3S-02

人の温熱快適性に配慮した空調制御の改善に関する検討と実証

三浦 太樹 *1　濱谷 尚志 *1　廣森 聡仁 *1　山口 弘純 *1　東野 輝夫 *1　下田 吉之 *2

*1 大阪大学 大学院情報科学研究科　*2 大阪大学 大学院工学研究科

*1{ d-miura, h-takasi, hiromori, h-yamagu, higashino }@ist.osaka-u.ac.jp

*2{ shimoda }@see.eng.osaka-u.ac.jp

1　はじめに

近年，オフィスや商業施設などの大規模な建物においてエネルギー消費量の削減と快適な空調環境の提供という相反する要求を共に満足することが主要な課題となっているが，既存のビルの多くでは画一的な空調制御や管理者の経験に基づく空調制御がなされており，この要求の両方を満たしているとは言いがたい．このような状況の中で，建物に組み込まれている室温，湿度，照度，二酸化炭素濃度などを計測するセンサを活用し，建物全体のエネルギー消費の70%を超える照明や空調機器を最適に制御することを目的としたBEMS(Building Energy Management System)が多くの商業ビルに導入されてきている．

BEMSの導入された環境におけるエネルギー消費の削減を目指す研究は広くなされており，一例として文献[1]では，複数のAHU(エアハンドリングユニット)を個別に制御することでエネルギー消費を抑制する手法を提案している．また，文献[2]では，オフィス環境で位置検知センサーを使用し，タスクもしくはスポットレベルでのサービスの提供を行った結果，従来の周囲の状況にもとづいたサービス提供に比較して無駄なエネルギー消費をかなりの割合(平均10%以上)で削減可能であるとの報告がなされている．

しかしながら，BEMSを導入した環境であっても，大規模な屋内空間になるとスポット(地点)ごとの室温はスポットに固有の要因による影響を受けるため，人々の熱的快適性を考慮した空調制御の達成は依然として困難である．そのため空調の運転時に空調設定に対する空間内のスポットごとの温度変化がどのようになるかをモデル化して理解してから，人々の不快度を最小化するような空調制御を実施することが重要である．そこで本研究では，比較的大規模な屋内空間を対象とし，その空間における空調設定(給気温度・体積流量)と，空間内の各スポットにおける何点かの室温観測データが与えられたときに，各スポットにおける室温の時系列的な変化を予測する手法を提案する．

2　提案手法

2.1　提案手法の概要

本研究では，単純化のため空調の運転環境として冷房環境を想定し，オフィスなど多数の来訪者や居住者の存在する比較的大きな屋内空間を対象とする．このような屋内空間内で，室温センサーが設置可能な対象空間内の数m四方の領域を「スポット」として定義する．

A Study on Control of Air-conditioning and Demonstration Experiment
Daiki Miura*1　Takashi Hamatani*1　Akihito Hiromori*1　Hirozumi Yamaguchi*1　Teruo Higashino*1　Yoshiyuki Shimoda*2
*1 Graduate School of Information Science and Technology, Osaka Univ., Osaka Japan
*1 Graduate School of Engineering, Osaka Univ., Osaka Japan

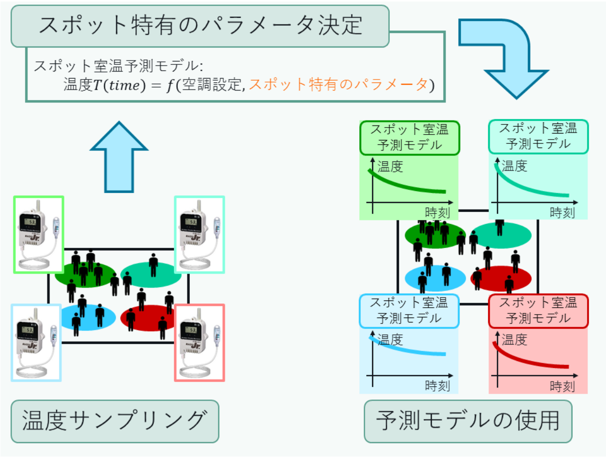


図 1: 提案手法の概要

ここで，任意のスポットにおいて温度センサが設置可能であり，空調室内機の給気温度と風量という設定情報は得られることを前提条件とすることで，スポットにおける空調設定とその際の温度変化の情報から，空調設定を入力として温度変化を予測するモデルを構築する．このモデルは，スポット固有の環境を表現するパラメータを含んでおり，モデルを使用する際には，このスポット依存のパラメータを学習させることでスポット特有の空調に対する反応を予測する．以上の提案手法の概要を図1に示す．

2.2　モデルの設計

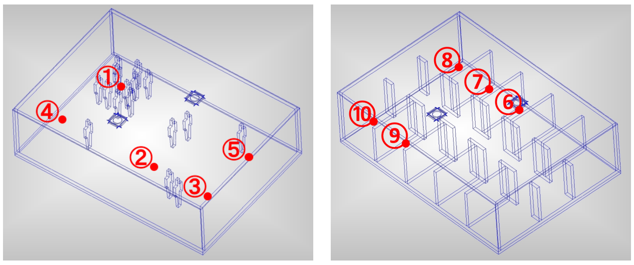
はじめに，事前実験として，実在のオフィス空調における室内機を模した3種の環境で，気流に対する障害物や熱源といった要因の存在しない理想的な屋内空間を設定し，流体シミュレーションを行った．この事前実験の結果より，直感的に空調効果に影響を与えると考えられる(1)空調の運転開始時における室温 T_{init}，(2)空調の吹出から出る冷気の温度 T_{set}，(3)空調の風量設定に対応する空調吹出体積流量 V，(4)屋内空間の容積 C，の基本的な4つのパラメータのみを考慮した温度変化予測モデルを構築した．

シミュレーションの結果より，空間内の平均室温は初期温度より指数関数的に低下し，最終的に空調吹出温度に収束することが判明した．そこで，任意の経過時間 t における基礎的な室温予測モデル $T(t)$ を以下に定義した．

$$T(t) = (T_{init} - T_{set}) \cdot e^{-\psi \cdot t} + T_{set} \tag{1}$$

屋内における室温の変化は人の存在，家具，パーティション，部屋の構造，窓からの日射などさまざまな要因に影響される．その一方で，これらの要因はスポットごとに異なるため，このような熱的な影響を生じる要因を先に述べた基礎的なモデルに対応するパラメータとして組み

Copyright ©2017 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.



(a) 評価環境 (I)　　(b) 評価環境 (II)

図 2: 評価環境と観測点の配置

込む必要がある．このパラメータの値は，対象とするスポットにおける温度の観測によって決定される．基本的に，上記にあげた要因は基礎的なモデルに対して場所に特有な以下の 3 種の影響，すなわち (i) 指数関数の速度 ψ に対する抵抗，(ii) 時間的な遅れ (空調の設定変更に対する観測点の反応の遅れ)，(iii) 収束温度に対する抵抗，として組み込むことができると考えられる．そこで，本研究では，スポットに特有な影響を正の変数 q_1，q_2，q_3 を用いて表現し，以下の形でモデルに組み込んだ．

$$T(t) = (T_{init} - (T_{set} + q_3)) \cdot e^{(-\psi + q_1)(t - q_2)} + (T_{set} + q_3) \quad (2)$$

ここで，式 (2) は $t \geq q_2$ で有効であり，それ以外の場合は $T(t) = T_{init}$ となる．指数関数の観点からは，q_1，q_2，q_3 はそれぞれ指数項の収束速度，指数関数全体の右方向のシフト，収束温度の上方向のシフトに対応する．

2.3 モデルの使用方法

場所依存のモデルを構築するにあたり，スポット依存のパラメータ q_1，q_2，q_3 は温度変化を知りたいスポットごとに値が決定される必要があるが，これは対象となるスポットでの実際の観測を元になされる．具体的には，ある T_{set} の値に対して経過時間 $t_0, t_1, \ldots, t_h$ のそれぞれにおける温度の観測 $T_{t_0}, T_{t_1}, \ldots, T_{t_h}$ が存在する場合に式 (2) で定義した指数関数をフィッティングさせることで，パラメータ値を決定する．

3 性能評価

本研究では，複数の環境に対して行った CFD シミュレーションの結果を用いて提案手法の評価を行った．流体シミュレーションには Autodesk 社の Simulation CFD 2015[3] を使用し，解析手法は有限要素法，乱流モデルは $k-\varepsilon$ モデルとした．評価においては，熱環境に対して大きな影響を与える要因として，(I) 熱源としての人と壁の存在，(II) パーティションなど気流を遮る存在，の 2 つを考慮し，図 2(a) と図 2(b) に示す 2 種類の環境を用意した．これらの空間内において流体シミュレーションを行い，図中の (No.1-No.10) に示す 10 点でその結果得られる温度変化を記録した．用意したそれぞれの評価環境に対し，シナリオとして開始時室温，空調吹出風量，空調吹出温度を変化させた 9 種類の組み合わせを用意し，各シナリオについて 20 分間の CFD シミュレーションを行った．

本研究では，評価環境 (I) と (II) においてそれぞれ 9 つのシナリオ設定で実施したシミュレーション結果のうち，8 つを訓練データ，残りの 1 つをテストデータとすることで 9-fold の交差検定を行いモデルの性能評価を行った．誤差の評価指標には二乗平均平方誤差 (RMSE) を使用し，各時刻 $t(1 \leq t \leq 20)$ における構築したモデルの温度予測の結果とテストデータの持つ温度の時系列データの誤差を算出した．なお，訓練データより構築される予測モデルは観測点によって異なる．そこで，性能評価に用いる RMSE はすべて観測点ごとに算出した．9 個のテストデータに対して行った交差検証の結果，評価環境 (I) においては，提案した予測モデルは 1 分毎の温度変化を各ポイントで平均しておよそ 0.32 °C の誤差で，評価環境 (II) ではおよそ 0.25 °C の誤差で予測可能であることを確認した．この結果より，現実的な屋内環境における空調使用時の室温変化を推定可能であることを示す事ができた．

4 実証実験における取り組み

現在，我々はおよそ 50 個の温度センサと 2 つの在室者検知を行う人感センサを $1400m^2$ の広さを持つ商業施設内のラウンジスペースに設置した上で，センシングデータをインターネット上のクラウドサーバに集約するシステムを構築し，提案手法の現実環境における適用を目指した取り組みを行っている．

今後は施設の協力を得て複数パターンの設定で空調を実際に稼働させて各地点の温度変化を取得することで，実環境においても提案手法を用いて構築した予測モデルが各地点ごとの温度変化を予測可能であるかを検証する予定である．また，現在のところ，人感センサの設置場所が施設内の 2 箇所にのみに限られており，施設利用者の面的な存在位置の把握は行えていない．そこで，今後はより小型で設置場所に関する自由度の高い焦電型赤外線素子を用いた人感センサを多数設置し，施設内における利用者の在室分布をより詳細なレベルで取得する予定である．これにより，利用者の移動も考慮した室温予測モデルへの改良も検討している．

謝辞

本研究成果の一部は，国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究「未来を創る新たなネットワーク基盤技術に関する研究開発」ならびに JSPS 科研費 15K12019 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] Nagarathinam, S., Vasan, A., Ramakrishna P, V., Iyer, S. R., Sarangan, V. and Sivasubramaniam, A.: Centralized Management of HVAC Energy in Large Multi-AHU Zones, *Proc. of the 2nd ACM International Conference on Embedded Systems For Energy-Efficient Built Environments*, pp. 157–166 (2015).

[2] Niwa, K., Tsukami, S., Kobayashi, K. and Hu, R.: Measurement and Simulation of Task/Ambient Air Conditioning System, *Journal of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol. 84, No. 8, pp. 637–642 (2010).

[3] Autodesk, Inc.: Simulation CFD, `http://www.autodesk.com/products/simulation-cfd/overview` (2015).

Copyright ©2017 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.