

学位論文の概要

【氏名】 Kizito N. Nkurikiyeyezu
【論文題目】 Affect-Aware Intelligent Thermal Comfort Environments
心理的感覚を考慮した知的温熱快適環境に関する研究

【論文概要】 温熱快適性 (thermal comfort) の提供は多くのエネルギーを消費していて、建物は世界のエネルギーの 40% を消費し、その大部分は冷暖房機能が費やしている。一方、その膨大なエネルギー資源が利用されているにもかかわらず、一番の目的であるはずの温熱快適性が、現状の仕組み (空調ユニットなど) では効果的に提供できず、建物の居住者の大半は不適切な温熱快適性に対して不満を持っている。温熱快適性は、人によって異なる心理的感覚と定義されている。しかし、空調ユニットなどは、建物のすべての居住者に中立的な熱条件を提供してしまう。残念ながら、この戦略は非効率的であり、多くのよく知られた欠陥が調査研究で強調されている。したがって、低エネルギー消費で質の高い温熱快適性を実現することは、熱的快適性の提供方法のパラダイムシフトを要する難問である。

本論文では、オフィス環境において、提供される温熱快適性の品質と、エネルギー消費との間のギャップを緩和することにより、この難問を解決することを提案している。具体的な方法として、周囲の環境による人の生理的変化に基づいて、温熱快適性を提供することを提案している。

実際、人間は主に脳の視床下部によって制御される温度調節プロセスを介して体の中心温度を維持している。一言で言えば、視床下部は皮膚、肝臓、骨格筋にある温度受容体から感覚入力を受け取り、体の中心温度を一定に保つための適切なプロセスを開始する。温熱快適性は、心理的な感覚であり人間の体温調整に依存することを考慮し、体温調整活動が検出可能な生理的変化を引き起こすことを考えると、温熱快適性状態は人の心拍変動 (HRV) の変化に基づいてより正確に推定できると、本論文で仮定している。

温湿度調整可能な実験環境において、一般的に熱い・寒い・ちょうどいいとされている条件下で被験者の心電図 (ECG) を取得した。ECG 信号から高い精度で抽出できる HRV 関連指標は、被験者の温熱快適感 (熱くて不快、寒くて不快、ちょうどいい) を検証した。また、頸部を冷却できるウェアラブル装置が人々の温熱快適感と生理信号に与える影響も調べた。様々な被験者実験から、2 つの重要な結論が導かれた。

- ① 温熱環境の変化は人の HRV を顕著に変化させる。また、快適な環境では心拍はより規則的で複雑ではないのに対して、暑い環境と寒い環境では、より複雑なパターンを示す。
- ② 暑い環境では、頸部の冷却は人々の温熱環境に対する主観的な認識を改善するとともに、心拍のパターンを快適環境で持つパターンに近づかせる効果がある。

この結果で、HRV に基づいて人々の温熱快適感を予測する自動温熱調節装置の設計ができることを強く示唆した。これにより、個別モデルと汎用モデルの二種類の機械学習モデルを開発し、心拍パターンの変化から人の温熱快適感を推定した。個別モデルは三つの温熱快適感 (熱くて不快、寒くて不快、ちょうどいい) を 95% 以上の精度で推定できることが分かった。一方、汎用モデルの性能は低かった (50% < 精度 < 60%)。

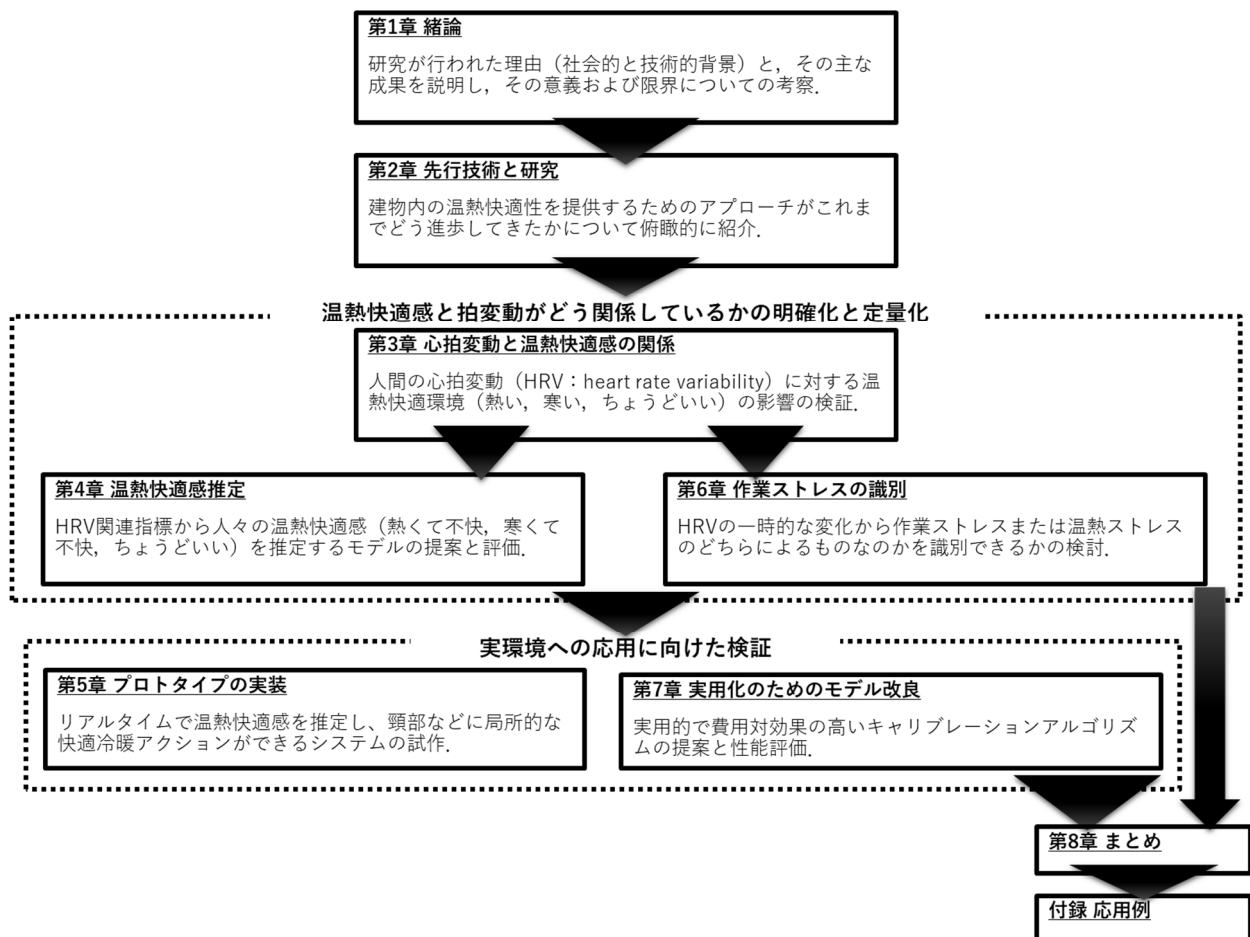
また、HRV に対する作業ストレスの影響、温熱負荷と作業ストレスの理論的相互作用を調べ、作業ストレスによる HRV と温熱快適性と温熱負荷による HRV の識別の可能性を検証した。温熱快適性と同様に、作業ストレスは人によって異なる反応を示している。その結果、オフィス環境において、温熱ストレスと作業ストレスの両方が HRV に影響するが、作業ストレスによるメンタル負荷と温熱快適性の両方がない限り、HRV のほとんどの一時的な変化は作業ストレスまたは温熱ストレスのどちらによるものなのかを識別できることを示唆した。しかし、個別モデルの作業ストレス認識性能が良いが、汎用モデルの

性能は不十分であった。

そこで、個別モデルと汎用モデルのいいとこ取りを統合した手法を提案し、評価した。大規模な集団から収集された生理信号から、正確で簡単に個人の心理的感覚（温熱快適性とメンタル負荷など）を予測する機械学習モデルを導出する実用的で費用対効果の高いキャリブレーションアルゴリズムを提案し、その有効性を公開データセットを用いて証明した。

最後に、これまでの結果を活用し、周辺環境に対する個人の生理反応によって調節される、個別適合された温熱快適性提供メカニズムのアーキテクチャを提案している。そのアーキテクチャを導入する知的環境では、人または人のグループの周囲に適応性のある個別適合された局所的な快適気候ゾーンの生成が実現可能になる。また、同じ空間の各居住者の温熱快適性は、生理信号の変動から推定されるため、適切な制約最適化アルゴリズムを使用することで、最も低いエネルギー消費ですべての人の温熱快適性のニーズを満たすことができる最適な温熱供給方法（空調と局所的冷暖房システムの組み合わせ）を決定することができることを示している。最後に、手首の光電脈波信号から算出された HRV に基づいて、提案したモデルによってリアルタイムで温熱快適感を推定し、頸部などに局所的な快適冷暖アクションができるシステム（ソフトウェアとデバイス）を試作した。

本研究で提案している技術とアプローチでは、各個人が期待する温熱快適性を反映する個別適合された温熱快適性が提供できるうえ、人々が温熱的に不快を感じる場合にのみ室内の温度を調節することにより、必要な消費エネルギーを大幅に削減することが可能になる。



【本研究に関する発表論文】

学術論文：5報（First Author 3報）

国内学会発表：3報（First Author 1報）

国際会議（査読有り）：8報（First Author 7報）

受賞：1報（First Author 1報）

【その他の研究】

国際会議（査読有り）：3報

国内学会発表：1報