

表情弁別閾値によるリーマン計量の導出と新しい顔表情空間の提案

A New Expression Space with Riemann metric induced from Expression Discrimination Thresholds

情報工学専攻 16N8100009D 炭矢 瑠奈
Runa Sumiya

要約 表情を定量化する手法として現在特定の表情カテゴリの寄与率を求める手法が主流となっている。しかし、表情は連続的に変化し、曖昧なニュアンスを含むため、カテゴリを用いた表現には限界があると考えられる。本研究では、心理物理学における弁別閾値を測定することで表情を表情空間の座標値で表現することに基づく定量化法を提案する。

キーワード 表情弁別閾値楕円, リーマン幾何学, 表情空間, 測地線, リーマン正規座標系

1 序論

近年、ロボットの接客業への進出が期待されている。様々な研究機関がロボットによる接客の実証実験を始めており、ますますコンピュータによる表情認識技術の需要が高まっていると考えられる。現在の表情認識技術とは表情刺激を入力して与え、その入力事前に設定された数個の基本表情のカテゴリのいずれかに分類されるかを示す、または、それらの複数個のカテゴリの寄与率を示すものである。人間の表情変化というものとは離散的ではなく連続的であり、表情をカテゴリで表す試みは曖昧なニュアンスを含んだ表情全てを表現することが可能なのだろうか。

人間の表情には人種や文化、個人の経験に依存せずに認知される普遍的な表情が存在し、代表的なものに Ekman らが提唱する基本 6 表情が広く知られている [1]。そのため提供されるデータベースとしては多くがラベルがつけられた 6 表情、多くて 9 表情の限られたもののみである。そのため、カテゴリでの表現は人へ結果を提示するには適しており検証がしやすいと考えられる。また、一つの表情にのみ対応するインターフェースなど、カテゴリ分類による認識をする方が適している場合も存在する。しかし、対話型インターフェースではカテゴリで表されない表情を認知する必要がある、そもそも会話においては表情の微妙なニュアンスを読み取ることが多く、カテゴリで表せない曖昧で複雑な表情を定量的に表現する必要があると考えられる。

心理学の学説には次元説とカテゴリ説が存在しており、カテゴリ説は前述の通り表情はカテゴリによって分類されることによって認知されるという立場である。一方で次元説は表情を心理空間上で連続して表現するもので、カテゴリの存在を否定するものではないが、連続変化する表情を表現するには適していると考えられる。

そこで、本研究は人間の表出する表情を対象に、カテゴリに依存しない表情の定量表現を目指す。人間の認知については従来、心理物理学による研究が知られている。主に光や音などの 1 次元の物理刺激に対して弁別閾値を測定されてきたが、リーマン幾何学を適用することで多次元の刺激に対して適用することが可能となる。1 人の表情の変化から画素値の差を用いて構成される多次元の表情画像空間上で、表情の認知にお

ける表情弁別閾値楕円を測定し、表情弁別楕円を計量としてリーマン幾何学を適用することで、物理刺激空間である表情画像空間へ人間の認知特性が導入された心理物理空間として表情空間を得た。さらにリーマン正規座標系を求めることで、空間内の点の距離が人間の認知の差と同等の表情空間を構築することが可能となる。本論では表情の定量表現が可能な新たな表情空間の構築法に関して述べる。

2 心理空間と表情空間

2.1 従来の心理空間の問題点

次元説において Russell の円環モデルが代表的な心理空間であるが、従来の心理空間は定量表現を行うためには不十分であると考えられる。心理空間はそれぞれの表情画像を被験者へ提示することで得られる心理実験の評価値によって構成される。そのため連続変化する表情全てを被験者に提示をし評価を得ることは不可能であり、離散的な表情に対する表現しかできない。また、Anger や Happiness などの表情画像のデータセットのラベルが心理空間上で表示されることにより心理空間上における物理刺激の布置が表されているが、このラベル付けにおいて既に表情画像データに対する主観を含んでいることとなる。したがって実際にどのような刺激を提示されているかのように物理刺激を直接的に記述することは難しく、物理刺激と認知による心理応答との対応を得ることができない。さらに、SD 法や類似度評価の 5 段階尺度というのは連続した数値ではなく離散的なラベルであり、これを MDS などによって圧縮して得られた連続した数値として扱うことによる心理空間における表情の座標値は、厳密には定量表現ということができない。以上の問題点より、従来の心理空間は定量表現を行うには不向きであり、これらの問題点を解消した空間を構築することが必要である。

2.2 新しい表情空間の提案

物理刺激と心理応答の対応関係を結びつける手法として、心理物理的手法が知られている。これは、物理刺激に対する弁別閾値を用いて物理刺激空間へ知覚特性を導入する手法である。この手法に則り、物理刺激として表情画像の画素値の差を用いて画像空間を構築し、その物理刺激空間へ弁別閾値によって知覚特性を導入することで初めて物理刺激と心理刺激が対応づいた表情空間を得る。物理刺激として表情画像空間を画素値より構築するため一意に定まり、また弁別閾値の測定によりカテゴリ依存しない空間の構築が可能である。

3 表情空間の構築法

3.1 表情画像空間の構築

表情の物理刺激として、心理尺度の評価データではなく表情画像から画素値を用いることで表情画像空間を構築する。表情画像のデータセットの画素値を PCA

に与え、次元削減を行うことで2,3次元での表現を行った。使用するデータセットはモーフィングを用いて特定の表情間の変化の連続を補完したものである。モーフィングによって、データベースとしてラベルがつけられた表情画像だけでなく、曖昧な表情や複雑なニュアンスを含む表情を作成することが可能となる。モーフィングは対応づけられた特徴点の差より2表情間の表情の補完を行うため筋肉の動きを考慮せず、表情画像の人物が表出することができない表情画像を作り出すという点がたびたび議論に上がることがある。しかし、人間は人間の顔ではないものに対し、目と口に対応する模様さえあれば顔であると認知を行うことができ、表情も認識することが可能であり、本研究では物理刺激と心理値の対応を見るため、作成したモーフィング画像が「人間の顔として認知できるか」をデータ使用条件とした。そのため、モーフィングを用いて得られた表情画像群の連続の中で、目を閉じた瞼の上に瞳が描画されるような、人の顔に見えない画像のみを除いた。また、画素値を物理刺激差とするため、輪郭外の背景を切り抜き、輪郭にガウシアンフィルタを適用した。

3.2 表情弁別閾値の測定実験

本研究では恒常法のみの実験と調整法と恒常法を組み合わせた実験を行った。前者は少数の弁別閾値楕円測定において、被験者の順応の影響を抑えた手法であり、後者は多数の楕円測定における、弁別閾値を測定する方向が前者に比べて多くなった場合に一定の測定精度を保ちつつ測定時間を短縮する手法である。前者における恒常法の実験では、一連のモーフィングによって得た表情の連続の中から標準刺激と比較刺激の2枚の表情画像の比較を行い、同じに見えるか異なって見えるかの評価を被験者に求めた。後者の調整法と恒常法を組み合わせた手法では、まず測定点が存在する範囲を求めるための前実験として調整法ベースの実験を行い、そして被験者に標準刺激を始点とするモーフィング画像の連続を標準刺激から遠ざかる方向へ操作させ初めて異なると感じる値を得る。また、逆に異なる表情から標準刺激の方向へ比較刺激を近づけていき、初めて同じと感じる値を得る。順応の影響によって、調整方向によって得られる測定点に幅があるため、それぞれの操作を3回ずつ行い、次に、前実験より得られた最大の幅の範囲で前述と同様な恒常法ベースの手法を行う。

3.3 リーマン幾何学による表情空間への変換

リーマン空間とは、二点 (u^i) および $(u^i + du^i)$ 間の微小距離 ds の平方が以下のように与えられる空間である。そして、この空間における幾何学はリーマン幾何学と呼ばれている。以降の式においてアインシュタイン記法を用いる。

$$ds^2 = g_{jk} du^j du^k$$

g_{jk} は u の滑らかな関数であり、座標によって値が変わり、空間の曲がり具合を示している。また、ユークリッド空間においては2点の最短曲線は直線となるが、リーマン空間上では必ずしも直線とならず、曲線 $u_i(t)$ の長さが2点間の最短距離であるとき、 $u_i(t)$ を測地線と呼ぶ。計量 $G = (g_{ij})$ より以下の二次の常微分方程

式を解くことで測地線を得ることができる。

$$\frac{d^2 u^i}{ds^2} + \Gamma_{jk}^i \frac{du^j}{ds} \frac{du^k}{ds} = 0$$

$$\Gamma_{jk}^i = \frac{1}{2} g^{i\alpha} \left(\frac{\partial g_{\alpha j}}{\partial u^k} + \frac{\partial g_{\alpha k}}{\partial u^j} - \frac{\partial g_{jk}}{\partial u^\alpha} \right)$$

リーマン計量は弁別閾値楕円によって定められ、楕円の長軸を a 、短軸 b 、回転角を θ したとき、リーマン計量 $G = (g_{ij})$ は次式で与えられる。

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix}$$

$$g_{11} = \frac{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta}{a^2 b^2}$$

$$g_{12} = g_{21} = 2 \sin \theta \cos \theta \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right)$$

$$g_{22} = \frac{b^2 \sin^2 \theta + a^2 \cos^2 \theta}{a^2 b^2}$$

計量より表情画像空間における測地線をもとめ、測地線とその測地線上の等距離線を導出することで、それらの交点から座標を定める極座標系の拡張形を構築することができ、この極座標系をリーマン正規座標系と呼ぶ。このとき、測地線導出の初期条件はリーマン正規座標系の原点といくつかのその原点から均等な角度の方向へ向かう速度ベクトルである。等距離線の導出では測地線上の一定の測地距離間隔の点が測地線と等距離線の交点となり、その距離と測地線の角度がリーマン正規座標系の座標となる。従って、リーマン正規座標系は測地線と等距離線からなる測地線網であり、測地線網の交点をパラメータ (r, ϕ) で扱う。このとき r は原点から測地線に沿った測地距離であり、 ϕ はその測地線の原点からの速度ベクトルの角度である。なお、リーマン空間において2点間の距離は2点間を結ぶ測地線の経路積分で与えられる。

上記リーマン正規座標系はユークリッド空間の極座標系とみなすことができ、リーマン空間における測地距離とユークリッド空間における距離と等しくなるため、これは等長写像となる。また、この写像によるリーマン空間の局所距離に対する影響を確認するために局所アフィン写像による近似が有効である。リーマン空間上の任意の点 x に対応するユークリッド空間の点 y を求める場合、測地線網上の2個以上の x の近傍点を選択する。測地線網 (r, ϕ) よりユークリッド空間における近傍点の対応を求めることが出来、それらの対応から局所アフィン写像を導出する。

以上の手法において、任意の点における計量を求めることが必要となるが、そのために測定した表情弁別閾値楕円のデータより Akima 補間を用いることで格子状に計量を補間する。補格子点状のデータのよって、任意の点における計量を内挿することが可能となり、任意点の計量を導出することができる。

4 実験

4.1 7 表情弁別楕円の測定

被験者7名に対して、基本表情を標準刺激とする表情弁別閾値を測定し、弁別楕円の推定を行った。比較

実験においては The Japanese Female Facial Expression(JAFFE) Database の 7 表情画像 (Anger, Disgust, Fear, Sadness, Happiness, Surprise, Neutral) を使用し, 全ての組み合わせでモーフィングを行うことにより 2086 枚の表情刺激を作成した。

7 つの表情弁別楕円を得るために, 126 点の測定点を求めた。なお, 実験時間は個人差はあるものの, 1 人 1 時間 30 分程度であり, 誤差を抑えるために 3 回測定を行う。分かりやすい傾向として 3 名の被験者の弁別閾値楕円を図 1, 2, 3 へ示す。

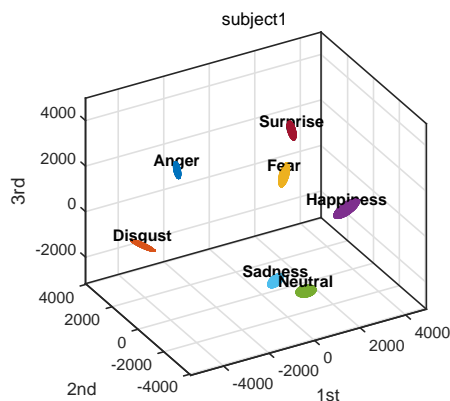


図 1: 被験者 1

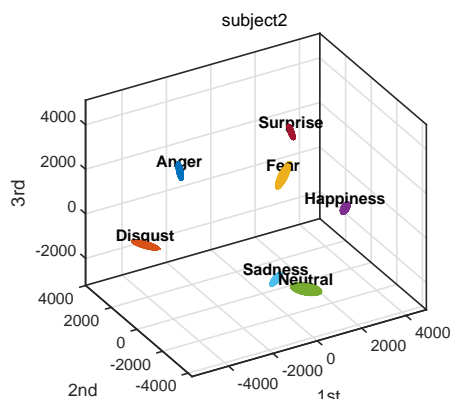


図 2: 被験者 2

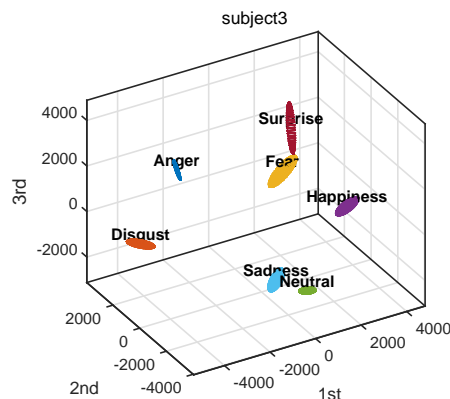


図 3: 被験者 3

以上の結果より, それぞれの楕円は基本的に同じ方向の傾きを持ち, 大きさに関して個人差が現れることがわかる。また, 表情の変化に鈍く, 閾値が非常に大きくなってしまいう楕円には方向に関して傾向を得ることができなかった。これは, 1 楕円につき 6 方向の測定点のみしか得ることができず, さらに方向は均等ではないため, 楕円の推定誤差の影響であると考えられる。測地線を求めるためには 7 楕円では少なく, さらに 7 楕円は PCA によって得られる表情画像座標の頂点に当たる箇所であり, 幾何学的内部構造を正確に表すことは難しい。そこで, 精度向上のため測定方向の増加と内部構造の幾何学的構造解明のため楕円数の増加を行なった実験を設計した。

4.2 23 表情弁別楕円の測定

楕円の推定精度向上と内部構造の幾何学的構造解明のため, 被験者 1 名に対して 23 楕円を測定する。7 表情の組み合わせでは得られる表情数が少ないため, 眉をあげるや口角をあげるなどの表情の最小単位である AU 画像を含めてモーフィングを行う。表情刺激は Bosphorus Database に含まれる 7 表情と AU21 種の画像を用いて, 全ての組み合わせでモーフィングをした結果, 57844 枚の表情画像を作成した。

また本実験では 23 点の楕円を求めるために 2233 点の測定点を求めている。なお, 2233 点の測定点を求めるための実験時間は測定中の休憩時間を含めて 21 日程度である。図 4 に PCA の第 1-2 主成分による 2 次元表情画像空間における表情弁別楕円を示す。

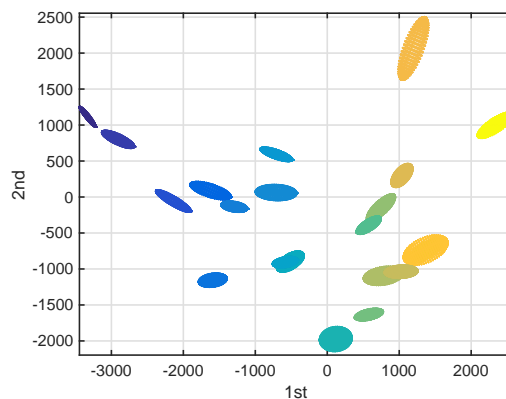


図 4: 1-2 主成分

以上より, 表情画像空間の内部構造を得ることができた。これらの楕円は, 向きと形状に明らかな規則性が存在するため, 表情空間の内在幾何学の構造を表していると思われる。表情画像空間の次元に関してはさらなる検証が必要であるが, 表情画像空間は画像空間の部分多様体であり, PCA による 1 から 3 までの主成分 (第 1, 2, 3 固有ベクトル) 部分空間におけるリーマン空間としての特徴を表していると考えられる。そのため, それぞれの主成分方向へ射影し, 2 次元におけるリーマン正規座標系を構築した。そして, リーマン空間における計量である楕円をユークリッド空間へ写像した。

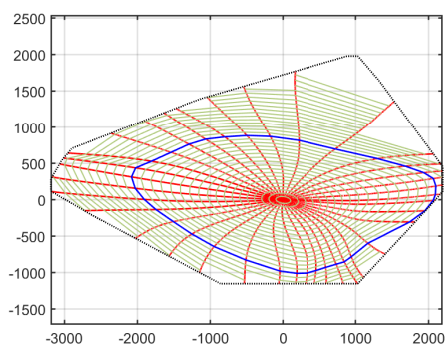


図 5: リーマン正規座標系

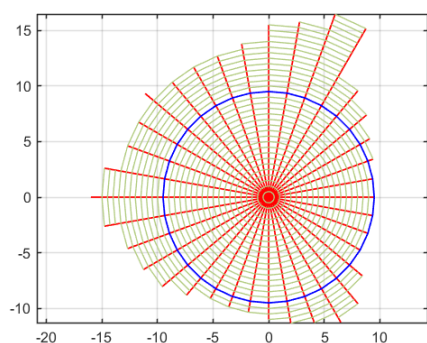


図 6: リーマン正規座標系に対応する極座標系

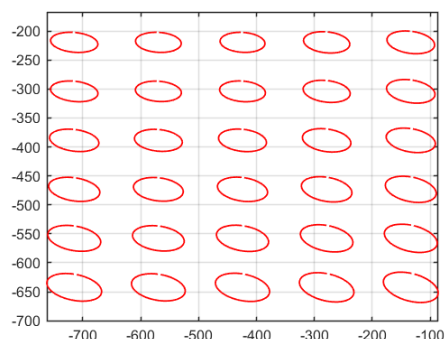


図 7: リーマン空間における楕円

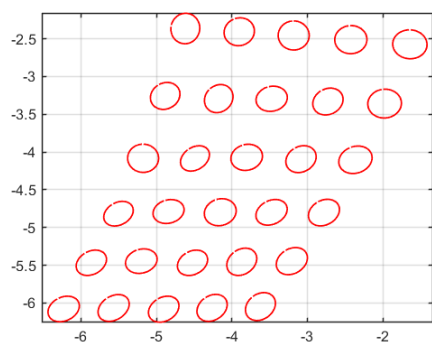


図 8: ユークリッド空間における楕円

リーマン正規座標系 (図 5) とそのリーマン正規座標系に対応する極座標系 (図 6) より, 表情画像空間の歪みによって直線と最短曲線が乖離していることがわかる. また図 7, 8 で示されるように, それぞれのリーマン空間における楕円がユークリッド空間上で単位円へと近づくことがわかる. リーマン正規座標系の構築により導かれたユークリッド空間では主観知覚特性と幾何学特性と一致させることができた.

5 結論と今後の課題

まず, 7 名の被験者において 7 表情弁別閾値楕円の推定を行ったが, これは被験者の認知を可視化し比較を行う手段を示したとも言える. 被験者の個人差は提示した 3 名のような一般的な結果と, ある数名の被験者において特定の表情に対して大きい閾値が得られるという現象を得た. 被験者の個人差は人によっては大きく存在すると考えられ, それぞれの個人ごとの表情弁別閾値から得られる知覚特性の特徴比較をさらに検討することが可能である.

次に, リーマン空間上の表情画像の座標値をユークリッド空間へ写像した. このユークリッド空間では表情弁別楕円は単位円となり測地線が直線となるため, 距離が知覚的差異と同等となる. 座標値での定量表現を行うことが出来る表情空間の構築法を示したが, 表情を表現するにあたっての適切な表情空間の次元数はわかっておらず, 表情空間の部分空間における局所特性となっている. 本手法は多次元においても用いることが可能であるが, 今後, 表情空間全般におけるリーマン計量の構築と, 表情解析などへの応用分野に本手法を適用することが課題である.

謝辞

本研究を進めるにあたり, 適切な御指導, 御助言, 御検討を頂いた中央大学 理工学部 趙 晋輝 教授, Linköping 大学 Reiner Lenz 教授, 工学院大学 情報学部 蒲池 みゆき 教授に深く感謝いたします.

関連発表

1. 炭矢 瑠奈, Reiner Lenz, 趙 晋輝, “顔表情認知における弁別閾値を用いた表情空間の構築とその意義に関する考察”, HCG シンポジウム 2017, 2017 年 12 月 14 日.
2. 炭矢 瑠奈, Reiner Lenz, 趙 晋輝, “表情空間におけるリーマン正規座標系の構築”, ヒューマン情報処理研究会, 2018 年 3 月 4 日 (発表予定).
3. Runa Sumiya, Reiner Lenz, Jinhui Chao, “Measurement of JND Thresholds and Riemannian Geometry in Facial Expression Space”, Human-Computer Interaction International Conference 2018 (発表予定)

参考文献

- [1] Ekman P., Friesen W.V., Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement, Palo Alto: Consulting Psychologists Press, 1978.
- [2] ゲシャイダー, G. A., 宮岡徹 (監訳), “心理物理学 方法・理論・応用 上巻”, 北大路書房 (2003).