

マルチモーダル皮膚感覚提示技術開発のための感覚統合解析

代表研究者 Ho Hsin-Ni

九州大学 芸術工学研究院 准教授

1 研究の目的

人間の皮膚は、触覚・温度感覚・痛覚など複数の感覚モダリティを受容する複合感覚器官であり[1]、日常生活においてこれらは統合的に処理されることで物体の質感や環境の状態が知覚される。近年、仮想現実（VR）・拡張現実（AR）・ロボット遠隔操作などの先端技術分野において、視覚・聴覚だけでなく皮膚感覚をリアルタイムに提示可能な「マルチモーダル皮膚感覚ディスプレイ」の開発が急速に進んでいる[2, 3]。これらのデバイスは、医療訓練シミュレーション、触覚テレプレゼンス、皮膚感覚代替・補完技術など、幅広い応用が期待されている分野である。

マルチモーダル皮膚感覚ディスプレイでは、複数の感覚モダリティ（例えば触覚と温度感覚）を同時または所定の時間関係で提示する必要がある。しかし、人間が複数の刺激を「同時である」と知覚するためには、物理的に完全に同期している必要はなく、ある程度の時間的ずれを許容することが知られている。この許容範囲を「同時性知覚の時間窓（Simultaneity window）, SW」と呼ぶ[4]。この時間窓の大きさは、モダリティの組み合わせや刺激特性によって大きく異なる。

一方、触覚と温度感覚という同一皮膚上で受容される感覚モダリティ間の SW は、本研究が着手するまでほとんど研究されていなかった。これは、触覚と温度感覚を独立かつ精密な時間制御で提示できる装置の開発が技術的に困難であったことが一因である。また、温度感覚には大きく「冷覚」と「温覚」の二種類があり、前者は有髄 A δ 線維（伝導速度 5~30 m/s）、後者は無髄 C 線維（伝導速度 0.5~2 m/s）を介して脳に信号が伝達されるため、同一の温度変化に対しても両者の知覚遅延は大きく異なると予想される[5]。この予測を実験的に検証することは、皮膚感覚の時間統合の神経科学的理解を深めると同時に、マルチモーダルデバイスの設計に直接的な指針を与えるものである。

以上の背景のもと、本研究は以下の三つの目的を設定した。第一に、触覚刺激（機械的タップ）と温度刺激（冷覚または温覚）を、独立に時間制御して同一皮膚部位に提示できる実験装置を開発すること、第二に、触覚と冷覚の組み合わせにおける SW（同時性時間窓全幅、以下 SW）および主観的等価点（Point of Subjective Simultaneity, PSS）を心理物理学的手法により定量化すること、第三に、触覚と温覚の組み合わせについても同様の測定を行い、冷覚の場合と比較することである。加えて、補助期間後半では、刺激の空間配置が時間統合特性に与える影響についても探索的な予備実験を実施した。

得られた知見は、ハプティックデバイスにおける触覚・温度感覚の提示タイミング設計の理論的根拠を提供するとともに、皮膚感覚の多感覚時間統合メカニズムの基礎理解に貢献することが期待される。

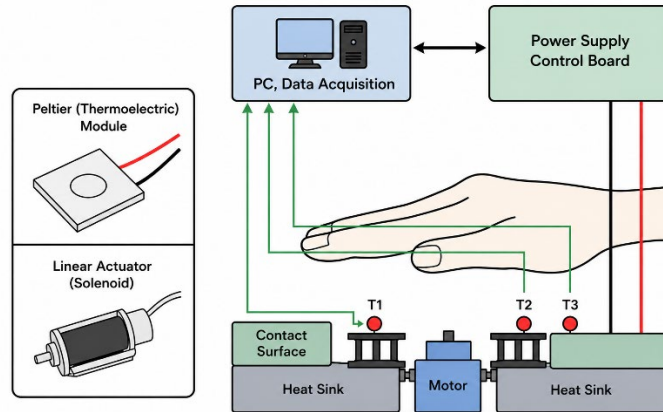
2 研究の方法

2-1 マルチモーダル皮膚感覚提示装置の開発

本研究では、触覚と温度感覚を精密な時間制御のもとで独立に提示できる実験装置を新規に開発した。装置の主要構成要素は、（1）温度刺激部（ペルチェ素子モジュール）、（2）触覚刺激部（電磁ソレノイド）、および（3）リアルタイム制御システムの三部からなる（図 1）。温度刺激部は、中央に穴（直径 14.4 mm）を設けた 30 mm 角のペルチェ素子（430533-502, Laird Thermal Systems 社）を用いた。ペルチェ素子への電流方向と大きさを PWM 信号で制御することで、ベースライン温度（参加者の初期皮膚温度）からの温度変化量（冷刺激：-7° C, 温熱刺激：+5° C）を生じさせた。ペルチェ素子の裏面には放熱ファン付きヒートシンクを取り付け、連続使用時の熱飽和を防止した。

温度変化のタイミングを精密に把握するため、サーミスタ（56A1002-C8, Alpha Technics 社）をペルチェ素子と皮膚の境界面に配置し、15 ms のサンプリング間隔で皮膚温をリアルタイム計測した。ペルチェ素子への電力投入から皮膚温が実際に変化し始めるまでに約 120 ms の遅延が存在するため、この遅延をサーミスタデータから試行ごとに実測し、SOA 計算に際して補正した。

触覚刺激部は、先端直径 3.5 mm、長さ 9 mm の電磁ソレノイドを用いた。ソレノイドの可動範囲は 3 mm である。Python で生成したデジタルパルス信号によりソレノイドが駆動され、プローブが皮膚表面に瞬間的に接触するタップ刺激を生成する。タップ力はばねで調整し、約 1.4 N（予備実験で明確に感知される強さとして設定）とした。



【図 1】 マルチモーダル皮膚感覚提示装置の概要（文献[6]より改変）

ペルチェ素子と電磁ソレノイドは、温度刺激と触覚刺激を同一皮膚部位（左手の母指球部，thenar eminence）に提示できるよう、ソレノイドのプロープがペルチェ素子中央の穴（直径 14.4 mm）を通過する構造で一体的に配置した。実験全体の制御には Python を使用し、USB 接続の DAQ ユニット（AIO-160802AY-USB, Contec 社）を介してペルチェ素子の PWM 信号およびソレノイドのパルス信号を出力した。実験中、参加者はノイズキャンセリングヘッドホン（Soundcore Life Q20, Anker 社）を装着し、装置の動作音を遮蔽した。

装置全体の信頼性を確保するため、各実験セッション開始前にキャリブレーション手順を実施した。具体的には、（1）ペルチェ素子のベースライン温度（参加者の初期皮膚温度）への収束確認、（2）ソレノイドの動作確認、（3）サーミスタの記録確認、（4）参加者の皮膚温の実測確認、の 4 ステップを経てから実験試行を開始した。また、各試行の刺激提示前に 9 秒間のベースライン維持期間を設け、皮膚温が安定した状態で刺激が提示されるようにした。

2-2 実験 1：冷熱触覚同時性知覚の測定

（1）参加者

色覚・触覚・温度感覚に既往症のない健常成人 12 名が参加した。このうち 1 名は全 SOA 水準にわたる同時性判断率が 50%を下回ったためデータを除外し、最終的に 11 名（女性 4 名、年齢 21～30 歳、平均 22.8 歳、SD = 2.30 歳、全員右利き）のデータを分析した。参加者は書面によるインフォームドコンセントを提供した後に実験に参加した。本実験は九州大学倫理審査委員会の承認を受けて実施した。

（2）刺激と実験手続き

実験参加者は、左手を装置の上に置き、左手の母指球部にペルチェ素子を接触させた状態で安静位を保った。各試行は、（a）9 秒間のベースライン温度維持→（b）刺激提示→（c）応答収集→（d）ベースライン回復という流れで進行した。

各試行では、冷却刺激（ベースライン温度から -7°C の温度低下開始）と触覚タップ刺激を、SOA に従って提示した。SOA は -1000 , -700 , -500 , -350 , -250 , -200 , -150 , -50 , 100 , 300 , 600 ms の 11 水準（正值：触覚先行，負値：冷覚先行；中心 SOA = -200 ms）とした。各 SOA 水準につき 20 試行、合計 220 試行を 5 セッション（各 44 試行）に分けて実施した。SOA の提示順序は試行ごとにランダム化した。両刺激の提示後、参加者は二つの刺激が「同時に感じられたか否か」について、「同時」（1 キー）または「非同時」（2 キー）でキーボード応答した（同時性判断課題，SJ task）。

（3）データ解析

11 水準の SOA に対する「同時」と回答した割合（synchrony rate）について、11 名全員のデータを合算した群データ（ideal human model）にガウス累積分布関数を非線形最小二乗法でフィットした。フィット曲線の 50%同時回答率に対応する SOA 値を PSS，同時回答率が 50%以上となる SOA の範囲を SW（同時性時間窓）として定義した。また、各参加者の個人データにも同様のフィットを行い、参加者平均±標準誤差として個人差を評価した。

2-3 実験 2：温熱触覚同時性知覚の測定

(1) 参加者

実験 1 とは独立した健康成人 13 名が参加した。このうち 2 名のデータは分析基準を満たさなかったため除外し、最終的に 11 名（女性 5 名，年齢 21～31 歳，平均 22.9 歳，SD = 2.52 歳，全員右利き）のデータを分析した。選定基準・倫理手続きは実験 1 と同一とした。

(2) 刺激と実験手続き

温熱刺激（ベースライン皮膚温度から $+5^{\circ}\text{C}$ の温度上昇開始；実測平均変化量 4.57°C ，SD = 0.20°C ；上昇率約 1.41°C/s ，SD = 0.06°C/s ）と触覚タップ刺激の組み合わせで実験を実施した。目標温度変化量は温痛覚閾値（通常 $43\sim 45^{\circ}\text{C}$ ）を超えない範囲に設定し，実験前に各参加者の温覚確認を行った。提示部位（左手の母指球部），試行数（220 試行，5 セッション），手続き，応答方法は実験 1 と同一とした。SOA 水準は -2000 ， -1500 ， -1100 ， -800 ， -600 ， -500 ， -400 ， -200 ， 100 ， 500 ， 1000 ms の 11 水準（中心 -500 ms ）とした。温覚刺激は C 線維を介して伝達されるため，実験 1 より大きな時間遅延が予測された。そこで，予備実験の結果を踏まえ，実験 1 より広い SOA 範囲を設定した。

(3) データ解析

実験 1 と同一手順で PSS および SW を算出した。実験 1 との比較には，独立した 2 群（各 11 名）の対応なし t 検定（ $\alpha = .05$ ）を用いた。

3 研究の結果

3-1 実験 1：冷・触覚同時性知覚の結果

実験 1（触覚×冷覚）の結果を図 2(A)に示す。全参加者の応答を統合した群データに対してガウス関数を当てはめた結果，主観的同時点（Point of Subjective Simultaneity: PSS）は -242 ms ，同時性ウィンドウ（Simultaneity Window: SW）は 639 ms と推定された。一方，個人差を考慮するため，各参加者のデータから算出した値を平均すると，PSS は -245 ms （SEM = 29 ms ），SW は 626 ms （SEM = 55 ms ）となった（図 3）。

PSS が負の値であったことから，触覚刺激と冷覚刺激が「同時」と知覚されるためには，冷覚刺激を触覚刺激より約 245 ms 先行して提示する必要があることが示された。この時間差は，有髄 A δ 線維（冷覚，伝導速度約 $5\sim 30\text{ m/s}$ ）による末梢から中枢への伝導時間に加え，中枢における感覚統合処理時間を反映していると考えられる。

本研究成果は，IEEE World Haptics Conference 2023（オランダ・デルフト，2023 年 7 月）において発表し，査読付き国際会議論文として公表された[6]。本成果により，触覚と冷覚の同時性知覚に関する定量的な基礎データを初めて示し，マルチモーダル皮膚感覚提示技術の設計指針となる重要な知見を提供した。

3-2 実験 2：温・触覚同時性知覚の結果

実験 2（触覚×温覚）の結果を図 2(B)に示す。全参加者の応答を統合した群データに対してガウス関数を当てはめた結果，主観的同時点（Point of Subjective Simultaneity: PSS）は -633 ms ，同時性ウィンドウ（Simultaneity Window: SW）は 1001 ms と推定された。一方，個人差を考慮するため，各参加者のデータから算出した値を平均すると，PSS は -569 ms （SEM = 76 ms ），SW は 1041 ms （SEM = 105 ms ）となった（図 3）。

PSS が負の値であったことから，触覚刺激と温覚刺激が「同時」と知覚されるためには，温覚刺激を触覚刺激より約 569 ms 先行して提示する必要があることが示された。この時間差は，無髄 C 線維（温覚，伝導速度約 $0.5\sim 2\text{ m/s}$ ）による末梢から中枢への伝導時間に加え，中枢における感覚統合処理時間を反映していると考えられる。また，同時性ウィンドウは冷覚条件（ 626 ms ）よりも大きく，温覚情報のより遅い処理特性を反映した結果と考えられる。

3-3 冷覚条件と温覚条件の比較

実験 1（触覚×冷覚）と実験 2（触覚×温覚）の結果を比較したところ，温覚条件では冷覚条件に比べて主観的同時点（PSS）が有意に大きく遅延した（ $t(20) = 4.41$ ， $p < .001$ ，Cohen's $d = 0.59$ ）。これは，温覚情報が無髄 C 線維（伝導速度約 $0.5\sim 2\text{ m/s}$ ）を介して伝達されるため，有髄 A δ 線維（伝導速度約 $5\sim 30\text{ m/s}$ ）を介する冷覚情報よりも中枢への到達が大幅に遅れることを反映していると考えられる。

また、同時性ウィンドウ (SW) は温覚条件において冷覚条件より有意に拡大していた ($t(20) = -3.49$, $p = .001$, Cohen's $d = 0.53$)。この結果は、C 線維入力に伴う時間的不確実性の増大により、同時性判断における時間的許容範囲が拡大したことを示唆している。すなわち、PSS は主として末梢から中枢への信号伝達速度の違いを反映する一方、SW は感覚信号の到達タイミングのばらつきや高次の時間統合機構を反映する指標であると考えられる。

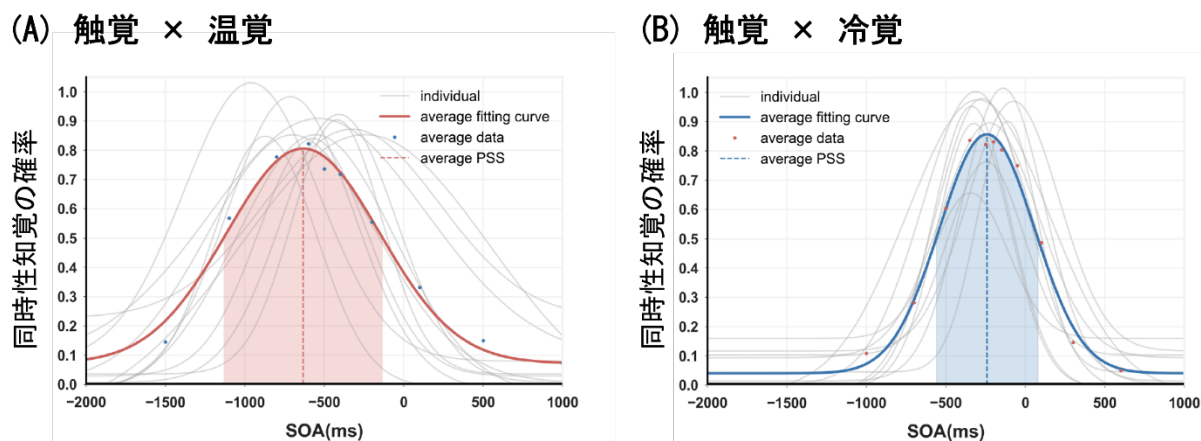
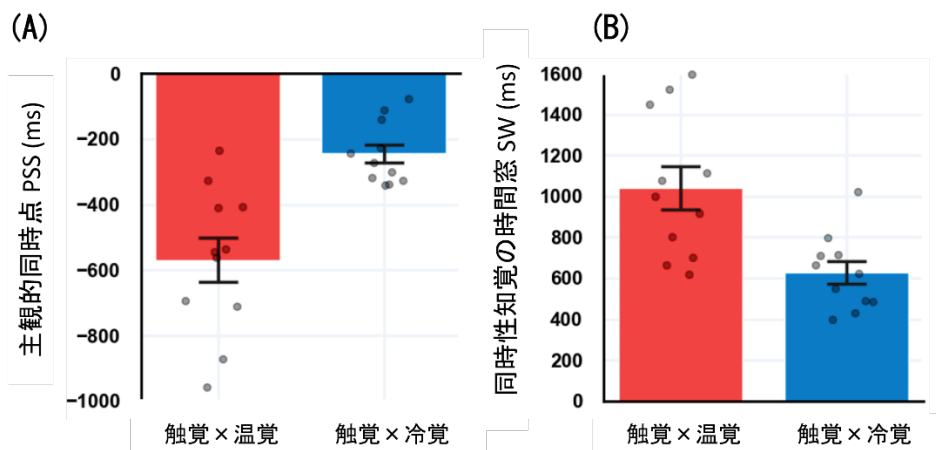


図2 触覚と温度刺激の同時性判断曲線。(A) 実験1 (触覚×冷覚), (B) 実験2 (触覚×温覚) の結果を示す。灰色の曲線は各参加者の同時性判断データに対するフィッティング曲線を示す。青色 (冷覚条件) および赤色 (温覚条件) の点は、各 SOA における全参加者の平均同時性判断率を示し、実線はその平均値に対するフィッティング曲線を表す。点線は主観的同時点 (PSS), 淡色で塗りつぶした領域は群データから算出した同時性ウィンドウ (SW) を示す (文献[7]より改変)。



【図3】参加者ごとのフィッティング結果 (灰色の丸) から算出した平均値。(a) 主観的同時点 (PSS), (b) 同時性知覚の時間窓 (SW)。触覚×温覚条件を赤色, 触覚×冷覚条件を青色で示す。エラーバーは平均値の標準誤差 (SEM) を表す (文献[7]より改変)。

以上の結果は、温度・触覚を統合したマルチモーダル皮膚感覚提示技術の設計において、温覚と冷覚で異なる時間補正を行う必要があることを示すと同時に、PSS と SW を独立した設計パラメータとして考慮することの重要性を示した。本研究により、ヒトの皮膚感覚統合特性に基づくマルチモーダル皮膚感覚提示技術の時間設計に関する基礎指針を確立することができた。

本研究成果は、IEEE Transactions on Haptics 誌に掲載され、2024 年 9 月に公開された[7]。本成果により、触覚と温覚の同時性知覚に関する定量的な基礎データを明らかにし、温熱・触覚を統合したマルチモーダル皮膚感覚提示技術の時間設計に有用な知見を提供した。さらに、本論文はその学術的・学際的価値が高く評価され、第 41 回電気通信普及財団賞 (テレコム学際研究賞) 奨励賞を受賞した。

4 考察

4-1 主な知見

本研究は、触覚と温度感覚（温覚・冷覚）の同時性知覚を体系的に検討した初めての研究である。実験の結果、触覚刺激と温度刺激は物理的に同時に提示される必要はなく、温度刺激を適切な時間だけ先行させることで両刺激を「同時」と知覚させられることが明らかとなった。すなわち、主観的同時点

（PSS）が 0 ms である必要はなく、同時性ウィンドウ（SW）の範囲内であれば、同時提示でなくても同期した刺激として知覚される。この知見は、マルチモーダル皮膚感覚提示装置において、各感覚モダリティの処理時間の違いを補償するよう刺激提示タイミングを調整することで、より自然な触覚体験を実現できることを示している。また、温度刺激と触覚刺激を同時に提示すると温度変化の知覚がマスキングされることが知られているが[8]、適切な時間遅延を設けることでこの影響を軽減できる可能性も示唆された。

4-2 温覚条件と冷覚条件の違い

温覚・冷覚のいずれの条件においても、PSS は温度刺激が触覚刺激より先行する方向へシフトした。しかし、温覚条件では冷覚条件より約 300 ms 大きな先行時間を必要とした。これは、温覚情報が無髄 C 線維、冷覚情報が有髄 A δ 線維によって伝達されるため、両者の伝導速度の違いが知覚される同時性に反映された結果と考えられる。この傾向は、視聴覚、視触覚、聴触覚など他のクロスモーダル知覚研究において、伝達速度の遅い感覚刺激を先行させることで同時性が知覚されるという報告とも一致する[4, 9, 10]。

一方、同時性ウィンドウは温覚条件で冷覚条件より有意に広がった。これは、温覚は冷覚に比べて刺激開始時刻の検出精度が低く、時間的不確実性が大きいと考えられる[11, 12]。さらに、温度刺激と触覚刺激の同時性ウィンドウは、他の感覚モダリティ間で報告されている同時性ウィンドウよりも大きく、温度感覚と触覚の同期判断が本質的に難しいことを示している。本研究で用いた温度刺激は、短時間の物体接触時に生じる温度変化を模擬したものであり、得られた PSS および SW は日常的な触覚体験を反映した結果であると考えられる。

4-3 工学的意義

本研究で得られた知見は、VR・AR 環境や遠隔コミュニケーションにおけるマルチモーダル皮膚感覚提示技術の設計に重要な指針を与える[13, 14]。従来、触覚提示における許容遅延については報告されていたものの、温度刺激と触覚刺激を統合した提示における時間設計指針はほとんど明らかになっていなかった。本研究により、温覚・冷覚それぞれに適した提示タイミングと許容範囲を定量的に示したことで、より自然で没入感の高いデジタルタッチ体験を実現するための基礎データを提供した。

5 今後の展望

本研究で得られた基礎知見を踏まえ、補助期間終了後も研究を継続・発展させる予定である。現在、新たな研究課題として、刺激の空間配置が触覚・温度感覚の同時性知覚に与える影響について検討を進めている。これまでの予備的な検討では、触覚刺激と温度刺激を左右の手に分けて提示した場合、同一手内で提示した場合と比較して、同時性知覚の特性が変化する可能性が示唆されている。今後は十分なサンプルサイズを確保した心理物理実験を実施し、空間配置が主観的同時点（PSS）および同時性ウィンドウ（SW）に及ぼす影響を明らかにするとともに、触覚と温覚の組み合わせについても同様の検討を行い、皮膚感覚の時空間統合メカニズムの解明を目指す。

また、本研究で確立した SOA 操作・同時性判断課題・ガウスフィッティングからなる心理物理学的评价手法は、触覚と温度感覚以外の皮膚感覚モダリティにも適用可能な汎用的手法である。今後は、触覚と振動、温覚と冷覚など様々な感覚モダリティの組み合わせへ展開し、皮膚感覚間の時間統合特性を体系的に明らかにするとともに、複合皮膚感覚の時間統合に関する計算モデルの構築・検証を進める予定である。

さらに、本研究成果は VR・AR 環境や遠隔コミュニケーションにおけるマルチモーダル皮膚感覚提示技術の設計にも重要な知見を提供する。触覚と温度刺激は物理的に同時に提示する必要がなく、適切な時間補正を行うことで、より自然で違和感の少ない触覚体験を実現できることが示された。今後は、本研究で得られた PSS および SW を設計指針として、ユーザーが知覚する遅延許容範囲や Quality of Experience (QoE) との関係性を明らかにし、VR・AR や遠隔コミュニケーションにおけるデジタルタッチ技術への応用を推進していく予定である。

6 結論

本研究では、触覚刺激と温度刺激（温覚・冷覚）の同時性知覚特性を心理物理学的手法により定量化し、マルチモーダル皮膚感覚統合の時間特性を明らかにした。その結果、触覚と温度刺激は物理的に同時に提示される必要はなく、温度刺激を適切な時間だけ先行させることで両刺激が同時に知覚されることを示した。また、主観的同時点（PSS）は温覚条件と冷覚条件で大きく異なり、同時性ウィンドウ（SW）は温覚条件（1041 ms）が冷覚条件（626 ms）より有意に広いことを明らかにした。これらの結果は、温覚と冷覚を伝達する求心性神経線維の伝導速度や時間特性の違いを反映しており、ヒトの脳が異なる時間特性をもつ皮膚感覚情報を統合して一貫した知覚を形成していることを示している。さらに、本研究で確立した心理物理学的評価手法は、触覚と温度感覚以外の皮膚感覚モダリティにも適用可能な汎用的な評価基盤となることが期待される。今後は、刺激の空間配置や他の皮膚感覚モダリティを対象とした研究へ展開するとともに、得られた知見を統合した複合皮膚感覚の時間統合モデルを構築する予定である。

本研究成果は、VR・AR環境や遠隔コミュニケーションにおけるマルチモーダル皮膚感覚提示技術の設計指針として重要な意義を有する。今後は、本研究で明らかとなった時間統合特性を活用し、複数の触覚提示デバイスの最適配置や提示タイミングの設計手法を確立することで、より自然で没入感の高いデジタルタッチ体験の実現に貢献していきたい。

【参考文献】

- [1] McGlone, F., & Reilly, D. (2010). The cutaneous sensory system. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34, 148–159.
- [2] Gallace, A., & Spence, C. (2014). *In Touch with the Future*. Oxford University Press.
- [3] Yang, G., Jones, L. A., & Kwon, D. S. (2006). Use of simulated thermal cues for material discrimination and identification with a haptic interface. *Presence*, 15(1), 29–42.
- [4] Vroomen, J., & Keetels, M. (2010). Perception of intersensory synchrony: a tutorial review. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72, 871–884.
- [5] Filingeri, D. (2016). Neurophysiology of skin thermal sensations. *Comprehensive Physiology*, 6, 1429–1491.
- [6] Jodai, T., Terao, M., Jones, L. A., & Ho, H.-N. (2023). Determination of the Thermal-Tactile Simultaneity Window for Multisensory Cutaneous Displays. *Proceedings of IEEE WHC 2023*.
- [7] Jodai, T., Jones, L. A., Terao, M., & Ho, H.-N. (2024). Perceiving Synchrony: Determining Thermal-Tactile Simultaneity Windows. *IEEE Transactions on Haptics*, 17(4), 850–859.
- [8] Singhal, A., & Jones, L. A. (2017). Perceptual interactions in thermo-tactile displays. *IEEE World Haptics Conference*.
- [9] Chen, Y.-C., Lewis, T. L., Shore, D. I., Spence, C., and Maurer, D. (2018) “Developmental changes in the perception of visuotactile simultaneity,” *Journal of Experimental Child Psychology*, 173, 304–317.
- [10] Altinsoy, M. E. (2003) “Perceptual aspects of auditory-tactile asynchrony,” *Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration*, 3831–3838.
- [11] Ho, H.-N. et al. (2017). Physical-perceptual correspondence for dynamic thermal stimulation. *IEEE Transactions on Haptics*, 10(1), 84–93.
- [12] Courtin, A. S. et al. (2023). Spatial summation of cold and warm detection: Evidence for increased precision when brisk stimuli are delivered over larger area. *Neuroscience Letters*, 797, 137050.
- [13] Wechsung, I., & De Moor, K. (2014). Quality of Experience versus User Experience. In *Quality of Experience: Advanced Concepts, Applications and Methods*, S. Moller and A. Raake Eds. Cham: Springer International Publishing, 35–54.

[14] Van Damme, S., Torres Vega, M., & De Turck, F. (2020). Human-centric quality management of immersive multimedia applications. 6th IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft), 57–64.

〈発 表 資 料〉		
題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Determination of the Thermal-Tactile Simultaneity Window for Multisensory Cutaneous Displays	IEEE World Haptics Conference 2023 (WHC2023)	2023 年 7 月
Perceiving Synchrony: Determining Thermal-Tactile Simultaneity Windows	IEEE Transactions on Haptics (DOI: 10.1109/TOH.2024.3452102)	2024 年 9 月