

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

Productivity-oriented BEMS のための生理指標計測を用いた

リアルタイム知的生産性評価に関する研究

申請者

國政 秀太郎

最終学歴

平成 31年 3月

京都大学大学院エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻
博士後期課程（研究指導認定見込）

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科

（主査）

教授 下田 宏

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科

教授 手塚 哲央

調査委員

京都大学学術情報メディアセンター

教授 中村 裕一

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	國政 秀太郎
論文題目	Productivity-oriented BEMS のための生理指標計測を用いたリアルタイム知的生産性評価に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>世界のエネルギー・環境問題の一つである CO₂ 排出量の増加は、日本でも無視できない問題である。さらに近年では、東日本大震災の影響で原子力発電所の稼働率が低下し、エネルギー消費の削減が急務となっている。特に、近年増加傾向にある業務部門つまりビルのエネルギー消費量の削減が求められており、その解決策の一つとしてビルのエネルギー消費を最適化する Building Energy Management System(BEMS) が挙げられる。しかし、過度なエネルギー消費の抑制は執務環境を悪化させ、執務者の知的生産性を低下させる恐れがある。</p> <p>本論文は上記の背景に鑑み、オフィス執務者の知的生産性と省エネルギーの両立を可能とする Productivity-oriented BEMS を実現するため、3つのリアルタイム知的生産性評価の手法を提案し、それらの精度や実用性を評価した結果をまとめたものであり、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、世界および日本のエネルギー問題について述べた後、日本の業務部門エネルギー消費量の問題を指摘し、近年その解決策として注目されている BEMS の現状と課題について述べている。この課題を解決する方法としてリアルタイム知的生産性の意義を述べ、最後に本論文での研究の目的を示し、関連する既往研究について記述している。</p> <p>第2章では、生理指標計測が執務者の作業を阻害せず非接触で計測可能であり、かつ知的生産性を推測できると期待されているため、執務者が知的作業を実施しているか否かを生理指標の計測結果から分類するモデルを提案し、その妥当性評価の結果について述べている。26名の被験者に5種類の認知タスクについて作業状態と一時休息状態になるように瞳孔径と心拍を計測する実験の結果、分類の正答率は平均約 59.0% であり、無作為に分類した場合の正答率に比べて約 13.6% 高く ($p < 0.001$)、生理指標が執務者の知的生産性評価に有効であることが示されている。</p> <p>第3章では2章で扱った分類問題を回帰問題へ拡張させた手法を提案している。具体的には、生理指標の計測結果から知的作業時の作業成績(タスクの解答速度)を直接推定する手法を検討している。推定に用いる生理指標として人の認知状態を反映するとされる心拍変動と瞳孔径を利用し、推定手法として機械学習である SVR(Support Vector Regression) と RF(Random Forests) の2つの回帰分析手法を利用している。31名の被験者に認知課題を与えた際のタスク解答速度と生理指標を計測した実験の結果、SVR で導出した回帰モデルの平均決定係数が 0.875 という高い推定精度を示し、本手法の有効性を確認している。また、本手法が複数の生</p>			

理指標を用いることで生理反応の個人差に対して堅牢な精度を担保できることが分かり、複数の生理指標を利用する有効性が確認されたことを示している。

第 4 章では、執務者の作業成績だけでなく認知負荷も評価することにより、より詳細な作業状態を評価する手法を提案している。具体的には、執務者の複数の認知・作業状態を仮定したパフォーマンス-認知モデルに基づき、作業成績を計測可能な作業を対象として、その作業中の瞳孔径と心拍変動から認知・作業状態をファジィ推論により推定する手法を提案している。本手法の妥当性評価のため 27 名が参加する被験者実験を実施した結果、タスク難易度の上昇によってパフォーマンスが有意に低下するとともに、瞳孔径や心拍数から推定される認知負荷が上昇することが分かり、提案手法による推定結果が妥当であることを示している。

第 5 章は結論であり、第 2 章から第 4 章で述べた研究成果をまとめ、これらで提案された知的生産性手法についての課題を述べている。また、これまでの BEMS は執務環境が執務者の健康や快適性を損なわせないという制約条件の下、エネルギー消費量の最小化を目的とした最適化問題の解に基づいて設備を制御していたが、本研究によって評価が可能となった知的生産性の最大化も目的変数に組み入れることで、これまでにはない新しい **Productivity-oriented BEMS** の実現に寄与できることを述べている。一方で、知的生産性評価は BEMS のインプット部分であり、今後は最適化問題の検討や制御アルゴリズムの検討を行う必要性を述べ、実現に向けての展望を示している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、オフィス執務者の知的生産性と省エネルギーの両立を目的とした新しい BEMS (Building Energy Management System)である Productivity-oriented BEMS を実現するため、執務者の生理指標を用いた 3 つのリアルタイム知的生産性評価手法を研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 執務者の脳波、心拍、眼電位の計測結果から特徴量を抽出し、それらを説明変数とするマハラノビス距離に基づいた判別分析により、執務者の知的作業状態と一時休息状態を判別することが可能であることを見出した。これにより、知的生産性が低下する一時休息状態の出現頻度に応じて BEMS の制御を変更するなど、知的生産性を考慮しつつ省エネルギーに向けたエネルギー機器制御ができることを示した。
2. 1 の研究で実施した執務者の状態判別問題を拡張して、機械学習により作業成績を直接推定する回帰問題に発展させた。具体的には、非接触計測が可能な瞳孔径と心拍から特徴量を抽出し、機械学習を用いて作業成績を推定する手法を提案した。さらに被験者実験を実施し、SVR(Support Vector Regression)と RF(Random Forests)の二つの機械学習方法を比較した結果、SVR のほうが高い精度で作業成績を推定できることを示した。
3. 執務者の詳細な作業状況を推定するために、生理指標およびタスクログから特徴量を抽出し、ファジィ推論手法を利用して時系列的な認知・作業状態を 4 状態に分類する方法を開発した。これにより、作業成績の評価だけでは困難であった、執務者の知的作業への取り組み状況を考慮した BEMS の開発が可能となることを示した。

これまでの BEMS は、執務環境が執務者の健康や快適性を損なわないという制約条件下、エネルギー消費量の最小化を目的とした最適化問題の解に基づいて、空調などの設備を制御するものであった。しかし、知的生産性をも考慮した Productivity-oriented BEMS のためには、新たに執務者の知的生産性をインプットとし、この最大化も目的関数とした最適化問題を考える必要がある。本論文の 3 つの研究結果はこれまで考慮されてこなかった知的生産性のリアルタイム計測の確立に寄与するものであり、学術上、實際上、資するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 31 年 2 月 25 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降