

商業施設における快適度推定および 可視化システムの開発

地口 将雄^{1,a)} 西村 友洋^{1,b)} 山口 弘純^{1,c)} 東野 輝夫^{1,d)} 山口 容平^{1,e)}

概要：近年，新しい商業ビルやオフィスビルなどでは，ビル全体の電力消費の約 70%を占めると言われる空調の省エネルギー化のための BEMS 導入が盛んになってきている．BEMS では，ビルインフラ設備として固定設置された温湿度計や風量計，CO₂ 計などをもとに換気や温湿度調整を行うが，これらの設備型センサは設置位置や設置数に大きく影響を受けるため，オフィスビルの居住者や商業施設の来訪者の「快適性」を真に表していない．にもかかわらず，ビル管理者はそれらをもとに感覚的あるいは画一的な温度設定で制御せざるを得ず，過剰な冷暖房などエネルギー損失や快適度損失につながる可能性が指摘されている．我々は，スマートフォン内蔵の温度センサ等で得られる，人に近い位置での温度を参加型センシングで集約すると仮定するとともに，人々の存在による放射熱を人密度から推定し，体感的な快適度を表す PMV 指数に反映する方法を検討している．本稿では，現在開発しているモバイル型のセンシングシステムのアーキテクチャを述べるとともに，実施設での測定結果に基づき，検討中の PMV 推定手法の妥当性検証を行う．また，推定した混雑情報や PMV をクラウドサーバーに集約し，モバイル端末でリアルタイムに可視化するシステムを開発しているため，それらについて報告する．

1. はじめに

一般的なオフィスビルにおける消費電力の約 7 割は空調及び照明機器に起因することが知られており，空調及び照明機器に対する様々な省エネルギー制御手法が提案・研究されている．オフィスビルにおける省エネルギー化の取組の一つとして，タスク・アンビエントな照明空調システムが提案されており，執務者の在不在に応じ，適切な照明と空調を提供することで電力消費の削減を把握している [1], [2], [3]．これらにより，ビルの照明空調にかかる総消費電力（ビル全体の電力消費の約 70%[4]）のうち少なくとも 10%程度の削減が見込めることが知られている [3], [5], [6], [7]．

BEMS では，ビルインフラ設備として固定設置された温湿度計や風量計，CO₂ 計などをもとに換気や温湿度調整を行うが，これらの設備型センサは設置位置や設置数に大きく影響を受けるため，オフィスビルの居住者や商業施設の来訪者の「快適性」を真に表していない．にもかかわらず，ビル管理者はそれらをもとに感覚的あるいは画一的な温度

設定で制御せざるを得ず，過剰な冷暖房などエネルギー損失や快適度損失につながる可能性が指摘されている．さらに，駅地下街や商業施設のレストラン街などでは，多くの人々が来訪することによる人体放射熱や飲食店舗の熱調理による放射熱の増加などにより体感温度は上昇する可能性があり，体感的快適性の実現はさらに困難となる．

人々の快適度を表す指標として，デンマーク工科大の Fange により定義された温熱環境評価指数 PMV (Predicted Mean Vote) が知られており，これを用いて快適度を測定あるいは推定する方法も提案されている．PMV は熱的快適度のことであり，4 つの環境的要素（室温，平均放射温度，相対湿度および平均風速）と 2 つの人体的要素（着衣量および作業量）に対する被験者の温冷感の 7 段階の主観評価に基づき設定された指標である．PMV は設備設計を始めとする様々な分野で活用されているが，数値の導出において前述の 6 要素の情報が必要であり，それらは設置型センサに依存するため，前述と同様の課題がある．文献 [8] では，簡潔な計算式や低コストで取得できる情報から PMV を推定することで，設置型センサ数を減らしながら PMV 値を推定するが，これをはじめとした既存手法では，人々による混雑や設置型センサの位置や環境が快適度に与える影響を考慮しきれていないのが現状である．

我々は，スマートフォン内蔵の温度センサ等で得られる，

¹ 大阪大学 大学院情報科学研究科

a) m-chiguchi@ist.osaka-u.ac.jp

b) t-nisimr@ist.osaka-u.ac.jp

c) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

d) higashino@ist.osaka-u.ac.jp

e) yohei@see.eng.osaka-u.ac.jp

人に近い位置での温度を参加型センシングで集約すると仮定するとともに、人々の活動による放射熱を人密度から推定し、体感的な快適度を表す PMV に反映する方法を検討している。本稿では、現在開発しているモバイル型のセンシングシステムのアーキテクチャを述べるとともに、実施設での測定結果に基づき、検討中の PMV 推定手法の妥当性検証を行う。また、推定した混雑情報や PMV をクラウドサーバーに集約し、モバイル端末でリアルタイムに可視化するシステムを開発しているため、それらについて報告する。

2. 関連研究

2.1 BEMS 動向

快適な室内環境は建築において提供される主要なサービスである。室内環境として考慮される項目には照度、温湿度、空気質があり、それぞれ照明設備、空調、換気設備がサービスの提供を担っている。通常の業務建築では執務者の在不在情報のセンシングがおこなわれていないことから、執務者の在不在にかかわらず一定のサービスが提供されているが、最新の BEMS では、居住者の在不在情報を用いてサービスの提供空間を限定する、あるいは、提供されるサービスの強度を調整する手法が提案され、複数の実証事例がある。例えば、大阪ガスでは照明ではタスク・アンビエント照明 [3], [7], 空調ではタスク・アンビエント空調 [2], [5] や IP 電話の在室検知機能を利用した省エネ制御 [9], 換気では室内の二酸化炭素濃度に基づく換気量制御などがある。これらの技術においては、RFID などを利用して人の在不在情報に基づいた制御を行っている。これらは実証試験により 10%~20% のエネルギー消費量の削減が達成されることが示されているが、いずれも快適性を決定的に考慮できていないのが現状である。

2.2 PMV 推定手法

様々な空間や状況の快適度を定義するため、快適度指標 PMV[10] は多様な分野で利用されている。しかし PMV の推定に必要な要素は多く、そもそもデータ取得自体が難しい要素も存在する。文献 [8] では、衣服量の範囲を限定することで気温と湿度のみから PMV を推定可能とし、より簡易に計算を出来るものの、屋内の理想的な空間を想定しているため、混雑密度の変化による影響などには対応できていない。

2.3 スマートフォンによる混雑推定手法

監視カメラなどの設置型インフラによる人密度の把握は従来より行われているが、そのようなインフラに依存せず、モバイル端末を用いて群集の密度を推定する方法が提案されてきている。スマートフォン端末により密度推定を行う手法 [11] では、Bluetooth により得られる近隣端末数

表 1 PMV の定義

PMV	温冷感
+3	暑い (hot)
+2	暖かい (warm)
+1	やや暖かい (slightly warm)
0	中立 (neutral)
-1	やや涼しい (slightly cool)
-2	涼しい (cool)
-3	寒い (cold)

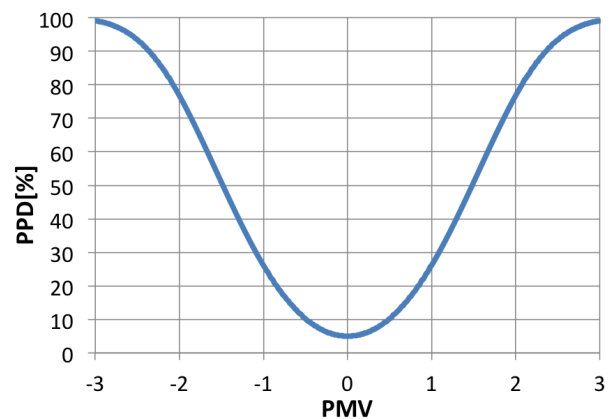


図 1 PMV と PPD の関係

や受信電波強度をもとに端末保持者周囲の状況を推定する。我々の研究グループでは、文献 [12] で一般的なスマートフォン端末に付属している加速度センサおよび音センサから得られた情報から端末保持者周辺の混雑状況の推定を行う手法を提案しており、混雑時に発生する速度低下や環境音の増加を捉えることで、端末単独での混雑推定を実現している。本研究では、この手法を適応し得られた混雑情報と PMV の関連性について調査を行っている。

3. 快適度指標

PMV (Predicted Mean Vote) は予測平均温冷感申告とよばれる。デンマーク工科大学の Fanger 教授によって提唱されており、1984 年には ISO 7730 として国際標準化されている。PMV は +3 から -3 の範囲で、温熱環境に対し不満足あるいは不快と感じる人の割合を元に設定される数値であり、表 1 に示される定義となる。

PMV が 0 の温熱環境は最も快適であり、対象者の 95% が満足し、 ± 0.5 では 90% が満足する。その温熱環境に不満足あるいは不快さを感じる人の割合は PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied, 予測不快者率) とよばれる。PPD と PMV の関係を図 1 に示す。

人間の温熱感覚に影響を与える熱平衡における熱収支は、外部環境 (気温、放射温度、気流、および湿度) ならびに人的要因 (着衣量、および活動量) の 6 要素で決定される。PMV は人体と等価な熱収支モデルから式を算出し、統計実験における人間の温感と結びつけて定義している。

ISOにおけるPMVの熱収支モデルを以下に示す。

$$\begin{aligned}
 PMV &= (0.303 \times e^{-0.03 \times M} + 0.028) \times [(M - W) \\
 &\quad - 3.05 \times 10^{-3} \times \{5733 - 6.99 \times (M - W) - p_a\} \\
 &\quad - 0.42 \times \{(M - W) - 58.15\} \\
 &\quad - 1.7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a) \\
 &\quad - 0.0014 \times M \times (34 - t_a) \\
 &\quad - 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times \{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\} \\
 &\quad - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)] \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、 M は活動量(W/m^2), W は外部への仕事(W/m^2), I_{cl} は着衣量($m^2 \cdot C/W$), f_{cl} は着衣表面積割増率, t_a は気温($^{\circ}C$), t_r は放射温度($^{\circ}C$), V_a は気流速(m/s), p_a は水蒸気圧(Pa), h_c は対流熱伝導率($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$), t_{cl} は着衣表面温度($^{\circ}C$)である。

f_{cl} は、着衣時と不着衣時の肌の露出面積比であり、式(2)で定義される。

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl} & (I_{cl} \leq 0.078[m^2 / W]) \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & (I_{cl} > 0.078[m^2 / W]) \end{cases} \quad (2)$$

また、 t_{cl} は式(3)で定義される。

$$t_{cl} = 33.1 - I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \quad (3)$$

h_c は対流熱伝達率であり、式(4)で定義されている。

$$h_c = \begin{cases} 2.38(|t_{cl} - t_a|)^{0.25} & (2.38(|t_{cl} - t_a|)^{0.25} > 12.1v_{ar}^{0.5}) \\ 12.1v_{ar}^{0.5} & (2.38(|t_{cl} - t_a|)^{0.25} < 12.1v_{ar}^{0.5}) \end{cases} \quad (4)$$

v_{ar} は風速[m/s]である。衣服の熱抵抗を表す $I_{cl}[m^2 / W]$ は季節や天候によって変化するため、その日の気象条件に応じて決定する必要がある。文献[13]では実環境における外気温と I_{cl} 値の関係を調査しており、提案手法では式(5)により I_{cl} を導出する。

$$I_{cl} = 0.155 \times (2.072 - 0.055 \times t_{out}) \quad (5)$$

また、 p_a は水蒸気圧[Pa]を表し、気温および相対湿度RH[%]から式(6)を用いて導出する。

$$p_a = 611 \times e^{17.27 \times T / (T + 237.3)} \times RH / 100 \quad (6)$$

なお、本研究で対象とする屋内空間では、基本的に歩行のみを行うと考えられる。したがって、活動量指標であるMETs[10]に基づき、商業施設内の歩行者は1.6[met]、また外部への活動量は0と定義する。これを用いて M の値



(a) 混雑度(低) (b) 混雑度(中) (c) 混雑度(高)
図2 混雑度の分類

を式(7)のように定義する。

$$M = 58.1 \times 1.6 \quad (7)$$

これによってPMVを表す式(1)は、式(8)に簡易化できる。

$$\begin{aligned}
 PMV &= 1.90 + 1.79 \times 10^{-4} p_a + 5.03 \times 10^{-3} t_a \\
 &\quad - 1.53 \times 10^{-9} f_{cl} \times \{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\} \\
 &\quad - 3.86 \times 10^{-2} \times f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (8)
 \end{aligned}$$

提案手法は、この式を用いてPMVを推定する。

4. 提案システムのアーキテクチャと実装

4.1 想定環境

提案システムは、日常的に多数の来訪者で混雑するショッピングモール、商業施設や地下街などを対象とする。それらの来訪者の一部がシステムに参加するユーザであり、かつウェアラブル温湿度計やスマートフォン温度計を有していることを前提としているが、将来的には施設内の設置型温湿度計からの快適度推定も視野に入れている。また、屋内空間の快適度推定であることから、風量は常に1[m/s]以下であると仮定する。

また提案手法では、文献[8]などの既存のPMV推定に対し、来訪者による混雑度を加味することで、より現実に近い快適度を推定する方法を提案する。したがって、既存のPMV影響要因の他に、混雑情報をリアルタイムに取得する。混雑情報に関しては、我々の研究グループにおいてスマートフォンによる混雑度推定技術を開発しており、それにしたがって、歩行者への負担や事故の発生の可能性の面から以下のカテゴリに分類するものとする。

- 混雑度(低) 群衆密度が1.0人/m²未満(図2(a))
 - 混雑度(中) 群衆密度が1.0人/m² ~ 2.5人/m²(図2(b))
 - 混雑度(高) 群衆密度が2.5人/m²以上(図2(c))
- 図2に上記のカテゴリに対応する人密度の例を示す。

4.2 システムアーキテクチャ

提案システムは、壁に設置された温湿度センサなどの固定型センサ(環境情報クライアント)および周辺状況をセンシングするスマートフォン端末(混雑情報クライアント)と、センシングされた情報を集約するサーバから構成される(図3)。環境情報クライアントは室内の温度・湿度および外気温の情報を一定時間ごとにサーバに送信する。混雑

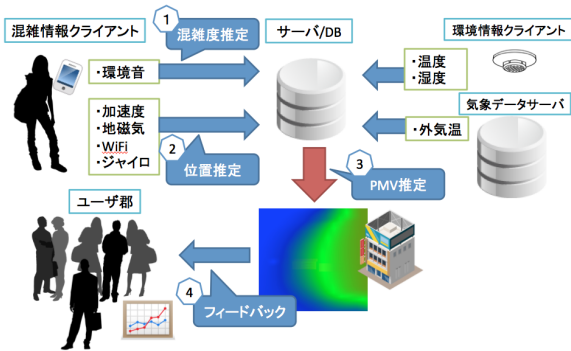


図 3 提案手法のアーキテクチャ

情報クライアント上では、加速度および音センサの情報から一定時間ごとに周辺混雑度分析を行う。加えて混雑情報クライアント上では、Wi-Fi 電波強度による位置推定を行うとともに、ジャイロ・地磁気・加速度センサの情報による PDR を組み合わせ、より高精度な位置推定を行う。各クライアントは、各時刻における環境情報・位置情報・混雑情報を携帯電話網または WiFi ネットワークを通じて定期的にサーバへ送信するものとする。

サーバ上では、クライアント群から収集したローカルな環境情報・混雑情報から各地点に対して提案手法による PMV 推定を行う。最終的に得られた PMV 値はマップ上に反映され、来訪者や施設管理者にフィードバックされる。これにより空調制御への利用や商業施設のマーケティングの活用が期待できる。

4.3 混雑度推定

本研究では文献 [12] の手法を応用し、混雑度の推定を行う。この先行研究では、対象環境が屋内の公共施設、特に商業施設を対象としているため、前述の先行研究の利用は可能であると想定しており、提案システムの混雑度推定に利用している。

提案システムでは、最初に事前実験を行い、対象空間内で各混雑状況別の音データを 100 分程度取得し、1 分ごとの音データに分割する。分割された音データに対して、それぞれ FFT を適用することで、周波数ごとの振幅スペクトルを求め、2[kHz] 以下のスペクトル値の総和を求める。この情報を学習データとして利用し、一般的な機械学習アルゴリズムの 1 つである K 近傍法 [14] を用いて、環境音の特徴量から混雑状況のカテゴリを判別するための分類器を構成する。混雑情報クライアントで観測された過去 1 分間の音データから前述と同様に、周波数ごとの振幅スペクトルを求め、2[kHz] 以下のスペクトル値の総和を求める。得られた総和の値を抽出し、前述の分類器に入力することで、混雑度 (低), (中), (高) の 3 つのカテゴリに分類する。

4.4 屋内位置推定手法の実装

WiFi を使った位置推定には、電波強度と距離の関係を表す伝播モデルを使用して推定する手法と事前に各地でフィンガープリントを取得し最近傍探索で位置を推定する手法がある。しかし、壁による電波反射や人体による電波減衰のため、伝播モデルを使用した場合は位置推定精度が大きく低下する。そこで本システムでは、対象空間に対してロバストな位置推定を行うため WiFi フィンガープリント手法を採用した。PDR による位置推定手法を組み合わせることにより、正確性とリアルタイム性の向上を図っている。最初に混雑情報クライアントから得られる WiFi 情報をもとに、フィンガープリント手法を用いた絶対位置の推定を行う。その後は、加速度センサ・ジャイロセンサ・地磁気センサの情報から PDR により位置推定を行う。Android API が提供する WiFi 情報は RSSI 値に遅延性があり、推定した位置は実際の位置と比べ数秒遅延して追従する特性があるため、移動中は PDR による推定結果を優先する。しかしながら、PDR による推定を長時間利用した場合、推定位置誤差が拡大する可能性がある。そこで、提案システムの 2 つの手法を用いた推定位置と WiFi のみを用いた推定位置が異なる場合、提案システムの推定位置を 1 秒あたり 10% づつ WiFi のみを用いた推定位置に近づけることで累積誤差の補正を行っている。以下では、その詳細を述べる。

4.4.1 PDR による位置推定

PDR は得られたセンサデータから移動距離とその時の方位角を推定し、相対位置変化量を加算していくことにより歩行者の移動軌跡を求める手法である。移動距離は、歩行ステップを加速度センサから認識することで求め、方位角はジャイロや地磁気センサを用いることで求める。

移動距離の推定ではステップ数とステップ幅を用いる。得られた垂直方向加速度に対して、移動平均フィルタを用いてノイズを緩和した値を垂直方向加速度と定義し、垂直加速度の変化量とある閾値によりステップの検出を行う。

方位角推定には地磁気を利用するが、屋内環境ではエスカレータなど大きなノイズの発生源があり、精度が安定しない。提案システムでは地磁気センサとジャイロセンサを併用することで方位推定の精度を高める。地磁気センサ情報から方位を推定し、ジャイロセンサの角加速度ベクトルと重力の単位ベクトルの内積を取ることにより重力周りの角加速度を抽出する。重力の単位ベクトルは、Android API で取得できる重力ベクトル情報を正規化することにより取得している。得られた重力周りの各加速度情報を積分することにより、方位角の変化量を求め、もとの方位に加える事で方位を求めている。ジャイロセンサは比較的高精度な変化量推定が可能であるが、長時間利用の場合には誤差の累積による問題もあり、一定時間ごとに推定方位の補正を行う必要がある。そのため、提案システムでは地磁気

センサ情報を用いて、ジャイロセンサ情報によって推定した方角を磁北に収束させている。しかし前述の通り、地磁気センサは屋内環境においてノイズが生じやすいという課題がある。この課題に対し、地磁気センサによる推定に対して信頼度を定義し、信頼度が高い時のみにジャイロで推定している方角を磁北の方角に収束させる手法を採用している。

4.4.2 WiFi フィンガープリント手法による位置推定

WiFi フィンガープリントマップを作るために、予め地図上に計測地点を約 15m おきに設定した。WiFi フィンガープリントの学習データとして、各地点において約 15 秒 RSSI 情報の取得を行い、最も強度が高い値を使用した。またモバイルルータなどの一時期に存在するアクセスポイントを除去するため、異なる時刻で測定し直し、検出した BSSID の積集合の AP のみを対象とした。その後、歩行時には、連続で 3 回測定した RSSI 情報の中で最も強いものを学習データと比較し、マンハッタン距離を用いた最近傍探索を行い位置推定を行う。事前に計測したフィンガープリントを S とし運用時に計測したフィンガープリントを R とすると、式 (9) のように距離を表すことが出来る。

$$ManDist(S, R) = \sum_{i=1}^n |s_i - r_i| \quad (9)$$

文献 [15] より、マンハッタン距離による最近傍探索は、ユークリッド距離などの他の手法よりも精度が高くなる事がわかっている。実際の運用では、導入コストを抑えるためにランドマーク間を約 15m の距離としたため、各クライアントがランドマーク間に存在する時間が比較的多い。そこで、より正確な位置を推定するため、最も距離が近いランドマークと次に近いランドマークの間を、マンハッタン距離の比で分割した地点を推定位置とした。

4.5 PMV 推定とその可視化

快適度指標 PMV の推定には、数多くの環境要素が必要であり、取得のためのコストが高い。そこで、本研究では商業施設に適した計算手法を提案し、低コストで取得できる温湿度情報から算出する新たな PMV 推定手法の提案を行う。

予備実験により、商業施設内で歩行する場合の v_{ar} の平均値は約 $0.6[m/s]$ であることがわかっている。式 (2)~(8) より、PMV を算出するには、相対湿度 RH、空気温度 t_a 、外気温度 t_{out} 、平均放射温度 t_r の 4 つのデータが必要である。外気温は気象データから取得するものとする。空気温度と相対湿度は取得可能であるが、平均放射温度 t_r は簡易に測定することができない。

この t_r の導出に関して、まず本研究では予備実験として、屋内空間で各混雑状況についてデータ取得を行い、どのような t_a や t_{cl} との関連性があるのかを調査し、それに

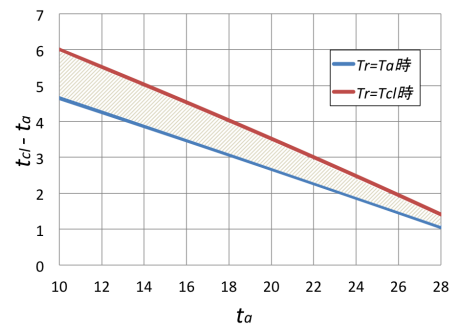


図 4 空気温度 t_a と衣服表面温度 t_{cl} の関係

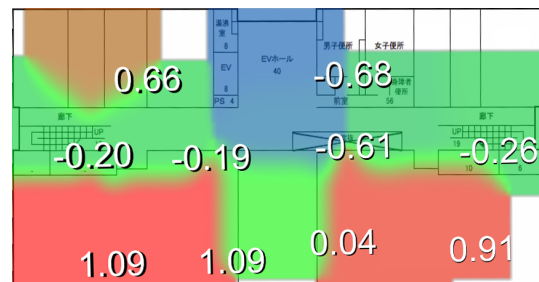


図 5 PMV の可視化例

基づき PMV 推定を行っている。これらの詳細は 5.4.2 小節で述べる。

4.6 PMV の可視化

混雑情報クライアントから取得した”時刻”、”位置情報”、”混雑度”の情報と、環境情報クライアントから取得した”時刻”、”クライアント番号”、”温湿度”の情報から、各時刻の温湿度と混雑度リストを生成する。それらを用いて 3 章の PMV 推定手法により各地点の PMV 値のマップを作成する。この PMV マップを $[-1.0, 1.0]$ の範囲で寒色から暖色に変換を行い、屋内空間の地図上にヒートマップ形式で PMV 値を表示する (図 5)。

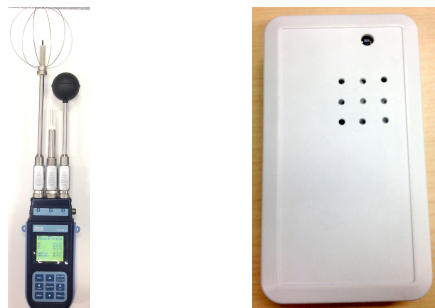
5. フィールドデータ収集とそれに基づくパラメータ決定

5.1 データ取得環境

屋内環境において Android 端末 (Nexus 5) を用いたデータ収集を実施した。端末上では、提案手法のアルゴリズムを実装したアプリケーションを動作させ、音センサにより取得した環境音情報から混雑度を推定し、また、WiFi 電波強度や加速度センサ情報から位置推定を実施した。推定した混雑度情報および位置情報は、サーバ上に送信される。サーバ上では Android 端末から得られた情報と音湿度センサからの情報を用いて PMV 値の推定を行い、最終的にはマップ上に PMV 値の可視化を行う。図 5 は、実験日のある時間帯における PMV 値を可視化した例である。

5.2 使用機材

実際に歩いている人が体感する PMV の真値は、図 6(a) の DeltaOHM 社 HD32.3 センサを持ちながら歩行することで計測した。このセンサは、黒球温度プローブや、熱線プローブなどを接続し、輻射温度や風速などを測定することで正確な PMV 値を測定し記録することができる。



(a) WBGT 指数-PMV 値計 HD32.3
(b) モバイルセンサ SENSIRION SHT1X
図 6 実験時使用センサ

実験では HD32.3 で測定すると同時に、我々の研究グループで開発している図 6(b) のモバイルセンサを携帯し読み取った温湿度から提案手法で PMV 値を推定する際のパラメータ検討を行う。

5.3 位置と混雑度の取得

位置推定の精度を調査するため、予め Android 端末 (Nexus 5) を用いてフィンガープリント情報を収集し、そのフロア内を被験者 2 名が計 10 分程度の自由な歩行を行った。各地点での推定位置誤差は平均 6.5[m]、最大 18.0[m] であり、誤差の標準偏差は 4.1[m] であった。平均 6.5[m] の推定位置誤差はやや大きいですが、今回対象とする屋内空間や実施条件を考えた場合、十分であると考えている。また、混雑度は文献 [12] の手法を用いて取得し、真値は撮影した動画からおおよその人の密度 [人/m²] を計測した。PMV の推定に使用する混雑密度は、動画から得られた真値を利用した。

5.4 実験結果

5.4.1 空気温度による快適度への影響

本実験で PMV および PPD 推定を実施した際に、これらの快適度への影響しうる項目として、壁際と歩行者周辺での空気温度 t_a [] の異なりが存在した。今回のフィールド実験では、壁際に設置されたセンサからの情報と歩行者周辺の温度情報を、様々な場所において約 3 時間取得し比較したところ、歩行者周辺の温度は、壁際の温度に比べ、平均約 1.5 低下していることを確認した。図 7 は、実験空間において観測された壁際と歩行者周辺の温度のグラフである。

この壁際と移動経路上の温度測定誤差が与える影響に関

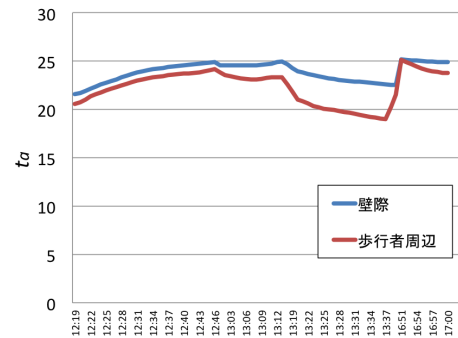


図 7 壁際の温度と歩行者周辺の温度差

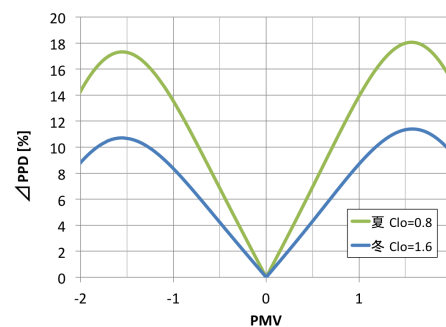


図 8 測定位置の違いによる PPD への影響 ($\Delta T_a = 1.5, T_r = T_a$)

して、図 8 に温度差 1.5 における PPD 値への影響を示す。これによると、他の快適度要因が保持された状態で、1.5 の温度変化が生じた場合、PPD 値は最大 17% の上昇が考えられる。これは、約 6 人に 1 人の割合で不満を感じる人が増加することを表す。以上より本研究では、快適な空間を設計するためには、壁際の温度計だけでは不十分であり、温度測定可能なモバイル測定器を導入し、歩行者周辺の温度を正しく取得することで、より正確に快適な空間を設計できると考えている。

5.4.2 混雑度による快適度への影響

図 9 は予備実験で収集した混雑密度 [人/m²] を横軸とし、縦軸を $t_r - t_a$ の温度差を表したグラフである。混雑の増加に伴い、平均放射温度 t_r が上昇している。これは、人口密度の増加に伴い、人体から発せられる熱が増えるために、 t_r が衣服表面温度 t_{cl} に近づくことにより生じる現象であると考えられる。逆に、ほとんど混雑していない時には t_r は、空気温度 t_a に近い値を示している。これは、人体から発せられる放射熱よりも空気温度に近い周囲の影響を受けやすいためだと考えられる。

実環境では、混雑は特定の時間帯や一時的なものであると考えられ、そのため混雑が判定できない場合は、 $t_r = t_a$ と定義しているが、前述の式 (3) において、 t_a が 10 の時には t_{cl} は約 16 と考えられ、 t_a と t_{cl} の差は大きい。図 4 は、式 (3) から得られる t_a と t_{cl} の関係を表している。このことから、 t_r は t_{cl} と混雑度情報から推定することが望ましい。図 10 では、十分に混雑しているため $t_r = t_{cl}$ と

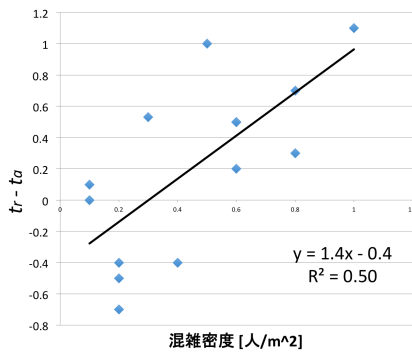


図 9 平均放射温度の気温に対する相対増加量と混雑度の関係

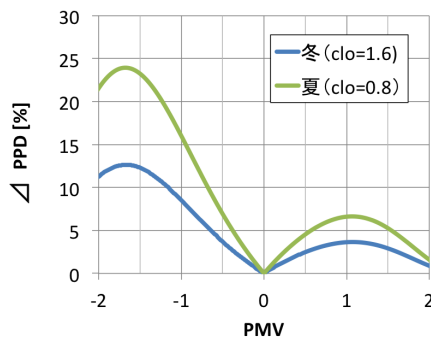


図 10 非混雑時 $T_r = T_a$ と混雑時 $T_r = T_{cl}$ の PPD の差

推定した場合と、 $t_r = t_a$ と仮定した状態での PPD の差を示している。この結果から、PPD は最大で 24%異なる可能性があり、不快に感じる人数が多い時には約 4 人に 1 人の割合の誤差が出ることになる。

以上より、快適な空間を設計するためには、混雑による人口密度を考慮せずに、空気温度からの予測値のみでは不十分であると考えられる。提案システムでは、モバイル端末を用いた混雑推定を行っているが、得られた混雑度情報により、出来る限り正確な平均放射温度を求めることが、より正確な快適な空間設計のためには必要であることがわかる。

6. おわりに

本稿では、スマートフォン内蔵の温度センサ等で得られる、人に近い位置での温度を参加型センシングで集約するとともに、人々の存在による放射熱を人密度から推定し、体感的な快適度を表す PMV 指数に反映する方法を検討した。現在開発しているモバイル型のセンシングシステムのアーキテクチャを述べ、実施設での測定結果に基づき、検討中の PMV 推定手法の妥当性検証を行った。

実験から、気温センサの温度はセンサの位置によって変わり、実験を実施した商業施設ではその差は平均で 1.5 度に及んだ。また PMV 推定に必要な平均放射温度は、混雑度が上昇すると共に上昇する傾向が見られ、人体から発せられる熱気が増えるために t_r が衣服表面温度 t_{cl} に近づい

ていると考えられる。逆にほとんど混雑していない場合には、 t_r は、空気温度 t_a に近い値を示すことがわかった。

参考文献

- [1] 大成建設：T-zone saver, http://www.taisei.co.jp/about_us/release/2010/1275870348591.html (2010).
- [2] 柳井崇, 佐々木真人：中規模本社ビルにおけるタスク・アンビエント空調の実施・検証, 空気調和・衛生工学, Vol. 84, No. 8, pp. 643–650 (2010).
- [3] 古屋誠二郎, 高井啓明：Led 照明を採用したタスク・アンビエント照明によるオフィスの改修事例, 学術講演梗概集, Vol. 2010, pp. 1335–1336 (2010).
- [4] 経済産業省：オフィスビルの節電行動計画フォーマット, <http://www.meti.go.jp/setsuden/20110513taisaku/07.pdf> (2011).
- [5] 丹羽勝巳, 塚見史郎, 小林弘造：タスク・アンビエント空調の実証とシミュレーション, 空気調和・衛生工学, Vol. 84, No. 8, pp. 637–642 (2010).
- [6] 張本和芳, 加藤美好, 齋藤正文, 仁志出博一, 小林信郷, 樋渡潔：天井吹出型パーソナル空調システムの研究：その 4 エネルギー評価, 学術講演梗概集, Vol. 2008, pp. 973–974 (2010).
- [7] 多井慶史：人感センサを用いた照明制御システムの省エネルギー効果の解析, 学術講演梗概集, Vol. 2009, pp. 435–436 (2009).
- [8] Buratti, C., Ricciardi, P. and Vergoni, M.: HVAC systems testing and check: A simplified model to predict thermal comfort conditions in moderate environments, *Applied Energy*, Vol. 104, pp. 117–127 (2013).
- [9] 大阪ガス：プレスリリース, http://www.osakagas.co.jp/company/press/pr_2012/1198411_5712.html (2010).
- [10] International Standard Organization: Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, ISO 7730, Second Edition (1994).
- [11] Weppner, J. and Lukowicz, P.: Collaborative Crowd Density Estimation with Mobile Phones, *Proc. of the 9th ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems* (2011).
- [12] Nishimura, T., Higuchi, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Detecting smoothness of pedestrian flows by participatory sensing with mobile phones, *Proc. of ISWC*, pp. 15–18 (2014).
- [13] 星野元紀, H.B. リジャル：着衣量に関する研究 その 8 渋谷駅八チ公前における熱的快適性と着衣量の実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 475–476 (2014).
- [14] Larose, D. T.: *Discovering Knowledge in Data: An Introduction to Data Mining*, pp. 90–106, Wiley Online Library (2005).
- [15] Arsham Farshad, Jiwei Li, Mahesh K. Marina, Francisco J. Garcia: A Microscopic Look at WiFi Fingerprinting for Indoor Mobile Phone Localization in Diverse Environments, 2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (2013).