

## Real-time indoor environmental control method for improving personal thermal comfort using multimodal biometric information

大阪大学 大学院情報科学研究所  
情報ネットワーク学専攻  
先進ネットワークアーキテクチャ講座 (村田研究室)  
33E23025 原 啓太

## 背景

- 室内環境の質が重要視<sup>[1]</sup>
  - リモートワークやサテライトオフィスの浸透
  - 室内環境は様々な要素で構成され人間に心理的、身体的に影響
    - ▶ 温熱環境、照明、騒音、室内空気質、非光視覚要素など
  - 質が保たれない場合健康に悪影響を及ぼす可能性が指摘<sup>[2]</sup>
- 人間の快・不快の感じ方には個人差が存在
  - 年齢、性別、心理的な状態、そのときの活動など様々な要因が影響
  - 既存の PMVモデル<sup>[3]</sup> には限界が存在<sup>[4]</sup>
    - ▶ 客観的な指標のみでは完全な対応不可
    - ▶ 環境が変化を未考慮
      - ▶ 環境の変化で心理的負荷が増大<sup>[6]</sup>
- 生体情報を用いて心理状態の推定が可能<sup>[5]</sup>
  - 生体情報により個人においてもその状況に応じた推定が可能
- 生体情報に基づく空間への介入で心理状態の改善も報告<sup>[8]</sup>
  - 適した空間への介入により個人の快適性が向上

## 課題と目的

- 課題
  - 心理状態推定のための生体情報はその時々において状況により変化
    - ▶ 平均的なモデルでは対処不可
  - 推定から制御までを同時に評価している研究は少ない
    - ▶ 推定の評価と制御の評価を同時に行う必要
- 目的
  - 室内環境における温熱快適性の向上
    - ▶ 個人の温熱快適性を推定
      - ▶ 個人の特徴を学習をして推定
    - ▶ 快適な空間になるようにアクチュエーターを制御
      - ▶ 快適に活動できる空間になるように空間に介入

ある日計測した生体情報

- EDA : HIGH
- TEMP : LOW



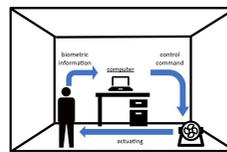
別の日に計測した生体情報

- EDA : LOW
- TEMP : HIGH

同一環境においても変化する生体情報が異なるイメージ

## 提案手法

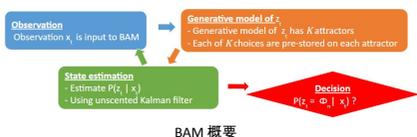
- 温熱快適性向上のためのリアルタイム室内環境制御手法
  - 複数の生体情報を取得し温熱快適性を推定
    - ▶ 特徴量選択
    - ▶ ゆらぎ学習<sup>[11]</sup>による推定
    - ▶ マルチモーダル統合処理
  - アクチュエーターを操作し室内環境を制御
    - ▶ 推定の結果から温熱快適性を判断し空間に介入
  - リアルタイムに繰り返し温熱快適性を向上



手法外観

## 温熱快適性の推定

- ゆらぎ学習にて温熱快適性を推定
  - Bayesian attractor model (BAM) <sup>[13]</sup>を用いた機械学習フレームワーク
    - ▶ 脳の意思決定をモデル化
    - ▶ ノイズを許容しながら推定可能
- 温熱快適性の推定は次の手順にて実行
  - アトラクターの設定
  - 特徴量選択
  - 内部状態の更新
  - マルチモーダル統合処理



BAM 概要

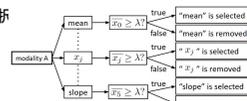
## アトラクターの設定と特徴量選択

- アトラクターの設定
  - 選択肢の個数 n に応じた数だけ安定点 (アトラクター)  $\theta_n$  を設定
  - 今回は快適 / 不快の 2つを設定
- 特徴量選択
  - 個人に合わせてモダリティごとに特徴量を選択
    - ▶ 標準化された特徴量の差を計算
  - 閾値と比較し特徴量を取捨選択
    - ▶ 閾値を超えた特徴量のみ有用として推定に使用

$$x_j = \frac{x_j^{\text{cand}} - \mu}{\sigma}$$

$$\bar{x}_j = \sum_{\{o \in O_{\text{train}}, I(o) = i\}} \frac{x_j}{|\{o \in O_{\text{train}}, I(o) = i\}|} \quad (i = \text{uncomfortable})$$

変数	説明
$x_j$	標準化された特徴量の差
$x_j^{\text{cand}}$	候補となる特徴量の候補
$\mu$	候補となる特徴量の平均
$\sigma$	候補となる特徴量の分散
$\bar{x}_j$	学習データの平均値
$\theta_n$	学習データの平均値
$I(o)$	学習データのラベル
$\lambda$	閾値



特徴量選択の様子

## 内部状態の更新と統合処理

7

### 内部状態の更新

- 入力に対しての意思決定状態  $Z_t$  の事後分布  $P(z_t | x_t)$  をベイズ推定
- どのアトラクターに近いかが確率密度  $P(z_t = \square_j | x_t)$  で出力

### マルチモーダル統合処理

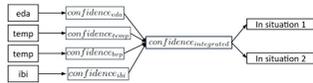
- 複数のモダリティで得た確信度を統合

$$P(z_t = \Phi_i | x)_{\text{integrated}} = \sum_{m \in M} P(z_t = \Phi_i | x)_m$$

変数	説明
$P(z_t = \Phi_i   x)_{\text{integrated}}$	複数のモダリティの確信度を統合した値
$M$	モダリティの集合
$P(z_t = \Phi_i   x)_m$	各モダリティにおける確信度

- 統合した後の確信度を最終的な推定結果とする

- 今回は確信度大きいほうの状態を現在の状態と推定



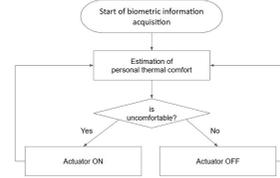
マルチモーダル統合処理

## 室内環境制御

8

### 推定結果を受けアクチュエータを操作

- 推定結果に基づきオンオフを操作
  - 本研究では送風機能を持つサーキュレーターを使用
  - 不快な場合に動作し快適な場合は停止
- リアルタイムに推定と制御を繰り返し実行
  - 1分間の生体情報を利用した推定結果を用い制御
  - 想定しない要因による突発的変動の影響を軽減



制御の流れ

## 評価実験

9

### 提案手法を評価するための実験の検証内容は次の2点

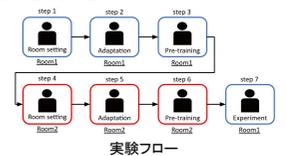
- 温熱快適性の推定を行っているか
  - 快不快の感じ方に対して推定を行っているかを検証
    - 温熱快適性がことなる環境を用意
  - 手法による推定結果と主観での回答を比較
    - 快適かどうかの回答には TCV<sub>[3]</sub> を使用
    - とても不快、不快、やや不快、快適で回答
    - 推定結果と TCV を比較
    - 補助的に TSV の回答も取得
- 不快を取り除く空間への介入ができてるか
  - 介入した時間や介入による主観の変化を調査
- 以上の内容を手法による介入なしの場合と比較
  - アトラクターは介入ありの場合のみを使用し条件を統一
  - 推定結果や主観での回答を比較

## 実験プロトコル

10

### 不快な環境から快適な環境に移動した際に推定し制御

- step1: Room1 の温度設定
- step2: Room1 で環境適応 (10分)
- step3: Room1 で事前学習 (10分)
- step4: Room2 の温度設定
- step5: Room2 で環境適応 (10分)
- step6: Room2 で事前学習 (10分)
- step7: Room2 から Room1 へ移動する制御実験 (10分～)
  - 10分以降快適な状態と推定が継続したら終了
- step7 を制御有 / 無で比較
  - 同じアトラクターを使用し 制御の効果を比較
  - 別日同時刻に実施



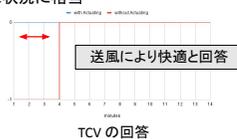
実験フロー

## 実験結果①

11

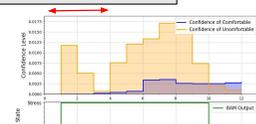
### 開始直後にて非認知の温熱快適性を推定

- 制御なしの場合 4分まで TCV はやや不快
  - この4分までは身体的には不快な状況に相当
- 制御ありの場合は TCV は快適
  - 送風により快適と回答
- 身体的な快適性を適切に把握
  - 認知による誤認を回避
  - 非認知の負荷を軽減

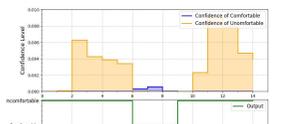


TCV の回答

### 非認知での負荷を検知



制御ありでの推定結果



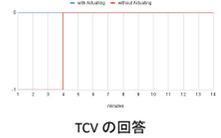
制御なしでの推定結果

## 実験結果②

12

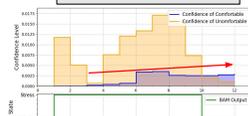
### 不快を取り除く空間への介入ができていないことを確認

- 制御あり
  - 快適の確信度が向上
  - 停止後も不快の確信度が低下
  - 常に快適と回答
- 制御なし
  - 快適の確信度は向上せず
  - 不快の確信度も不安定
  - 開始時はやや不快と回答



TCV の回答

### 快適の確信度が向上



制御ありでの推定結果

### 快適の確信度は向上せず



制御なしでの推定結果

## 議論：特徴量選択の妥当性

13

- 特徴量選択手法の拡張の必要性が考えられる
  - 今回は制御ありと制御なしで場合と同等のアトラクターを使用
  - 同一人物の同プロトコルにおいても選択される特徴量が異なる
    - 様々な要因が影響している可能性
    - 心理状態、睡眠時間、食事、行動
- 個人の状態に合わせた特徴量選択が求められる

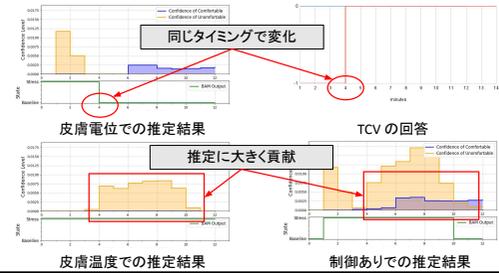
今回使用した特徴量						制御なしでの直前で学習した場合の特徴量							
	mean	std	min	max	range	slope		mean	std	min	max	range	slope
phasicEDA		✓					phasicEDA						
tonicEDA	✓						tonicEDA						✓
temp	✓		✓	✓		✓	temp	✓		✓	✓		
bvp							bvp	✓		✓	✓		
ibi		✓			✓	✓	ibi		✓		✓		✓

異なる特徴量が選択

## 議論：生体情報ごとの重要度

14

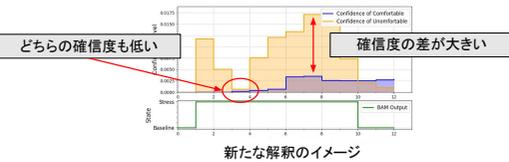
- 生体情報ごとに推定への貢献度に差が存在
  - 皮膚電位は TCV を良く反映し、皮膚温度は推定に大きく貢献
- 重みの導入により温熱快適性に対し最適化の可能性
  - 推定したい内容に合わせた重みにより精度向上の可能性



## 議論：確信度の解釈

15

- 推定結果の決定には検討の余地が存在
  - 両確信度が低い状態の解釈
    - 現在は高いほうの確信度を採用
    - どちらの状態でもないという解釈も可能
      - 現状の動作の継続や、初期状態へ戻すなどの制御も検討
      - 閾値は慎重に設計が必要
    - 確信度の差に注目することも可能
  - 用いるアクチュエーターや状況に応じ仮説を立て検証が必要



## まとめ

16

- リアルタイム室内環境制御手法を提案
  - 生体情報を用いて温熱快適性を推定
    - 複数の生体情報から個人に合わせ特徴量を選択
  - 推定と制御を繰り返し実行
- 評価実験を行うことにより手法の有用性を確認
  - 開始直後に非認知の温熱快適性を推定
  - 不快さを取り除く空間への介入ができていることを確認
- より適した手法のための考察を提示
  - 複数回の事前学習の検討
  - 有用と考えられる生体情報への重みの検討
  - 現在と異なる確信度に対する解釈方法の検討

## 参考文献 ①

17

- [1] C. Wang, F. Zhang, J. Wang, J. K. Doyle, P. A. Hancock, C. M. Mak, and S. Liu, "How indoor environmental quality affects occupants' cognitive functions: A systematic review," *Building and Environment*, vol. 193, p. 107647, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03601323211000597>
- [2] Y. Al-horr, M. Anif, M. Katsygiotou, A. Mazroei, A. Kaushik, and E. Elsarraj, "Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 5, no. 1, pp. 1–11, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221260916300140>
- [3] ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, International Organization for Standardization Std., 2005, ISO 7730:2005(E). [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/39155.html>
- [4] Z. Wang, H. Zhang, Y. He, M. Luo, Z. Li, T. Hong, and B. Lin, "Revisiting individual and group differences in thermal comfort based on ashrac database," *Energy and Buildings*, vol. 219, p. 110017, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877819334589>
- [5] P. Schmidt, A. Reiss, R. Duerichen, C. Marberger, and K. Van Laerhoven, "Introducing WESAD, a multimodal dataset for wearable stress and affect detection," in *Proceedings of ACM international conference on multimodal interaction*, Oct. 2018, pp. 400–408.
- [6] P. A. Bell and D. P. Doyle, "Effects of heat and noise on helping behavior," *Psychological Reports*, vol. 53, no. 3, pp. 955–959, 1983. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2466/pr0.1983.53.3.955>
- [7] F. S. Ansari, R. Hod, N. Ahmad, M. Baharom, and M. H. Ja'afar, "Assessment of indoor thermal comfort temperature and related behavioural adaptations: a systematic 32 review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 29, pp. 73 137–73 149, 2023.
- [8] W. Li, J. Zhang, and T. Zhao, "Indoor thermal environment optimal control for thermal comfort and energy saving based on online monitoring of thermal sensation," *Energy and Buildings*, vol. 197, pp. 57–67, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877818337101>

## 参考文献 ②

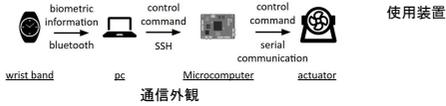
18

- [9] R. American Society of Heating and A. conditioning Engineering, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ANSI/ASHRAE Standard 55-2017, Atlanta, GA, USA: ASHRAE, 2017.
- [10] H. Mao, S. Tsuchida, Y. Suzuki, R. Kanada, T. Hori, T. Tenada, and M. Tsukamoto, "Subjective and objective thermal comfort estimation using wearable sensors and environmental sensors," *Journal of Information Processing*, vol. 31, pp. 308–320, 2023.
- [11] M. Murata and K. Leibnitz, *Fluctuation-Induced Network Control and Learning: Applying the Yuragi Principle of Brain and Biological Systems*. Springer, 2021.
- [12] R. Yoshida, "Stress detection from biological information by Yuragi learning and multimodal integration," Master's thesis, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Feb. 2023.
- [13] S. Bitzer, J. Bruineberg, and S. J. Kiebel, "A Bayesian attractor model for perceptual decision making," *PLoS Computational Biology*, vol. 11, no. 8, p. e100442, 2015. [14] K. Hara, R. Yoshida, D. Kominami, Y. Ohtsuka, M. Kaihatsu, and M. Murata, "Indoor environment control method for improving well-being using human thermal stress estimated by yuragi learning," in *2024 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2024, pp. 1–6. [15] A. Greco, G. Valenza, A. Lanata, E. P. Scilingo, and L. Chi, "cvx2d: A convex optimization approach to electrodermal activity processing," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 63, no. 4, pp. 797–804, 2016.

## 付録：使用デバイスと実装方法

19

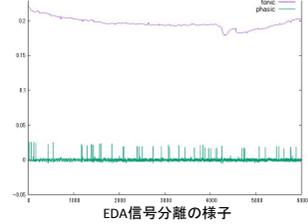
- リストバンド型デバイスで生体情報を取得
  - 4種の生体情報をリアルタイムに取得
    - 電気皮膚反応 (EDA), 皮膚温度 (TEMP), 血液量パルス (BVP), 心拍間隔 (IBI)
  - EDAを2種類に分離し計6種を推定に使用
    - 低周波成分 (phasicEDA) と高周波成分 (tonicEDA) に分離
- ノート型計算機にて推定
  - 推定結果をサーキュレーターに送信
- サーキュレーターにて送風を実行
  - 不快な状態であれば送風



## 付録：EDA の分離の様子

20

- 受信した EDA 信号を周波数で分離
  - phasicEDA : 高周波成分
    - 刺激や不快感に対する即時の反応を反映
  - tonicEDA : 低周波成分
    - リラックス状態や持続的な不快感を反映

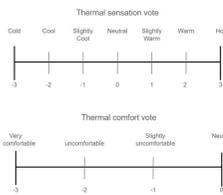


## 付録：主観の回収

21

- step 7の実験中被験者は1分ごとに回答

time	Sensation	Comfort
1 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
2 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
3 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
4 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
5 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
6 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
7 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
8 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
9 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
10 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
11 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
12 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
13 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
14 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
15 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
16 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
17 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
18 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
19 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3
20 min	-3 -2 -1 0 1 2 3	0 -1 -2 -3



アンケート用紙