HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Real-time Thermal Sensation Prediction Incorporating Individual Differences via Thermal Comfort Models and Physiological Responses
Author(s)	Biswas, Biplob Kanti
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16624号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16624
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98234
Type	doctoral thesis
File Information	Biplob_Kanti_Biswas_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　Biplob Kanti Biswas

審査担当者　主　査　准教授　若林 斉
副　査　教　授　森 太郎
副　査　教　授　森 傑
副　査　客員教授　林 基哉　（大学院工学研究院）

学位論文題名

Real-time Thermal Sensation Prediction Incorporating Individual Differences via Thermal Comfort Models and Physiological Responses
(温熱快適性モデルと生理反応を用いた個人差を考慮したリアルタイム温冷感予測)

本学位論文について、学位論文審査の要旨を以下の通り報告する。
本研究は、温熱的快適性の予測精度向上と個人差への対応を目的とし、サーモグラフ (IRT) による非接触温度計測を活用して、着衣量 (Icl) や代謝量 (M) を簡便に推定することで予測平均温冷感申告 (PMV) の推定精度を高め、さらに実際の温冷感申告値 (TSV) をより正確に予測する手法を構築したものである。加えて、皮膚温や近位-遠位皮膚温度勾配といった生理指標に着目し、体格、性別や冷え性などの個人差を考慮した温冷感予測モデルの開発を試みた。

本論文は以下の 6 章から構成される。

第 1 章　序論

研究の背景として、温冷感や温熱的快適性は執務者の生産性に影響するため、温熱環境を快適域に保つことが求められてきた。質問紙による主観申告の調査は煩雑であり、温熱環境要素に基づく温熱環境指標が開発されてきた。その中で PMV は最もよく用いられる指標であり、温度、湿度、放射、気流の環境側要素と、着衣量、代謝量の人体側要素を合わせた人体-環境熱収支式を用いて温冷感を予測するモデルである。PMV に基づく空調制御では着衣量や代謝量の測定が煩雑で、現場での適用が難しい。そのため、従来は人体側要素に固定値を用い、個人差を無視した温冷感推定が行われてきた。温冷感には個人差が大きく関与するため、個人の着衣量や代謝量を組み込んだ PMV モデルの高精度化が求められる。本研究では「IRT を用いた実用的な PMV 推定法の開発」と「生理反応に基づくリアルタイム温冷感予測モデルの構築」を目的とし、研究課題を設定した。

第 2 章　文献レビュー

温熱的快適性の理論、主観評価法、PMV モデル、生理指標 (皮膚温・温度勾配) との関係、IRT を用いた非接触温度測定の有用性、個人差の影響について先行研究を整理した。特徴的な項目として、オフィスなどの温熱的中立域で生じる体温調節応答である皮膚血流調節の基礎や皮膚温応答の温熱環境依存性について整理した。また、温熱的快適性や着衣量、代謝量評価に関する既往研究とその限界を示し、本研究の意義を明確にした。

第 3 章　IRT を用いた PMV 予測と TSV との比較 (研究課題 1)

大学講義室にて大学生を対象に実施した調査に基づき、IRT を用いた衣服表面温度 (tcl) と皮膚温 (tsk) から着衣量を推定し、PMV を計算した。従来の質問紙を用いた着衣量の評価と比較して、

IRT を用いた着衣量推定手法の妥当性や限界を検討した。また、心拍数による代謝量推定と体格、年齢、性別による代謝量推定を行い、推定値の妥当性や限界の検討を行った。IRT を用いて推定した PMV は、従来の人体側要素に固定値を用いる方法よりも実際の TSV との一致度が高く、また体格、年齢、性別による代謝量の推定と併用することで、個別評価に基づく高精度かつ実用的な PMV 予測法を提案した。

第 4 章　個人差が温冷感・生理反応に与える影響の分析 (研究課題 2)

オフィスにて執務者を対象に実施した調査に基づき、体格、性別、冷え性傾向などの個人差が TSV、PMV、皮膚温に与える影響を分析した。Body mass index の低い群、女性、冷え性群では、TSV、PMV が寒い側の申告を示し、また、遠位部の皮膚温が低くなる傾向があり、個人差を考慮したモデル化の必要性が示された。また、個人の身体的・生理的特性が温冷感に及ぼす影響の可視化を通じて、PMV の個別性の再検討を促す知見が得られた。

第 5 章　生理反応に基づくリアルタイム温冷感予測モデルの構築 (研究課題 3)

皮膚血流応答を反映する指標とされる近位-遠位皮膚温度勾配 (前額部-鼻部) と TSV の強い相関に基づき、IRT で取得した皮膚温からリアルタイムで温冷感を推定する TSP(Thermal Sensation Prediction) モデルを開発した。このモデルは IRT を用いて非接触で連続評価が可能であり、顔面に位置する 2 点の温度差に基づいており、実環境への応用可能性が高いと考えられた。TSP モデルは、温熱 6 要素の評価に基づく PMV 推定とは異なり、生理反応に基づく即時評価を可能とし、温熱環境のパーソナル制御への活用が期待される。

第 6 章　総括と今後の展望

IRT を用いた PMV 推定法と TSP モデルは、個人に応じた温熱快適性評価や建築・空調制御への応用が期待される。今後は、多様な環境条件・年齢層を対象とした検証や、より多様な個人属性への対応、さらに機械学習との連携による予測精度の向上と実用化の促進が課題となる。これにより、非接触・リアルタイムでの熱的快適性モニタリングの実現が可能となる。

これを要するに、著者は、温熱快適性評価手法に関する体系的研究を通じて、IRT による着衣量の推定と体格による代謝量の推定を合わせた PMV の個別評価手法の構築や、皮膚温度勾配などの生理指標に基づくリアルタイム温冷感予測モデルの構築といった新知見を得たものであり、個人差を考慮した温熱快適性評価および空調制御技術の高度化に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。