

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500921

研究課題名(和文)人間-環境系を考慮した空調省力化のためのユーザモデリング技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on User Modeling Method for Low Energy Consumption of Air-conditioner  
Considering the Relationship between Resident and Environment

研究代表者

小島 一恭 (KOJIMA, Kazuyuki)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60361391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：住環境において温熱的快適度を維持しつつエネルギー消費を低減するための新たな空調制御方法について、その効果を実環境における被験者を通じた実験により検証した。従来研究では、住環境の温熱特性および居住者の温熱的快適指標の予測方法を発展させ、温熱環境での個別の居住者の温熱的快適感と温熱環境に対する要求を推定する方法を研究開発し、実験室レベルでの検証を実施してきた。本研究では、実験範囲を実環境へと広げ、実環境において、ネットワーク上の不特定多数のセンサ情報を選択的に使用し、その選択状況を動的に切り替えながら空調装置の運転時にオンラインで住環境と複数居住者の温熱特性をモデル化する手法について検討した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed a new air-conditioning control methodology in order to both reduce energy consumption and keep thermal comfort in residential environment. We verified its effect by conducting experiments using subjects. In our conventional study, we had developed the method to predict individual thermal comfort and resident's thermal requirement at a laboratory level. This study expanded the level to an actual environment. We conducted experiments in the real environment in which unspecified a large number of sensors on a network was selectively used for modeling the resident's thermal characteristics online.

研究分野：機械工学

キーワード：空気調和

1. 研究開始当初の背景

空調設備は、人間の日常的な生活空間のみならず、医療、福祉や精密機器、半導体などの製造現場においても必要不可欠なものとなっている。一方で環境負荷低減が叫ばれ、特に地球温暖化対策としてのCO2削減、そして何より平成23年3月11日に発生した東日本大震災以降、省エネに対する社会的要求は喫緊の課題となっている。これまで「京都議定書」における温室効果ガスの排出抑制・吸収量の目標として1990年度の総排出量を基準として、2008年～2012年の目標期間内に日本国において6%削減することを約束していたが、従来よりの困難さに加え震災による原発から火力発電への切り替えに伴い、6%削減は極めて難しい状況となっている。エネルギー消費は産業を含めた全体としては減少に転じたものの、オフィスビル等の床面積増大、各家庭での家電等の保有台数の増加を背景としてオフィスや家庭などいわゆる「暮らし」由来のエネルギー消費は増大している。とりわけエアコンによるエネルギー消費の比率は家庭で使用される電気の中で最も大きく、電気事業連合会の統計によれば家庭の電気使用量の実に4分の1がエアコンに使用されている。空調装置の省エネに対する取組みは、空調装置メーカー各社をはじめ多方面でなされており、近年のエネルギー効率の改善は目覚ましいものがある。しかしながら、空調装置の省エネ性能の測定が実際の使用状況での省エネ性能と乖離していることや、エネルギー効率の改善率よりも空調装置新規導入数が多いことなどにより、結果としてエネルギー消費の増加を招き、そのため家庭から排出される温室効果ガスは削減どころか逆に増加しており、更なる対策が求められている。空調装置の更なるエネルギー消費削減の試みとして、空調装置単体でのエネルギー効率を高めるだけでなく、オフィス等において複数台の空調装置を連携、協調制御して効率改善を行う試みや、タスク・アンビエント空調のように必要な空間のみを空調し、不必要な空間は空調せず省力化する試みがなされている。また、デシカント空調のような除湿冷房の試みもある。

しかし、このようなシステムで効率的かつ効果的な空調を行うためには、空調装置を構成する多くのセンサ、アクチュエータを刻々と温熱負荷が変動する環境下において、その温熱環境を適切に把握し、適切に制御する必要がある。しかしながら、現状では、空調のように非常に多くの要素を含む系の特性の把握や制御が困難な状況にある。また、建築分野においても住宅における高断熱、ゼロ・エミッション促進の施策がなされ、現在、装置の効率化や太陽光利用の研究が盛んに行われているが、これらの研究はいずれも機器の側の性能改善に関するものである。これに対し申請者らは人間の側の温熱感覚や快適感、温熱環境に対する意識、意思に着目した

検討を行ってきている。

2. 研究の目的

従来の空調装置では居住者の温冷感や快適感として温冷感指標が用いられている。人間の温熱感覚は7つの要因(気温、湿度、気流速、平均放射温度、代謝量、着衣量、仕事量)が関連すると言われる。そこで、これらの7つの要因のうちの幾つかの要因を使用して計算することができる様々な温熱指標が提案されている。代表的なものを列挙すると、有効温度(ET)、暑さ指数(WBGT; 湿球黒球温度)、不快指数(DI)、予測平均温冷感申告(PMV)、新有効温度(SET)などがある(表1)。これらの温熱指標は物理量に基づくが、温冷感や快適感は本来主観的なものであり、人間の温熱感覚はこれらの物理量のみによって定義することはできない。さらには、主観的な温冷感や快適感と温熱環境に対する要求も一意に決定することはできないと考えられる。つまりこれは、平均化された温熱指標に基づいて空調制御を行っても居住者ごとの快適感を満たすことはできないし、また、居住者の中には「やや暑い」状態で「やや不快」な温熱環境にあるとしても「我慢できる」あるいは「気にならない」居住者も存在する可能性があり、このような居住者に対しての空調を省くことで、更なる省力化が可能であると考えられる。

表1 代表的な温冷感指標

指標	提案者	特徴
カク治癒力	L.Hill (1916)	人体の冷却効果の関連から環境を評価する。
グローブ温度	H.M.Vernon (1930)	温度、気流、輻射を総合的に評価する。
	Madsen (1972)	温度、気流、輻射の総合的評価をもとに着衣量、作業量、湿度を電子回路の系で定義してみたPMVを示す。
P4SR	McAuley (1947)	発汗量の予測を温度、輻射、気流、作業量を変数とするプログラムを用いて行う。
有効温度(ET)	Houghton, Yaglou (1923)	温度、湿度、気流の3つの温熱要素の組み合わせによる温冷感を、温度の尺度で表示。多くの被験者の主観的判断に基づく。
不快指数(DI)	アメリカ気象局 (1959)	温度と湿度のみを用いて有効温度を近似的に示す。
WBGT	Yaglou, Minard (1957)	温度、気流、輻射、湿度の計測により有効温度を近似的に示す。
作用温度(TO, STO)	Gagge (1937)	輻射、温度、熱放射伝達率、対流熱伝達率を含む仮想温度である。
平均予測温熱申告(PMV)	Fanger (1970)	温度、湿度、気流、輻射、代謝量、着衣量から温冷感を指標として表示。その環境に滞在する人々の不満足に感じる割合は、PPDで表示する。
新有効温度(ET*, SET*)	Gagge, Nishi (1971)	発汗による体温調節を含む熱平衡モデルに基づき、温度、輻射、湿度、気流、着衣、作業量、気圧、人工気流などの変数より、生理因子として皮膚温、体内温、発汗量、貯熱量等を総合的に評価する。

本研究では、住環境において温熱的快適度を維持しつつエネルギー消費を低減するための新たな空調制御方法について、その効果を実環境における被験者を通じた実験により検証する。従来研究では、住環境の温熱特性および居住者の温熱的快適指標の予測方法を発展させ、温熱環境での個別の居住者の温熱的快適感と温熱環境に対する要求を推定する方法を研究開発し、実験室レベルでの検証を実施してきた。本研究では、実験範囲を実環境へと拡張、実環境において、ネットワーク上の不特定多数のセンサ情報を選択的に使用し、その選択状況を動的に切り替えながら空調装置の運転時にオンラインで住環境と複数居住者の温熱特性をモデル化する手法について検討する。

### 3. 研究の方法

実環境に多数の温湿度センサ、気圧センサなどを配置し、それらをネットワークに接続し、センサネットワークを構築する。このセンサネットワーク上の不特定多数のセンサ情報を選択的に使用し、その選択状況を動的に切り替えながら空調装置の運転時にオンラインで住環境と複数居住者の温熱特性をモデル化する。このモデルに基づき居住者の要求に応じた最小限の空調を行うことで居住者の要求を達成しつつ空調の省力化を図る。この実現のため、複数居住者の温熱環境に対する要求の抽出方法とそのための装置および環境、複数センサと複数居住者からなる環境のモデル化手法、複数居住者の温熱環境に対する要求の予測方法、予測された要求のフィードバック方法ならびに空調制御方法を開発し、実環境における被験者を用いた実験で複数居住者の温熱環境に対する要求の達成と空調の省力化の効果を工学的、医学的な見地から検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 実験環境の構築

居住者の近傍の温湿度を測定するとともに、環境内（室内・室外）に複数の温湿度、気圧などを測定するセンサを配置し環境情報を測定するシステムを構築した。これらセンサネットワーク上の測定データはネットワークを經由してサーバ上に記録する（図1）。また、居住者は不定期に携帯端末を使用して温冷感を申告する（図2）。

#### (2) 居住者の温熱申告のモデル化

ベイジアンネットワークを用いて居住者の機器操作、温冷感申告などのモデル化手法を提案した。ベイジアンネットワークは事象間の因果関係を有向グラフで表現し、その上

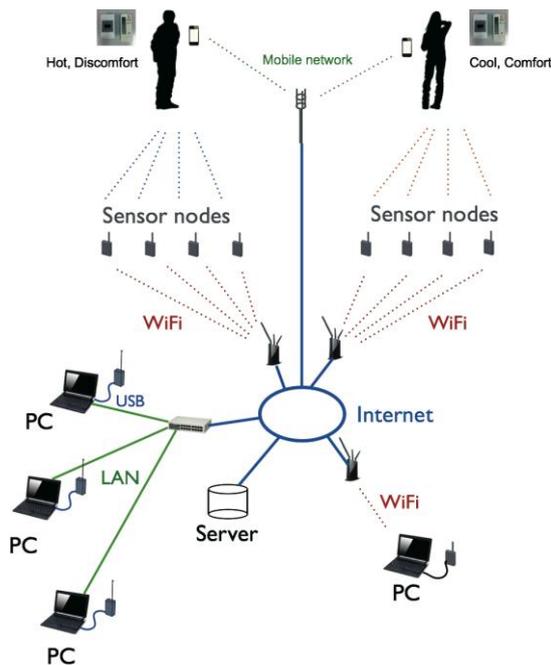


図1 実験環境の構築

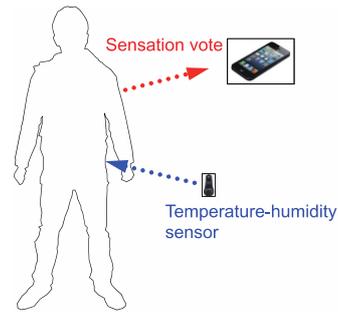


図2 携帯端末を使用した温冷感申告

で事象の個々の変数の関係を条件付き確率で表す確率推論モデルの一つである。複雑で不確実な事象の生起確率を予測することが可能である。図3に本研究で提案するベイジアンネットワークの例を示す。ノードと有向グラフで事象の因果関係を示すが、ここではUは空調機器の温度設定を上げること、Dは下げること、Kは保持することに相当する。また、 $T_0, T_1, T_2, \dots, T_n, H_0, H_1, H_2, \dots, H_n$ のノードはセンサ値（例えば温度や湿度）の範囲を示している。

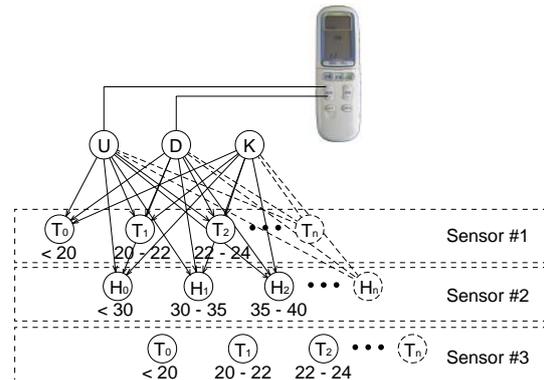


図3 操作予測のベイジアンネットワーク

ベイジアンネットワークではベイズの定理に基づき事後確率と呼ばれる原因の確率を算出する。計算にはベイズの定理を用いる。例えば、あるセンサが示す値がある範囲にあるときに、居住者が温度設定を上げるのか、下げるのか、保持するのかの確率をベイズの定理を用いてそれぞれ算出する。ある温度範囲の時に温度設定を上げる確率は次式により計算できる。

$$P(U|T_n) = \frac{P(T_n|U)P(U)}{P(T_n)} \quad (1)$$

ここで、Uは温度を上げること、 $T_n$ はある温度範囲を示す。計算には、温度設定を「上げる」、「下げる」、「保持する」の3つについて個別の事象の生起確率と温度設定を変えた時のセンサ群の個々のセンサ値がどの範囲に入っているかの条件付き確率が必要である。これは、空調機器の操作履歴や居住者の申告と空調機器のセンサ値の記録から簡単に計算できる。例えば図4は気温に対する居住者の空調機器操作の確率分布であるが、こ

のような分布から個々のセンサ値に対する操作の条件付き確率が容易に求められる。また、これらのセンサ群は温冷感に関係する温度、湿度のみならず、例えば空調機器以外の温湿度センサや歩数計や活動量計、温冷感とは直接関係がなさそうな照度センサ、騒音計などでもよく、予測の向き不向きはあるものの、センサ群を用いることで、より確度を上げた予測をすることが期待できる。

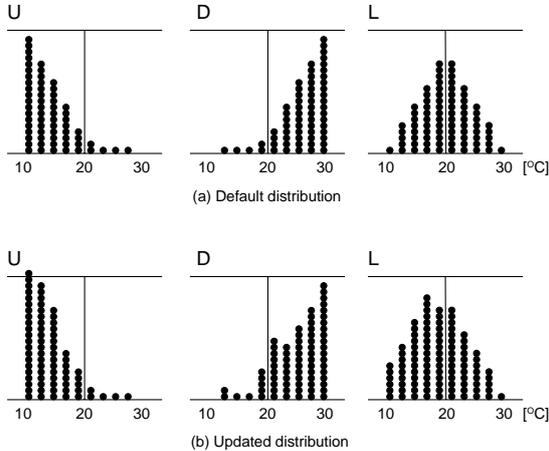


図4 居住者の機器操作の確率分布

### (3) 実環境実験による検証

居住者の実際の申告による事前確率分布に基づいて空調機器の温度設定の上げ下げを予測する。居住者近傍の外気温を測定するとともに、居住者が小型携帯端末を使用して任意のタイミングで温冷感を「寒い」、「涼しい」、「やや涼しい」、「どちらでもない」、「やや温かい」、「温かい」、「暑い」の7段階で申

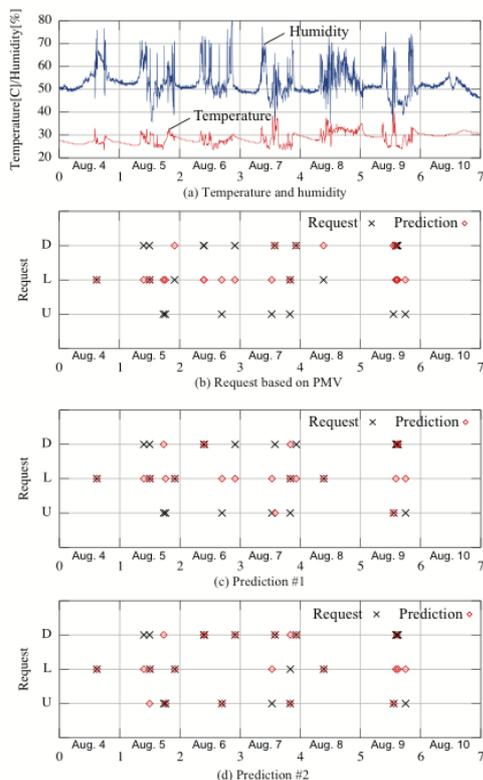


図5 予測結果の比較

告する。これらの申告を「寒い」は「温度を上げる」、「暑い」は「温度を下げる」、それ以外を「保持する」と読み替え、確率分布を得る。この分布とベイズの定理を用いて事後確率を計算し、操作を予測する。図5は予測結果である。(a)温湿度変化、(b)空調機器などで温冷感の予測によく用いられるPMVによる予測、(c)本手法による予測結果(温度センサのみを使用した場合)、(d)本手法による予測結果(温度センサと湿度センサを使用した場合)である。PMVによる予測は実際の申告に一致しないものが多く見られ、予測結果と申告の一致は43.4%であった。これに対して、本手法による予測結果は、温度センサのみを用いた場合は53.9%、温度センサと湿度センサを用いた場合は64.5%であり、従来手法に比べて予測精度が向上した。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計11件)

1. K. Kojima and T. Okumura: Controller Design for Air-conditioners Considering of Occupant's Requests by using Bayesian Network, Proceedings of The 3rd International Conference on Design Engineering and Science (ICDES 2014), pp. 58-62(2014). 2014. 8. 31~9. 3, パークホテルコンgresセンター (チェコ共和国プルゼニ)
2. M. Sato, J. Kaneko and K. Kojima: Development of Pavement Surface Inspection System for Wheel Chair Comfortability, Proceedings of 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2014), pp. 219-220(2014). 2014. 10. 7~10, 幕張メッセ (千葉県千葉市)
3. 小島一恭, 奥村高広: 環境センサ群を用いた温熱環境下の居住者の空調機器操作予測, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (ROBOMECH2014) 講演論文集, No. 14-2, 1P2-H04, pp. 1-2(2014). 2014. 5. 25~29, 富山市総合体育館 (富山県富山市)
4. 小島一恭, 奥村高広: ベイジアンネットワークを用いた室内空調機器の操作予測, 日本機械学会関東支部第20期総会講演会講演論文集, (2014). 2014. 3. 14~15, 東京農工大学 (東京都小金井市)
5. K. Kojima and T. Okumura: Bayesian Network-based Air-conditioning

Control Considering of Occupants Requests, 2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), ISBN 978-1-4799-1291-9, pp. 77-78 (2014). 2014. 1. 10 ~ 13, ラスベガスコンベンションセンター (米国)

6. T. Okumura and K. Kojima: Effects of electromagnetic interferences on implantable cardiac pacemakers, 2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2013), DOI: 10.1109/GCCE.2013.6664924, ISBN 978-1-4799-0890-5, pp. 59-62 (2013). 2013. 10. 1~4, 幕張メッセ (千葉県千葉市)
7. 小島一恭: センサネットワークを用いた居住者の活動局面に応じた快適度推定, 日本機械学会第 12 回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, pp. 143-144 (2012). 2012. 4. 23~24, 愛媛県県民文化会館 (ひめぎんホール)
8. 小島一恭, 距離画像センサを用いたロボットアーム制御に関する教育事例, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, (2012). 2012. 9. 9~12, 金沢大学 (石川県金沢市)
9. 小島一恭: 室内外の環境情報に基づく居住者の個人差を考慮した快適度推定, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH2012) 講演論文集, (2012). 2012. 5. 27~29, アクトシティ浜松 (静岡県浜松市)
10. K. Kojima and T. Okumura: Predictive Modeling of Thermal Comfort Based on Relationship between Occupant's Satisfaction and Thermal Aspects Using Sensor Network, Proceedings of 2012 ASME-ISPS / JSME-IIP Joint International Conference on Micro mechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2012), (2012). 2012. 6. 18 ~ 20, サンタクララ大学 (米国)
11. K. Kojima: Automatic Generation of VHDL for Controller of Inverted Pendulum in Consideration of Robustness, Proceedings of SICE2012 SICE Annual Conference, (2012). 2012. 8. 20~23, 秋田大学 (秋田県秋田市)

[その他]  
ホームページ等  
<http://hilab.mech.saitama-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小島 一恭 (KOJIMA, Kazuyuki)  
埼玉大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 60361391

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

奥村 高広 (OKUMURA, Takahiro)  
埼玉医科大学・保健医療学部・助教  
研究者番号: 30458533