

ヒューマンファクターと人工知能を用いた次世代建物制御システム

株式会社竹中工務店 高井勇志 菊池卓郎 田中規敏 粕谷貴司
西園健吾 頼光拓真 濱中南咲 青野敏紀

1. はじめに

急速な人口減少社会を迎える日本において、様々な職種で人材不足の問題が顕在化しつつあり、高度な技術を持った建物管理者についても例外ではなく、同様の問題が生じている。建物管理の主な業務には、時々刻々と変化する状況下における設備機器の適切な制御や、それらの機器の保守・点検、エネルギー利用の最適化など様々な要素がある。このような建物管理は、技術の進展と共にますます高度化・複雑化しており、さらに、利用者が建物管理者に要求する内容やレベルも高まってきている。

つまり、熟練管理者が減少する一方で、利用者の多様なニーズに応えるために高度な建物管理が求められているという状況となっている。このような状況下で、適切に建物の管理・運用を行うには、

- 導入されている設備機器を一元管理できる仕組み
- 自律的に設備機器を管理制御する仕組み
- 設備機器が連携する仕組み
- 遠隔からシステムを管理できる仕組み

などが必要となる。これらの仕組みによって建物管理の高度化が実現できると、業務負荷の低減や省人化が可能となり、加えて、設備機器の効率的な運転によるエネルギー利用の最適化も見込むことができるだろう。

とはいえ、現在の自律自動制御には様々な課題がある。中でも特に大きな課題としては、

- 極端な最適化や制御によって利用者への負担をかけたり、不快感を与えたりしまうこと
- 異常時、災害時といった、通常とは異なる状況への対応

が挙げられる。現在の自律自動制御システムでは、予め指定された目的変数に対して最適化を行うものが多いため、設計時に予測できなかった特別な状況に対応することは困難である。そのため、システムに対して人が何らかの方法で介入する必要があると言える。

このような仕組みは、人間参加型(human-in-the-loop)システムと呼ばれている。制御ループの中に人が介在することによって、自動化の恩恵を受けながら、極端な学習や制御を抑制し、非常の事態にも対応可能な強いシステムを作り上げることができるのである。

ここで、本システムにおいて、人の参加には二つの側面がある。

- 管理者側面
 - システムに対して教師(正解を与える存在)として振舞う。
 - 通常時は自律自動運転に任せつつ、非常時などの特別な状況下でシステムと一体となって対応を行う。
 - 熟練者にとっては知識・経験を伝承する相手、非熟練者にとっては頼れる先輩として、システムを活用する。
- 利用者側面
 - 自律自動システムから快適性を享受しつつ、時と内容に応じてシステムへ報酬やペナルティを与える。

我々は、このような人間参加型～人が介在し人が育てる～次世代建物制御システムの開発を進めている。このシステムによって、建物管理業務負荷の軽減と、エネルギー利用の最適化を実現すること、かつ、利用者の快適性も確保し、例外的な非常事態にも対応可能な、ソフトウェア・ハードウェアの両面

で強靱でレジリエンス性の高い建物を目指している。

以下、本稿では、本システムの基盤となるデータ・プラットフォーム、建物に設置した各種センサから得られる情報から活動状況をプロファイリングする技術、熟練管理者の運用を学習するAIを用いた設備機器の高度な自律自動制御技術、利用者の状況の取得技術、についての取り組みを紹介し、最後に本研究の今後の展開についてまとめる。

2. データ・プラットフォーム「futaba」

一つの建物内における活動は人間社会の縮図である。それはつまり、建物内には多様なニーズを持つクライアントと多様なサービスを提供するプロバイダがあり、これらの要素が絡み合った系となっていて、さらに、時々刻々と変化し、状況などの要因によってクライアントとプロバイダが入れ替わることもあるといった、一種の複雑な社会システムとなっているためである。

粕谷らは、このような複雑なシステムを担うデータ・プラットフォームとして「futaba」を提案している¹⁾。詳細については文献1を参考されたいが、この役割を短くまとめると、

- クライアントから生じる多様な要求とプロバイダが提供する多様な価値を結びつけること
- そこでやり取りされる膨大なデータを記録し、その利活用を支援すること

となる。また、このデータ・プラットフォームを実現するには、

- 様々なプレイヤーを引き入れるためのオープンなプロトコル
- 柔軟性を担保するための疎結合なインターフェース
- これらを実現する汎用性のあるデータモデル

が必要となる。

さらに、建物の規模にもよるが、数千～数万のポイントが、即時性の高いものから数分～数時間まで様々な時間間隔で互いにデータをやり取りするため、多様かつ大量のデータを効率よく捌くことのできる通信基盤も必要となる。加えて、遠隔から建物の管理運用やシステムメンテナンスを実施可能とするためのクラウドの活用と、建物内外からのアクセスに対するセキュリティも重要な要素である。一方で、センサやサービスアプリケーションといった「機械」だけではなく、「人」もこのシステムに加わることも特筆すべき項目である。

本研究では、竹中技術研究所(千葉県印西市)に、この futaba を実装して実証実験を行っている(図1)。上記に示すような様々な要素を考慮した、実際の建築プロジェクトに適用可能なデータ・プラットフォームは世界にも類を見ない最先端の取り組みであると言える。

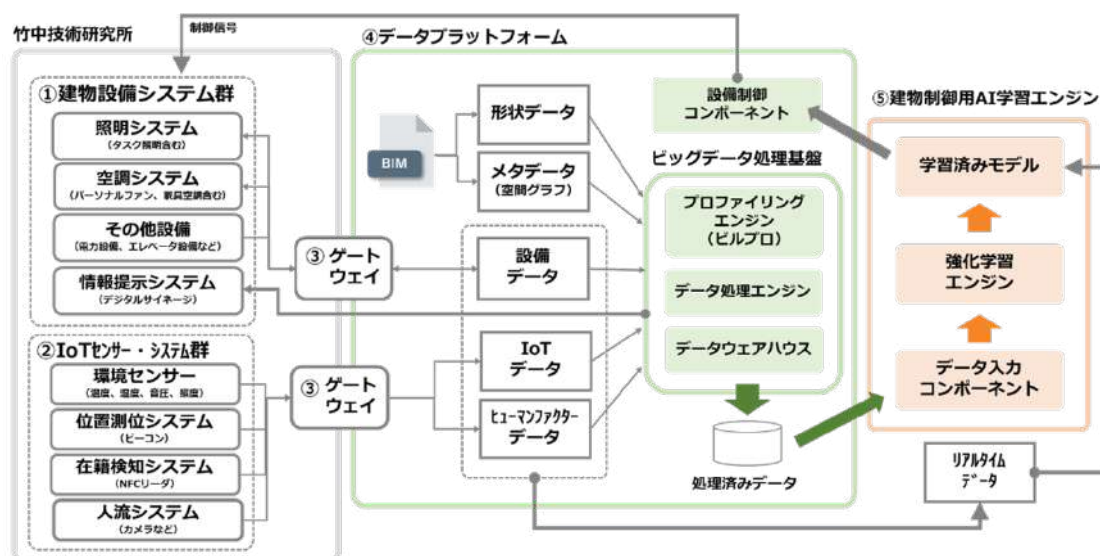


図1 データ・プラットフォーム

3. 建物活動状況プロファイリング「ビルプロ」

現在の建物には、電力量や送水温度、空気質、騒音といった、様々な設備や環境情報を収集するセンサが備え付けられており、それらから大量の時系列データが送られている。

例えば、毎分計測される計測点については、単一のセンサのみで1日で1440点のデータが得られることになる。

建物の規模によってセンサの数は異なるが、本研究で実証実験を行っている300人規模のオフィスでは、室温などの環境センサも含めて5000点ほど設置しているため、総数では、1日で百万点を超える量のデータが蓄積されることになる。この量のデータを建物管理者が人力で分析することが現実的ではないのは明らかであろう。そのため、このような大規模な時系列データを取りまとめ、分かりやすく可視化する仕組みが必要となる。それが、本節で紹介する「建物活動状況プロファイリング」である。

本技術の特徴は、事前知識を用いずに、集められた様々な時系列データそのものから、建物内の活動状況のパターンとその内容、すなわち「プロファイル」を生成することである。つまり、「平日はどのような活動が多い」、「朝は〇〇がよく動く」、といったパターンの情報(モード)が得られることに加えて、「〇〇がある状態になると〇〇の動きが変化する」、「〇〇の翌日は〇〇となる確率が高い」、といった因果関係やモードの遷移確率なども含めて、多様なセンサのプロファイルが得られることを意味している。また、このプロファイリングを利用すれば、「夜に〇〇の状態が現れることはない」ということを利用した異常検出など、様々な応用も可能となる。

これはまさに、建物管理者が経験に基づいて行っている建物活動の分析・理解を自動化したものだと言える。さらに、このように自動的に得られたプロファイルに対して、ベテラン管理者が解釈やアノテーションを加えることによって、プロファイリング技術の精度を向上させ、意味づけをより深めることも可能となる。また、プロファイルの可視化を行うことによって、熟練していない管理者に対しても建物内の活動の理解を促進することができる。

このように、本技術によって得られたプロファイルを用いることによって、従来から行われてきたベテランと若手が同席して業務を行う中で技術や経験を深めていく方法に加えて、時間や空間を越えた技術の伝承も可能となる。つまり、本技術は、大量のデータを扱う単なる省人化や効率化の技術のみならず、知識や経験の蓄積や共有にも資するものであると言える。

本技術の詳細な内容については文献2を参照されたい。本研究では、このプロファイリング技術をモジュール化して組み込んで、自動的にプロファイリングが行えるシステムを構築した。また、プロファイリングモジュール自体もサブモジュールの組み合わせで構築しているため、技術の進展や内容の変更に応じて、モジュールの一部や全部を容易に差し替えることが可能であり、将来の拡張にも柔軟に対応できる(図2)。

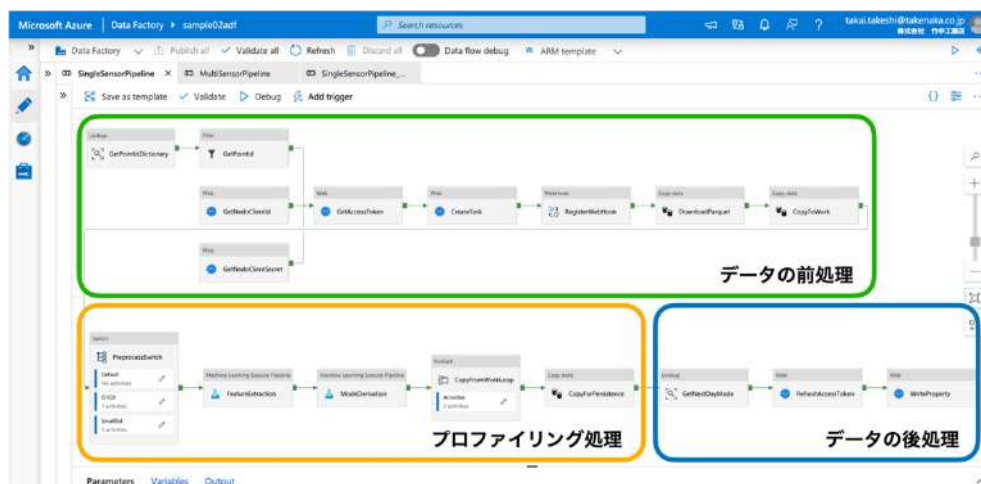


図2 プロファイリングモジュール

また、本システムを用いてプロファイリングを行った例を図3に示す。このプロファイリングに用いたセンサは電力計であり、その時系列データから5つのモードが推定された。また、各モードが表すダイナミクス(例では消費電力の変化)と各モードの状態遷移、各モードが何月何日に出現したかを表すモードカレンダーが得られている。さらに、他のセンサからもこのようなプロフィールを推定し、それらを組み合わせることによって上位階層のプロファイルも得ることができる。最終的には、建物全体のプロファイルも得られることになり、建物全体での活動状況を取りまとめることが可能となる。

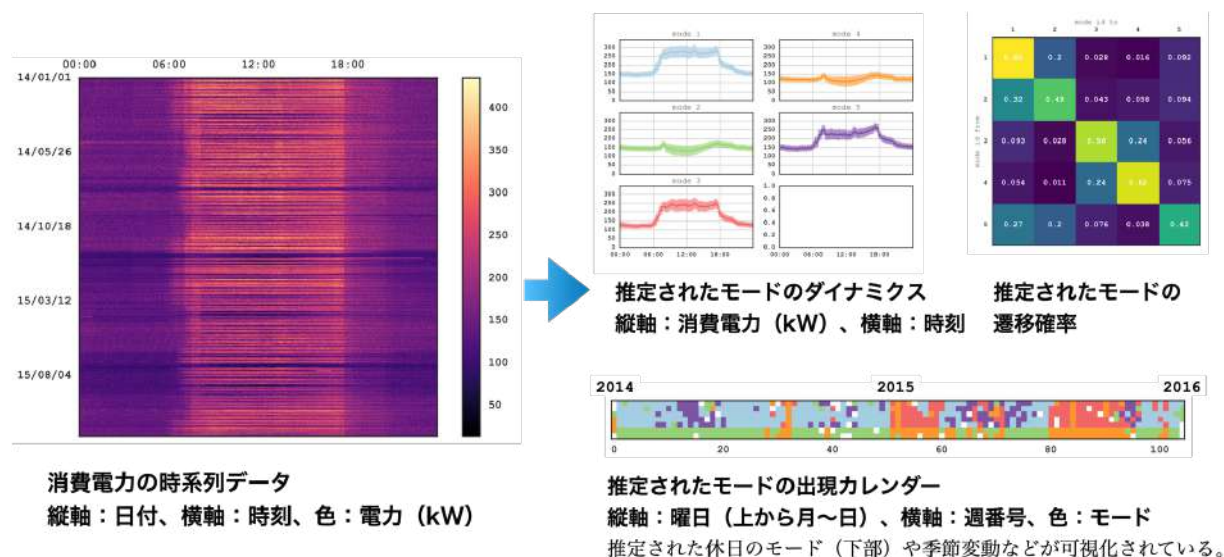


図3 モード推定結果の例

4. 強化学習による設備制御

第1節で述べたように建物管理には様々な業務があるが、我々は設備制御に注目して検討を進めている。本研究では、その主たる機器である空調機器と照明機器を対象としているが、実際の建物管理者は、これらの機器の管理運用において下記の点に注意を払って業務を行っている。

- **環境制御**: 外環境と、室内の利用者やその活動が変化の中で、予め設計・指定された室内環境(温湿度、照度など)となるように制御すること
- **利用者対応**: (外環境の変化や室内環境の不均一性、また、利用者の特性等により生じる)利用者からのクレームを未然に防止すること

加えて、事業者が定めた省エネ目標達成を支援するために、建物全体の消費エネルギーの最適化も考慮する必要があり、建物管理者は経験やノウハウに基づいて、これらの複雑な状況をうまく調整しながら管理業務を進めている。

本研究では、上記の環境制御と利用者対応を支援する仕組みの検討を進めており、まずは、環境制御支援についての研究開発を開始した。本研究に先駆けて、我々はEQ House(東京都港区六本木)において、強化学習をベースとした設備制御システムについての研究開発を行っている³⁾。この研究は、人と家とモノを結びつける情報基盤(futabaの前身技術)を用いて、空間に繋がる様々な情報を学習するAIを用いることによって、適切な設備制御を行うという取り組みである。

本研究はこの成果を進展させるものであるが、本研究の対象である研究所は、EQ Houseと比べて遥かに大規模(対象床面積、構造、機器数など)であり、利用者数もその性質も全く異なっている。このように異なる状況であっても、「空間につながる様々な情報を学習する」という共通の枠組みを用いて、建物管理者の管理運営を学習し、設備機器の自動制御と最適化を行うことによって、システム導入前に対して15%の省エネを実現することを目指している。

現在は、建物管理者が実際に行っている制御のデータと、実際の環境データを合わせて蓄積しており、EQ House で得られた強化学習 AI 設計のノウハウを移行する取り組みを進めている。さらに、利用者対応支援については、次節にて述べるヒューマンファクタ取得の仕組みの構築を踏まえてネクストステップとして研究を開始する予定である。

5. 利用者の状況の取得技術

本研究で主たる対象としている建物は、オフィスや学校等の人が使う建物である。もちろん、倉庫やデータセンタ等の建物であっても本システムは活用できるが、本研究で目標としている課題は、管理者とは別の利用者が存在する環境で、利用者の状況を取得し、利用者の行動を変化させることによって、建物の空間やエネルギー利用の最適化を行うことである。本研究では、この利用者の状況や利用者が起こす行動を、「人が要因となる事象」、つまり、「ヒューマンファクタ」として広く捉え、ヒューマンファクタと制御システムが相互に与える影響を考察し、建物全体の管理へ活用することを一つの課題としている。

そのためには、まず、実際にその空間を利用する利用者の状況を取得する技術が必要となる。利用者の状況には、究極には、快適度、満足度などが挙げられるが、このような主観的指数を取得することは容易ではなく、これまでは、アンケートや調査員による観察などによってこれらの値を推定してきた。最近では、心拍数や活動量、さらには、発汗量や心電位、脳波などを計測できるウェアラブル機器が安価に手に入るようになったため、これらを用いて、利用者の主観的指数を推定する方法も提案されているが、常時、機器を身につける必要があるなど利用者に負担を強いるものとなっている。また、利用者全てに配布する機器を用意するには、管理者側の金銭的・管理的な負担が大きくなることも課題の一つである。

そこで本研究では、利用者の状況を取得するためのセンサとして、カメラを利用することとした。ウェアラブル機器と比較した際のカメラの利点は、

- 利用者への負担がないこと(機器の脱着、充電、操作など)
- 様々な情報を複合的に取得可能なこと(位置、性別、年齢層、服装、姿勢、表情など)
- 技術革新による将来的な発展が見込めること(新しい画像技術の適用など)

が挙げられる。

一方、欠点としては、

- 個人情報・プライバシーの問題、機密情報の管理
- 各種情報の推定精度

がある。

特に個人情報・プライバシーの問題については慎重に対応する必要があるが、法整備や広報・啓発活動が進められた結果、データの正当な利活用が進められる環境が整いつつある。本研究においても、個人情報(例えば、顔から得られる個人識別符号)は取得せず、カメラの画像についてはエッジ処理を行うことによってクラウドにはアップロードしないとといった技術的な対応と、利用者に分かりやすく取得目的を提示して不安を解消し理解を得るといった、十分な配慮を行なって検証を進めている。なお、取得する情報については、前述した照明・空調機器制御との連携を想定して、「人の位置」、「エリア内の人数」、「着衣量(clo 値)¹」とした(図4)。

その他、姿勢や表情など、カメラであれば利用者の心理的状況を表す要素についても取得可能である。これらはオフィス内での健康や知的生産性の指標となる可能性があるため、今後、これらにも注目して研究開発を進めていく。

¹ 着衣の熱抵抗値の単位(衣服の保温力を数値化したもの)。



図 4 利用者状況の取得の例

6. まとめ

本稿では、人が要因となる事象～ヒューマンファクター～を取り入れ、建物管理者の経験やノウハウに基づく設備制御を学習し実施する人工知能を用いた、次世代建物制御システムについての構想と設計、および、(着手したばかりであるが) その取り組みを紹介した。

本研究において特に注目すべきは、人に注目している点である。建物に関わる人としては、「管理者」と「利用者」の立場があるが、この両者の役割や視点をシステムに取り入れることによって、利用者の快適性と、建物の消費エネルギーの最適化を両立することが可能となる。本稿では、本システムを実現するための技術として、

- 多様な要素が複雑に絡み合ったシステムの基盤となるデータ・プラットフォーム
- 大量の情報から特徴を見出すプロファイリング技術
- 管理者の経験やノウハウを学習する AI による設備機器の自動制御
- 利用者の状況を取得するための画像 AI 技術

について述べた。

また、さらなる取り組みとして、利用者の行動変容を促す仕掛けの構築も並行して進めている。快適な空間と省エネを実現するには、利用者の理解と協力が不可欠であるため、利用者への適切な働きかけや、利用者自らが興味を持って動くようになる仕掛けといった、人をより深く理解する研究が必要となる。

相次ぐ激甚災害や感染症リスクの顕在化により、都市や建物といった空間のあり方そのものが問われ始めてきている。このような状況の中で、人を中心とした技術、人間参加型のシステムについて、改めて検討を深めていき、これからの時代のための建物について、ハードウェア・ソフトウェアの両面で研究開発を進めていく。

謝辞：本研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業の支援を受けて行ったものである。

【参考文献】

- 1) 粕谷貴司: BIMを用いた Software Defined BACS の実現に関する研究, 東京大学博士論文, 2020.
- 2) Takashi Kasuya, Takeshi Takai, Hiroshi Esaki: Building Activity Profiling: Explainable and Predictive Modeling for Building Automation, Proceedings of IEEE ICAIIC 2020, Fukuoka, Feb, 2020.
- 3) EQ House | 竹中工務店: https://www.takenaka.co.jp/eq_house/