

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 宮田 翔平

業務用建築物には建築設備システムの運用・管理のための **Building Energy Management System (BEMS)** が導入されていることが多い。しかし、この **BEMS** の役割はシステム監視とデータ保存に留まっており、システムの効率的な運用・管理を高度に支援するには至っていない。システムの運用・管理において不具合検知・診断と最適制御は重要な技術として考えられているが、一般には実用に供されていない。特に不具合検知・診断に関しては、これまで長年にわたって研究されてきたにも関わらず、いまだ有力な方法論が提示されていない。こういった背景のもと、本論文は「次世代 **BEMS** に向けた空調用熱源システムの不具合検知・診断と最適制御に関する研究」と題して、不具合検知・診断と最適制御に関する技術開発を目的としており、全8章で構成されている。各章をまとめると以下の通りとなる。

第1章では、本論文の背景と目的について述べている。

第2章では、実在の複数の空調用熱源システムを対象にした運転データの手作業的な分析を通じて、機器性能低下や制御設定値不全などの不具合が存在することを明らかにしている。従来から、ほとんどのシステムに不具合が存在し、それによるシステム効率の低下が無視できないと言われており、それを裏付ける結果を示している。

第3章では、不具合検知・診断や最適制御の検討に用いる詳細なシステムシミュレーションプログラムを独自に開発している。機器特性や搬送系の圧力損失、PI 制御などを組み込み、不具合の有無や制御設定値の変化に応じたシステム挙動の変化を再現可能としている。

第4章では、不具合の有無そのものを検知する手法を開発している。熱源システムの冷温水の温度や流量などに関して、真値からの誤差を不確かさとして定義し、それをシミュレーションプログラムに組み込むことでシステム COP の性能分布を算出している。この性能分布と実際の **BEMS** データから得られるシステム COP を比較し、性能分布の信頼区間外（性能が低い側）に **BEMS** のシステム COP が位置した場合に、対象システムにはその性能に大きな影響を与える不具合が存在していると判断する手法である。

第5章では、不具合の有無だけではなく、システムのどの部分にどういった

不具合が存在するのかを診断することを可能にすべく、深層学習の手法の一つである畳み込みニューラルネットワークを活用した不具合検知・診断手法を考案している。その開発の準備段階として、不具合によるシステム挙動をシステムシミュレーションで生成・画像化した不具合データベースを作成している。

第 6 章では、第 5 章で作成した不具合データベースを教師データとして畳み込みニューラルネットワークに学習させ、熱源システムにどのような不具合が発生しているかを確率的に診断する手法を開発している。また、実際の BEMS データを入力して出力される不具合診断の結果が十分な確度をもって実態の不具合発生状況を診断できることを検証している。

第 7 章では、不具合検知・診断を行った後の最適制御として、モデル予測制御による低炭素制御に取り組んでいる。系統電力の 1 時間ごとの CO_2 排出係数を推定し、蓄熱槽を調整力として 1 日の CO_2 排出量を最小とする冷凍機発停をモデル予測制御によって決定する手法を提案している。この手法によれば、6 月の 1 週間において従来の夜間蓄熱や昼間蓄熱に対してそれぞれ 47%、13% の CO_2 排出量削減効果が得られることを示している。

第 8 章では、本論文で得られた知見と今後の課題をまとめ、総括としている。

以上、要するに、本論文は、データ駆動型のスマートビル実現に欠かせない次世代 BEMS に組み込むための先進技術の開発を目的とし、一品生産的で大規模な非線形性を有する空調熱源システムを対象に、その不具合検知・診断や自動制御の最適化といった長年の課題に対して、独自に開発した高度なシステムシミュレーションと、深層学習やモデル予測制御といった先進的な情報技術を組み合わせることによって、その課題解決の技術的な知見と方向性を示したものであり、建築設備工学に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。