

特別研究報告

題目

ゆらぎ学習を用いた室内快適性向上のための
マルチアクチュエータ制御手法の考案と実装

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

東田 昂大

2024年2月7日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

内容梗概

人は多くの時間を室内で過ごしており、先進国ではその時間は9割以上になるとも言われている。そのため室内環境の快適性を向上させることは、その室内で過ごす人々のウェルビーイングや発揮するパフォーマンスの向上につながると考えられる。室内環境の快適性は温熱、音、光、空気質の4つが大きく影響すると言われている。しかし、快適性を考慮して室内環境を設計する際の温熱、音、光、空気質を決定する要因は非常に多岐にわたり、それらは相互に複雑に関係して総合的な快適性に影響を及ぼす。既存研究においては、室内環境の快適性を分析するアプローチとして、温熱快適性、音響快適性、視覚快適性などの環境快適性に着目したものが見られるものの、そのほとんどはあらかじめ設定された環境の組み合わせにおいて人の感じる快適度合いの相関を分析したものに留まっている。そのため、快適性の予測や向上を目的とし、複合的に室内環境を制御する方法を確立することは重要な課題である。

本報告では、複数の環境快適性に着目し、マルチアクチュエータを用いて室内環境を制御する手法を提案および実装する。人が快適に感じているかどうかの状態推定には、実時間で受け取る皮膚電気活動、容積脈波、皮膚温度を入力として、ゆらぎ学習を利用することによって行う。また、複数のアクチュエータを用いることによって快適性の高い室内環境を実現するために、提案手法では、室内で過ごす人からのフィードバックを実時間で受け取り、快適と感じる室内環境に近づける。フィードバックは、人の感じる現時点での室内環境への評価が必要となるため、システムへこの評価値を直接入力することによって実現する。快適であるというフィードバックを受け取ったときは、現在のマルチアクチュエータ制御を継続する。また、快適ではないというフィードバックを受け取ったときは、実行すべきマルチアクチュエータ制御を変更することによって、快適な室内環境を実現する。

提案したマルチアクチュエータ制御手法を実現するために、マルチアクチュエータ制御手法を実装したシステムを作成した。そして、システムの動作検証において、このシステムがゆらぎ学習によって推定した状態とフィードバックによって、アトラクターに対応させたマルチアクチュエータ制御を変更することを示すとともに、正しく動作することを確認した。

主な用語

ウェルビーイング, リアルタイムセンシング, マルチモーダル統合処理, ベイジアンアトラクターモデル, ゆらぎ学習, マルチアクチュエータ制御, 生体情報

目次

1	はじめに	6
2	関連研究	8
2.1	ゆらぎ学習	8
2.2	ゆらぎ学習を利用したストレス状態の推定	9
2.3	室内の温熱快適性を向上するためのアクチュエータ制御	10
3	マルチアクチュエータ制御による室内快適性の向上	11
3.1	概要	11
3.2	ゆらぎ学習による人の快適度の推定	11
3.3	フィードバックの取得	12
3.4	マルチアクチュエータ制御	12
4	実装	14
4.1	ゆらぎ学習による人の快適度の推定	14
4.2	フィードバックの取得	15
4.3	マルチアクチュエータの制御	15
4.4	フィードバック機能の検証	16
4.5	実験	21
5	おわりに	26
	謝辞	27
	参考文献	28

図目次

1	使用するダイキン製のアシストサーキュレータ	16
2	使用するスピーカー	17
3	実装するシステム	17
4	快適時のマルチアクチュエータ制御の推移	19
5	不快時のマルチアクチュエータ制御の推移	20
6	取得した生体情報	22
7	ゆらぎ学習の推定結果	24
8	動作検証を行っている間のマルチアクチュエータ制御の変化	25

表 目 次

1	マルチアクチュエータ制御の変更方針	15
2	マルチアクチュエータ制御の種類	16
3	実験における快適時のマルチアクチュエータ制御の変更	18
4	実験における快適時のマルチアクチュエータ制御の変更	18
5	フィードバックを入力したタイミング	21
6	生体情報を取得する部屋の環境	21
7	生体情報を取得している間の室温変化	21
8	生体情報を取得している間の湿度変化	23
9	選択された特徴量	23
10	動作検証を行っている間の室温変化	24
11	動作検証を行っている間の湿度変化	24

1 はじめに

人は生活におけるほとんどの時間を建物の中で過ごしており、先進国ではその時間は9割以上にもなると言われている。そのため室内環境は、そこで過ごす人の健康やウェルビーイング、人が行うタスクのパフォーマンスの促進にとって非常に重要なものである [1]。文献 [2] では、室内環境の質は、温熱的快適性、視覚的快適性、音響的快適性、呼吸器系的快適性という4つの側面に大別され、評価されていると述べられている。

温熱的快適性は、熱環境に対する満足感を表す心の状態とされており、ISO7730 [3] などの規格が知られている。様々な快適性の中でも温熱的快適性は、視覚的快適性、音響的快適性、呼吸器系的快適性よりも重要視されている。温度、湿度、放射、気流、代謝量、着衣量などが温熱快適性の要因となっており、平均予想温冷感申告 (Predictive Mean Vote; PMV) と呼ばれる指標が、ISO7730 では定義されている。視覚的快適性は視覚環境に対する満足感を表す心の状態であり [4]、人が従事している活動や作業にとって、過剰でない十分な量の光を与えることに焦点が当てられる。視覚的快適性の要因としては、輝度に加えて、明るさの均一さ、色あい、明るさの変化などがある。音響的快適性は、人を騒音から保護し、建物が設計された目的に適した音響環境を提供する能力とされている [5]。音響快適性は、その中で過ごす人のウェルビーイングを確保し、作業パフォーマンスを向上させるために不可欠な要素であると述べられている。音響快適性の要因は、音の大きさ、周波数、音色などである。呼吸器的快適性は、室内空気環境品質 (IAQ; Indoor Air Quality) と密接に関連していると述べられており、文献 [6] によると汚染物質の量、建物内の換気率、汚染物質が空間内に閉じ込められている時間などの3つの要因に左右されると述べられている。室内空気環境品質はそのモニタリングや制御の研究が中心的であり、快適性との関係性を定量的に評価した文献は少ない。

温熱・音響・視覚といった室内環境と快適性に関する調査において、環境を設定するパラメータには多くの種類が存在し、さらにそれらは相互に複雑に関係して快適性に影響を及ぼすことが示されている。しかしながらこれらは相関性の分析に留まっており、文献 [2] では、人間の快適性を推定するためのアプローチとして、複数の環境快適性に着目したものが少ないことを指摘している。さらに、相関性の分析を行っている既存研究の多くが、人が不快に感じる領域に関する評価となっている。温熱環境・音響環境・視覚環境を複数組み合わせたマルチモーダルな環境制御において、人の感じる快適性を推定しつつ、環境要因の組み合わせによって、総合的な快適性の向上を行う方法の確立は未解決の課題である。また、快適性について、個人差が含まれる点にも考慮すべきであり、例えば文献 [7] では、建築環境の設計や運用における温熱快適性の個人差を慎重に考慮する必要があること、文献 [8] では、温熱快適性、音響快適性、それらを合わせた総合快適性に身体差、性差があることが示

唆されている。

前述の通り、温熱・音響・視覚といった屋内の快適性に影響を与える要因は相互に影響を及ぼす。しかしながら、温熱・音響・視覚など複数の環境快適性に着目して、室内の快適性を推定、向上するアプローチは少ない。また、複数の環境快適性は相互に影響しあうが、現段階では、相関関係に注目した分析に留まった研究が多く、実際に快適性を推定し、向上させる方法が重要である。

本報告では、室内で過ごす人の快適度を推定し、マルチアクチュエータを用いて室内環境を制御する手法の提案と実装を行う。この手法では、人が快適に感じているのかどうかを把握できることを前提としており、室内環境の快適性を推定する方法については、先行研究である [9] の手法を用いる。文献 [9] の手法では、個人の状態推定に、E4 リストバンドを使用することで人の生体情報を取得して、ゆらぎ学習とマルチモーダル処理を利用することによって、状態を推定している。ゆらぎ学習のアトラクターには室内環境を快適にするために必要なマルチアクチュエータ制御を紐づけている。それによって、現在よりも室内環境の快適性を向上させることを目指す。さらに、個人にとっての快適性が高まるような室内環境を実現するために、室内で過ごす人からのフィードバックを受け取って利用する。フィードバックによって、個々のアクチュエータの制御方針の組み合わせ方を変更し、人がより快適に感じるようなマルチアクチュエータ制御を行うことによって室内環境を実現する。

2 関連研究

2.1 ゆらぎ学習

ゆらぎ学習とは、計算機がベイジアンアトラクターモデル (Bayesian Attractor Model; BAM [10]) に基づいて認識と意思決定を行う手法である。文献 [10] では、人の脳が行う意思決定プロセスをベイズ推論としてモデル化する確率的枠組みとしてベイジアンアトラクターモデルを提案している。ここでの意思決定とは、観測された情報に基づいて複数の選択肢の中から1つを選択するというものである。脳における意思決定プロセスをモデル化するために、意思決定を表す変数 (意思決定変数) が定義されている。この変数は複数のアトラクターを持つダイナミクスに従うものとモデル化されており、前述の各選択肢がアトラクターと対応付けられている。ベイジアンアトラクターモデルでは外部から観測した情報を入力とし、ベイズ推定を利用することで意思決定変数を更新する。観測対象があらかじめ設定された選択肢のうちどの選択肢に当てはまるかを、意思決定変数がどのアトラクターに近いかを表す確信度と呼ばれる指標を用いて決定する。

ベイジアンアトラクターモデルの数理的な説明を以降に述べる。ベイジアンアトラクターモデルでは、入力 x_t を受け取ると、ベイズ推定を用いて意思決定状態 z_t の事後確率分布 $P(z_t|x_t)$ を計算する。事後確率分布 $P(z_t|x_t)$ は脳の意思決定の曖昧さや不確実性を反映している。このベイズ推定では、以下の生成モデルが仮定されている。

$$z_t - z_{t-\Delta t} = \Delta t f(z_{t-\Delta t}) + \sqrt{\Delta t} W_t \quad (1)$$

$$x_t = M\sigma(z_t) + V_t \quad (2)$$

ここでは、 $f(z)$ はホップフィールドダイナミクスを表す。これは、 N 個のアトラクターを持ち、 $\Phi = \{\phi_1, \dots, \phi_N\}$ で表される。 N は前述した選択肢の個数である。 W_t と V_t はガウス分布に従う変数項であり、 $W_t \sim \mathcal{N}(0, \frac{q^2}{\Delta t} I)$ 、 $V_t \sim \mathcal{N}(0, r^2 I)$ である。 I は単位行列である。また、 q はダイナミクスの不確実さ、 r は観測の不確実さを表している。 $M = [\mu_1, \dots, \mu_N]$ は設定された選択肢に対応する観測値の行列である。 σ は多次元シグモイド関数である。

z_t の事後確率分布 $P(z_t|x_t)$ を計算する際には、生成モデルの非線形性を考慮し、Unscented Kalman Filter (UKF) を用いる。 i 番目の選択肢に対する確信度は事後確率密度 $P(z_t = \phi_i|x_t)$ と定義され、脳の内部状態がどの程度アトラクターに近いかを表現した値である。意思決定はこの確信度を用いて行われる。

2.2 ゆらぎ学習を利用したストレス状態の推定

文献 [9] では、ゆらぎ学習を用いて、複数の生体情報をもとにリアルタイムにストレスを推定する手法が提案されている。これは、文献 [11] で提案された手法を実装したものである。このストレス推定手法では、まず、観測された複数の生体情報から個々に特徴量を取り出す。この特徴量をそれぞれ対応するゆらぎ学習への入力とする。 i 番目の生体情報を用いた意思決定変数を $z_t^{(i)}$ 、入力特徴量を $x_t^{(i)}$ とするとき、ゆらぎ学習の出力は $F_i = P(z_t^{(i)} = \Phi | x_t^{(i)})$ と定義されている。そして、各生体情報に対応するゆらぎ学習から出力された F_i をマルチモデル統合することによって、最終的な推定結果を決定する。

次に、この手法の事前学習について説明する。まず、一定時間 T^{train} 生体情報を収集する。この時間中、ストレス状態、非ストレス状態のいずれであるのかの回答を収集し、ラベルとして用いる。以降では、 T^{train} の間に収集した生体情報につけられたラベルは、ストレス状態、非ストレス状態両方を含むものとする。取得した全ての生体情報から、全特徴量を取り出し、これらを候補特徴量とする。この中から推定に用いる特徴量を決定するために、まずは以下の式によって、非ストレス時の特徴量を用いた正規化を行う。時刻 t でのラベルは $L(t)$ で表し、ストレス時に 1、非ストレス時に 0 とする。

$$\tilde{x}_{t,j} = \frac{x_{t,j} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (3)$$

$x_{t,j}$ は時刻 t で得た j 番目の候補特徴量である。また、 μ_j と σ_j はそれぞれ非ストレス状態での j 番目の候補特徴量の平均と標準偏差を表す。

次に、ストレス状態における $\tilde{x}_{t,j}$ の平均を以下の式によって算出する。

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{t=1}^{T^{train}} L(t) \tilde{x}_{t,j}}{\sum_{t=1}^{T^{train}} L(t)} \quad (4)$$

最後に、 \bar{x}_j が事前に設定した閾値を超えているかどうかを調べて、閾値を超えていたら j 番目の特徴量を選択する。閾値を超えていない場合、 j 番目の特徴量はストレス推定には使用されない。また、生体情報 i に由来するすべての特徴量が閾値を超えていない場合、その生体情報はストレス推定に使用されない。

次に、ストレス推定方法について述べる。それぞれの生体情報に対してゆらぎ学習によってストレス推定を行うために、まず、その生体情報から利用する特徴量を抽出する。式 (3) によって正規化された特徴量を算出し、ゆらぎ学習に入力することによって意思決定状態を更新して、確信度 $P(z_t^{(i)} = \Phi | x_t^{(i)})$ を求める。これにより、それぞれの生体情報をもとにしたストレス推定の結果（ストレス状態、非ストレス状態であるというそれぞれの確信度）が得られる。

次に、マルチモーダル統合を行う。まず、それぞれの生体情報をもとに得られた確信度が、あらかじめ定めた閾値より低ければ、その確信度は除外される。残った全ての確信度を以下の式によって統合する。

$$F = \sum_{i \in \mathcal{M}} \frac{\omega_i F_i}{\sum_{i \in \mathcal{M}} \omega_i |F_i|} \quad (5)$$

\mathcal{M} は除外されなかったモダリティの集合、 ω_i は i 番目のモダリティの重みであり、事前に求めておく。

文献 [11] では、複数の生体情報を用いたストレス状態推定手法を、31 名の被験者に対して実験を行ったデータを用いて検証しており、単一の生体情報を利用する場合よりも高い精度でストレス状態を推定できることが示されている。

2.3 室内の温熱快適性を向上するためのアクチュエータ制御

文献 [9] では、文献 [11] で提案されていた手法を利用して、温熱ストレスの推定を行い、その結果を用いてアクチュエータの制御を行っている。アクチュエータとしてサーキュレータを使用しており、送風制御を行っている。Empatica 社製の E4 リストバンドを装着して、皮膚電気活動 (EDA)、容積脈波 (BVP)、心拍間隔 (IBI)、皮膚温度 (TMP) を取得し、これらの生体情報を入力として、文献 [11] の手法によってストレス状態を推定している。

文献 [9] で行われた実験では、まず、PMV に基づいて快適な部屋と不快な部屋を準備する。被験者はそれぞれの部屋で 10 分の待機時間の後、10 分間事前学習用の生体情報を取得する。その後被験者は、不快な部屋に入り、ストレス状態の推定が行われる。生体情報は機器の動作周期に応じて取得されるが、ゆらぎ学習による推定は 1 秒ごとに行われる。この推定周期は生体情報の取得周期よりも十分長い時間に設定されている。また、ストレス推定の結果を用いたアクチュエータの制御周期は 10 秒に設定されている。10 秒間ごとにストレス状態と推定された回数をカウントし、ストレス状態と推定された回数が多い場合はサーキュレータによる送風が行われ、ストレス状態と推定された回数が少なければサーキュレータによる送風を停止するという制御が行われている。制御実験の結果、実装したシステムによって、観測した生体情報を入力とすることでのストレス状態の推定とアクチュエータによるリアルタイムな制御が実現可能であることが示されている。

3 マルチアクチュエータ制御による室内快適性の向上

3.1 概要

室内環境の快適性の感じ方には個人差があり、さらに同じ人においても状況によって違いが現れる。そのため、快適な室内環境を実現するために作動させるべきアクチュエータは対象とする人、状況に応じて決める必要がある。そこで本報告では、個人差や個人のおかれた状況に応じて適切なマルチアクチュエータ制御を行う手法を提案する。基本的な方法は、我々の先行研究である文献 [9] で提案した手法を用いる。室内で過ごす人が室内環境に対して快適あるいは不快のどちらを感じているのかを、ゆらぎ学習を用いて推定する。不快に感じているのであれば、室内が快適な環境となるようにアクチュエータを動作させる。ここで、前述の理由により、このときのアクチュエータの動作が室内で過ごす人にとって快適性を向上するのかどうかを事前に把握することは困難である。そこで、人から現在快適であるのか不快であるのかというフィードバックを受け取り、アクチュエータ制御方法に反映させる方式を提案する。提案手法は主に以下の3点で構成する。

- ゆらぎ学習による人の快適度の推定
- フィードバックの取得
- マルチアクチュエータ制御

それぞれの詳細について、以降に述べる。

3.2 ゆらぎ学習による人の快適度の推定

ゆらぎ学習を用いて、人が快適に感じているのか、不快に感じているのかを推定するためには、その人が快適な環境下で測定された際の生体情報と、不快な環境下で測定された際の生体情報を用いた事前学習が必要となる。事前学習では、得られた生体情報から状態推定に必要な特徴量を選択し、それぞれをゆらぎ学習のアトラクターに記憶する。アトラクターへの記憶後の推定フェーズでは、実際に人から測定した生体情報をゆらぎ学習の入力に与えることで、その人が快適と感じている状態であるのか、不快と感じている状態であるのかという推定結果が得られる。ここで、各アトラクターごとにどのアクチュエータをどのように制御するのかを事前に紐付けておく。紐付ける制御は、一般的に室内環境を向上させるものを事前に設定しておくが、この設定が誤っている可能性があり、次節のフィードバックにより、紐付け方の変更を行う。

3.3 フィードバックの取得

アトラクターに紐付けられたアクチュエータ制御は、個人差、個人のおかれた状況によっては、室内で過ごす人が必ずしも快適と感じない可能性がある。そこで、室内で過ごす人から快適/不快という現在の状態を表すフィードバックを受け取ることによって、現在行っているマルチアクチュエータ制御が快適性を向上するものであるのかどうかを判定する。

フィードバックは以下のように利用する。まず、快適であるというフィードバックを受け取った場合については、現在のアクチュエータの動作について不満が無いあるいは満足していると判断する。そのため、現在アトラクターに紐付けられているアクチュエータの制御方法の変更は行わない。一方で、不快であるというフィードバックを人から受け取ると、現在のアクチュエータの動作について不満があると判断する。このときは、どのアクチュエータをどのように制御することが、その人にとって室内快適性を向上させるのかを探索する。本報告では、フィードバック機構の追加とその動作検証を行うが、この探索方法については今後の検討課題と考えている。本報告では、各アクチュエータに複数の動作モードがあるとき、アクチュエータと動作モードの全組み合わせを順に変更していく方法を採用した。探索の順序は、室内環境に関する事前情報から、改善に効果があると考えられるアクチュエータを先に決定し、その動作モードを順に変更していく。ある時点で、快適であるとフィードバックが与えられたときに、そのとき動作しているアクチュエータおよびその動作モードをアトラクターに紐付ける。このように、アトラクターに紐付けるアクチュエータ動作を変更する制御によって、個人に応じた快適な室内環境を実現する。

3.4 マルチアクチュエータ制御

室内環境に影響を与える要因は1章で述べたように、温熱、音、光、空気質が大きく影響する。室内環境の総合的な快適性を向上させるためには、これらの環境要因に作用するためのアクチュエータが必要となる。近年は様々な環境要因と室内環境の快適性との相関関係を調べる研究が多くなされており、温熱環境・音響環境と人間の快適さとの相関関係は文献 [12]、温熱環境・視覚環境・音響環境と人間の快適さとの相関関係は文献 [13] で報告されている。しかし、多くの研究では人がどのようなときに不快を感じるかという点に着目しており、複数の環境快適性に着目して室内環境の快適性を向上させる観点の研究はほとんどみられない。単に、温熱、音、光、空気質それぞれの快適性が高いと思われる環境の組み合わせを提供するのではなく、個人にとって最も快適と感じる環境を提供すべきであり、個人にとって快適な室内環境をどのように実現するのかということ自体が解決すべき課題である。本報告では複数のアクチュエータを組み合わせることで、室内環境の快適性を向上させ

る。そのために、前節で述べたフィードバックを利用したマルチアクチュエータ制御手法を提案する。

アクチュエータにはさまざまな動作モードがある。単にオン/オフのみを選択できるものもあれば、モーターなどの駆動部の動作強度を何段階かから選ぶことのできるもの、室内を特定の状態に近づけるエアコンのようなものもある。アクチュエータの数が増えるほどに、動作モードの組み合わせ方は爆発的に増加する。そのため、その中から個人にとって最も快適であるものを探索することは非常に困難である。本報告では、人から受け取るフィードバックを元に探索を行うため、一度不快であるというフィードバックを受け取った際にはアクチュエータの動作モードが変更され、それによって室内環境が変化し、その後快適であるというフィードバックが得られないのであればさらに動作モードが変更されることとなる。このような手順で全ての動作モードの組み合わせを探索すると、快適な組み合わせが見つかるまでに長い時間を要してしまう可能性がある。そこで本報告では、探索の順序を、最も快適性の向上に寄与すると考えられるアクチュエータから順に行うこととする。また、人の状態や人のおかれている状況に対して、そのときのアトラクターとアクチュエータの動作の適切な紐付けが一度行われていれば、個人にとって快適な室内環境を提供するアクチュエータの動作をすぐに決定することが可能である。

4 実装

この章では、提案したマルチアクチュエータ制御手法の実装内容について述べる。

4.1 ゆらぎ学習による人の快適度の推定

本報告では、人の快適度の推定は文献 [9] の手法と同様の手順で行う。文献 [9] では温熱的ストレスの推定にゆらぎ学習を用いている。我々の対象は快適性であるが、文献 [9] におけるストレス状態を本報告での「不快」状態、非ストレス状態を本報告での「快適」状態に対応付けて推定を行う。

生体情報の計測には、Empatica 社製の E4 リストバンドを用いる。この機器を装着した人から得た生体情報をゆらぎ学習に用いることで、室内環境に対する快/不快を推定する。なお、E4 リストバンドから計測された生体情報は一度 Windows 上で動作する E4 ストリーミングサーバー上に送信される。ゆらぎ学習を行うプログラムは、このサーバープログラムの API を利用することで、生体情報を受け取る。

4.1.1 アトラクターの事前学習

事前に快適な部屋と不快な部屋を用意して、それぞれの部屋における生体情報を測定する。生体情報は E4 リストバンドを装着することによって測定し、皮膚電気活動 (EDA)、容積脈波 (BVP)、皮膚温度 (TEMP) の計測を行う。そして、測定した各環境下における生体情報の選択された特徴量を文献 [11] の手法のように、ゆらぎ学習のアトラクターにそれぞれ記憶させる。

4.1.2 快適度の推定

本報告では、ゆらぎ学習を利用することで、室内で過ごす人が快適と感じている状態であるのか、不快と感じている状態であるのかを推定する。この推定に生体情報を用いる。生体情報として E4 リストバンドにより、皮膚電気活動 (EDA)、容積脈波 (BVP)、皮膚温度 (TEMP) の計測を行う。これらの計測された生体情報は、文献 [9] の手法と同様にゆらぎ学習の入力に用いられ、個人が現在の室内環境に対して快適に感じている状態であるのか、不快に感じている状態であるのかを表す確信度として出力される。この確信度が高い方の状態を推定結果とする。

4.2 フィードバックの取得

フィードバックの取得方法は口頭での回答や、入力デバイスを用いる方法など様々なものが考えられるが、本報告では実装したシステムとの結合テストの容易さから、キーボードへの入力を採用した。室内環境が快適であると感じたとき、不快であると感じたとき、それぞれキーボードの‘p’と‘q’を押下することによってフィードバックを受け付ける。4.3節、4.5節にて述べるが、本実装では、サーキュレーターとスピーカーをアクチュエータとして用いた。マルチアクチュエータ制御として、これらの機器を対象に送風制御と音響制御を行う。ゆらぎ学習での事前学習用の生体情報を取得するために、温熱環境が異なる部屋を2つ用意する。本報告では温熱環境の異なる、快適な部屋と不快な部屋を準備するため、ゆらぎ学習による推定結果が快適であるときは、人は温熱環境に対しては不快を感じていないと想定し、人から不快であるというフィードバックが届くと、音響制御を先に変更する。一方で、ゆらぎ学習による推定結果が不快であるときは、人は温熱環境に対して不快を感じていると想定し、人から不快であるというフィードバックが届くと、送風制御を先に変更する。以上より、マルチアクチュエータ制御の探索順序は表1の通りである。

表 1: マルチアクチュエータ制御の変更方針

推定結果	初めに変更する制御	2番目に変更する制御
快適	音響制御	送風制御
不快	送風制御	音響制御

4.3 マルチアクチュエータの制御

室内環境を制御することのできるアクチュエータとして、本報告では、先行研究である [9] で用いているサーキュレーターに加えて、音響的快適性を制御することの可能なスピーカーを採用した。一定周期ごとにゆらぎ学習の推定結果、フィードバックの結果に応じてアクチュエータを制御する。サーキュレータの制御については送風するかしないかのオンオフ制御を行う。また、スピーカーについても音を鳴らすか鳴らさないかのオンオフ制御を行う。各アクチュエータの動作モードの組み合わせは表2に示す4種類となる。

4.3.1 サーキュレーターによる送風制御

実装においては、図1に示すダイキン製のアシストサーキュレーターを使用する。アシストサーキュレーターを計算機から制御するために、アシストサーキュレーター本体の改造を行って

表 2: マルチアクチュエータ制御の種類

制御名	送風制御	音響制御
制御 1	あり	あり
制御 2	あり	なし
制御 3	なし	なし
制御 4	なし	あり

おり、シリアル通信によって、計算機上のプログラムから風量や風向を制御することが可能となっている。



図 1: 使用するダイキン製のアシストサーキュレータ

4.3.2 スピーカーによる音響制御

本報告では、ノートパソコンのイヤホンジャックに接続された、図 2 に示すスピーカーを使用する。スピーカーからはノートパソコン上で再生する自然音を出力する。音源には著作権フリーの自然音 [14] を使用する。音響のオンオフ制御は、Linux OS での `amixer` コマンドを使用することで実現した。

4.4 フィードバック機能の検証

まず、実装したシステムのフィードバック機能の検証を行う。フィードバック機能は、キーボードからのフィードバックが送信されると、マルチアクチュエータ制御の変更が行われ



図 2: 使用するスピーカー

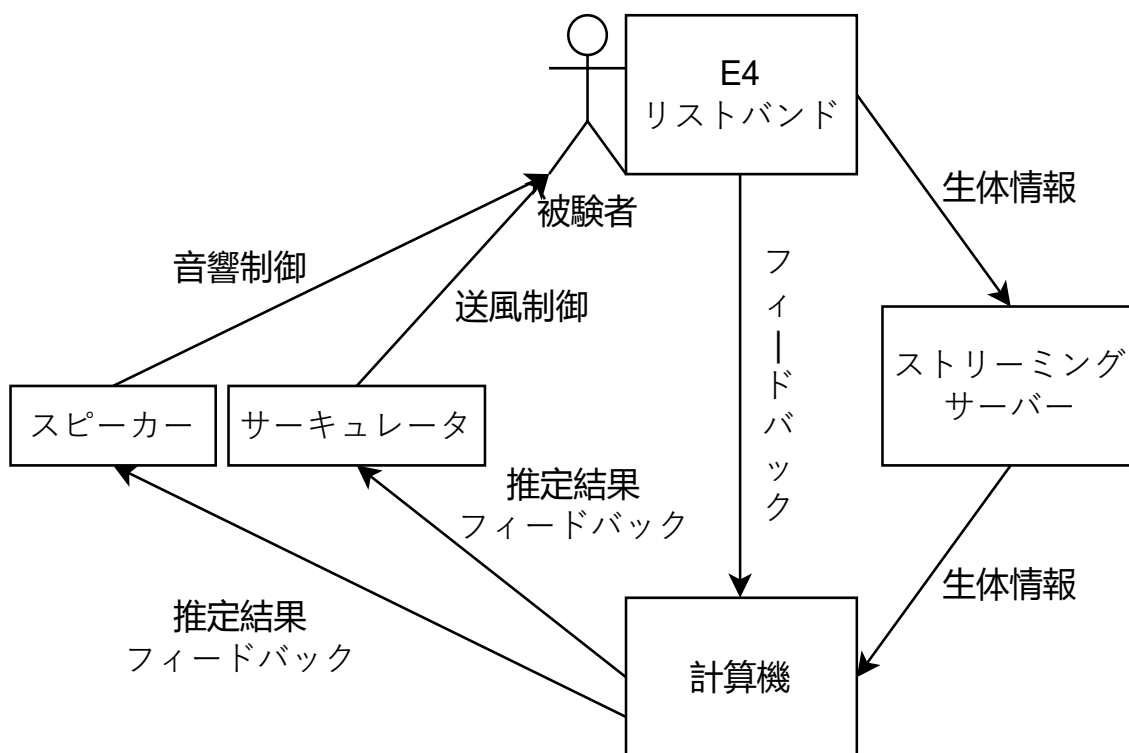


図 3: 実装するシステム

る。そこで、フィードバックを受け取ることによって、マルチアクチュエータ制御とアトラクターの対応が、設計時に想定した通りに変更されることを確認する。

フィードバック機能の検証は、4.2節の方針に基づいてフィードバックによってアトラクターに対応させたマルチアクチュエータ制御を変更することを示す。この方針に基づいて、最初に快適のアトラクターに対応させたマルチアクチュエータ制御に応じて、制御を変更する順番は表3のように設定した。なお、3回変更したものの、もう一度不快のフィードバックが入力された場合、最初のマルチアクチュエータ制御に戻る。

フィードバックの動作検証では、推定結果を快または不快として固定して行った。図4から図5は最初に対応させたマルチアクチュエータ制御がそれぞれ制御1、制御2、制御3、制御4であったときに、不快のフィードバックが入力されることによってマルチアクチュエータ制御が表3、表4のように変化していることがわかる。なお、フィードバックを入力したタイミングは表5の通りである。'0'を制御の中断、'1'を制御の実行としてラベル付けている。このことから、不快のフィードバックが正しく認識されて、マルチアクチュエータ制御を変更していることが確かめられた。また、図4において、快適のフィードバックを入力している。その結果、このフィードバックが反映される30秒のときにおいて制御が変わっていないことから、快適のフィードバックも正しく動作していることが確かめられた。

表 3: 実験における快適時のマルチアクチュエータ制御の変更

最初の制御	1回目の変更	2回目の変更	3回目の変更
制御 1	制御 2	制御 3	制御 4
制御 2	制御 1	制御 4	制御 3
制御 3	制御 4	制御 1	制御 2
制御 4	制御 3	制御 2	制御 1

表 4: 実験における快適時のマルチアクチュエータ制御の変更

最初の制御	1回目の変更	2回目の変更	3回目の変更
制御 1	制御 4	制御 3	制御 2
制御 2	制御 3	制御 4	制御 1
制御 3	制御 2	制御 1	制御 4
制御 4	制御 1	制御 2	制御 3

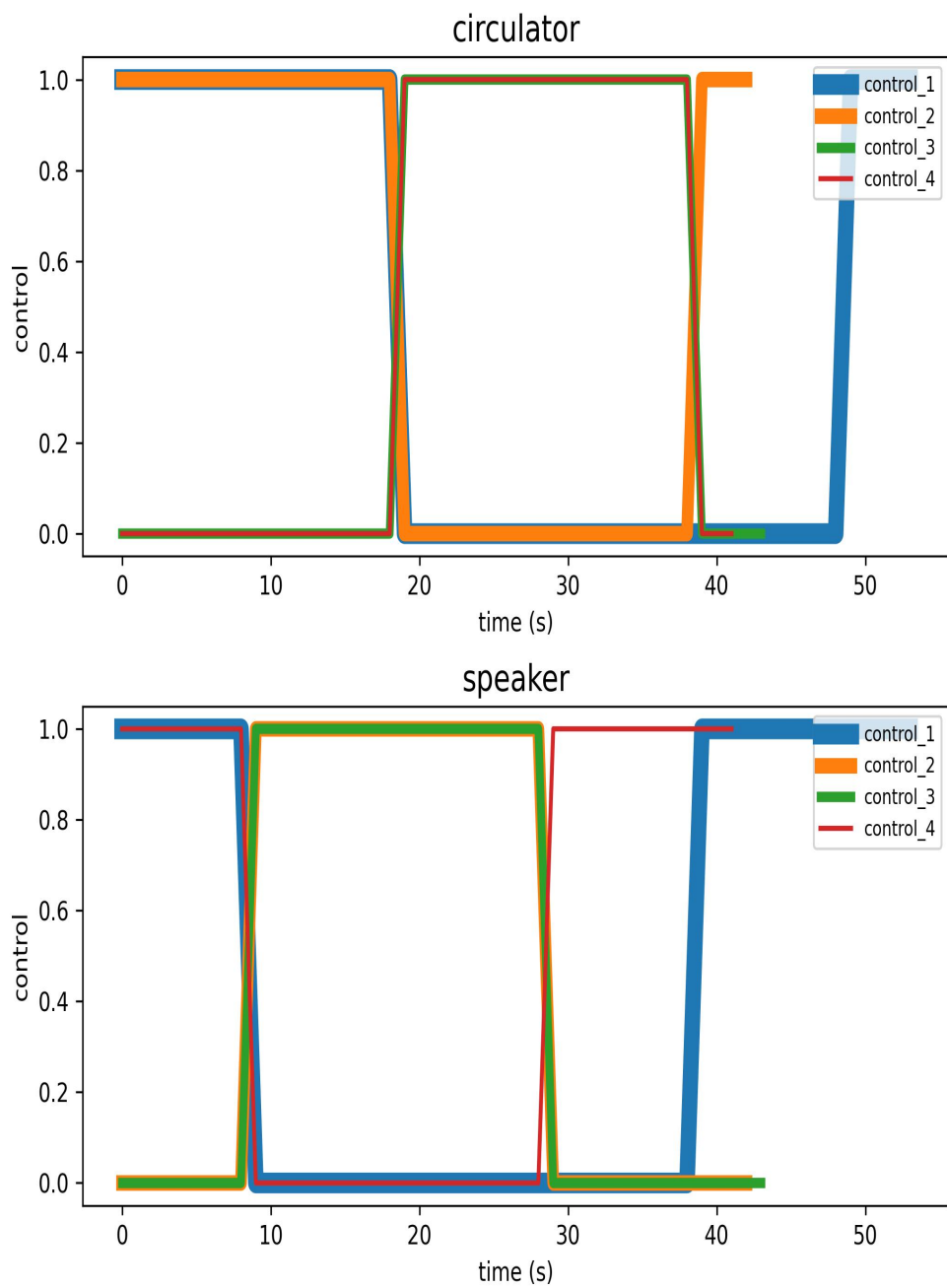


図 4: 快適時のマルチアクチュエータ制御の推移

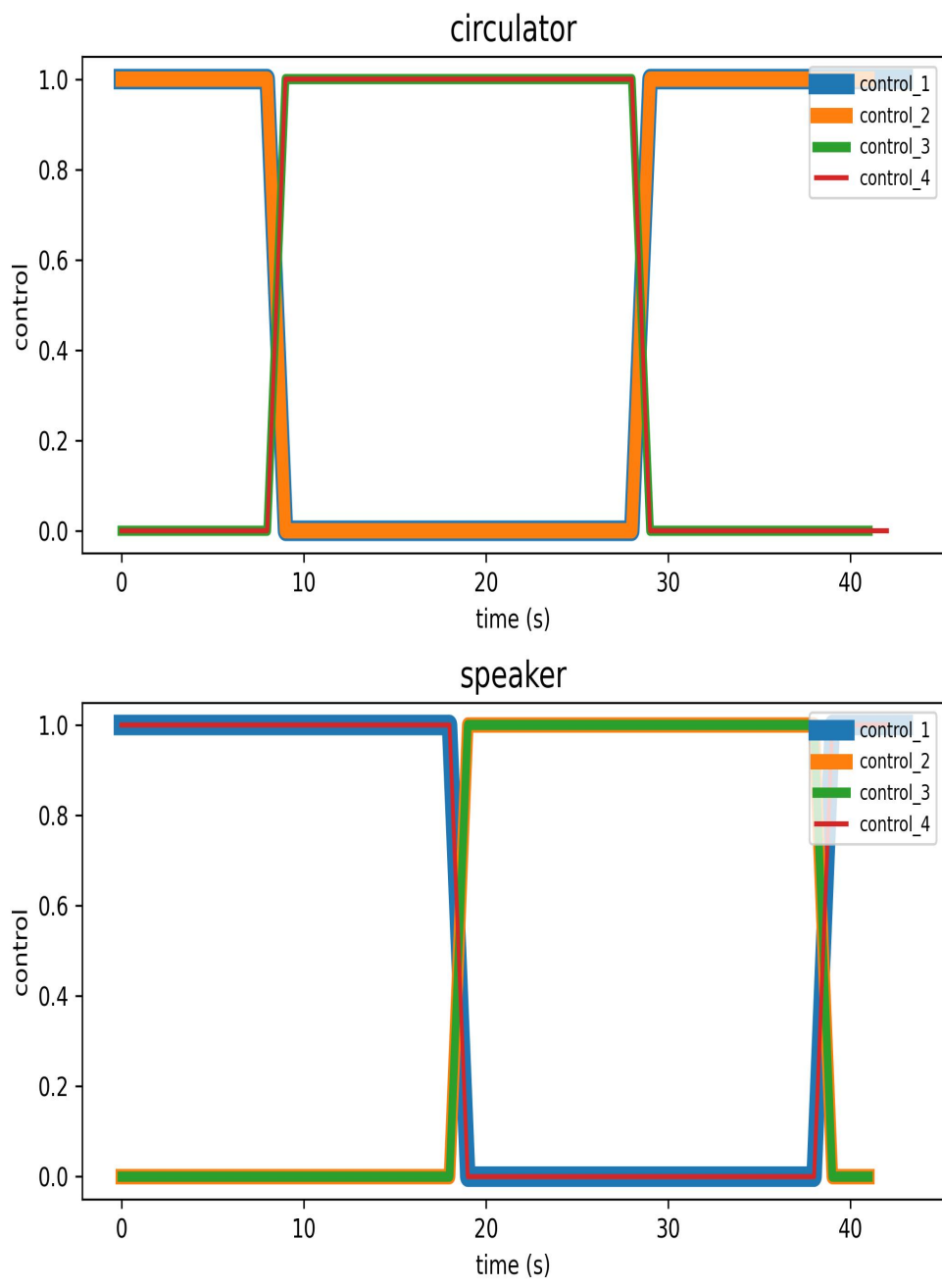


図 5: 不快時のマルチアクチュエータ制御の推移

表 5: フィードバックを入力したタイミング

時間 (s)	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
快適時の最初の制御が制御 1	不快	不快	快適	不快	不快
それ以外	不快	不快	不快	不快	-

4.5 実験

4.5.1 実験の事前準備

実装したシステムの動作検証を行うための実験を実施した。被験者は 20 代の男性一名を対象に実施した。まず、ゆらぎ学習におけるアトラクターに快適、不快のそれぞれの状態での生体情報を記憶させるために、表 6 に示す温熱環境の異なる 2 つの部屋を準備した。事前学習用のデータには、それぞれの部屋であらかじめ 10 分間順応のために過ごした後に、10 分間の生体情報を取得したものをを用いる。

表 6: 生体情報を取得する部屋の環境

用意する部屋	空調の設定温度	加湿
部屋 1	30 °C	あり
部屋 2	25 °C	なし

生体情報を計測している間、被験者は椅子に座って静かに過ごす。その際の被験者周辺の室温と湿度は、それぞれ表 7、表 8 に示す通りであり、時間経過によって温熱環境が変化していないことを確認した。

表 7: 生体情報を取得している間の室温変化

	開始時	2 分後	4 分後	6 分後	8 分後	終了時
部屋 1	25.7 °C	25.7 °C	25.7 °C	25.7 °C	25.8 °C	25.8 °C
部屋 2	30.7 °C	30.9 °C	31.0 °C	31.2 °C	31.3 °C	31.5 °C

取得した生体情報は、皮膚電気活動 (EDA)、容積脈波 (BVP)、皮膚温度 (TEMP) であり、それぞれの計測結果は図 6 に示す通りであった。EDA、TEMP は室内環境が大きくは変化していないにもかかわらず、時間経過とともに値が目立って変化している。これらは生体反応としては自然であり、このような時間変化よりも、2 つの部屋で計測した結果の方が互いに差が大きく見られている点が重要である。この違いをゆらぎ学習は事前学習によって捉え、快適な状態と不快な状態を区別する。

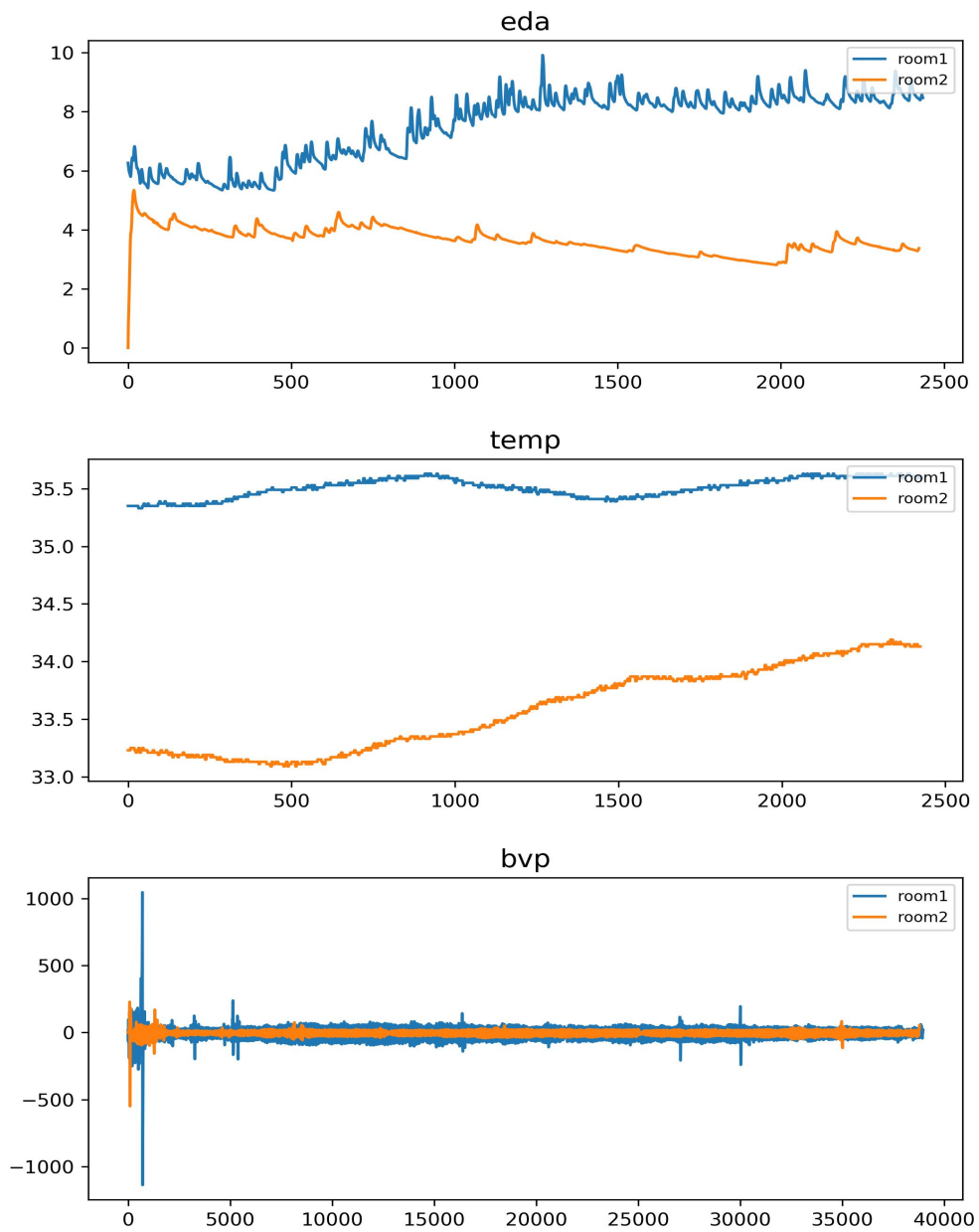


図 6: 取得した生体情報

表 8: 生体情報を取得している間の湿度変化

	開始時	2分後	4分後	6分後	8分後	終了時
部屋 1	21%	22%	22%	22%	22%	22%
部屋 2	31%	32%	32%	32%	32%	31%

生体情報から選択する特徴量は人によって異なる。本報告の被験者の生体情報から選択された特徴量は表 9 のようになった。なお、phasicEDA は phasic 筋，SNMAphasicEDA は下垂体神経活動，tonicEDA は tonic 筋を表していて、いずれも EDA から算出できる生体情報である。

表 9: 選択された特徴量

	平均	標準偏差	最大値	最小値	範囲	傾き
EDA	○	○	○	○	○	○
phasicEDA	○					
SNMAphasicEDA	○					
tonicEDA	○			○		
TEMP	○		○	○		
BVP		○	○	○	○	

4.5.2 実装したシステムの動作検証

システムの動作検証として、実装したシステムをリアルタイムに動作させる。システムの動作検証では、被験者は不快な部屋に 10 分間順応した後、10 分間実装したシステムを動作させることでゆらぎ学習による快適度の推定とマルチアクチュエータ制御の変更が正しく行われているかを確認する。本報告では、2 秒おきにゆらぎ学習による推定を行い、20 秒おきに推定結果やフィードバックに応じてマルチアクチュエータ制御を変更する。10 分間動作検証を行っている間の被験者周辺の室温と湿度の変化、ゆらぎ学習の推定結果、マルチアクチュエータ制御の変化はそれぞれ表 10, 表 11, 図 7, 図 8 のようになった。なお、ゆらぎ学習の推定結果は、'0' を不快、'1' を快適だと推定結果をラベル付けしていて、EDA, TEMP, BVP のそれぞれ単独の推定結果とマルチモーダル統合後の推定結果を INTEGRATION として図示している。また、マルチアクチュエータ制御は'0' を制御の中断、'1' を制御の実行としてラベル付けしている。また、赤色の点線があるときに不快のフィードバックが入力されて、緑色の点線があるときに快適のフィードバックが入力されている。そして、青色の点

線があるときに、ゆらぎ学習による推定結果が変化している。

システムの動作検証を行った結果、推定結果が変わった時とフィードバックが入力された時にマルチアクチュエータ制御が変更して、正しくシステムが動作することが分かった。また、推定結果を不快であると正しく判定した割合は94.9%であった。これは、ゆらぎ学習による推定が一定間隔であるため、一時的に推定を誤っても、それ以外の部分で推定結果が合っていれば、推定結果が誤る可能性が非常に低いためであると考えられる。

表 10: 動作検証を行っている間の室温変化

開始時	2分後	4分後	6分後	8分後	終了時
30.2 °C	30.3 °C	30.4 °C	30.5 °C	30.5 °C	30.5 °C

表 11: 動作検証を行っている間の湿度変化

開始時	2分後	4分後	6分後	8分後	終了時
42%	42%	38%	38%	38%	36%

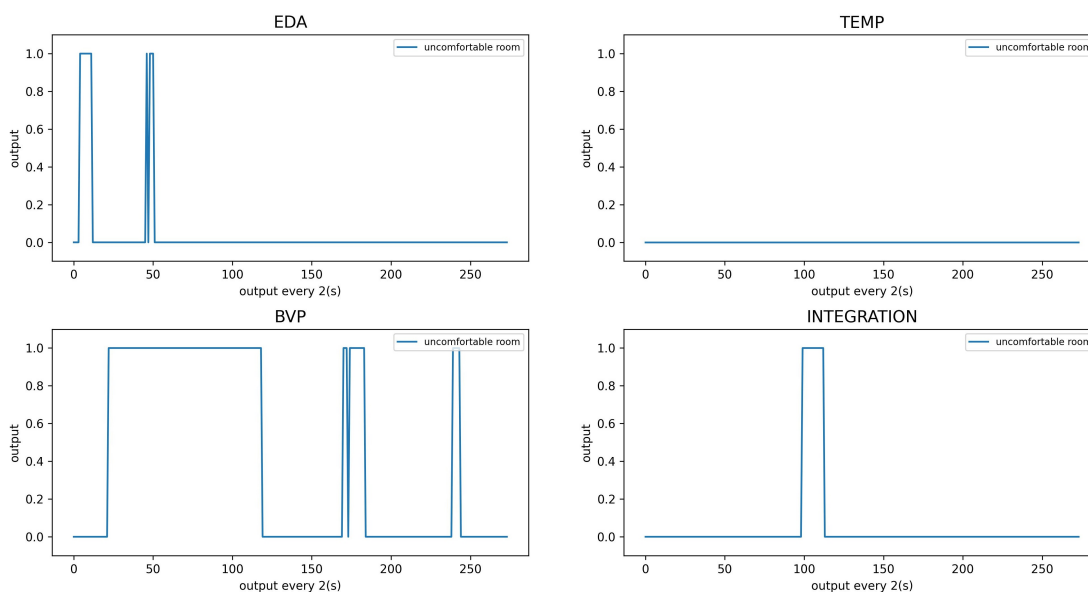


図 7: ゆらぎ学習の推定結果

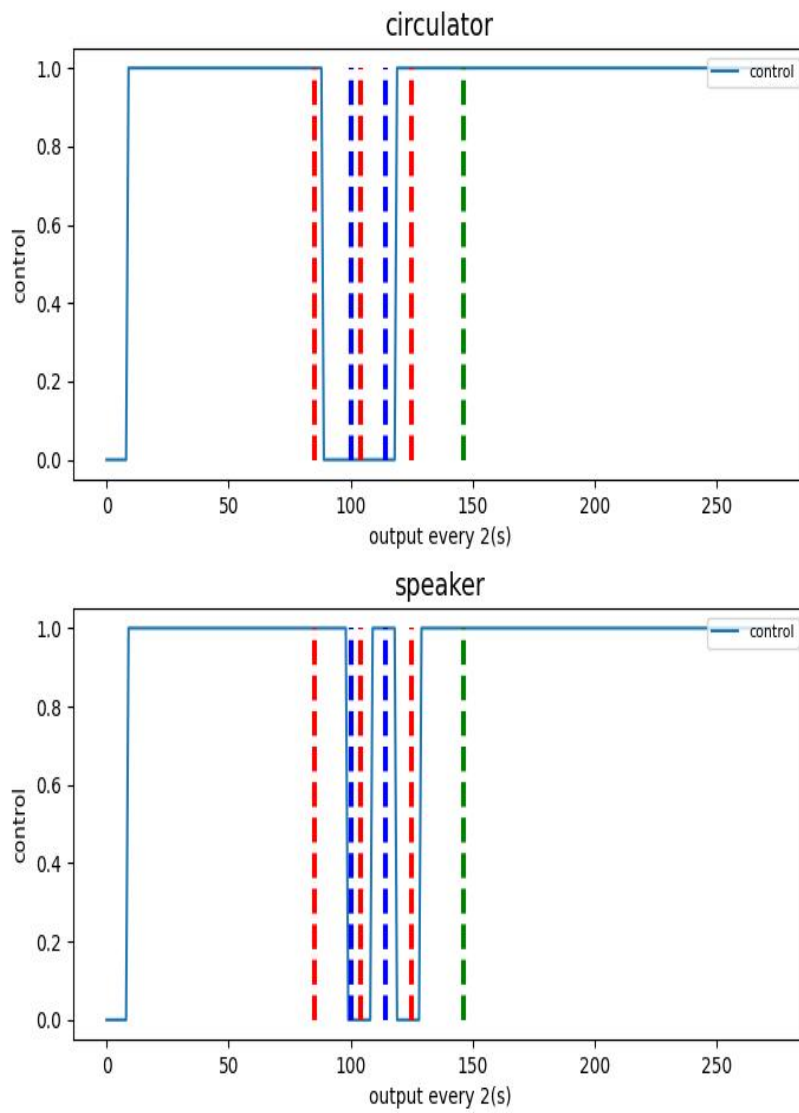


図 8: 動作検証を行っている間のマルチアクチュエータ制御の変化

5 おわりに

本報告では、個人が室内環境に対して快適あるいは不快と感じている状態の推定と、推定結果に応じて複数のアクチュエータを制御する、マルチアクチュエータ制御手法の提案、実装を行った。提案手法では、人が快適に感じている、あるいは不快に感じているという情報をフィードバックすることで、その人が室内環境に対して感じる快適性を向上する機器の動作を実現する。

システムの動作検証のために、温度設定および湿度設定の異なる2つの部屋を準備し、提案手法の動作実験を行った。使用したアクチュエータはサーキュレータとスピーカーであり、送風のオンオフ制御および音響のオンオフ制御が、状態推定の結果に応じて行われる。実機実験を通して、本報告で提案、実装したシステムが正しく動作することを示した。

今後は、本報告で提案した手法を実装したシステムによって室内環境の快適性が向上できることを、被験者数を増やして評価を行う必要がある。また、今回使用したアクチュエータは即時に室内環境を変化させることができるアクチュエータであった。しかし、本報告で使用していないアクチュエータの中には、室内環境を変化させるために必要な時間が長いアクチュエータが存在する。例えば、加湿器によって加湿制御を行おうとすると、送風制御や温熱制御よりも制御が室内環境に影響を与えるまでの時間が長いいため、この時間を考慮するようなマルチアクチュエータ制御を検討する必要がある。さらに、より多様なアクチュエータを同時に制御することや、オン/オフだけでなく段階的な制御、それらの組み合わせから、適切な制御を選択するために、室内環境の中のどの要素が不快であると感じているのかを推定する方法も検討する必要がある。これらは今後の課題である。

謝辞

本報告を終えるにあたり，ご多忙の中丁寧にご指導，ご教授いただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に心より深く感謝を申し上げます。また，本報告を進めるにあたり，本報告の方針や進捗の確認，執筆指導など手厚くご指導していただきました大阪大学大学院情報科学研究科の小南大智准教授，本報告の方針や進捗の確認などを丁寧にご指導していただきました大阪大学サイバーメディアセンターの大下裕一准教授に心より感謝申し上げます。最後に，日々の学生生活や本報告を作成するにあたって，支えてくださった家族，友人，村田研究室の皆様にご感謝の意を表し，謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] M. Frontczak and P. Wargocki, “Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments,” *Building and Environment*, vol. 46, no. 4, pp. 922–937, 2011.
- [2] Y. Song, F. Mao, and Q. Liu, “Human comfort in indoor environment: A review on assessment criteria, data collection and data analysis methods,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 119 774–119 786, 2019.
- [3] ISO 7730:2005, “Ergonomics of the thermal environment,” <https://www.iso.org/standard/39155.html>.
- [4] K. Steemers, “Daylighting design: Enhancing energy efficiency and visual quality,” *Renewable Energy*, vol. 5, no. 5, pp. 950–958, 1994.
- [5] M. Arif, M. Katafygiotou, A. Mazroei, A. Kaushik, E. Elsarrag *et al.*, “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.
- [6] N. Oceanic and A. Administration, “State of the science fact sheet: What is air quality?” 2019, <https://csl.noaa.gov/factsheets/airqualitysos.pdf>.
- [7] Z. Wang, R. de Dear, M. Luo, B. Lin, Y. He, A. Ghahramani, and Y. Zhu, “Individual difference in thermal comfort: A literature review,” *Building and Environment*, vol. 138, pp. 181–193, 2018.
- [8] W. Yang and H. J. Moon, “Combined effects of acoustic, thermal, and illumination conditions on the comfort of discrete senses and overall indoor environment,” *Building and Environment*, vol. 148, pp. 623–633, 2019.
- [9] K. Hara, R. Yoshida, D. Kominami, Y. Ohsita, M. Kaihotsu, and M. Murata, “Indoor environment control method for improving well-being using human thermal stress estimated by yuragi learning,” in *Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics (IEEE ICCE)*, Jan. 2024.

- [10] S. Bitzer, J. Bruineberg, and S. J. Kiebel, “A Bayesian attractor model for perceptual decision making,” *PLoS computational biology*, vol. 11, no. 8, p. e1004442, 2015.
- [11] R. Yoshida, “Real-time stress detection using yuragi learning by multimodal integration of living-body information,” Master’s thesis, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Feb. 2023.
- [12] H. Guan, S. Hu, M. Lu, M. He, Z. Mao, and G. Liu, “People’s subjective and physiological responses to the combined thermal-acoustic environments,” *Building and Environment*, vol. 172, p. 106709, 2020.
- [13] L. Huang, Y. Zhu, Q. Ouyang, and B. Cao, “A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices,” *Building and environment*, vol. 49, pp. 304–309, 2012.
- [14] “環境音 [1] | 効果音ラボ,” <https://soundeffect-lab.info/sound/environment/>.