

# 主体的快適性に関する基礎的研究

ローコストワイヤレスセンサーネットワークを用いた主体的環境調整行動の観測と推定

○遠田 敦<sup>\*1</sup> 中川 純<sup>\*2</sup>  
富樫英介<sup>\*3</sup> 永井拓生<sup>\*4</sup>

キーワード：主体的快適性，センサーネットワーク，環境調整行動，Adaptive Model

## 1. 研究背景

建築における快適性の評価は、建築空間における温熱環境の物理的な条件に対して、人体の熱収支理論をあてはめることによって体系化されてきた歴史がある。例えば、FangerによるPMV<sup>1)</sup>は、予想平均申告値を算出するために「温冷感＝人体熱負荷の関数」と「人体熱負荷＝温熱6要素の関数」に分割し、温熱6要素の物理式から導かれた人体の熱収支と被験者実験から得られた温冷感申告結果を統計処理することで関係を求めている。一方、deDear<sup>2)</sup>らは、自然換気を用いたオフィスでは人体の環境適応範囲が広がり、空調を行っている環境下よりも許容範囲が広がる行動的・心理的適応について報告しており、設備容量の縮小や設定温度の緩和などの効果が期待されている。しかし、適応過程のメカニズムや行動的・心理的な適応による熱的な快適性への影響はまだ十分に把握されておらず、自然換気を活用した建築に対する評価基準も存在しないのが現状である。

適応モデルの発展に関しては、そのメカニズムを科学的に明らかにすることが求められている。一方で、環境や行動の履歴を統計的に解析することで、快適性を担保したままエネルギー消費を減らすきっかけとなるトリガーを発見することができれば、人間の主体的な環境調整行動によって快適性と省エネルギーを両立するシステムを考案することも可能になるだろう。

また、近年ではオープンソースハードウェアの普及により、従来よりも安価にセンサモジュールを構築することが可能になったため、大量の情報を効率的に集めることで、環境と人間の行動を同時に計測することにより、行動に内在する悉無律を探りたいと考えた。

## 2. 研究目的

住空間内で生活者が主体的におこなう環境調整行動が発生するタイミングを、センサーによって観測できるデータのみにより推定する手法について検討をおこなう。また、生活者の行動と住空間の温熱環境の観測とデータの取得については、筆者らがこれまでに開発してきたワイヤレスセンサーネットワークモジュール<sup>3)</sup>を使用することとし、その性能評価についても合わ

せて検討をおこなう。

## 3. 研究方法

### 3.1 研究概要

計測対象として選定した住宅にワイヤレスセンサーネットワーク（WSN）を構築した上で、これを用いて温度[℃]、湿度[%RH]、照度[lx]などの環境データを断続的に計測し、これをデータサーバに蓄積する。また同様に、居住者による主体的な環境調整行動の現れのひとつとして、窓の開閉状態を記録する。

観測された温熱環境データ、年月日および時刻を説明変数とし、窓の開閉状態を目的変数とする推定モデル（識別器）を構築するため、一定期間観測を継続した後、種々の観測データを教師データとした機械学習をおこなう。識別器の構築にあたっては、説明変数となる温熱環境データなどの変数を組み替え、説明変数の多寡や種類と推定精度との関係に着眼した分析をおこなう。

### 3.2 ワイヤレスセンサーネットワークの概要

観測に用いるWSNの構築には、筆者らがこれまで開発してきたWSNモジュールを用いる（図1）。このモジュールは、オープンソースハードウェアのArduinoをベースとして開発され、観測をおこなうセンサーノードと観測データをデータサーバへ送信するハブノード（図2）の2種類によって構成されている。

ハブノードは有線LANポートを備え、インターネット上のデータサーバにHTTPクライアントとして接続することができる。センサーノードは温湿度、照度などのセンサーモジュールを搭載し、各種の温熱環境データを観測することができる。

ハブノードおよびセンサーノードはDigi International社のXBee Series1を搭載し、IEEE802.15.4に類するメッシュ型のワイヤレスネットワークを構築することができる。データはいくつかのセンサーノードを経由し、最終的にハブノードへ送られる。ハブノードはセンサーノードから受け取った観測データをデータサーバへ送信し、データサーバではこれを逐次記録して保存する。

なお、本研究で用いたセンサーノードは時刻を取得

する手段を持たないため、データサーバがデータを受け取った日時を観測された時刻として記録する。実際の観測時刻とデータサーバが記録した時刻との間には若干の差異があるが、ごく数秒程度であるため本研究では無視することとした。

### 3.3 実験場所および日時

観測対象としたのは、夫婦二人暮らしの住宅であり、夫は日中、仕事のため外出し、妻は日中、おおむね在宅しているというライフスタイルである。

全観測期間は2010年1月から2012年9月末までであるが、センサーノードはその期間中に随時追加されていったため、すべてのセンサーノードのデータがその期間にわたって存在するわけではない。センサーノード数と観測期間との対応関係を図3に示す。

センサーノードの設置時期が統一されていないため、識別器を用いた分析においてはすべてのセンサーノードの観測期間が重複する2011年3月18日から2012年9月30日までのデータを用いることとした。周期関数モデルの構築には、観測された全期間のデータを用いることとした。

### 3.4 観測方法および分析準備

観測するデータの種類に応じて、センサーノードは3種類用意した。主に屋内に設置し、温度 [°C]・湿度 [%RH]・照度 [lx] を観測するものをI型とする。主に屋外に設置し、温度・湿度・照度・気圧 [hPa]・風向 [deg]・風速 [m/sec]・雨量 [mm] を観測するものをO型とする。居住者の主体的な環境調整行動の現れとして窓の開閉距離 [mm] を観測するものをR型とする。なお、本来はR型の計測値は距離の数値として記録されるが、本研究では開閉状態の二値（開か閉か）として扱うこととした。センサーノードの型と設置場所との対応を図4に示す。

分析をおこなう前の準備として、得られた観測データの整形をおこなう。各センサーノードから得られた観測値は必ずしも時刻が一致しないため、1日を5秒ごとに区切り、その区間に該当する時刻の観測データが存在する場合はその区間の代表値とすることとした。また、観測値が複数ある場合はそれらの平均値を代表値とし、区間に該当する観測値が存在しない場合はこの区間の観測値はデータなしとして扱う。この操作はすべてのセンサーノード、すべての観測データの種類に対して実施し、最終的には全観測期間にわたってすべてのセンサーノードの観測値を統合する。

以降で実施する分析においては、これらのデータを機械学習における教師データおよびテストデータとして扱うとともに、識別器による方法との比較として作成する周期関数モデルを決定するための実測値として扱う。



図1 WNS モジュール外観（センサーノード）

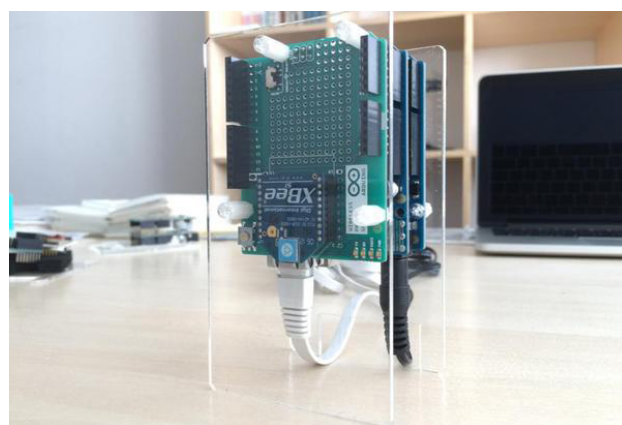


図2 WNS モジュール外観（ハブノード）

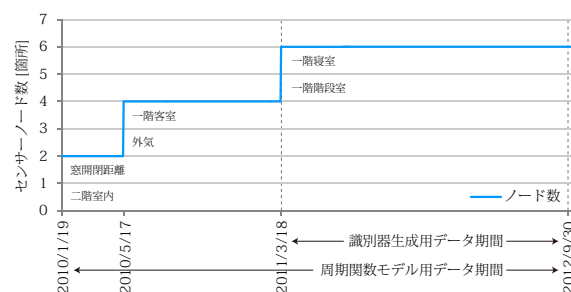


図3 WNS モジュール外観（ハブノード）

### 3.5 分析方法

ここでは得られた観測データを分析する方法について述べる。後述するように、機械学習により得られた識別器を使った推定と、周期関数モデルによる推定との比較を通じて検討をおこなう。いずれの推定においても、モデルが得られた後に得られたモデルによる識別結果と元にしたデータとの対応から識別率を算出し、これを指標としてモデルの妥当性評価をおこなう。

#### (1) 機械学習による識別器の構築

種々の観測データの値によって窓の開閉状態（開と閉の二値）を推定する識別器を得るため、前項で用意したデータを元に、表1に示した観測変数（特徴ベクトル）の組み合わせごとの識別器をナイーブベイズ法を用いて得る。

センサーノードの数が増えるほど識別に用いることができる特徴ベクトルを増やすことができるため、一般的に考えれば識別器の推定精度は上昇するものと予想することができる。その一方で、センサーノード数が増えると計算のための時間的コストや観測のための機材のコストが膨らむことから、それらのバランスを考える必要が出てくる。特徴ベクトルの組み合わせ数を変えて分析をおこなうのは、このような検討をおこなうためである。

また、機械学習に関する処理は統計解析用のソフトウェア「R」を用いて実施した。Rにおいて、ナイーブベイズ法による学習はライブラリ「e1071」のnaiveBayes()関数を用いることで実装することができ、本研究においてもこれを用いることとした。

## (2) 周期関数モデルの構築

人間の行動にはある種の周期性(習慣性)があることは経験的に明らかであることから、窓を開け閉めするという行為にも周期性があると仮定する。つまり、窓の開閉状態がサインカーブに類する周期的で単純な変動で表現できるものとする。

この仮定が成立するかについて、得られた観測データから変動の傾向を確認する。データの量が膨大であるため、データを人間が目視して評価することは困難

であるため、ここでは開閉の状態をRGB値に変換して画像として表現することとした。その際、表現の都合上、60秒を1ピクセルとして扱うこととしたため、元とした開閉の二値データを60秒ごとの平均値として再計算した。

画像の横方向1行を1日分のデータとして割り当てる。1日は1440分であることから、横幅は1440ピクセルとなり、先の手順で再計算された値(値域は0から1)を用いて、緑(0x00FF00)から赤(0xFF0000)までのグラデーションでRGB値を割り当てる。画像の縦方向に全計測期間分の結果を同様にして割り当てる。これにより得られた画像を図5に示す。図5より、横方向の周期(日内変動:朝は閉状態から始まり、昼に開状態を経て晩に再び閉状態に戻る)と縦方向の周期(年内変動:冬場は閉状態が多く、夏場は開状態が多い)とがあることが確認できる。従って、このふたつの変動の和として周期関数をモデル化する。

日内変動については、すべての観測データについて同一時刻区間の平均値を算出し、これにより得られた分布に対して最もよく近似するサイン関数を非線形最小二乗法により得る。同様に、年内変動については各日の平均値をすべての計測期間にわたって算出し、これにより得られた分布に対して最もよく近似するサイン関数を非線形最小二乗法により得る。このふたつの周期関数は月・日・時・分の4つの変数により得られる数値が定まり、その和をもって窓の開閉状態の推定値とすることとした。

計測期間と同一の月日時分の値を入力して得た推定値が0.5以上の時を開状態とし、0.5未満の時を閉状態とする。それぞれの月日時分に対応する開閉状態の一致率を指標としてモデルの妥当性評価を実施する。

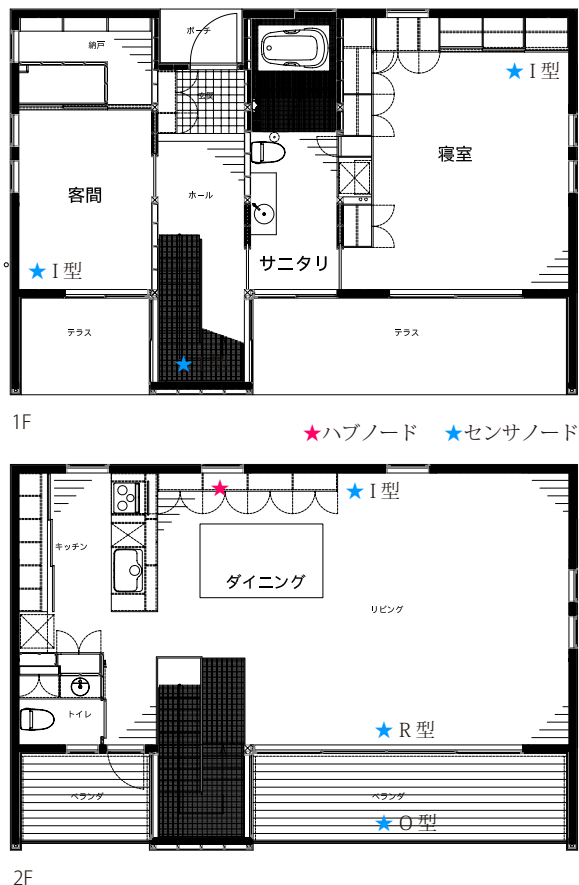


図4 センサーノードの配置と型

表1 特徴ベクトルの組合せ

	二階室内温度	外気温度	一階客室温度	一階階段室温度	一階寝室温度	月日時分秒
識別器1	○					
識別器2	○					
識別器3	○	○	○			
識別器4	○	○	○	○		
識別器5	○	○	○	○	○	
識別器6	○					○
識別器7	○	○				○
識別器8	○	○	○			○
識別器9	○	○	○	○		○
識別器10	○	○	○	○	○	○

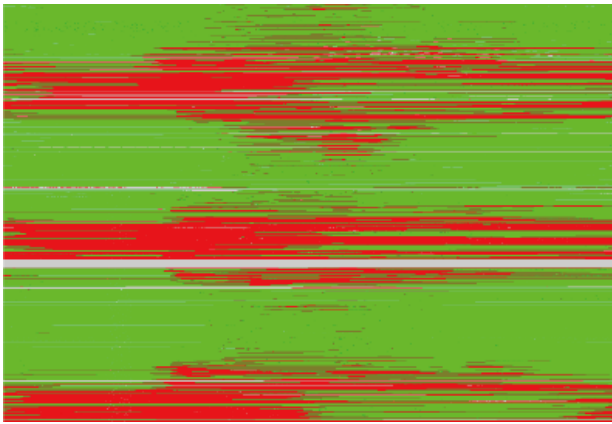


図5 実測データの図化

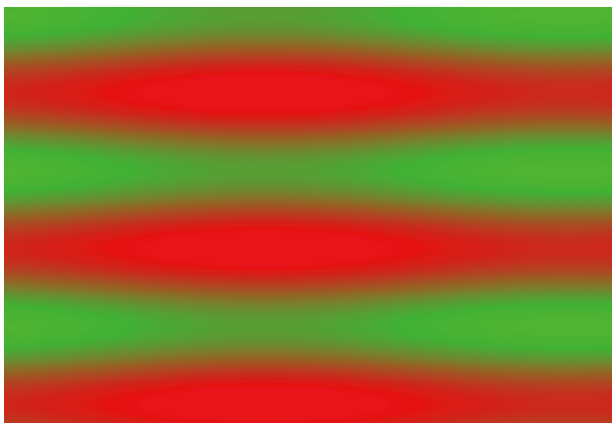


図6 周期関数モデルにより推定された開閉状態

表2 識別器ごとの識別率一覧

時分秒なし	識別率 [%]	時分秒あり	識別率 [%]
識別器 1	67.95	識別器 6	80.45
識別器 2	81.53	識別器 7	84.00
識別器 3	83.64	識別器 8	84.36
識別器 4	83.05	識別器 9	84.06
識別器 5	81.43	識別器 10	82.88

表3 周期関数の係数一覧

$$y = (A_d \sin(\theta + t_d \pi) + b_d) + (A_y \sin(\theta + t_y \pi) + b_y)$$

日内変動	数値	年内変動	数値
振幅 $A_d$	0.112	振幅 $A_y$	0.359
位相 $t_d$	1.652	位相 $t_y$	1.285
定数項 $b_d$	0.304	定数項 $b_y$	0.298

#### 4. 実験結果および考察

ナイーブベイズ法を用いて識別器を得て推定した場合の結果を表2に示す。大まかな傾向としては、特徴ベクトル数が増えるにつれて識別率が高くなる傾向があるが、84[%]程度で頭打ちになっている。モデルに用いる特徴ベクトルが<二階室内温度>のみの場合、識別率は67.95[%]であったものが、他のセンサーの観測値と組み合わせることでよりよい識別率が得ら

れる結果となった。また、単に観測データだけでなく時間帯や季節が行動に影響を及ぼすとも考えられるため、月日時分秒の値を特徴ベクトルに加えて識別器を得ることとした。その結果、加えなかった場合に比べて総じて識別率が高くなっており、今回の分析においては識別に有効な変数であったことがわかる。

一方、周期関数を用いて作成した推定モデルの結果について、観測期間全体の開閉状態推移予測結果は図6のようになった。また、日内変動と年内変動のそれぞれの周期関数のパラメータは、表3の通りとなった。

これらを用いて実測値との比較を行った際の一致率は66[%]であり、先に述べたナイーブベイズ法による識別器を用いた場合に比べて劣る結果となった。

#### 5. まとめ

本研究は、ワイヤレスセンサーネットワークによって観測された温熱環境データから人間が行動するタイミングを推定する手法の検討を行ったものである。

周期関数による単純なモデルと比較して、機械学習を用いた識別器による手法は十分な推定結果を得られることが明らかとなった。識別器の作成に用いる特徴ベクトル数は、十分な推定精度を得るためにはいくつかの変数が必要となるが、多すぎても逆に精度を落とす結果となることが示された。

また、低価格なセンサー機器であっても、断続的に環境の変動を捉えることができるのであれば、データ数としてのスケールメリットを活かした手法で有効な識別モデルを得ることが示された。

#### 謝辞

本研究は一般財団法人住総研より「主体的快適性に関する基礎的研究」として助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) P.O.Fanger, Thermal Comfort, Danish Technical Press,1970
- 2) deDear,R.J,et al.,Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions, Vol.104(1),pp.27-48, 1998
- 3) Atsushi Enta, Kousuke Kikuchi, Hitoshi Watanabe, Study of Low-cost Architectural Monitoring Infrastructure based on Open Source Hardware, UIA2011, 2011-9

\*1 日本大学 生産工学部 助教 博士 (建築学)

\*2 早稲田大学大学院 建築学専攻 学士 (工学)

\*3 工学院大学 建築学部 准教授 博士 (工学)

\*4 滋賀県立大学 環境科学部 助教 修士 (工学)