社会白書、内閣府）。また高齢者は、年齢や身体的衰えにより仕事を辞めるため、65歳以上の就業率は男性でも30%強である（労働力調査、統計局）。単身世帯や仕事の無い高齢者は、社会との関わりが希薄となり、生きがいを喪失しやすい状態にある。

高齢者の社会的孤立への対策として、テレビ電話の活用がある。しかし、映像と音声による対話は、直接会って対話する場合に比べ伝わる情報量が少ないため、対話者を身近に感じにくい、対話内容に齟齬が生じる、などの課題が生じる。こうした課題を解決するために、触感伝達技術が研究されてきた。触感伝達技術を対話時に用いることで、視聴覚では伝わらない人の「ぬくもり」が感じられる。「ぬくもり」は対話者とのつながりを強く感じさせ、精神的な安定をもたらすことが知られており[山口, 2016]、上述の課題を解決し得ると考える。しかし従来の触感伝達技術は、主に遠隔作業などの分野を対象に研究・開発が進んでおり、その使用には専門的な知識や専用の機器の準備が求められる。申込者もこれまで、温冷覚を中心に触感伝達技術の研究に携わり、振動と温度、圧の刺激を伝達する触感の記録／再現グローブを開発してきた[Yem, et al., 2019]。これらのグローブはロボット遠隔操作などの用途には適している。一方で、着用の手間やメンテナンスの煩雑さがある、触感の伝達が単方向である、触感伝達専用の通信が必要となる、などの問題があり、高齢者のコミュニケーション用途には適さない。

以上の背景から本研究では、高齢者に使いやすく、かつ既存のテレビ電話と共用可能な触感の相互伝達システムを開発し、人の「ぬくもり」が伝わる遠隔コミュニケーションの有効性と課題を実証する。

2 関連研究

テレビ電話を活用した高齢者の社会的孤立への対策は、これまで盛んに行われてきた。例えば異文化交流サービス Sail（株式会社 Helte）では、外国の若者に向けたテレビ電話による日本語教室の教師を高齢者に任せる取り組みを行っている。また研究代表者は、文部科学省のCOC+プロジェクト（2016～2019年度）の一部として、農村部の高齢者が日本への留学生とテレビ電話で対話する予備検証を実施した。その結果、高齢者のコミュニケーション意識が向上することを確認した。一方で、対面コミュニケーションと比較した場合の、触感が無いことによる臨場感・存在感の不足が課題となった。

また、触感伝達技術は、ロボットやXR（VRやAR）の分野において著しく発展している。近年では、ANA Avatar XPRIZE と呼ばれる遠隔操作型ロボットの世界的なコンペティションが開催され、その要素として触感情報の伝達技術が含まれている。日本国内においても、内閣府ムーンショットプロジェクトの目標1には、伝達・拡張すべき身体的な情報として触感が含まれている。このように、触感情報の伝達技術に関する研究、特に触感情報を記録するセンサや、再現するディスプレイなどのデバイス技術は、国際的にも急速に発展している。

その一方で、触感情報の伝達は、未だに専用の通信プログラムを研究者各々が準備する必要があり、視聴覚情報の伝達のような規格化・標準化がなされていない。Techtile Toolkit (Solidray Co., Ltd) [仲谷ら, 2014]やゆびレコーダー（テック技販）など、触感の中でも振動のみを音声信号として伝達する試みはあり、一定の有効性を示している。しかし、圧力や温度の情報が含まれないため、その用途は振動が主要な触対象に限られている。これら触感情報の通信手段に関する問題が、触感情報の伝達技術をユーザから遠ざけ、そ

の価値を示す機会を奪っている。

3 研究内容・結果

本研究では、1. 触感伝達システムの開発、2. 高齢者にも使いやすいデバイスデザイン、3. 高齢者など一般ユーザを対象とした有効性の実証評価、の3つの課題に取り組んだ。

3-1 課題1 触感伝達システムの開発

研究代表者が開発した、音声通信を介して振動と温度の単方向伝達を可能とする試作システムを基に、双方向の伝達が可能で、かつ圧力情報も伝達可能なシステムの実現を目指した。

(1) 方法

研究代表者は、音声通信を介して振動と温度の単方向伝達を可能とする試作システム（図1、2）[Sato. et al., 2022; 佐藤ら, 2022]を開発している。マウス型のデバイスを用いて対象の表面をなぞると、デバイスに生じる振動（加速度変化）と温度が計測される。計測された振動はそのまま音声信号に変換され、また温度は高周波の音声信号に変調され、これらが重畳される。変換された音声信号はコンピュータにマイク端子から取り込まれ、Zoom などテレビ電話アプリを介して遠隔地のコンピュータに送られる。遠隔地のコンピュータのスピーカ端子から得られた音声信号は、フィルタにより分割・復調され、振動と温度情報として復元される。そして、マウス型デバイスに搭載された振動子やペルチェ素子によりユーザの手に提示される。この時、送信と受信のコンピュータ間で音声信号のボリュームが異なる可能性があるため、高周波帯に1Vの基準信号を重畳することで、元の振幅を復元可能にしている。

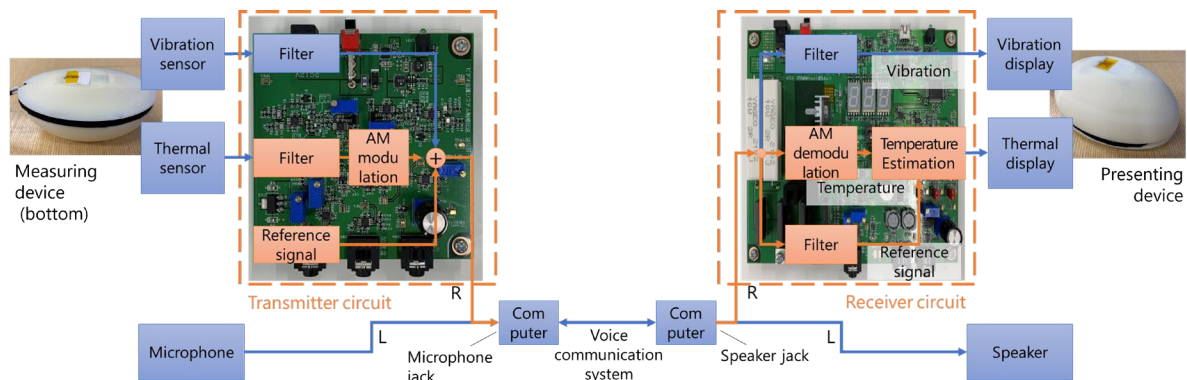


図1. 音声通信を活用した単方向の触感伝達の試作システム



図2. マウス型装置を用いた遠隔触覚伝達

この試作システムを基に、双方向の伝達が可能で、かつ圧力情報も伝達可能なシステムを設計する。人が知覚する振動は数十 Hz～数百 Hz であり、音声信号の数十 Hz～数十 kHz に比べ帯域が狭い。提案システムではこのことを利用し、温度と圧力の情報を 1kHz～20kHz の帯域でそれぞれ変調することで、音声通信を介し

た触感伝達を実現する。この際圧力や温度の情報伝達に用いる帯域をある程度限定する必要がある。そのため、圧力と温度の情報を遜色無く伝達するために必要な帯域を、心理物理学の手法を用いた閾値評価実験から明らかにする。そのうえで、伝達システムの改良に取り組んだ。

(2) 結果

女子学生 14 名を対象として、心理物理学実験の手法である恒常法を用いた閾値評価実験を行った。実験では、温冷交互刺激を用いて、温度の上昇・下降を繰り返す刺激を提示、温度の変化を知覚できる周波数を評価した。0.2Hz、0.5Hz、0.7Hz、0.9Hz、1.2Hz の刺激をランダムな順番で提示し、温度変化を知覚できない割合を調査した。ペルチェ素子は 1 cm 角の大きさであり、パナソニック社製のペルチェモジュール制御システム TECSDK19A を用いて刺激強度を調整した。

温度を知覚できない割合をシグモイド関数で近似し、50% 閾値を算出した。その結果 (図 3)、時間分解能の閾値は 0.5Hz 程度であり、温度の情報を遜色無く伝達するために必要な帯域は 1Hz 程度で十分であることが示唆された。また圧力については、先行研究調査より、金属的な硬さを再現するためには数 kHz の帯域が必要となる一方で、コミュニケーション用途であれば数十～数百 Hz で十分であることが確認できた。

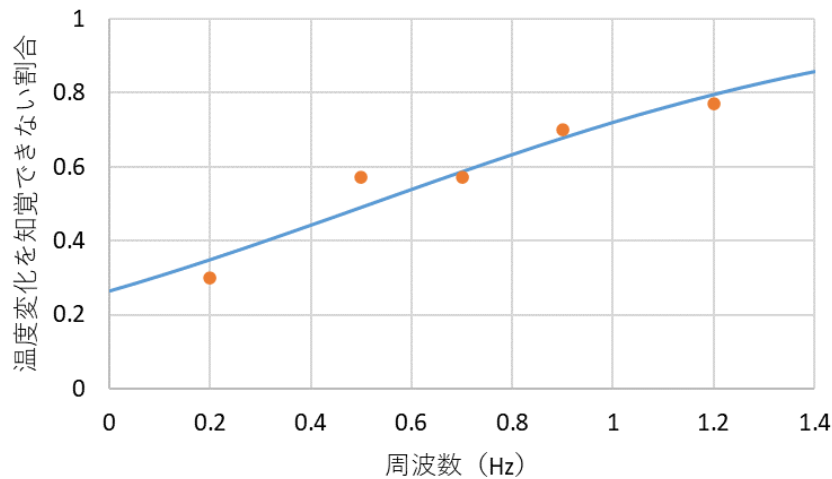


図 3. 温度感覚の周波数特性：時間分解能 0.5Hz

また、双方向の伝達システムの設計・開発においては、実装費用の関係から単方向システムを組み合わせで双方向通信を伝達するよう、計画を変更した。開発した単方向システムによって伝達される触感情報が正確さに伝達されることを、正弦波・矩形波的に変化するバーチャルな温度と圧力情報をシステムによって伝達させ、送信側に入力した波形と、受信側で計測した波形を比較することで評価した。15kHz の正弦波で変調した圧力情報は比較的ノイズが生じやすいが、4kHz の正弦波で変調した温度情報は、圧力情報に比べ 1/10 以下のノイズとなり、正確に伝達可能であることがわかった (図 4)。

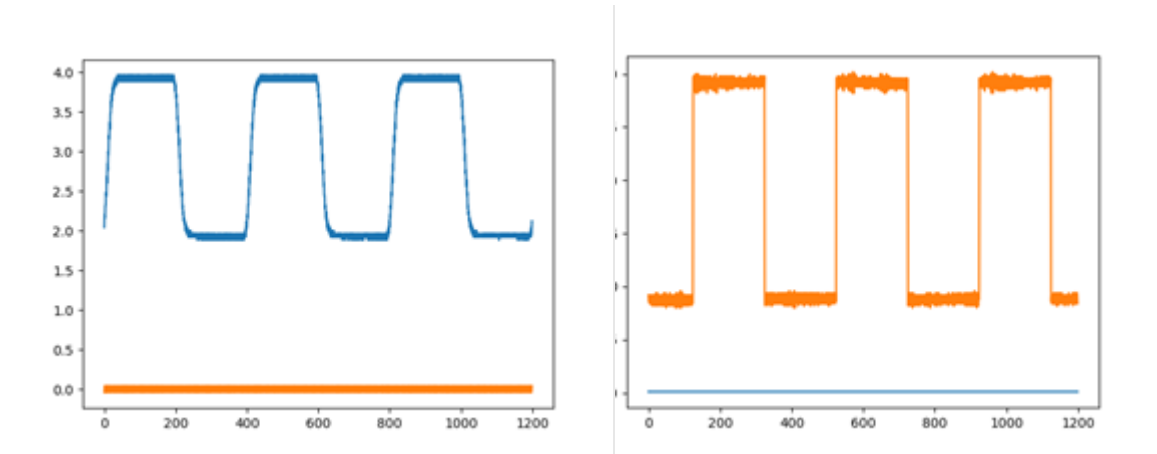


図 4. 伝達システムの評価結果の例：温度の伝達（青色、左図）と圧力の伝達（オレンジ色、右図）

3-2 課題 2 触感伝達デバイスのデザイン

高齢者でも使いやすいデバイスとするため、日常的に用いる多くの道具と同様、把持型のデバイスを設計する。

(1) 方法

図 2 の試作したマウス型デバイスでは、装置が大き過ぎる、対象に計測部を当てにくい、装置の質感により伝達される触感（特に温度）が感じにくくなる、という課題が明らかになっている。そこでまず、モデリングソフトを用いて計上や大きさの異なる把持型のデバイスを数パターン設計し、それらを 3D プリンタにより造形する。高齢者と条件が比較的近い手の小さい女子学生を対象とした設計を行い、女子学生および高齢者により使いやすさを評価尺度報により評価、デバイスデザインを決定する。

(2) 結果

高齢者でも使いやすいデバイスとするため、日常的に用いる多くの道具と同様、把持型のデバイスを設計した。まず、モデリングソフトを用いて形状や大きさの異なる把持型のデバイスを数パターン設計し、それらを Stratasys 社の 3D プリンタ uPrint SE Plus を用いて、樹脂により造形した。特に、幅が 40mm～50 mm の 5 種類の円筒型デバイスに着目し、高齢者と条件が比較的近い手の小さい女子学生 7 名を対象とし使いやすさを評価尺度法により評価した結果、幅は 45mm 付近が望ましいことが示唆された（図 5）。

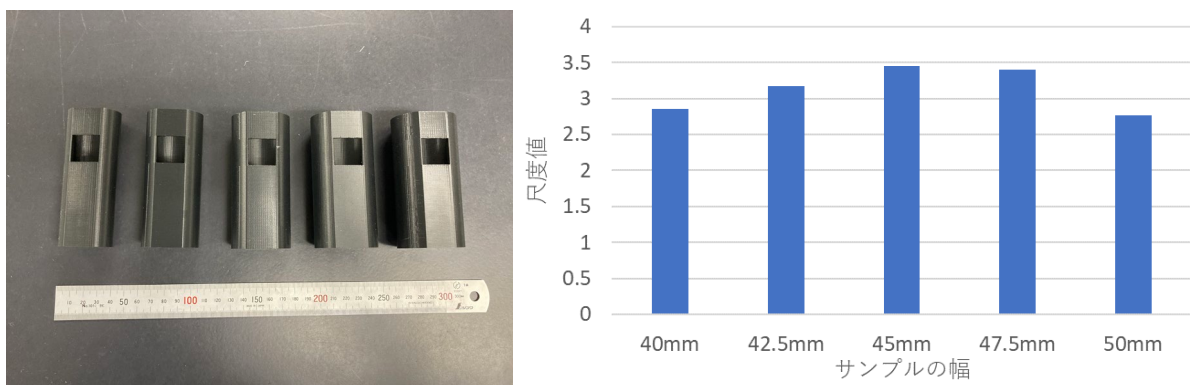


図 5. 把持型デバイスの評価パターン（左）と評価結果（右）

一方で、握りやすいデザインでは温度刺激が適切に提示されない場合があった。そこで、刺激が提示しやすいデバイスデザインとして、指や手首に装着する装置を改めて設計・実装した（図 6）。

送信型における振動と温度の計測にはそれぞれ加速度センサ（KXR91 2050、Kionix 社製）と NTC サーミスタ（B57540G1103F000、EPCOS 社製）を用いた。サーミスタにはペルチェ素子（TEC103103、Thermonamic Electronics 社製）を付与することで、人の皮膚温度を再現できるようにした。

受信側の提示装置にはハプティックリアクタ（TOUGH タイプ AFT14A903A、アルプスアルパイン社製）とペルチェ素子（TEC103103、Thermonamic Electronics 社製）を用いた。ペルチェ素子の表面には NTC サーミスタを貼り付け温度を計測し、送信側で計測され受信側に送られてくる温度を目標温度として PID 制御を行った。

音声通話システムとしては Zoom を活用した。ソフトウェアによるノイズ除去などによる影響を削減するため、背景雑音の抑制を「低」に、高忠実度音楽モードとエコー除去およびステレオオーディオをオンに、そしてオリジナルサウンドに設定した。コンピュータ端末にはラップトップ PC（Vaio VJPF11C11N、Sony 社製）を用い、オーディオ端子としてオーディオ USB 変換アダプタ（PAA-U3P、ミヨシ社製）を用いた。

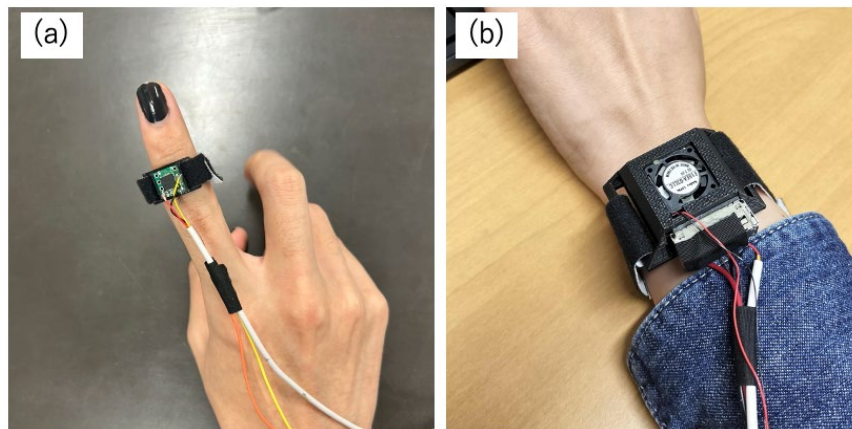


図 6. 実装した触感伝達デバイス：(a) 指に装着する触感計測デバイス
(b) 手首に装着する触感提示デバイス

3-3 課題 3 高齢者など一般ユーザを対象とした有効性の実証評価

課題 1 と 2 を通して開発した触感伝達装置を、高齢者を含む一般ユーザに体験頂き、人の「ぬくもり」が伝わる遠隔コミュニケーションの有効性と課題を検証する。

(1) 方法

開発した触感伝達装置の基本的な有効性を評価するため、図 6 の開発した装着型デバイスを用いて、オンラインでの共同作業中に振動の伝達を行うことが、繋がり感や共同作業感に及ぼす影響を評価する。

また、「ぬくもり」すなわち温度が伝わることの有効性や課題を検証するため、高齢者を含む一般ユーザを対象としたデモアプリケーションを開発、体験会を実施する。

(2) 結果

オンラインの共同作業における振動の伝達実験は、振動あり条件と、対照条件である振動なし条件の 2 つの条件で構成された。いずれの条件も参加者は学生で、振動あり条件では男性 9 名女性 8 名、振動なし条件では男性 10 名女性 7 名であった。両条件で実験者と参加者は別の部屋から zoom を用いてビデオ通話を行い、お互いに中世的な見た目のアバターをパソコン上に表示した。実験者と参加者は、与えられた英文を読み、アルファベット順に単語を抜き出す、というタスクを実施、その後コミュニケーションに関する質問に回答した。アンケートは 7 段階のリッカート尺度により実施し、1 が「全くそう思わない」7 が「強くそう思う」であった。質問が順序尺度であり、正規分布の仮定を用いないノンパラメトリック検定である、Mann-Whitney 検定を両側検定で行った。

結果を図 7 左に示す。「タスクを通して相手との共同作業している感覚が感じられましたか」という質問に関して、振動あり条件では平均 4.8 (SE=0.49)、振動なし条件では平均 3.2 (SE=0.41) であり、条件の間に有意差が見られた ($p=0.016$)。また、「タスクを通して相手との繋がり感が感じられましたか」という質問に

関して、振動あり条件では平均 4.6 (SE=0.43)、振動なし条件では平均 3.5 (SE=0.35) であり、 $p=0.054$ となった。

さらに振動あり条件の参加者について、「振動刺激は、あなたとタスクを行った相手との繋がりを強めるのを助けましたか」という質問に対して、「強めたと思わない選択肢 1、2、3」を選択した参加者をグループ N、「強めたと思う選択肢 5、6、7」を選択した参加者をグループ Y とした。その結果 (図 7 右) 繋がり感に関して、Y グループでは平均 5.9 (SE=0.35)、N グループでは平均 3.6 (SE=0.53) で条件の間に有意差が見られた ($p=0.009$)。共同作業感に関して、Y グループでは平均 6.3 (SE=0.25)、N グループでは平均 3.6 (SE=0.67) で条件の間に有意差が見られた ($p=0.007$)。

このことからビデオ通話をした状態で協力型のタスクを行う際、振動フィードバックがあった場合には繋がり感や協力感といったものに示される、相手の存在感を感じることができるのではないかと考えられる。さらに、これに温度刺激が加わることで、より相手の存在感が高まることも期待できる。

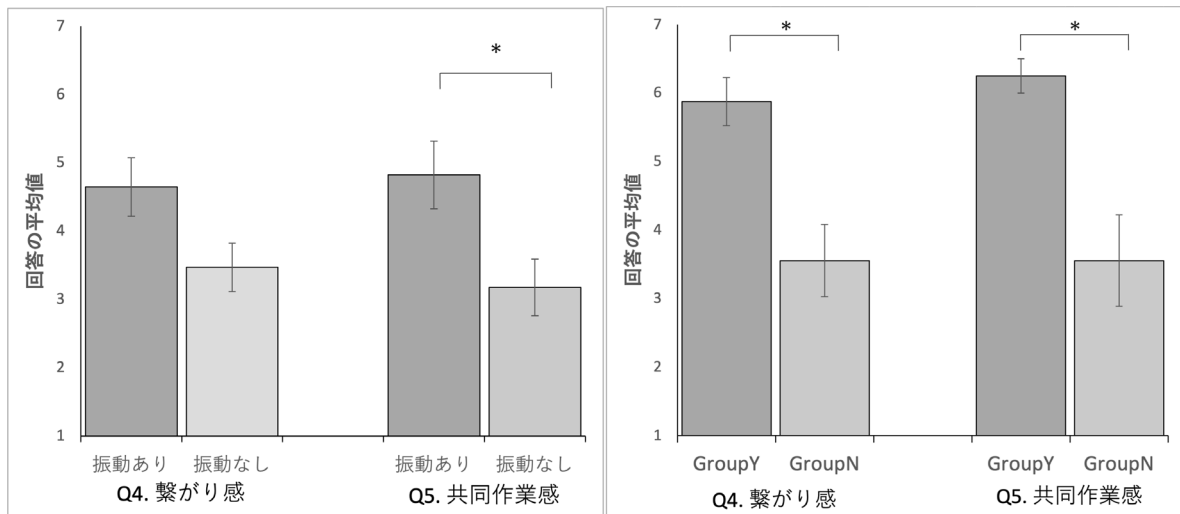


図 7. (左) 繋がり感と共同作業感の回答の平均値. (右) 振動あり条件の各グループにおける繋がり感と共同作業感の回答の平均値. エラーバーは標準誤差、*は $p < 0.05$ を示す.

最後に、振動と温度が伝わるアプリケーションを実装し、触感の違いが明確に伝わることをデモンストレーションし、その感想を得ることで、「ぬくもり」が伝わる遠隔コミュニケーションの有効性と課題を検証した。デモンストレーションでは、平らな金属の板、表面に凹凸のある木製の板、温かいホッカイロの三種類を準備した (図 8)。それぞれ触れている様子の動画と共に、触れた際に生じる振動や温度変化を音声情報として記録、ボタンクリックによりそれぞれの動画と音声再生されるアプリケーションを作成した。Zoom を用いたリアルタイム伝達の場合、通信のノイズの影響を受ける課題が明らかとなったため、記録・再生によるデモンストレーション装置として実装した。

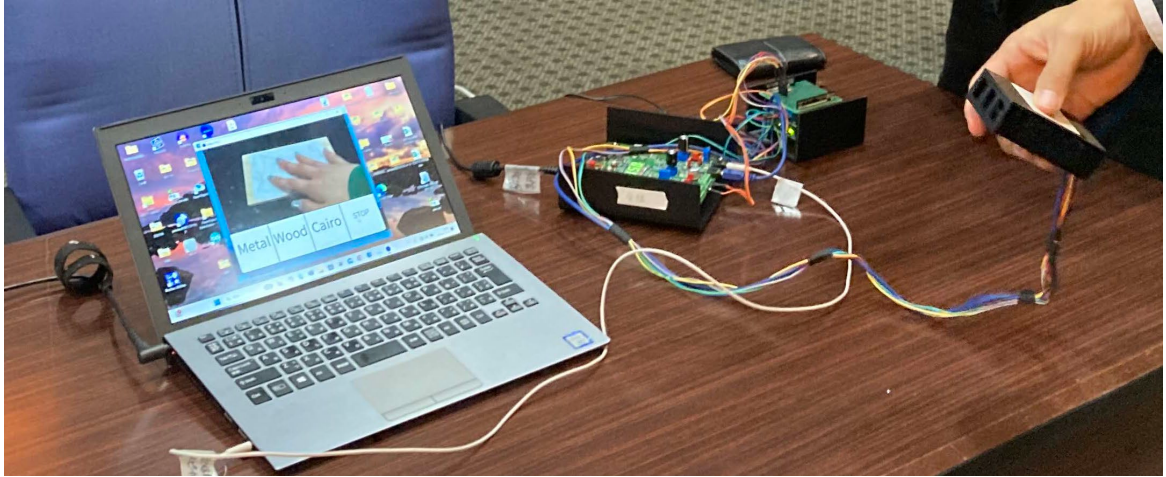


図 8. 触感を音声情報として記録・再生するデモンストレーション装置

デモンストレーションは、2024 年 11 月に京都府京都市の「キャンパスプラザ京都」で開催された「触覚講習会」における企業や大学などの技術者や研究者、学生、および 2025 年 3 月に奈良県下市町の「KITO FOREST MARKET SHIMOICHI」で開催された「オープンラボ」における高齢者を含む一般ユーザを対象に実施した（図 9）。

「触覚講習会」の参加者は、20 代の学生から 60 代の社会人まで、3 種類の触感条件の違いを温度と振動両方の側面から感じ取ることができていた。

奈良県下市町は 2020 年の総人口にしめる 65 歳以上の割合（高齢化率）が 46.8%と高く、「オープンラボ」の来訪者も 70 歳以上が 30%を占めていた。また、20 代と 50 代の参加者が次いで多く（23.3%）、幅広い年代に対する調査を実施できた。いずれの参加者も 3 種類の条件の違いを、温度と振動両方の側面から感じ取ることができた。音声情報を介して触感が伝わることに対しては、既存の電話を超える新しいコミュニケーションの形式に期待感を感じるという意見を多く得られた。



図 9. 「触覚講習会」（左）および「オープンラボ」（右）におけるデモンストレーションの様子

4 おわりに

本研究では、高齢者が生きがいを持って暮らせる社会の実現を目指し、高齢者が遠隔地の家族や知人と触れ合うことを可能とする、高齢者が使いやすい触感の相互伝達システムを開発した。人を対象とした感性評価実験から、触感伝達システムの設計指針を確認し、振動、温度、圧力の触感 3 要素を音声情報として伝達可能なシステムを構築した。そして、振動や温度の触感情報を、少なくとも 3 種類の区別が明確にわかる範囲で伝達可能であること、特に振動については遠隔の共同作業の感覚が高まり、相手の存在感向上につなが

りうることを確認した。また、高齢者を含む幅広い年代が、「ぬくもり」が伝わる遠隔コミュニケーションの価値を定性的に評価した。

今後は、本研究では未検証となった、遠隔コミュニケーションにおける触感伝達による生きがい創出の定量的な評価を目指す。そのため、Zoom など遠隔対話システムを用いた際に生じるノイズの課題や、単方向ではない双方向の触感伝達の実現などの課題の解消に取り組む。

【参考文献】

仲谷 正史, 笥 康明, 南澤 孝太, 三原 聡一郎, 舘すすむ: 触感表現の一般普及に向けた方法論とテクタイ
ルワークショップを通じたその実践, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 19 巻 4 号, 2014.

山口創: 人は皮膚から癒される, 草思社, 2016

Vibol Yem, Hiroyuki Kajimoto, Katsunari Sato, Hidekaze Yoshihara: A System of Tactile
Transmission on the Fingertips with Electrical-Thermal and Vibration Stimulation, HCII 2019,
2019

Katsunari Sato, Jun Wada, Ryota Amakawa: ThermoPhone: Transmission of Thermal and
Vibrotactile Information through an Audio Call System, Asia Haptics 2022, 2022

佐藤克成, 和田潤, 天川良太: 音声通話システムを活用した振動・温度情報の伝達, ロボティクス・メカトロニ
クス講演会 2022, 2022

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
遠隔ビデオ通話における振動フィードバックの共同作業感への影響	インタラクション 2024	2024 年 3 月
Enhancing the sense of Togetherness with Vibrational Feedback in Virtual Communication	23rd IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2024)	2024 年 10 月