研究論文：論文

鼻部皮膚温度画像の局所フラクタル次元解析による主観的理解度の推定

野澤昭雄*, 内田雅文**, 田中久弥***, 井出英人*

*青山学院大学, **電気通信大学, ***工学院大学

ESTIMATION OF SUBJECTIVE UNDERSTANDING LEVEL BY LOCAL FRACTAL DIMENSION ANALYSIS OF NASAL SKIN THERMAL IMAGE

Akio NOZAWA*, Masafumi UCHIDA**, Hisaya TANAKA***, Hideto IDE*

*Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara, Kanagawa, Japan

**The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, Japan

***Kogakuin University, 1-24-2 Nishi-Shinjuku, Shinjuku, Tokyo, Japan

Abstract: The purpose of this study is to estimate the information understanding level through the nasal skin thermal image which reflects the human emotion. The information understanding in communication is supposed to be concerned with the emotion. The local fractal dimension analysis was applied to the nasal skin thermal image. Based on the relationship among the local fractal dimension and the subjective understanding measured in English listening tests, the information understanding level has been estimated by the neural network. As a result, the estimated understanding level has been obviously classified in two groups according to the difficulty of the test.

Keywords: Understanding level, Nasal Skin Thermal Image, Local Fractal Dimension

1. はじめに

自分の話を相手が理解しているかどうかを知ることは、円滑なコミュニケーションをもたらす。話の内容を理解しているようならば話を先に進めてよいと判断できる。逆に、理解していないようならば、改めて内容を噛み砕いて説明することが必要であると判断できる。超高齢化社会を迎え、寝たきり等の要介護者数が増加している現在、このような「伝達情報に対する理解度」としての「理解度」を定量的に判断する機能を具備するコミュニケーション支援機器の実現が望まれている。コミュニケーション支援機器は介護者と被介護者の円滑なコミュニケーションを助けるだけでなく、両者の精神的負担を軽減し生活クオリティ (QOL: Quality Of Life) の向上をもたらすことが期待される。

また、近年コンピュータを用いた学習方法として、いわゆる e-learning が注目されている。e-learning の利点は、時間や場所を限定せず学習者が能動的に学習可能な点にある。しかしながら、学習者のレベルに合わせた課題を選択し実時間で提示することは困難であり、対人学習の完全な代替手法とはなり得ていない。特に、語学のリスニング学習においては学習者のリスニング能力に合わせた発話スピードで課題を与えなければ効果がないばかりでなく、学習意欲を減退させる可能性がある。リスニング能力を「理解度」として定量的かつ実時間で評価できれば、きめ細かな学習課題を与えることが可能となる。

このような理解度の定量的把握ニーズに対して、人間同士のコミュニケーションにおける顔表情の重要性に着目し、マン・マシンインタフェースへの応用を目的とした顔表情による理解度推定に関する研究が盛んである(1)。しかし、筋萎縮

性側策硬化症 (ALS: Amyotrophic Lateral Sclerosis) 等の疾病に伴う顔面麻痺・顔面痙攣患者の顔表情は、可視画像による表情認識手法で読み取ることは不可能である。また、個人の性格によっては、心理状態が明確に表情に現われるとも限らず、表情認識に代わる理解度推定方法が望まれている。

我々はこれまで赤外線サーモグラフィ装置により測定した顔面熱画像による情動の推定方法について検討してきた。特に鼻部に着目し、鼻部周辺熱画像の局所フラクタル次元と覚醒水準の相関を見出した(2, 3)。また、鼻部周辺皮膚温の時間変化量を入力としたニューラルネットワークにより快不快状態を推定可能であることを示した(5, 6)。

情動とは一時的な激しい感情の動きで、自律神経系や内分泌などの身体的変化を伴う。情動を引き起こす因子は情動ストレスと呼ばれ、情動ストレスに応じた生体反応が全身に発現する。特に血流量は、交感神経系の血管収縮作用を中心とした自律神経系活動により変化が生じる。鼻部周辺部には、毛細血管の血流量を調整する動静脈吻合血管 (AVA) が皮膚と鼻骨のわずかな隙間に集中的に存在する。皮膚温は血流量に依存するため、情動ストレスによる心理状態が鼻部皮膚温に顕著にあらわれる。特に快状態推移時には鼻部皮膚温が上昇し、不快状態推移時には下降することが知られている。また、鼻部熱画像の局所フラクタル次元と覚醒度には相関があり、覚醒時には鼻部熱画像の局所フラクタル次元が増加し、覚醒の低下に伴い減少することが確認されている(4)。

一般に、人間は伝達された情報が「理解できない」「わからない」場合には、不安、恐怖、緊張、焦燥、退屈等の情動が誘発される。特にテスト等の課題を通じて情報を与えられた場合には、情報の理解度が自らの利害に関わるためこの傾向

図 1：実験装置の構成

図 2：問題提示と顔面熱画像測定スケジュール

は顕著である。また、日常使用していない外国語を聞き取る等「理解できない」状況に対する予期不安が大きい場合は、実際の理解度がより大きく情動に表れると予測される(7)。そこで、このような「理解できない」状況自体を情動ストレスと見做せば、理解度は情動ストレスと結び付けて考えることができ、理解度に起因する生体反応が鼻部熱画像に現われることが推測される。本研究は、この理解度と鼻部熱画像の状態変化の相関に基づく全く新しい理解度の推定手法の確立を目的とする。研究では、一般的な英語テストである英検リスニングテストを理解課題として与える(8, 9)。英検リスニングテストには様々な形式のテストが含まれるが、ある状況における対話文とそれに関連する質問文を聞き取り、正解を4つの選択肢から選ぶ対話文応答問題を用いる。対話文と質問文を区別せず提示された英語全てに対する内容の主観的な理解度を推定の対象とする。このような形式のテストは、同じ内容を日本語で聞き取れば論理的に回答困難な問題が含まれることがほとんどない。したがって、主観的な理解度は純粋に英語が聞き取れているかどうか、すなわち、会話の内容を理解できているかどうかを表すことになる。また、テスト形式は集中力や緊張感を持続することが比較的容易であるため実験には好都合である。本研究で使用する赤外線サーモグラフィ装置は、血流量の変化に起因する人体からの放射熱を非接触に計測することが可能であり、計測が容易かつ、被験者に与えるストレスが比較的少ないという利点がある。また、

図 3：単位領域の画像温度面を被覆する立方体

自律神経系の血管収縮作用に伴う皮膚温度画像を利用するため、障害の有無などの身体的状態に関わらず応用可能である。さらに、個人の性格による身体的な感情表出の程度に依存せず理解度を推定可能である点が、表情や身振り手振り等に基づく手法と比較して優れている。

本稿では、鼻部熱画像に対する局所フラクタル次元解析により特徴抽出を行い、主観的な理解度を目的変数、局所フラクタル次元を説明変数として学習させた階層型ニューラルネットワークを用いて主観的な理解度を推定した。階層型ニューラルネットワークによる推定モデルは、非線形特性を有する多様な生体信号パターンの分類に有効であり、論理的説明付けは困難ながらも目的変数に倣った実際的な結果を得ることができる点で本研究の目的に合致する。結果として、課題の難易度により明確に分別された推定理解度が得られるとともに、鼻部熱画像の特徴を表す局所フラクタル次元が被験者の個人性に依存しない理解度推定要因である可能性が示され、提案手法の有効性を確認したので報告する。

2. 主観的難易度の推定

2.1. 熱画像の測定方法

熱画像の測定は測定機器に対する放射ノイズの影響を低減するために、電磁シールドルーム(幅 3.8m×奥行き 3.1m×高さ 3.2m)で行う。室温は $25.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 、照度は約 200lx、室内は無風とする。実験装置の構成を図 1 に示す。被験者の鼻尖から水平距離 1.0m の位置に赤外線サーモグラフィ装置(NEC 三栄製 TH3102)を設置する。本装置の熱画像サイズは 255×239 pixel、温度分解能は 0.08°C である。皮膚放射率は $\epsilon = 0.98$ とする。被験者の両側から 0.50m の位置にステレオスピーカ(ELCY 電機製 LCC-M3)を配置する。

以下の手順に従い顔面熱画像の測定を行う。測定環境への慣れを考慮し被験者には座位開眼状態で3分間安静にさせた後、英検の対話文応答問題を課題として与える。課題は難易度の異なる easy 課題と difficult 課題の2種類とし、easy 課

図 4：局所フラクタル次元の時間推移（被験者 A, easy 課題）

図 5：局所フラクタル次元の時間推移（被験者 A, difficult 課題）

題は英検 3 級レベル、difficult 課題は英検 2 級レベルの各々 10 題の問題から構成される。各課題の問題提示と顔面熱画像測定のスケジュールを図 2 に示す。課題の提示開始と同時に熱画像測定を開始し、課題終了まで 20sec 毎に顔面熱画像を取得する。測定中、被験者の姿勢は座位とし頭部を動かさないよう留意させる。課題に従い被験者は、対話文とそれに関連する質問文を聞き取り、予め解答用紙に記された 4 つの選択肢から問題に対して最も適切なものを選び○印を筆記記録する。さらに各問題の解答後すぐに対話文と質問文を区別せず提示された英語全てに対する理解度を「理解している」を 1、「理解していない」を 0 とした Visual Analogue Scale（以下 VAS と記す）に記録する。VAS は、対を成す語句を両端に配置したスケール上のマーク位置により、被験者の主観的な感覚や感情を測定することができる。一定の情動ストレスに対する反応であっても主観的な個人差が存在し、理解度を絶対的に定量化することは困難である。VAS を用いることで、主観的な理解度を測定することが可能となる。問題への解答と VAS への記録を含めた解答猶予時間は各問題につき 10sec、解答猶予時間中は無音状態とする。ただし、課題の性質上、難易度により課題の所要時間が異なり、解答猶予時間を含めて easy 課題は 280sec、difficult 課題は 340sec である。従って、測定される顔面熱画像は easy 課題が 15 枚、difficult 課題が 18 枚となる。また、測定結果に対する相対的な影響を避けるため両課題に対する測定は同日に行わないようにする。なお、測定が円滑に正しく行われるように被験者にはあらかじめ実験の趣旨や測定手順などを詳しく説明しておく。

2.2. 局所フラクタル次元解析による特徴抽出

フラクタル次元とは図形や現象の自己相似性や複雑性を定量的に表す尺度で、一般に非整数値をとる。フラクタル次元の値が大きくなるほど、その図形は複雑であるといえる(10, 11)。血管網は液体やガスの分配と再収集の効率を向上するためにフラクタル的構造を成している。そこで本稿では測定し

た顔面熱画像のうち特に血流の状態を反映している鼻部熱画像に対して局所フラクタル次元解析を適用する。局所フラクタル次元を解析スケール変位に伴う画像温度面の起伏の複雑さを表す尺度として温度分布を定量化する。

鼻部熱画像に対する局所フラクタル次元解析の手順を以下に示す。取得した顔面熱画像から、鼻中隔前縁部下端を下辺とし鼻梁を上辺と下辺の中点を結ぶ線と同一とするような 35×50 pixel の方形領域を鼻部熱画像として切り出し、解析部位とする。この解析部位に対して $r \times r$ pixel を単位領域とすると、図 3 のような単位領域の温度面を被覆する一辺 r の立方体の個数 $n(r)$ は、次式で表される。

$$n(r) = \text{floor} \left\{ \frac{\max(I_i) - \min(I_i)}{r} \right\} + 1$$

ここで、 floor は切捨てによる整数化を表し、 I_i ($i=1, 2, 3, 4$) は単位領域 4 隅での温度値を赤外線サーモグラフィ装置の温度分解能で割った値である。また、 $\max(I_i)$ 、 $\min(I_i)$ は各々 I_i の最大値、最小値を表す。解析部位すべての領域で求めた $n(r)$ に対して平均値が $\bar{n}(r)$ であるとき、解析部位の温度面を一辺 r pixel の立方体で被覆するときに必要な個数 $M(r)$ は次の式のように表される。

$$N(r) = \bar{n}(r) \frac{A}{r^2}$$

A は解析部位の面積である。解析スケール r を変化させて、 $\log r$ vs. $\log M(r)$ をプロットしたときに得られる回帰直線の傾きの大きさがフラクタル次元となる。しかし、実際に測定された熱画像において自己相似性を完全に満足することは少ない。そこで、各スケールの近傍においてのみ自己相似性を

満足していると仮定し、微小区間の回帰直線の傾き $D(r)$ を局所フラクタル次元として導入する。

$$D(r) = -\frac{d \log N(r)}{d \log r}$$

本研究における局所フラクタル次元の解析スケール r の範囲は $2 \leq r \leq 33$ である。

局所フラクタル次元解析結果の一例として、被験者 A の easy 課題および difficult 課題遂行時の鼻部熱画像から求めた局所フラクタル次元の時間推移を図 4 および図 5 に示す。x 軸は解析スケール r , y 軸は時刻, z 軸は局所フラクタル次元を表す。鼻部熱画像データの温度値を高さと見立てた三次元的データとして解析しているため、その局所フラクタル次元は 2~3 を中心に表れる。解析スケール r が比較的小さいときには局所フラクタル次元は 2.4 付近であるが、 r が大きくなるにつれて、局所フラクタル次元が変動するという傾向が見てとれる。

2.3. ニューラルネットワークによる理解度の推定

測定された一連の熱画像に対する局所フラクタル次元解析の結果、解析スケール r 毎に時系列の局所フラクタル次元値が得られる。解析スケール r における時系列局所フラクタル次元値を $D[r;n]$ とする。解析スケール $r=2, 3, \dots, 33$ である。 n は時系列上のサンプル点を表す。サンプル点数は、easy 課題が 15pt, difficult 課題が 18pt であるため、easy 課題では $r=0, 1, \dots, 14$, difficult 課題では $r=0, 1, \dots, 17$ である。一方、VAS により測定された主観的な理解度を $u[d]$ と表す。ただし、 t は問題毎の VAS 測定時刻を表す離散値であり、easy 課題の場合は $t=\{25, 50, 75, 103, 128, 153, 180, 216, 245, 280\}$ sec, difficult 課題の場合は $t=\{38, 76, 108, 141, 176, 211, 243, 277, 308, 340\}$ sec である。easy 課題および difficult 課題各々の $u[d]$ において、 $20n \leq t$ となる最も小さい t を $t_{\min}$ とするとき、 $u[t_{\min}]$ を n における主観的な理解度と仮定し $U[n]$ と記す。 $U[n]$ を主観理解度と定義する。

以下に理解度の推定方法について述べる。複数の被験者のうち 1 名を被推定被験者、その他の被験者をモデル被験者とし、モデル被験者の測定データから作成した理解度推定モデルを用いて被推定被験者の理解度の推定値を得る。本稿では入力層、中間層、出力層の 3 層から成る階層型ニューラルネットワークを用いて理解度推定モデルを構成した。入力層のユニット数は解析スケール r の種類に対応して 32 ユニット、中間層は 16 ユニット、出力層は 1 ユニットとした。全モデル被験者の easy 課題および difficult 課題実験により得られた全ての主観理解度 $U[n]$ を目的変数、解析スケール r の局所フラクタル次元 $D[r;n]$ を説明変数として誤差逆伝搬法を用いてニューラルネットワークの学習を行う。学習後のニューラルネットワークは、入力 $x[r;n]$ に対して 0 から 1 の実数値 $NN(x[r;n])$ を出力する。モデル被験者数が m の場合、学習データ数は $m \times (15+18)$ となる。また、予め各説明変数は平均 0,

図 6：正解率と主観理解度

図 7：正解率と推定理解度

分散 1 に規格化しておく。被推定被験者の easy 課題または difficult 課題遂行時の測定データから得た時系列局所フラクタル次元を $D^*[r;n]$, 主観理解度を $U^*[n]$ とするとき、 $U_{\text{est}}[n]$ を被推定被験者の当該課題における推定理解度、 $e[n]$ を推定誤差と定義する。モデル被験者と被推定被験者の全ての組合について推定を行い、各被験者間および課題による差異について比較検討を行う。

$$U_{\text{est}}[n] = NN(D^*[r;n])$$

$$e[n] = |U^*[n] - U_{\text{est}}[n]|$$

3. 結果および考察

被験者は 21 歳~22 歳の健常成人 5 名 (A, B, C, D, E)。図 6 に各被験者の各課題における正解率 CAR および、主観理解度の n に対する平均及び標準偏差 $\bar{U}[n] \pm \sigma$ を、図 7 に CAR および、推定理解度の n に対する平均及び標準偏差 $\bar{U}_{\text{est}}[n] \pm \sigma$ を示す。また、図 8 に各被験者の主観理解度 $U^*[n]$ と推定理解度 $U_{\text{est}}[n]$ の関係を示す。図 9 に主観理解度、推定理解度の n に対する平均ならびに標準偏差 $\bar{U}[n] \pm \sigma$,

図 8：主観理解度と推定理解度の関係

図 9：主観理解度と推定理解度の平均及び偏差

$\bar{U}_{est}[n] \pm \sigma$ を示す。同じく図 10 に推定誤差の n に対する平均と標準偏差 $\bar{e}[n] \pm \sigma$ を示す。

本実験の被験者は同じ理工系大学の 4 年生である。被験者の選定にあたりその英語リスニング能力に関して特別な配慮は行わなかったが、図 6 に示す正解率 CAR および主観理解度 $\bar{U}[n]$ において課題による傾向と差異が得られたことは難易度設定が適切であったことを示すとともに、実験の妥当性を示す意味で重要である。また、主観理解度 $\bar{U}[n]$ と正解率 CAR が必ずしも一致していない点で、理解度の主観性を検討する意義が示されたと考える。図 8 より、時系列 n 毎の推定において主観理解度 $U^*[n]$ と推定理解度 $U_{est}[n]$ の上昇下降傾向に類似性が認められる。また図 7 および図 9 より、正解

図 10：推定誤差の平均および偏差

率や主観理解度 $\bar{U}[n]$ の個人差に関わらず、推定理解度 $\bar{U}_{est}[n]$ は 4 名の被験者において、easy 課題の場合 0.66～0.84 程度、difficult 課題の場合 0.17～0.31 程度に集中し、明確に分別されていることは注目に値する。したがって、本手法により求められた理解度推定モデルは、主観理解度の傾向に基づく課題の相対的な難易度を説明していると考えられる。また、主観理解度 $U^*[n]$ の偏差に被験者と課題による一定の傾向は認められないにもかかわらず、推定理解度 $U_{est}[n]$ の偏差は、easy 課題において大きく、difficult 課題において小さいことは興味深い。これは、課題による局所フラクタル次元の変動の大小に由来すると考えられる。したがって、局所フラクタル次元の変動の起因となる鼻部熱画像の複雑さの変動、すなわち、鼻部皮下血管血流パターン複雑さの変動の幅が課題難易度により変化している可能性が示唆される。さらに、課題難易度による生理心理状態の変動量の相違も類推される。一方、図 10 に示す平均推定誤差 $\bar{e}[n]$ においても、easy 課題では $\bar{e}[n] = 0.244 \sim 0.506$ に対して、difficult 課題では $\bar{e}[n] = 0.128 \sim 0.390$ と平均推定誤差が比較的小さく、推定理解度 $\bar{U}_{est}[n]$ の偏差と同様の傾向を読み取ることができる。

4. まとめ

本稿では、鼻部熱画像の局所フラクタル次元による理解度の推定を行った。4 名のモデル被験者の鼻部熱画像から求めた局所フラクタル次元を説明変数、難易度の異なる 2 種類の英語リスニングテストに対する主観理解度を目的変数として階層型ニューラルネットワークを学習させ、1 名の被推定被験者の主観理解度をニューラルネットワークを用いて推定した。結果、全ての被推定被験者において課題の難易度により明確に分別された推定理解度が得られ本手法の有効性が示された。また、鼻部熱画像の特徴を表す局所フラクタル次元が被験者の個人性に依存しない理解度推定要因である可能性が示された。今後は、教育や福祉分野への応用に向けて、年齢、性別などを考慮してより多くの被験者に対する検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 三村敦, 萩原将文: 表情から得られる理解度の推定システム, 電気学会論文誌, 120-C, 2, 273-278, 2000
- 2) 田中久弥, 井出英人, 長嶋祐二: 鼻部皮膚温と覚醒水準解析による感情推定の試み, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 1, 4, 51-56, 1999
- 3) 島田賢, 田中久弥, 井出英人: 顔面皮膚温の局所フラクタル次元解析による覚醒水準の評価法, 電気学会論文誌, 120-C, 10, 1429-1434, 2000
- 4) 南雲和幸, 善住秀行, 野澤昭雄, 井出英人, 田中久弥: 顔面熱画像を用いた一過性覚醒評価, 第19回センシングフォーラム資料, 95-98, 2002
- 5) 善住秀行, 南雲和幸, 野澤昭雄, 田中久弥, 井出英人: 鼻部熱画像を用いた快-不快状態の推定, 情報科学技術フォーラム講演論文集, 3, 459-460, 2002
- 6) 善住秀行, 野澤昭雄, 田中久弥, 井出英人: 鼻部皮膚温変化による快-不快状態の推定, 電気学会論文誌, 124-C, 1, 213-214, 2004
- 7) ドライデン, W., レントウル, R., 丹野義彦監訳: 認知臨床心理学入門-認知行動アプローチの実践的理解のために-, 東京大学出版会, 1996
- 8) 英検3級全問題集 CD 99年度版, 旺文社, 1999
- 9) 福田有美: 改訂版 こんど絶対うかりたい人の[英検2級], ナガセ, 1997
- 10) 中元淳, 山下博, 金子博: MTF フラクタル次元による印刷濃度むらの定量的評価法, 電子情報通信学会論文誌, J83-D-II, 4, 1082-1089, 2000
- 11) 石村貞夫, 石村園子: フラクタル数学, 東京図書, 1990