

脳波・心拍変動指標による感情マップと SD法による自動運転車内の快適性の評価の統合

上野 翔太¹ Jadram Narumon¹ Tipporn Laohakangvalvit¹ 菅谷 みどり¹

概要：完全自動運転時の車内空間は、オフィス、映画館、コンサートホールなど様々な空間として用いられることが期待される。車内では、これらの異なる要求に応じた快適な環境提供を客観的に実施する試みがなされている。一方、客観的でわかりやすく「快適性」の心理・感情を評価する手法は、まだ十分に確立していない。客観的に感情評価を行う方法として、生理的な反応から評価する方法や、主観情報から統計的に評価手法が提案されている。しかし、これらはいずれも長所・短所があり、これらを統合し、直感的に評価する方法の確立が望まれている。

本研究では、主観評価として代表的な評価手法と、脳波・心拍変動指標による生体計測手法を組み合わせ、快適性を客観的かつ直感的に評価する手法を提案する。実現のために、快適性を評価する感情マップを提案し、車内環境を用いた実験により効果を評価した。実際のデジタルキャビンで5つのライティングパターンを変えて快適性を調査した結果、特定のパターンが、快-高覚醒の仕事環境に適することがわかった。その有効性を示唆が示唆された。

キーワード：自動運転、生体情報、SAM、脳波、心拍変動、SD法、快適性

1. はじめに

近年、自動運転レベルは、SAE(Society Automotive Engineers)[1]におけるレベル3(条件付き運転自動化)が実現され、完全運転自動化のレベル5も想定範囲となっている。完全自動運転が実現すると、ドライバが運転から解放される。このことから、車内での移動時間を充実させるための車内環境の技術検討がなされている[2]。車内環境の例としては、オフィス、映画館、コンサートホール、寝室などが挙げられる。これらを実現する上で重要なのが車内空間における快適性の確保である。快適性の確保には2つのアプローチがある。1つ目はシートの座り心地や走行時の振動の軽減など車内空間そのものを快適にするアプローチである。2つ目は乗員の感情に合わせて個人を快適にするアプローチである。既にメーカーは乗員の状態を逐次把握し、検知された感情に応じて音、映像、空調、光、香りなどの刺激を組み合わせることで、快適化を行う方法が提案されている[3]。車という高度に安全性に関わる技術であることをふまえると、これらの快適度をより正確に、かつ客観的に評価し、応用できることが望まれる。しかし、正確で、客観的に「快適性」の心理・感情を評価する手法は、まだ十分に確立しているとはいえない。

感性工学分野では、客観的な主観評価手法としてSD(Semantic Differential Method)法[4]などが用いられている。心理分野では、SAM(Self-Assessment Manikin)[5]手法などの言語依存性がない評価として用いられている。一方、生体計

測を用いた感情推定手法[6]などをはじめとした、生体計測による感情推定技術なども提案されている[8]。生体計測を用いた感情推定手法においては、多くは心理学分野で用いられているArousal/Valence Spaceモデル[7]に脳波・心拍の値を対応させ、生理反応から感情を解釈する方式がとられている。本モデルは人の基本感情を覚醒度(Arousal)と快適度(Valence)の2軸で表現するモデルで、心理学分野、生理指標を用いる感情推定分野において利用実績がある[8]。

このように、人の感情や状態を客観的に評価する方法は様々な手法が検討されているが、手法はそれぞれ、長所と短所があり、一つの手法で十分に客観的な評価を行うことは困難である。複数指標によるより客観的な評価が望ましいが、異なる尺度を持つ指標を統合的に議論する方法は、現状、確立していない。

そこで、本研究では、感性評価の主観評価として代表的なSD法[4]、感情評価として代表的なSAM手法[5]と、脳波・心拍変動指標による生体計測により感情評価手法[6]を組み合わせ、快適性を客観的かつ直感的に評価する手法を提案することを目的とする。目的の実現のために、快適性を評価する感情マップを提案する。本感情マップは、主観の分散の大きさを考慮して、相関分析にて有意差がある結果のみを対応づけることで信頼性を向上させる。実験では、実際の車内空間としてデジタルキャビンの5つのライティングパターンにおける車内空間の快適性を調査した。その結果、特定のパターンが、快-高覚醒仕事を行うオフィス空間として適した環境であることが示唆された。

¹ 芝浦工業大学
Shibaura Institute of Technology.

本論文の構成は次の通りとする。2 節にて目的と提案, 3 節にて目的と提案, 4 節にて感情マップの対応手法, 5 節に実験, 6 節にまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連文献と研究の課題

感性工学の分野では, 人の感性・感情状態を明らかにする方法として SD 法が提案されている[4]. SD 法は, 人の感情的な意味(affective meaning)[4]を明らかにするために用いる手法である。感情的なイメージを持つ形容詞を対にして選択するアンケートを実施し, 統計的に人の感性の状態を明らかにする。形容詞を用いるため, その言語に慣れ親しみ, 理解する人にとっては評価が直感的に理解しやすい利点がある。一方, その言語を話さない文化圏の人に対する適用が困難であることが欠点として挙げられる。

これに対して, 感情評価手法として, SAM 尺度(Self-Assessment Manikin)[4]が用いられている。SAM は, 非言語情報を用いた評価手法であることから, 様々な文化圏の人に対する利用が可能である利点がある。しかし, Arousal, Valence の 2 値 (+Dominance) の限られた状態であることから, 評価は, それがどのような感情状態に対応しているのか, 理解することが困難であるとされる[5]。また, SD 法や SAM 法は, 主観によるアンケートであることから, 人の解釈のばらつきの影響が大きく, 対象群の条件や人数での評価が重要となる。

これに対して, 近年, Affective Computing 分野では生体情報を用いた感情評価が普及している [8,9,12]。生体情報を用いた評価では, 一般的に脳波や自律神経などを計測するセンサから直接的な人の生体反応を計測する。このため, 外界の刺激に対する反応を取得することができる利点がある。直接的な反応には恣意的な意図や認知の介入がない分, 客観的な評価が可能であると考えられる。また, センサの装着と計測により値を得ることから主観評価のように考えて, 回答する認知処理に時間がかからず, 外部の刺激に対してリアルタイムに反応を取得できる利点がある。

しかし, 一般的に生体計測値は, 異なる生体評価指標により評価されることから, 解釈のズレの補正が必要となる課題がある。例えば脳波は, 周波数解析を経て α 波や β 波などの周波数成分に分解され, それに対する解釈が行われる。これに対して, 心拍値は, 交感神経・副交感神経指標である LF/HF, pNNx などの指標により状態推定が行われる。例えば脳波の α 波から「リラックス」状態とする場合と, 心拍変動値で副交感神経優位な状態での「リラックス」は同じ言葉でも, 身体のリラックス部分が異なることから, それを理解して解釈する必要がある。一般的には, 生体計測による感情評価では複数の指標による評価が推奨されており[10], こうした課題を解決して用いる必要がある。信頼性のある評価を行うための重要な課題として, これらの生体情報により得られた状態の解釈の信頼性を得るためには, 本人の自

覚(認知)による評価が重要とされる。しかし, 先に述べた主観(認知)と, 生体計測による感情評価の結果の関係については, 十分に議論されておらず, 統一的な手法で議論することは重要な課題である。

これに対して池田らは, 心理学分野で広く用いられている Arousal/Valence を軸としたラッセルモデル[7]に, 生体計測で得られる脳波値を覚醒値(Arousal), 心拍変動で得られる自律神経指標を, 快不快(Valence)を対応づけて解釈することで, 心理学の成果と生体計測成果の統合を行った[6]。池田らは, さらに, この生体計測による A/V マップの上に, SAM で得られた本人の主観の対応させることにより, 人の認知と生体計測の誤差を MAE(Mean Absolute Error)により議論した [11]。このように, 主観評価で行う認知的な評価と, 生体計測の評価を組み合わせる試みは部分的に行われているが, 統合的に議論したり, 応用するには十分ではない。

3. 目的と提案

3.1 概要

本研究では, 人の状態を客観的に評価方法する快適性を客観的かつ直感的に評価することを目的とする。目的を実現するために, 客観的な主観評価手法とされる SD(Semantic Differential Method)法, SAM(Self-Assessment Manikin)手法と, 生体計測による感情推定手法[6]を用いる。これらを, 心理学分野で用いられている Arousal/Valence Space モデルに対応させ, 可視化し, 解釈する手法を提案する。

本研究では, まず, 心理モデルと, 生体計測を統合した基礎環境マップと, 生体指標について説明する。さらに, SAM について述べる。次に, 次節にて, SD 法を統合した感情マップについて述べる。SD 法の統合は本研究のオリジナルであり, 同様の試みは本研究以外には知られていない。本研究では, さらに, 実環境の評価として車内環境の評価を行った。実証実験については, 第 5 節にて述べる。

3.2 基礎感情マップ

本研究では, 生体情報と主観の裏付けを可視化し, 快適性を評価する新たな手法として「感情マップ」(図 1)を提案する。感情マップは, 心理モデルである Arousal/Valence を軸とした心理モデルを基礎とした可視化手法で, 脳波と心拍変動指標を対応させることで, センサから得られた生体計測値から感情分類を行うための仕組みである。基礎的な仕組みは, 池田らが行った A/V 2次元座標モデルに, X 軸に心拍変動指標, Y 軸の覚醒に脳波指標を対応づけて解釈するものを用いている。各象限と, 感情の関係は次のとおりである。第 1 象限は, 覚醒・快が高い状態(Arousal High/Valence High), 第 2 象限は覚醒が高く, 不快状態(Arousal High/Valence Low), 第 3 象限は覚醒が低く, 不快状態(Arousal Low/Valence Low), 第 4 象限は覚醒が低く, 快状態(Arousal Low/Valence High)とする(図 1)。

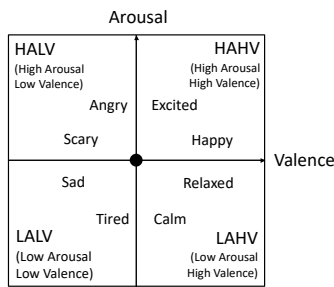


図1 Arousal/Valence 2次元モデル

3.3 A/V モデルと生体指標の対応づけと解釈

池田らは、覚醒-快不快の値に脳波指標と心拍変動指標を対応づけて解釈したが[6]、改めてこれらが対応づく理由を検討する。脳波においては、昏睡-睡眠-安静-興奮と、覚醒水準が上がるにつれて高振幅・徐波から低振幅・速波化していくことが知られており、覚醒度指標として多くの実験で利用されている[9]。また、心拍変動においては、心拍変動の周期性を検討するのにスペクトル解析すると、高周波成分 HF と低周波成分 LF の主に2つの周波数成分に分けられ、これらの成分には自律神経系が関与していることが知られている[10]。自律神経系は、交感神経と副交感神経の2つに分けられ、どちらが優位にあるかによって、リラックスしているか活動的かについて評価することができる。また、快であるとき副交感神経優位、不快であるとき交感神経優位であることが知られている[10]。以上のことから、本研究では覚醒-快不快の指標としてそれぞれ、覚醒に脳波指標、快不快に心拍変動指標を対応づける。

3.4 生理指標

本研究で使用する生理指標について述べる。快不快を示す値として自律神経の計測指標である pNN50(数式1)を用いる。一般的に、自律神経系の指標としてよく用いられるのは心拍変動(HRV)であり、その解析には時系列データの高速フーリエ変換(FFT)による周波数解析が主流であるが、FFT に関して、ある程度のデータ量が無ければ正確な解析が出来ないことからリアルタイム性に欠ける。また、体動などの外乱による心拍間隔の誤認定の影響を受けやすいとされている[10]。そこで今回は HRV の中でも時系列心拍間隔データから FFT を行わずにそのまま値を算出する pNN50 を採用する。

pNNx とは、心拍間隔を表す RR 間隔のゆらぎの大きさの指標で、副交感神経系の指標として用いられる。算出は次のように行う。連続する RR 間隔を $m_n[ms]$ ($0 \leq n \leq 30$: n は整数) とする。隣接する RR 間隔 m_n と m_{n+1} の差の絶対値を l_n ($0 \leq n \leq 29$) とする。この 30 個の l_n のうち 50ms を超えるものの割合が pNN50 の値となる。本研究では、pNN50 を感情マップの X 軸に対応付け、快-不快として解釈する。

$$pNN50 = \frac{\{(l_0 \sim l_{29}) \geq 50ms\}}{30} \quad (1)$$

また、脳波指標として Attention と Meditation の差分を用いる。これらの値は、Neuro Sky 社が提供する Mindwave Mobile2[11]の独自のアルゴリズムによって算出される。Attention は覚醒度の指標である β 波、Meditation は眠気度の指標である α 波とそれぞれ相関がある。本研究では、この Attention-Meditation を感情マップの Y 軸に対応付け覚醒-眠気として解釈する。

3.5 主観評価

予備実験では母国語が日本語でない実験協力者が含まれたため、実験条件を統一するために、非言語的に自分の気持ちと近い項目を選択する手法である SAM 尺度[4]を主観評価として用いる。今回は、図2の Arousal(覚醒度、覚醒-眠気の次元)と図3の Valence(感情価、快-不快の次元)の2つの指標を用いる。マネキンの間の評定値を含んで9件法による評定とする。

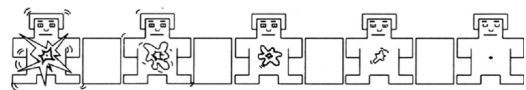


図2 SAM 尺度(Arousal)[4]

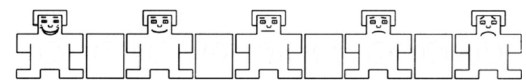


図3 SAM 尺度(Valence)[4]

4. SD 法を統合した感情マップ

4.1 快適状態

感情マップを作成するにあたり、覚醒-快不快の直交座標において、X 軸の脳波指標、Y 軸の心拍指標のそれぞれに0の原点を決定する。本座標は、人の生体計測による、刺激前の状態から刺激後の変位を確認するためのものである。このことから、初回安静状態の生理指標の平均値を原点とする。また、刺激を受けている間の生理指標の平均値を2次元平面上にプロットすることで、閾値からの距離と方向から喜怒哀楽の4象限に分類し可視化する。さらに、本研究は特に、快適状態(High Valence)領域に着目し、第1、第4象限の感情状態を安静状態と比較して快適であると判断する。また、脳波指標の値に応じてさらに、覚醒度を3領域に分類する。(1)快-高覚醒、(2)快-中覚醒、(3)快-低覚醒の3段階に分類する(図4)。そして、これらに分類されれば、それぞれオフィスのようなワークスペース、音楽・映画鑑賞などを行う娯楽スペース、睡眠を行う寝室に適した空間であると判断する。

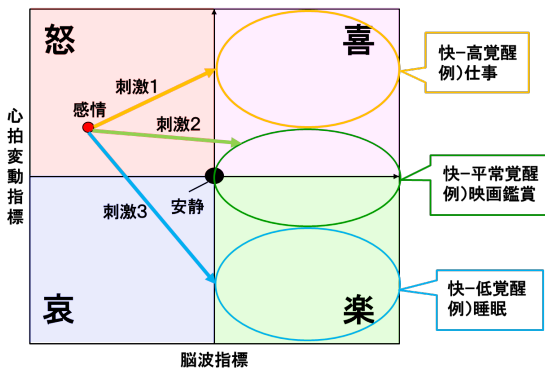


図4 感情マップにおける覚醒度による快適の分類

4.2 基礎感情マップの課題

本研究で提案する感情マップは、図1に示した基礎的な感情マップ Arousal/Valence 2次元モデル+生体計測にさらに、SD法で得られた主観情報を対応づけるものである。

なぜSD法の対応が必要だと考えたか、課題を次の1) 2)に示す。

1) SAMによる詳細な感情評価の困難性

我々は先行する予備実験にて、生体情報とSAM尺度を用いた主観評価を行った[13]。その結果、多くの実験協力者は、クラシックは第4象限、ロックや好きな音楽は第1象限を選択した。協力者の主観はほぼ類似となり、刺激による差異を評価することが困難であった。このことから、本実験では、さらに細かい感性を表現する形容詞を利用したSD法を用いるものとした。しかし、SD法にはSAM尺度のValenceとArousalのように快不快度と覚醒度を的確に表す評価が存在せず、そのまま感情マップに適用して裏付けることが困難である。そこで、SD法を用いた生体情報と主観の対応づけについて次節にて議論する。

2) 高信頼な閾値の必要性

当初の感情マップでは、単純に原点は安静状態の平均を用いた。しかし、安静時の平均の場合、分散値が多い場合と少ない場合で、信頼度が変わってしまう可能性がある。

4.3 感情マップ

1)2)の課題を解決するために本提案では統計解析による有意差検定の結果を用いる。安静状態の生理指標の平均値と、刺激提示時の生理指標の平均値に対して統計解析を行い、有意差の有無を確認し、有意差がみられた場合においてのみ閾値として用いるものとした。

また、分類としては快-平常-不快の3分類と高覚醒-中覚醒-低覚醒の3分類を組み合わせる9分類とした。感情マップには、各刺激の平均を個人別に表示した個人別感情マップ、全実験協力者の値を刺激ごとに表示した刺激別感情マップ、全実験協力者の平均を刺激ごとに表示した全体感情マップの3つがある。本提案手法は統計を行う標本として十分なデータである全体感情マップに対してのみ適用し、快-平常-不快の判定と覚醒度の分類を行う。また、図5に

分類フローチャート、以下に分類の手順を示す。

(1)まず、有意差検定を行い、安静時と刺激提示時の有意差の有無を調べる。

(2)有意差がみられる場合は、安静状態の生理指標の平均値と刺激提示時の生理指標の平均値の大小関係から、安静より刺激提示時の方が大きいならば、快、または高覚醒と判定する。刺激提示時より安静の方が大きいならば、不快、または低覚醒と判定する。

(3)有意差がみられない場合は、平常、又は、中覚醒と判定する。

また、実験では、脳波、脈波それぞれにおける安静状態の生理指標の平均値と刺激を受けている状態の生理指標の平均値に対して、対応のあるt検定を行う。

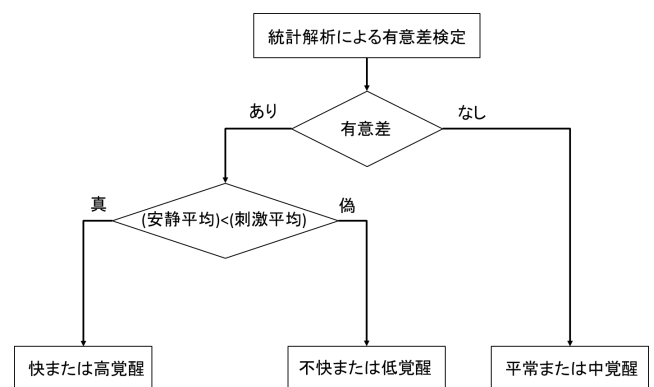


図5 分類フローチャート

4.4 生体情報と主観の裏付けの可視化

SD法には、快不快度と覚醒度を的確に表す評価が存在せず、そのまま感情マップに適用して裏付けることが困難であることを述べた。そこで本研究ではSD法を用いた生体情報と主観の裏付けの可視化を提案する。

以下に形容詞対の対応付けの手順を示す。

(1)まず脳波・脈波指標とSD法の形容詞対の得点に対して相関分析を行う。

(2)次に5%以下の水準で有意な相関がみられた形容詞対を抽出する。なお、ここでは例として「明るいー暗い」と脳波・脈波指標の間に、ともに相関係数0.6の有意な相関が得られたとして説明を行う。

(3)抽出した形容詞対の相関係数rを快不快度と覚醒度のスケールに合わせるために数式2と数式3を適用する(図6)。

(4)スケールを合わせた際の値を元に感性用語感情マップを算出する。図7にSD法の形容詞対で生体情報の裏付けを可視化する感性用語感情マップを示した。

$$(\text{快不快度への適用式}) = \frac{(1+r)}{2} \quad (2)$$

$$(\text{覚醒度への適用式}) = 100r \quad (3)$$

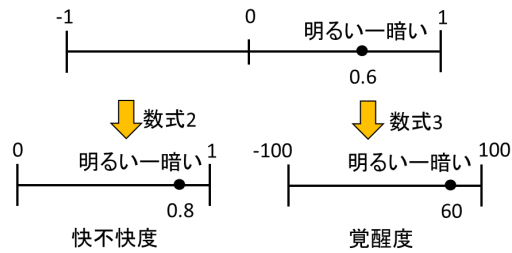


図6 スケールの合わせ方

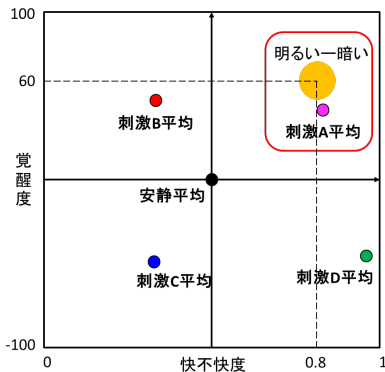


図7 感性用語を対応づけた感情マップ

5. 実験

5.1 概要と目的

提案手法の検証および、自動運転車内の快適性の評価を目的として、20代から50代の12名(男性:7女性:5)を対象に、デジタルキャビン[16]における次の5つの照明パターンの車内空間の快適性を評価する実験を行った。

- i) パターン1: 乗車(薄紫)(図8)
- ii) パターン2: エンジン起動(青)(図9)
- iii) パターン3: 追い越し警告(青から赤に変化)(図10)
- iv) パターン4: 自動運転(オレンジ)(図11)
- v) パターン5: 自動運転で森林を走行(緑)(図12)

の5つの照明パターンにおける車内空間の快適性を評価する実験を行った。実験条件を表1、実験の様子を図13に示す。デジタルキャビンのシステムの設計上パターンの順番や刺激時間は変更不可であり、刺激順序の入れ替えや刺激時間の統一はせずに実験を行った。パターン1の区間は乗車した状態からシート位置の自動調節、キャビン中央にあるテーブルの後方移動の後、ドアが閉まるまでとする。パターン3では警告時に音声アナウンスと座席の振動が生じる。パターン3, 4, 5では運転映像が前方ディスプレイに映し出される。また、パターン中は天井ディスプレイに映像が映し出され1, 2は水の揺らぎ, 3, 4は運転景色の延長, 5では森林通過時の景色の映像がそれぞれ流れる。また、パターン2, 3, 5では照明にアニメーションが加わる。

表1 乗車時の車内空間 (実験条件)

	乗車前安静	乗車後安静	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4	パターン5
内容	キャビン見えない位置	乗車状態	乗車状態→ドア閉	エンジン起動	追い越し警告	自動運転	自動運転(森林)
時間[s]	120	120	37	11	10	60	18
照明の色	なし	なし	薄紫	青	青→赤	オレンジ	オレンジ→緑
照明のアニメーション				○	○		○
シート移動			○				
中央テーブル移動			○				
ドア開閉			○				
振動					○		
音声アナウンス				○			
前方ディスプレイ映像					○	○	○
天井ディスプレイ映像			○	○	○	○	○



図8 パターン1



図9 パターン2



図10 パターン3



図11 パターン4



図12 パターン5



図13 実験の様子

5.2 実験手順

実験の流れを図14、実験室内のレイアウトを図15に示し、説明を以下に示す。

1. 廊下にて実験協力者に対して実験について説明を行い、実験に対する同意書を記入してもらう
2. 脳波計(NeuroSky)[14]、心拍計[15]を取り付け、椅子に座ったまま乗車前の安静状態を開眼で計測する
3. 実験室内に移動しキャビンに座り乗車後の安静状態を開眼で計測する
4. パターン1を計測する
5. パターン1終了後、主観アンケートを記入してもらう
6. 閉眼で1分間休息してもらう
7. 4~6の手順をパターン2, 3, 4, 5で繰り返す(パターン5では最後の休息はなし)
8. 各パターンの計測が終了した後、乗車したままいくつか実験に関する質問に回答してもらう
9. 終了

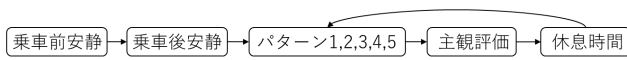


図 14 実験の流れ

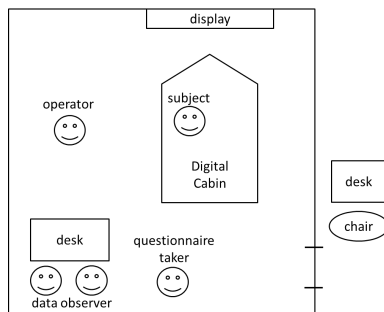


図 15 実験室内のレイアウト

5.3 主観評価

本実験では、主観評価手法として SD 法を用いる。実験に使用する形容詞対は主に[17]から抽出した。また、補足的に今回の実験に影響を及ぼす刺激である「色彩[18], 照明[19], 室内空間[20], 自動運転と景観動画[21], 振動[22], 森林映像[23]」に関する論文より、因子負荷量の大きい形容詞対をそれぞれ選択した。まず 23 項目を選択し、プレテストを行い 18 項目に絞り込んだ。また、5 件法により評価を行う。実験で使用した形容詞対は図 16 に示す合計 17 対とした。

5.4 心拍変動指標

予備実験では心拍変動指標として pNN50 を用いたが、本実験では刺激時間が短いものも含まれているため pNN50 よりも微細な心拍変動の揺らぎを値に反映することができる pNN10 を用いて評価を行う。

5.5 実験結果

5.5.1 SD 法プロフィール解析

図 16 にプロフィール解析の結果を示す。図中の線の色は各パターンの色を示す。また、図中の点はその形容詞対に対する点数のパターンごとの平均値を示す。

追いつきに対する警告を行うことを目的としたパターン 3 では「うわついた」「圧迫される」「激しい」などが他のパターンに比べて高くなった。このことから、他のパターンよりもパターン 3 に対してネガティブなイメージをもつ実験協力者が多かったことがわかる。また、パターン 4 と 5 では「くつろぐ」「穏やかな」「目にやさしい」などが他のパターンに比べて高くなった。このことから、他のパターンよりもパターン 4 と 5 に対してポジティブなイメージをもつ実験協力者が多かったことがわかる。また、「暖かい-涼しい」の項目ではオレンジ、緑(実験ではオレンジから緑に変化)、赤(実験では青から赤に変化)、薄紫、青という順に点数が大きくなっており、暖色には「暖かい」、寒色には「涼しい」と回答していることがわかる。

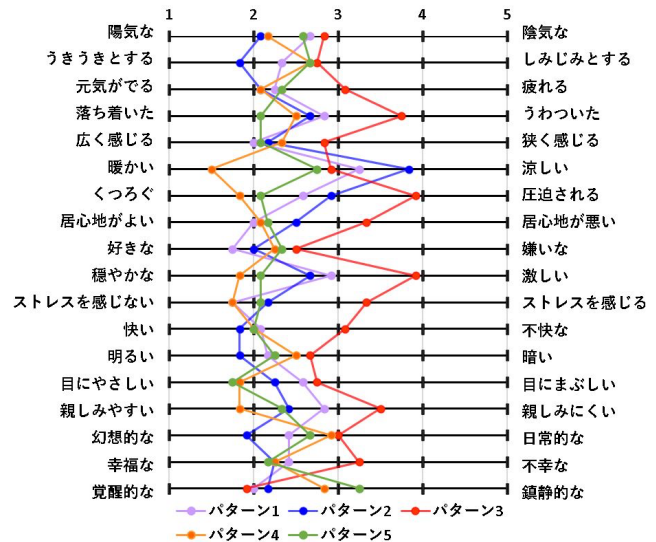


図 16 プロフィール解析

5.5.2 SD 法主成分分析

SD 法において快適性を表す形容詞対の得点が最も高かったパターン 4 に対して主成分分析を行った。表 2 にパターン 4 の主成分分析の結果を示す。主成分分析によって、累積寄与率が 80%を超えた主成分が 3 つ検出された。また第 1 主成分を「快適性」、第 2 主成分を「明るさ」、第 3 主成分を「活力性」とネーミングした。今回の結果より、「元気が出る-疲れる」以外のすべての形容詞対が第 1 主成分と第 2 主成分に含まれることが分かった。

表 2 パターン 4 において SD 法から得られたイメージ

	第1主成分	第2主成分	第3主成分
	快適性	明るさ	活力性
くつろぐ-圧迫される	0.965	-0.059	-0.192
穏やかな-激しい	0.965	-0.059	-0.192
快い-不快な	0.961	0.107	-0.052
ストレスを感じない-ストレスを感じる	0.927	-0.155	-0.255
好きな-嫌いな	0.922	0.143	-0.078
目にやさしい-目にまぶしい	0.905	0.176	-0.016
居心地がよい-居心地が悪い	0.896	0.044	-0.141
広く感じる-狭く感じる	0.702	-0.201	0.518
陽気な-陰気な	-0.028	0.924	0.036
明るい-暗い	0.157	0.807	-0.331
親しみやすい-親みにくい	0.294	0.766	0.221
覚醒的な-鎮静的な	-0.396	0.757	-0.287
うきうきとする-しじみとする	-0.107	0.734	-0.255
幸福な-不幸な	0.482	0.688	-0.089
幻想的な-日常的な	0.521	-0.677	-0.197
落ち着いた-うわついた	0.545	-0.664	0.15
暖かい-涼しい	0.45	0.619	0.375
元気が出る-疲れる	0.301	0.403	0.821
寄与率 (%)	44.36	29.2	9.03
累積寄与率 (%)	44.36	73.56	82.59

5.5.3 個人別感情マップ

図 17~26 に各刺激の平均を個人別に表示した個人別感情マップを示す。図中の第 1 象限に分類されたピンクの点は

喜, 第 2 象限に分類された赤の点は怒, 第 3 象限に分類された青の点は哀, 第 4 象限に分類された緑の点は楽をそれぞれ表す. また, 4 感情分類の閾値は乗車後の安静状態に計測した生理指標の平均値であり, 図中には黒い点で示す.

乗車前の安静状態に計測した生理指標の値と比較すると, 実験協力者の 12 人中 9 人において快不快度がほとんどのパターンで向上しており, 特に実験協力者 7 ではすべてのパターンで快不快度が向上していることがわかる. このことから, 個人差はあるもののデジタルキャビンの各パターンは多くの実験協力者を快適にする効果があることが示唆された.

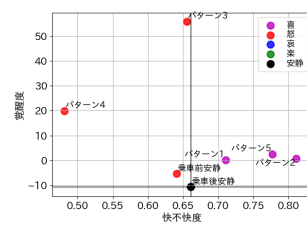


図 27 実験協力者 11

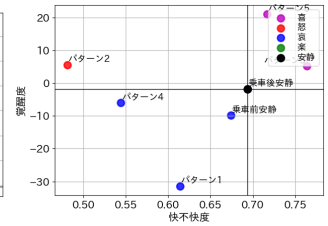


図 28 実験協力者 12

5.5.4 刺激別感情マップ

図 29~34 に, 全実験協力者の値を刺激ごとに表示した刺激別感情マップを, 表 3 に分類結果と生理指標の平均値を示す.

その結果, 第 1 象限(喜)に分類される数が多いのはパターン 1 とパターン 3, 第 2 象限(怒)に分類される数が多いのはパターン 2 とパターン 4, 第 3 象限(哀)と第 4 象限(楽)に分類される数が多いのは, 乗車後の安静状態であることがわかった. 第 1 象限と第 2 象限に分類される数の方が第 3 象限と第 4 象限に分類される数より多いことから, 実験中は覚醒度が高くなりやすい状況であったことがわかった. 特にパターン 3, 4, 5 では第 3 象限と第 4 象限に 1 人も分類されておらず, 覚醒度の指標である Attention-Meditation の平均をみてもパターン 3 以降で. その前よりも値が大きくなっていることが分かる. この理由として, パターン 3, 4, 5 では前方ディスプレイに運転映像が流れるため, この影響により覚醒度が上昇したと考えられる. 特にパターン 3 においては, 後方車両の追い越しに対する警告を行うため, 運転席の振動や音声アナウンスによる注意喚起が生じる. これらも覚醒度を上げる要因であると考えられる.

表 3 喜怒哀楽の分類結果と生理指標の平均値

	第 1 象限 (喜)	第 2 象限 (怒)	第 3 象限 (哀)	第 4 象限 (楽)	pNN50 平均	Attention- Meditation 平均
乗車後安静	4	1	3	4	0.678	-12.9
パターン 1	7	3	2	0	0.664	-5.49
パターン 2	4	5	1	2	0.707	-3.98
パターン 3	8	4	0	0	0.752	10.7
パターン 4	7	5	0	0	0.725	6.16
パターン 5	8	4	0	0	0.768	6.04

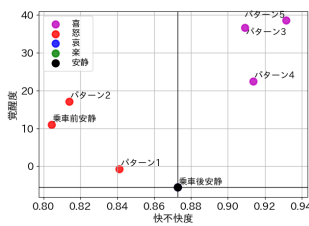


図 17 実験協力者 1

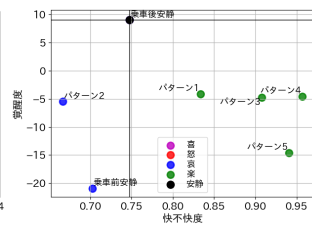


図 18 実験協力者 2

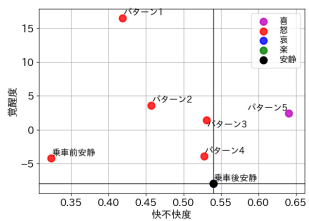


図 19 実験協力者 3

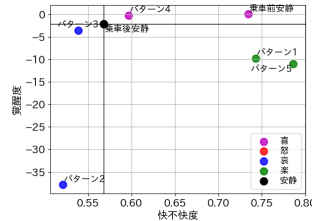


図 20 実験協力者 4

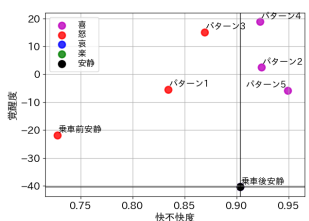


図 21 実験協力者 5

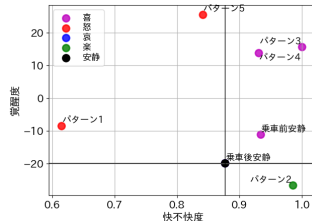


図 22 実験協力者 6

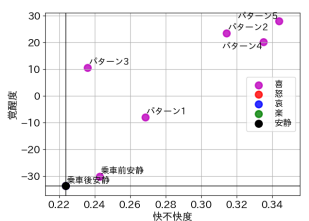


図 23 実験協力者 7

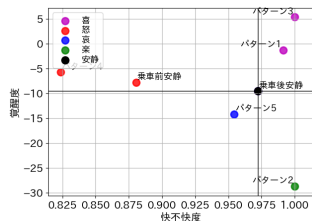


図 24 実験協力者 8

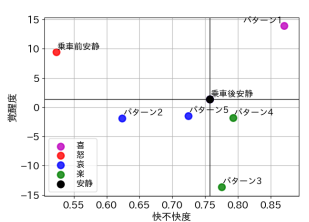


図 25 実験協力者 9

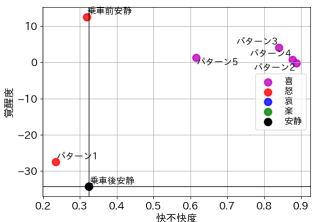


図 26 実験協力者 10

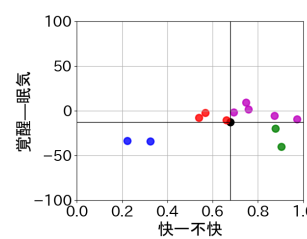


図 29 乗車後安静

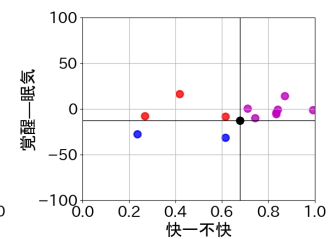


図 30 パターン 1

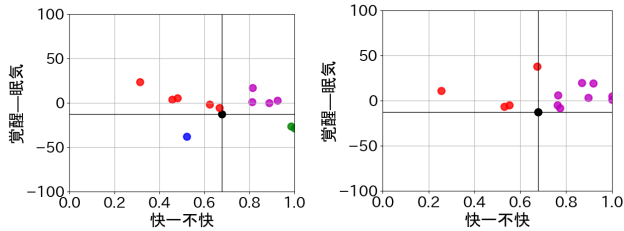


図 31 パターン 2

図 32 パターン 3

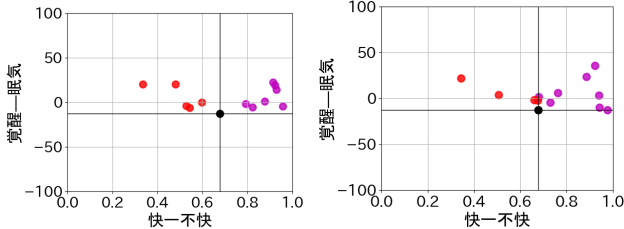


図 33 パターン 4

図 34 パターン 5

また、脳波、脈波それぞれの安静状態の生理指標の平均値とパターンごとの生理指標の平均値に対して、有意水準を 0.05 として対応のある t 検定を行った。グラフを図 35, 36 に示す。その結果、心拍変動指標 pNN10 ではパターン 5 にて有意確率 0.015 で有意差がみられた。脳波指標 Attention-Meditation では、パターン 3, 4, 5 にてそれぞれ有意確率 0.028, 0.041, 0.041 で有意差がみられた。

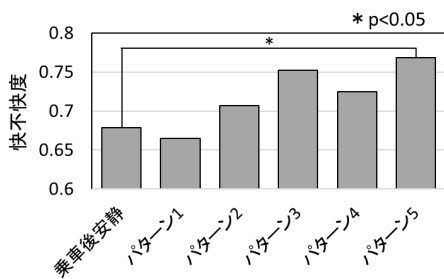


図 35 脈波における対応のある t 検定

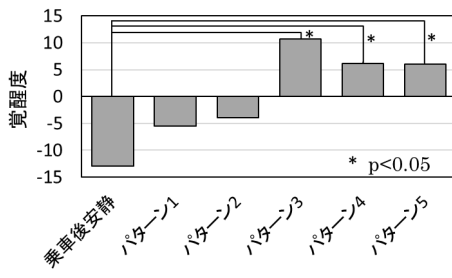


図 36 脳波における対応のある t 検定

5.5.5 全体感情マップ

図 37 に全実験協力者の平均を刺激ごとに表示した全体感情マップを示す。対応のある t 検定の結果より、安静状態と比較して、pNN10 ではパターン 5 で有意な快適性、Attention-Meditation ではパターン 3, 4, 5 で有意な高い覚

醒度が得られたことから全体感情マップによって分類を行った。

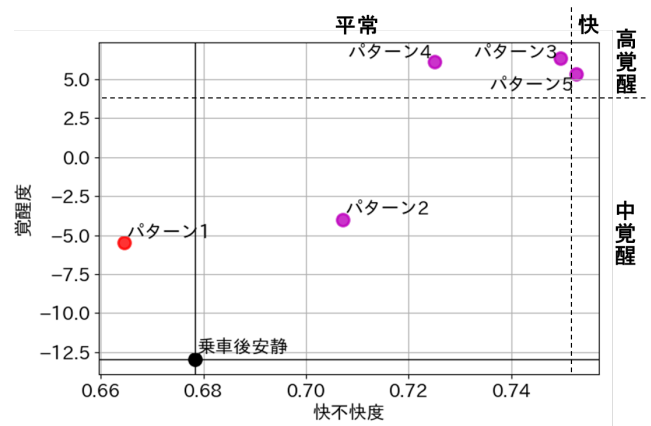


図 37 全体感情マップ

5.5.6 感性用語感情マップ

表 4 にパターン 4 における生体情報と形容詞対の相関係数、図 44 にパターン 4 における感性用語感情マップをそれぞれ示す。心拍変動指標 pNN10、脳波指標 Attention-Meditation のパターン別平均と SD 法の各パターンにおける形容詞対の点数に対してスピアマンの順位相関分析を行った。表 6 をみると快不快度において、5%以下の水準で有意な相関がみられた形容詞対は「広く感じる-狭く感じる」で覚醒度において 5%以下の水準で有意な相関がみられた形容詞対は「親しみやすい-親しみにくい」と「うきうきとする-しみじみとする」であることが分かる。これらを感性用語感情マップに表すと図 38 のようになる。実験協力者のうち快適になっている群では「広く感じる」と近い位置にプロットされていることから、パターン 4 ではデジタルキャビンの車内空間を広く感じていることが裏付けられた。

表 4 パターン 4 における生体情報と形容詞対の相関係数

	快不快度 相関係数	覚醒度 相関係数
くつろぐ-圧迫される	0.09	-0.068
穏やかな-激しい	0.09	-0.068
快い-不快な	-0.066	-0.044
ストレスを感じない-ストレスを感じる	0.117	-0.082
好きな-嫌いな	-0.03	-0.122
目にやさしい-目にまぶしい	0.212	-0.156
居心地がよい-居心地が悪い	-0.022	-0.351
広く感じる-狭く感じる	-0.603*	0.053
陽気な-陰気な	-0.332	-0.421
明るい-暗い	0.199	-0.048
親しみやすい-親しみにくい	0.008	-0.580*
覚醒的な-鎮静的な	0.113	-0.211
うきうきとする-しみじみとする	0.32	-0.659*
幸福な-不幸な	-0.076	-0.112
幻想的な-日常的な	0.266	0.57
落ち着いた-うわついた	-0.022	0.13
暖かい-涼しい	-0.088	-0.064
元気が出る-疲れる	-0.436	-0.227

* 相関係数は 5% 水準で有意 (両側)

** 相関係数は 1% 水準で有意 (両側)

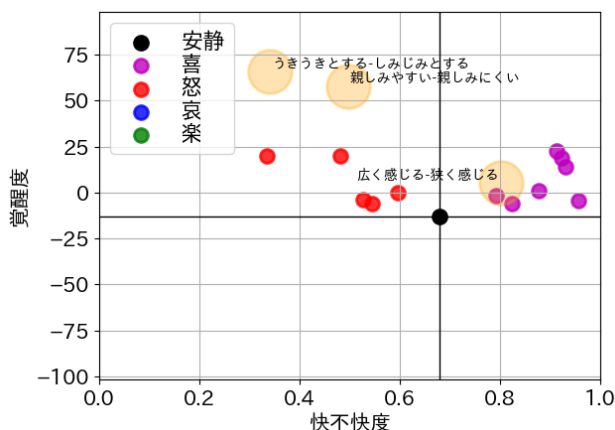


図 38 パターン 4 における感性用語感情マップ

6. まとめ

本研究では、生体情報と主観の裏付けを可視化し、快適性を評価する新たな手法として感情マップを提案した。実験ではアルプスアルパイン (株) が提供するデジタルキャビンの車内空間における 5 つの照明パターンの快適性を評価する実験を行い、SD法による裏付けを行った。その結果、緑色のライティングを基調としたパターン 5 では快-高覚醒に分類され、パターン 5 は仕事を行うオフィス空間として適した環境であることが示唆された。また、オレンジ色のライティングを基調としたパターン 4 において快適になった実験協力者群は、その要因として空間を「広く感じている」ことが分かり、対応づけが可能であることがわかった。

今後の課題として、実験協力者を増やした実験の実施があげられる。今回は、実験内容が車内環境という限定的な場面であった。汎用的な成果とするためには、さらに様々なアプリケーションや環境での評価が必要である。

謝辞

本研究は、アルプスアルパイン (株) および、加藤浩己様、川口修市様、穴久保蔵人様のご協力により実現しました。改めて感謝申し上げます。

参考文献

[1] SAE: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicle, J3016-201609(2016)
 [2] パナソニック株式会社 「Living Space Autonomous Cabin」
<https://panasonic.co.jp/design/works/car-future/>
 [3] トヨタ紡織株式会社 「MX191 | CES2020 トヨタ紡織ブース」
<https://www.toyota-boshoku.com/jp/special/ces2020/mx191.html>
 [4] Osgood, C.E., Suci, G.J., and Tannenbaum P.H. : The Measurement of Meaning , University of Illinois Press, 1957.
 [5] Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self assessment Manikin and the semantic differential. Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry, 25, 49-59.
 [6] Ikeda, Yuhei, et al . "Estimate emotion method to use biological, symbolic information preliminary experiment." International Conference on Augmented Cognition. Springer, Cham, 2016.
 [7] James A. Russell, "A Circumplex Model of Affect", Journal of Personality and Social Psychology, Vol.39, No.6, pp.1161-1178. 1980.

[8] S. Katsigiannis and N. Ramzan. DREAMER: A Database for Emotion Recognition Through EEG and ECG Signals From Wireless Low-cost Off-the-Shelf Devices. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2018, vol. 22, no. 1, p. 98-107.
 [9] Soraia M. Alarcao and Manuel J. Fonseca, Senior Member, "Emotions Recognition Using EEG Signals: A Survey", *IEEE*, Vol.10, No.3, 2017
 [10] 三宅 晋司監修, "商品開発, 評価のための生理計測と データ解析ノウハウ ~生理指標の特徴, 測り方, 実験計画, データの解釈, 評価方法~". 日本人間工学会 PIE 研究部会編集, 2017.
 [11] 池田悠平, 芝浦工業大学, 修士論文, 2018.
 [12] 鈴木悠太, ロベズ・ギョーム, 高橋淳二, "ウェアラブル環境における心拍変動解析における電子機器の制御方法", 第 19 回人間情報学会ポスター発表集, 2014 年 12 月 2 日
 [13] 上野 翔太, 張 潤青, 菅谷 みどり, 脳波と心拍変動から算出した感情マップによる音楽聴取の評価, 第 22 回日本感性工学会大会, 202009
 [14] NeuroSky, MindWave Mobile, <http://store.neurosky.com>, 2004
 [15] 心拍計, <https://www.uniontool-mybeat.com/SHOP/8600010.html>
 [16] "CEATEC 2020 ONLINE", アルプスアルパイン (株), https://www.alpsalpine.com/j/news_release/2020/1013_01.html,
 [17] 井上正明, 小林利宣, "日本における SD 法による研究分野とその形容詞対尺度構成の概観", *J.of Educ Psychol*, 1985, 33, 253, 60
 [18] 大森正子, 橋本令子, 加藤雪枝, "色彩刺激に対する心理評価と生理反応評価", *日本色彩学会誌*, Vol.26, No.2, 2002
 [19] 米田さつき, 吉田稔, "照明空間デザインと官能評価のモデル化", *日本オペレーションズ・リサーチ学会*, 1999
 [20] 加藤雪枝, 橋本令子, 雨宮勇, "室内空間に対する心理的及び生理的反応", *日本色彩学会誌*, Vol.28, No.1, 2004
 [21] 辰巳浩, 外井哲志, "自動運転時と動画を用いた室内実験における景観評価の相違性に関する研究", *日本都市計画学会都市計画論文集*, No.44-3, 2009
 [22] 石川孝重, 野田千津子, 隈澤文俊, 岡田恒男, "鉛直振動に対する感覚評価とその表現に関する研究", *日本建築学会計画系論文報告集*, 第 437 号, 1992
 [23] 辻裏佳子, 豊田久美子, "森林映像の心身反応に関する基礎的検証—森林映像両方の可能性—", *Japanese Journal of Nursing Art and Science*, Vol.12, No.2, pp23-32, 2013