

感性工学的手法に基づく触感予測モデルの構築と評価 —— 布地触感予測の実現 ——

正員 山崎 陽一^{*a)} 正員 飛谷 謙介^{*,**} 非会員 谿 雄祐^{*,***}
非会員 井村 誠孝^{*} 上級会員 亀井 光仁^{*} 正員 長田 典子^{*}

Development and Evaluation of a Prediction Model for Tactile Perception based on Kansei Engineering —— A Case Study of Tactile Prediction for Fabrics ——

Yoichi Yamazaki^{*a)}, Member, Kensuke Tobitani^{*,**}, Member, Yusuke Tani^{*,***}, Non-member,
Masataka Imura^{*}, Non-member, Mitsuhiro Kamei^{*}, Senior Member, Noriko Nagata^{*}, Member

(2021 年 3 月 24 日受付, 2021 年 12 月 11 日再受付)

In this paper, we propose a method for indexing, analyzing, and evaluating of the stroking movement based on vibration features as a measurement method that mimics the response characteristics of finger associated with active touch. We developed the tactile information acquisition system to obtain the vibration information during stroking. Moreover, the verification experiment was performed using 13 types of cloth selected from the texture sample set. As the result, the two factors (roughness and hardness), which constitute the tactile sensation of the fabric, were extracted. It was also confirmed that the frequency bands of the vibration features extracted during active touch corresponded to the frequency sensitivity characteristics of the four sensory receptors inside the skin. Furthermore, we evaluated the predicted and measured values of each factor, and confirmed that the proposed method can construct a model that accurately predicts the tactile sensation by measuring the vibration of the interaction force on the contact surface. This method realizes the tactile evaluation for a various materials and physical quantities. Then, the method will contribute to the realization of quantitative evaluation of sensibility, which is the key technology to product design based on sensibility value.

キーワード : 触感, 感性工学, 周波数解析, 主成分分析, 重回帰分析

Keywords : tactile perception, kansei engineering, frequency analysis, principal component analysis, multiple regression

a) Correspondence to: Yoichi Yamazaki. E-mail: y-yamazaki@kwansei.ac.jp

^{*} 関西学院大学 理工学部/感性価値創造インスティテュート
〒669-1337 兵庫県三田市学園 2-1
School of Science and Technology / Kwansei Gakuin Institute
of Kansei Value Creation, Kwansei Gakuin University
2-1, Gakuen, Sanda, Hyogo 669-1337, Japan

^{**} 長崎県立大学 情報システム学部
〒851-2195 長崎県西彼杵郡長与町まなび野 1-1-1
Faculty of Information System of Information, The University
of Nagasaki
1-1-1, Manabino, Nagayo, Nishisonogi, Nagasaki 851-2195,
Japan

^{***} 北陸大学 国際コミュニケーション学部
〒920-1180 石川県金沢市太陽が丘 1-1
Faculty of International Communication, Hokuriku University
1-1, Taiyogaoka, Kanazawa, Ishikawa 920-1180, Japan

1. はじめに

感性工学は、感性の働きに注目することで、新たな価値をつくり、価値を交換することによって、産業・経済・文化の発展を支える科学技術⁽¹⁾である。具体的には、モノや設計パラメータにおける物理要因と、それらが喚起する感性的反応(価値, 感情, 印象など)を計測し、得られた感度量を真値 (grandtruth) として物理量との関係をモデル化することによって、物理要因により喚起される価値や印象を定量化・可視化し、逆に価値や印象をもたらす物理要因を求める技術である。例えば感性的質感と呼ばれる「しっとりした」や「高級感のある」といった印象がどのような物理的特性と関連し、どのような価値に結びつくかを定量的に評価する研究が盛んに行われている⁽²⁾⁽³⁾。定量評価によっ

て顕在化するモノやサービスの価値は、感性価値として今後の産業の競争力を高める重要な要素と位置づけられている⁽⁴⁾。とくに、感性工学分野でのこれまでの研究が視覚、聴覚中心であったのに対し^{(5)~(8)}、最近、触覚に関わる感性価値への期待が急速に高まっている。

触感はいまだ、主に繊維・化粧品業界などにおいて定量評価への取り組みが行われてきた。例えば KES（Kawabata Evaluation System）で知られる触感評価システム⁽⁹⁾では、触覚と結び付きの強い物性を機械試験的に計測することで触感評価を実現しており、多くの計測例が報告されている^{(10)~(13)}。また、バイオミメティックの観点から精緻な指モデルを作成し機械試験に適用する手法⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、指と物体の接触面に発生する作用力⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾、指幅の変形⁽¹⁸⁾、指を伝わる振動⁽¹⁹⁾、などの特定の物理量を追求した手法なども報告されている。さらには、計測された物理量と指先が物体に触れることで喚起される触感を結びつける研究も進められている⁽¹⁴⁾⁽¹⁷⁾⁽²⁰⁾。

しかしながら触感とは、自らが手指を能動的に動かすことで対象物と指の相対的な変形等から刺激を受け、高次の情報処理過程を経て感じる主観的な感性量である。触感を定量的に評価するためには、こうした自然な触察行動において、対象物と指の相対的な変形に関する物理量と、その相対的な変形から刺激を受けて感じる感性量との間の関係を明らかにする必要があるが、まだ十分な研究は行われていない。

そこで本論文では、将来的な産業分野において触感に基づく製品開発で使用する汎用評価設備構築を目指し、人が対象物を撫でた際の対象物と指の相対的な変形を計測する触感情報計測装置を開発し、同時に感性工学的手法に基づき主観的な触感を指標化し、これら物理量と感性量の関係を分析・評価することで、能動的な触察行動に基づく人の触感予測を可能とするモデル構築手法を提案する。

本研究では対象物と指の相対的な変形を時間的な変形（振動）として扱う。指の皮膚内部にはメルケル細胞、マイスナー小体、パチニ小体・ルフィニ終末の4受容器が存在し、指が物体表面を撫でた際に生ずる振動をおおよそ 200 [Hz] までの周波数帯域で、それぞれ異なる受容野、応答特性で検出するとされており⁽²¹⁾、振動情報が触感形成において主要な要素であることが分かっている。実験心理学分野における基礎的な検討を通して振動情報が材質の差異を知覚する上で重要な情報であることが示されてきた^{(22)~(24)}。一方で、自然な触察行動下での計測に基づいた定量的な触感と振動情報の関係については十分に明らかにされていない。これに対し本提案手法の貢献は以下の3つである。1つ目は、本研究で開発した触感情報計測装置では、人が対象物を撫でた際の振動情報を、摩擦方向と押し込み方向に分けて同時に取得することにより、自然な触察行動において対象物と指の相互作用力の分析を可能としたことである。2つ目は感性工学的手法を用いることで、主観的な触感評価の指標化・定量化を可能としたことである。3つ目は物理量と感性量の関係性をモデル化することによって、感性量に寄与する周波数帯域が明らかになり、その結果、指の触感受容の応

答特性を模倣した計測装置の構成を可能にしたことである。

本論文では、布地の触感評価を対象として、まず主観評価に基づく触感の指標化・定量化を行い、次に触感情報計測装置による振動計測と特徴量の抽出を行い、最後に触感予測モデルを構築し、予測モデルの予測精度の観点から提案手法の妥当性を示す。

2. 主観評価に基づく触感の指標化・定量化

本章では、人が布地を撫でた時に布地が提供する触感を、主観評価によって指標化・定量化する手続きとその結果について示す。

〈2・1〉 主観評価実験

(1) 参加者 大学生及び大学院生計 20 名（男性 17 名、女性 3 名、平均年齢 22.4 歳±1.0 歳）が参加した。いずれの参加者も健康状態は良好で右手を利き手としていた。参加者は個室内で実験の内容について実験者より説明を受けた後に実験に参加することに同意し、同意書に署名した。また、この実験について関西学院大学人を対象とする行動学系研究倫理委員会の承認を受け行った。研究協力者は自由意志での参加であり、事前に実験責任者から口頭および書面で本研究の目的、内容および参加者の権利を十分に説明し、書面にて参加の同意を得ている。

(2) 実験刺激 実験刺激は、質感サンプルセット（竹井機械工業（株））⁽²⁵⁾から、8 号帆布（Sailcloth）、平デニム（Denim）、綿麻（Cotton linen）、ガーゼ（Gauze）、タオル（Towel）、フェルト（Felt）、フリース（Fleece）、スウェット（Sweat）、ビロード（Velvet）、シルク（Silk）の 10 種に、異方性を考慮し撫でる方向を変えた 3 種を加えた計 13 種の布を、それぞれ 10×10 [cm] の成形された金属板の上に貼り付けたものを用いた。全刺激の表面性状を撮影したものを一覧として Fig.1 に示す。

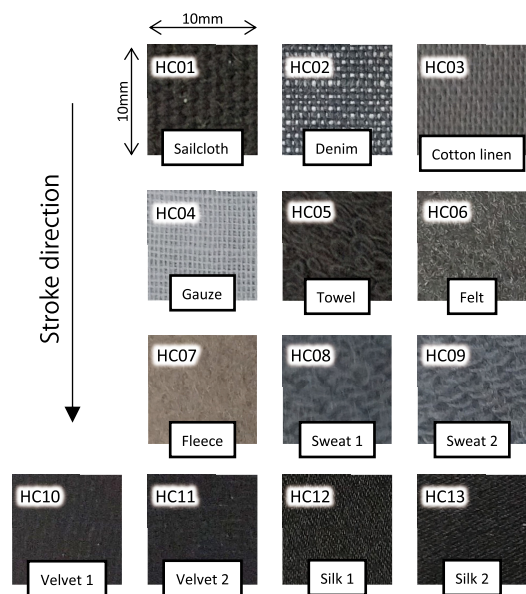


Fig. 1. Experimental stimuli.

Table 1. Results of subjective evaluation.

Impression word	Experimental Stimuli												
	HC01	HC02	HC03	HC04	HC05	HC06	HC07	HC08	HC09	HC10	HC11	HC12	HC13
温かい	2.4 ± 0.9	2.8 ± 1.0	2.5 ± 0.8	2.7 ± 0.9	3.7 ± 1.1	3.8 ± 0.9	4.6 ± 0.8	3.4 ± 1.0	3.3 ± 0.9	3.5 ± 0.9	3.8 ± 0.6	2.3 ± 1.0	2.6 ± 1.0
ひんやり	2.3 ± 1.1	2.7 ± 1.2	2.9 ± 1.0	2.7 ± 1.3	1.7 ± 0.7	1.8 ± 0.6	1.6 ± 0.8	1.8 ± 0.6	1.9 ± 0.6	2.5 ± 1.1	1.9 ± 0.3	3.5 ± 0.9	3.0 ± 1.3
サラサラ	2.2 ± 1.2	2.5 ± 0.9	3.4 ± 1.1	3.1 ± 1.2	2.7 ± 1.1	2.6 ± 0.9	3.9 ± 1.0	2.6 ± 0.9	3.0 ± 1.1	4.3 ± 0.7	3.9 ± 0.9	4.2 ± 1.2	4.0 ± 0.7
スベスベ	1.7 ± 1.0	2.1 ± 0.6	2.7 ± 1.0	3.0 ± 1.0	2.0 ± 0.8	2.2 ± 0.9	3.2 ± 1.2	2.2 ± 0.9	2.6 ± 1.2	3.6 ± 1.0	3.7 ± 1.0	4.5 ± 0.8	3.9 ± 0.9
ゴツゴツ	4.0 ± 1.0	3.5 ± 0.8	2.7 ± 1.1	1.9 ± 0.8	3.4 ± 1.2	3.1 ± 1.2	1.4 ± 0.6	3.3 ± 1.1	3.2 ± 1.2	1.5 ± 0.5	1.5 ± 0.5	1.4 ± 0.5	1.7 ± 0.9
ボコボコ	4.0 ± 1.2	4.0 ± 0.2	2.5 ± 1.1	2.2 ± 0.9	4.3 ± 0.6	3.5 ± 1.1	1.7 ± 0.8	4.0 ± 0.9	3.6 ± 0.9	1.5 ± 0.5	1.7 ± 0.7	1.4 ± 0.6	1.6 ± 0.7
かたい	4.2 ± 0.9	3.6 ± 0.9	3.2 ± 1.1	2.9 ± 1.1	2.6 ± 1.4	2.7 ± 1.3	1.3 ± 0.6	2.4 ± 1.4	2.7 ± 1.3	2.2 ± 1.0	2.1 ± 0.9	3.3 ± 1.0	3.4 ± 1.2
やわらかい	2.0 ± 0.9	2.7 ± 1.1	3.1 ± 1.0	3.2 ± 1.1	3.7 ± 1.2	3.7 ± 1.1	4.9 ± 0.4	3.8 ± 1.1	3.5 ± 1.1	4.4 ± 0.5	4.6 ± 0.5	3.2 ± 1.2	3.1 ± 1.1
滑らかな	1.6 ± 0.8	2.5 ± 1.1	3.4 ± 1.0	3.0 ± 1.2	2.3 ± 1.0	2.6 ± 1.3	4.0 ± 0.9	2.2 ± 1.1	2.4 ± 1.1	4.2 ± 0.6	3.7 ± 1.1	4.5 ± 0.8	4.2 ± 0.7
ザラザラ	4.3 ± 0.8	3.8 ± 0.9	3.3 ± 1.3	3.2 ± 1.1	3.7 ± 1.1	3.4 ± 1.2	1.8 ± 0.9	3.6 ± 1.2	3.8 ± 0.8	1.9 ± 0.8	2.5 ± 1.3	1.7 ± 1.0	2.2 ± 1.2
しっとり	1.8 ± 0.8	2.7 ± 1.0	3.0 ± 1.1	3.0 ± 1.0	2.5 ± 1.1	2.6 ± 1.2	3.9 ± 1.0	2.4 ± 1.0	2.8 ± 1.2	3.9 ± 1.1	4.2 ± 0.8	4.0 ± 1.0	3.9 ± 0.9
きめ細かい	2.5 ± 1.1	2.7 ± 0.9	3.5 ± 0.9	3.4 ± 0.9	1.9 ± 0.7	2.6 ± 1.1	3.8 ± 1.0	1.9 ± 1.0	2.4 ± 1.1	4.5 ± 0.6	4.3 ± 1.0	4.2 ± 0.9	3.8 ± 1.0

(3) 評価語 実験刺激の影響を適切に評価する手順として、まず人が実験刺激を撫でた際の印象を印象語として収集し、触感因子を代表かつ網羅する評価語を選定する必要がある。一方、触感を網羅的に表現する因子の抽出や評価語の選定については既に数多くの先行研究が報告されており、永野等はこれらの研究を調査することで、マクロ粗さ、ファイン粗さ、硬軟感、摩擦感、温冷感からなる5つの触感因子（材質感次元）を見出した⁽²⁶⁾。本研究では先行研究に基づき5つの触感因子と対応する評価語の中から、布地評価に適用可能な評価語を選定した。具体的には、一般材質で抽出されている「粗さ因子」、「凸凹因子」、「滑らか因子」の触感因子を代表する、「サラサラ」、「スベスベ」、「ゴツゴツ」、「ボコボコ」、「ザラザラ」、「しっとり」の6語⁽²⁷⁾、材質感を表現するマクロ粗さ、ファイン粗さ、硬軟感、摩擦感、温冷感の中から、既に採用した6語に含まれない温冷感、硬軟感を代表する「温かい」「ひんやり」「かたい」「やわらかい」の4語⁽²⁶⁾、および布地の摩擦評価研究において用いられた「滑らかな」「きめ細かい」の2語⁽²⁸⁾を合わせて12語の評価語を選定した。

(4) 手続き 実験は、個室において1名ずつ行った。参加者は練習として約1[N]の押込み力で、約5[cm/s]の速度で布を撫でた場合に適切な長さ表示になるように設定したインジケータを見ながら、適切な押込み力・速度の撫で方を習得した。触れ方を習得した参加者に、全13種類の布をブラインド環境下において撫でさせ、12語について当てはまるかといった観点から5件法により評価した。なお、布の提示順序が評価に与える影響を回避するため、提示順序は実験参加者ごとにランダム化した。また、室温が約22度の空調をした実験室に実験開始2時間前から布を置き布の温度が一定となるようにした。さらに、参加者は自己の判断にて必要に応じて実験中に休憩をとることができるようにした。

〈2・2〉 触感指標化・定量化のための因子抽出 実験刺激の印象の素点として、12の評価語それぞれに対する20名の評価の平均点及び標準偏差を算出した（Table 1 参照）。この平均点を布地触感の代表値として採用する。なお標準

Table 2. Factor loadings for the human tactile perception of fabrics.

Impression word	Factor 1 (Roughness)	Factor 2 (Hardness)
滑らかな	-0.99	0.03
サラサラ	-0.98	0.14
スベスベ	-0.98	-0.05
ボコボコ	0.98	-0.06
しっとり	-0.95	-0.13
ゴツゴツ	0.95	0.12
きめ細かい	-0.95	0.11
ザラザラ	0.94	0.14
ひんやり	-0.55	0.87
やわらかい	-0.37	-0.87
かたい	0.23	0.92
温かい	0.08	-0.97
Contribution rate[%]	67.0	29.8

偏差は概ね1程度であり個人差による主観評価への影響は20%程度であることが分かる。次に、印象に関する心理的構造を把握するために、素点に対する因子分析を実施した。因子分析では、因子抽出法は尤度法、回転は因子間相関を許容するプロマックス回転、因子数はカイザーガットマン基準により決定するものとして2因子を抽出した（Table 2 参照）。この時、2因子の累積寄与率は95.7%であり、実験刺激が提供する触感のほとんどを表現できていることが分かる。

抽出された第1因子と第2因子によって張られる因子空間上に全刺激を布置した結果をFig.2に示した。第1因子について見た場合、非常に粗い8号帆布（HC01）と表面が滑らかなシルク（HC12）が布置されている。また、「サラサラ」、「きめ細かい」、「ボコボコ」、「ゴツゴツ」、「ザラザラ」などの評価語が大きな負荷量を持つことから、粗さに関する因子であることが確認されFactor 1（Roughness）と表現した。また、第2因子は、「かたい」、「やわらかい」などの評価語が高い負荷量を示しており、硬さに対応する因子であるといえる。また、第2因子には「温かい」、「ひんやり」といった温冷感に関する評価語が含まれており、布地がもつ素材としての特質として、硬い素材が冷たく、柔らかい素材

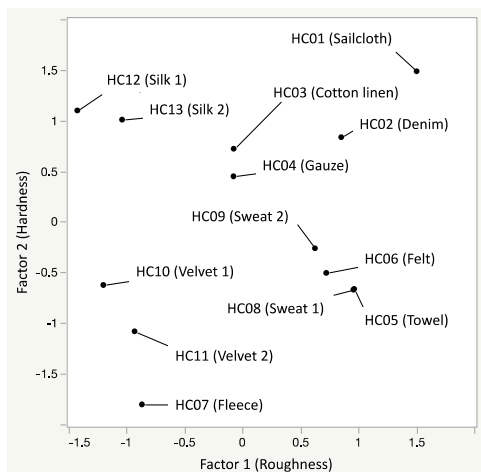


Fig. 2. Distribution of the stimuli in factor space of the human tactile perception.

が暖かく感じる傾向を持つことを示している。この傾向は、白土等による温感が硬さの印象に影響することを確認した実験において、指先から布への熱の移動しづらさを表す伝熱特性値として、シルク 4.2×10^2 [$W^{1/2} \cdot kJ^{1/2} / (m^2 K)$] に対して、デニム 4.2×10^2 [$W^{1/2} \cdot kJ^{1/2} / (m^2 K)$]、フェルト 1.3×10^3 [$W^{1/2} \cdot kJ^{1/2} / (m^2 K)$] が報告されており⁽²⁹⁾、Fig.2 より第2因子はその大小関係も良く表していることから、本論文でも温冷感を合わせて Factor 2 (Hardness) と表現した。

3. 振動計測と特徴量の抽出

本章では、前節において報告した触感を形成する「布地を撫でた際の振動の計測と特徴量抽出」について示す。

〈3・1〉 触感情報計測装置 サンプル表面を撫でた際に指の接触面に加わる2軸（垂直，水平方向）の力の振動情報を計測するために開発した触感情報計測装置の構造をFig.3に示す。この装置は、刺激試料を布置する台と、それを垂直及び水平方向から保持する振動板、そして振動板の歪を電気信号に変換するロードセルから構成され、水平・垂直方向に作用する摩擦力・押込み力を波形情報として計測可能である。なお、ロードセルから出力される信号は数mVと微弱であり、信号増幅器により増幅し、AD変換器を介してコンピュータ上に記録される。記録された信号は、1.02 [N]の負荷を加えた際の電圧値を基準とした較正係数により力の物理量に変換できる。

〈3・2〉 振動特徴量の抽出 指の皮膚内部に存在する4つの触覚受容器は3つの異なる振動周波数に対して感度を持ち、指全体でフィルタバンク様のセンサ構造を持つことが報告されている⁽³⁰⁾。

これは、振動情報が脳に伝達される以前に受容器が応答する振動周波数に対応した少数の要素に集約されることを意味しており、触感と振動の関係をモデル化する上で振動情報を集約的に表現することは有意であると考えられる。本論文においては、この振動情報の集約の過程を主成分分析によりモデル化する。手続きとしては、布を撫でた際の

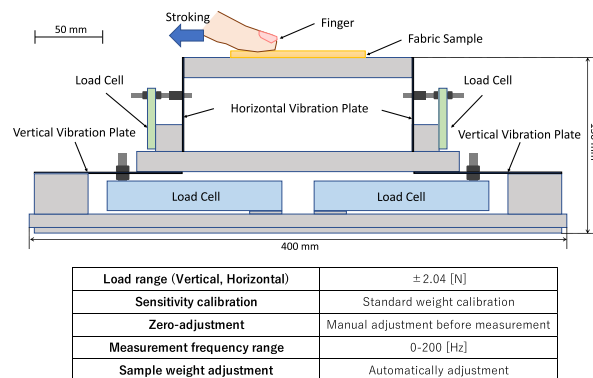


Fig. 3. Schematic of the developed measurement device.

摩擦力・押込み力についてそれぞれの周波数特性を算出し、各種の布毎の周波数特性の変動を説明する要素を主成分分析により抽出する。

〈3・3〉 実験条件 この実験は触感と物理量の対応を検討するもので、実験に使用する布は主観評価実験に用いたものと同じ13種を対象とし、参加者も主観評価実験と同じ大学生および大学院生20名とした。

なお、実験参加者には、ブラインド環境下において、計測装置上に布置された布を手前側に向かって主観評価実験と同様に、1.02 [N]の押込み力で、5 [cm/s]の速度に統制しつつ撫でてもらい、その際の摩擦力・押込み力の振動を記録した。なお、一回の撫で行動中の平均押込み力が0.74～1.23 [N]、速度が4～6.7 [cm/s]の範囲に収まった場合に1回の撫で行動としてカウントし、一人につき10カウントになったところで参加者を交代させた。

〈3・4〉 振動特徴量の算出結果

(1) 周波数特性 4つの触覚受容器の応答周波数はおよそ200 [Hz]までの帯域であることから、サンプリング定理より400 [Hz]以上のサンプリングであれば触感と結びつく振動情報を正確に計測可能である。本実験ではサンプリング周波数を1,000 [Hz]とした。また、収集されたデータに対して高周波数成分の情報を雑音として除去するためカットオフ300 [Hz]の6次ローパスフィルタを適用し、さらに計測データに含まれるハム成分をアダプティブフィルタ処理により除去した⁽³¹⁾。

計測された摩擦力、押込み力の時間プロファイルにWelch法（窓幅0.5 [s]，重複率0.5）を適用し、パワースペクトル密度を推定した。解析では0～200 [Hz]までの周波数帯域を4 [Hz]刻みで50個に分割し、同じ布において平均処理を行った結果をパワーとした。この算出されたパワーには測定系に依存した誤差要因として、ゼロドリフト，系ゲインの温度特性，周波数特性，およびゼロドリフトが想定される。ゼロドリフトについては解析時に負荷直前の状態を0とする処理によって除去した。系の温度特性については測定環境の温度安定化制御と電源投入後1時間のエージング処置を行い測定精度に影響が無いことを確認した。系の周波数特性については、全ての刺激について周波数別に一定量が

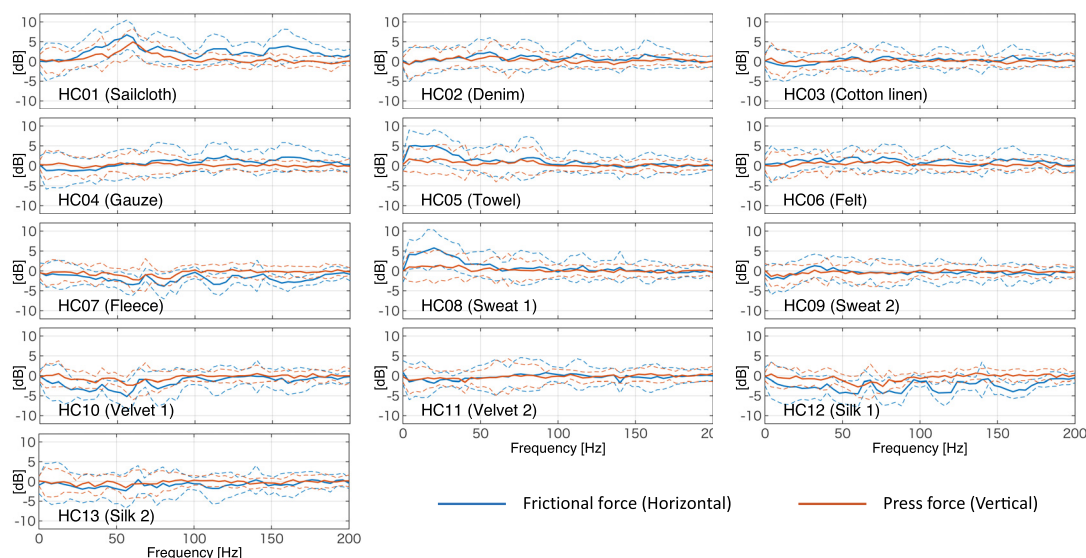


Fig. 4. Frequency characteristics (physical factor) for each stimulus.

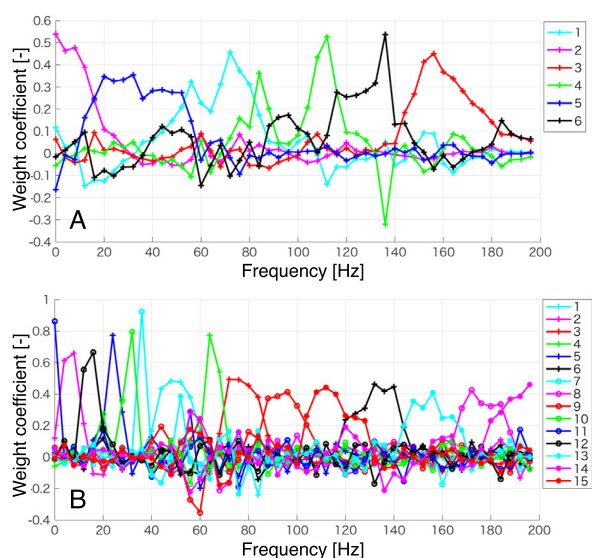


Fig. 5. PCA loadings (A: frictional force, B: press force).

This graph shows the relationship between each element of the vibration features and the frequency.

含まれると考えられることから、周波数別に各刺激のパワーから全刺激の平均パワーを除することで除去した。

これらの処理により得られた 13 種の布サンプル毎の摩擦力・押込み力のパワーを Fig.4 に示した。なお実線上下の破線は、それぞれ正負方向の標準偏差を示しており、全サンプルについて 5 dB 以下であることを確認した。Fig.2 に示した Factor 1 (Roughness) と Factor 2 (Hardness) のマッピング上でプロット位置が離れている布、すなわち触感が異なる布はそれぞれに固有の周波数特性を持つことが分かる。

(2) 周波数特徴量 周波数特性に対して主成分分析を適用することで、布地を撫でた際の振動の特徴量を抽出した。なお、抽出された主成分に対してバリマックス回転

を適用し、累積寄与率が 80%以上となるように主成分数を決定したところ、摩擦力は 6、押込み力は 15 の主成分を抽出した。

摩擦力・押込み力それぞれの主成分負荷量を Fig.5 に示した。図中の各線は対応する主成分の基底ベクトルであり周波数成分の関連の強さを表している。なお、凡例の番号は寄与率が大きかったものから割り振っている。Fig.5 から各主成分は、それぞれ異なる周波数成分を代表していることが分かる。また、この主成分に対応する主成分得点は、主成分が代表する周波数帯の振動の大きさを表す特徴量であることから、以降ではこれを振動特徴量と呼ぶ。振動特徴量は、各布について 21 次元のベクトル量として表現される。

4. 触感予測モデルの構築と評価

本章では、主観評価実験により得られた触感の指標化・定量化結果と、物理計測実験により得られた振動特徴量の関係を数理モデルとして表現し、その妥当性について予測精度の観点から検討する。

〈4・1〉 触感予測モデルの構築 3 章までに記載した手順により触感と振動特徴量の関係を、振動特徴量を説明変数、布地の触感の因子得点を目的変数とした重回帰分析によりモデル化する。ここで、説明変数の特徴量は 21 次元であるのに対して実験刺激（布の種類）は 13 と少ない点を考慮し、本研究の変数選択では観測値と予測値の 2 乗誤差基準と異なりモデル自由度の増大に対するペナルティ項が含まれた関数で、汎化性能の評価が可能な赤池情報量規準 (AIC) に基づくステップワイズ変数選択法を採用し、AIC が最小となるモデルを採用することで、モデル構築時の過剰適合を抑制し AIC の観点からの汎化性能を担保した。

重回帰分析により触感因子を振動特徴量から予測するモデルを構築した結果を Table 3 に示した。Table 3 は触覚因子毎のモデルの偏回帰係数を、主成分を振動特徴量の各成分

Table 3. Prediction model of the human tactile perception based on the vibration features. This model shows the relationship between psychological factor and physical factor.

	Basis Number	Frequency Band [Hz]	Factor 1 (Roughness)	Factor 2 (Hardness)	Sensory Receptor
Frictional force	2	0-28		-1.23	SAI or FAI
	5	12-56	0.96		FAI
	1	36-88			FAI
	4	72-128			FAI or SAI
	6	88-144			FAI or SAI
	3	140-			FAI or SAI
Press force	11	0-4			SAI
	2	0-12			FAI
	12	8-24		1.21	FAI
	5	16-28			FAI
	10	28-36			FAI
	7	32-40			FAI
	1	36-60			FAI
	4	60-72			FAI or SAI
	3	68-88			FAI or SAI
	9	84-108		-0.90	FAI or SAI
	15	100-132			FAI or SAI
	6	116-148			FAI or SAI
	13	140-172		-1.36	FAI or SAI
	8	164-188		0.81	FAI or SAI
	14	176-			FAI or SAI

が代表する周波数領域ごとに並び替えて表形式にまとめたもので、振動特徴量が触感に及ぼす影響の大きさを確認できる。なお、周波数領域は Fig.5 の主成分負荷量が 0 より大きな値を持つ連続した領域を設定した。また、摩擦力の第 6 成分など複数の周波数帯域を有する場合は、最も広い周波数帯域を研究者が選定し周波数領域として設定した。学習データの Factor 1 (Roughness) と Factor 2 (Hardness) に対して構築モデルは決定係数で 0.91, 0.95 の精度で表現でき、本論文の手続きにより学習データを十分に表現するモデルを構築できたことを確認した。

なお、主成分番号 (Basis number) は主成分が表現する振動の大きさの順番に割り振られている。モデルを確認すると、Factor 1 (Roughness) は摩擦力の第 5 成分, Factor 2 (Hardness) は摩擦力の第 2 成分, 押込み力の 8, 9, 12, 13 成分といったように必ずしも振動の大きな成分が触感予測に寄与していない。これは主成分が指に加わる振動の機械的特性を反映したものであり、振動の知覚量と必ずしも対応しないことに起因する。この知覚量への変換特性はモデル係数の重みとして表される。

〈4・2〉 触感予測モデルの予測精度評価 構築したモデルの妥当性を検証するため、leave-one-out 交差検証法による未学習のデータに対する予測精度の算出を試みた。交差検証では、布地の 1 つを未学習データとして選択し、残りのデータを学習データとしてモデルを構築し、構築したモデルにより未学習データの各触感因子の予測値を求めた。これを全ての布地について行い、未学習データに割り振られたサンプルの各触感因子の予測値と、主観評価により得られた触感因子の得点の対応関係を求め Fig.6 に示した。なお、予測値は測定された振動情報から触感を予測したもの

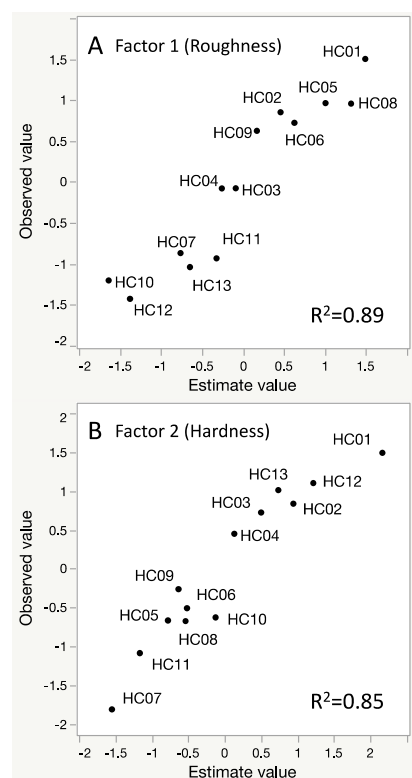


Fig. 6. Tactile prediction accuracy of the model for untrained data.

で、各布の振動情報を主成分得点毎に平均 0, 分散 1 となるように標準化した上で Table 3 の係数を乗じている。また実測値は因子分析のスコアである。構築モデルの予測精度は各プロットがどの程度一直線上に並ぶかで確認できる。Fig.6 において、Factor 1 (Roughness), Factor 2 (Hardness) とともに直線上に並んでいることが分かる。また、決定係数を図中右下に明示しており、Factor 1 (Roughness) は 0.89, Factor 2 (Hardness) は 0.85 と大きく、学習データに対する決定係数 0.91 と 0.95 からはわずかに低下したが、布地の触感を良好な精度での評価が可能であることが分る。また、モデル構造から Factor 1 (Roughness) は水平方向の成分が、Factor 2 (Hardness) は垂直方向の成分が主に寄与していることから、本論文で提案した装置の 2 軸の振動計測が触感予測上有効であることが分かる。

以上の結果から、予測精度の観点から本論文にて示した手続きにより、物体を撫でた際に計測される振動情報から触感評価が可能になることを確認できた。

5. 考 察

〈5・1〉 触覚受容器の機能に基づくモデル構造の妥当性

ここでは、構築したモデルの妥当性を触覚受容器の機能の観点から検討する。Table 3 より触感因子を振動特徴量から予測するモデルを構築した結果、布の触感は Factor 1 (Roughness) と Factor 2 (Hardness) で説明できることが明らかとなった。なお、Table 3 では、振動特徴量の周波数領域において最も感度が高い触覚受容器を右列に明示した。

ここで、FAI はマイスナー小体、SAI はメルケル細胞、FAII はパチニ小体、SAII はルフィニ終末、を表している。

Table 3 より粗さに関する Factor 1 (Roughness) に着目した場合、主に FAI のマイスナー小体の周波数帯域の振動がその触感の形成に影響していることが分かる。FAI, FAII の発火が粗さの知覚と関係することは先行研究においても確認されており⁽³²⁾、本モデルの Factor 1 (Roughness) が布の触感因子として出現したことの妥当性を示すものである。

また、Factor 2 (Hardness) に着目した場合、摩擦力は SAI のメルケル細胞が支配的な周波数帯域との関係が強いことが分かる。先行研究においても SAI の代表的な機能は、強度、空間パターン、皮膚曲率半径などの、指の接触面積の変化の影響を受ける柔らかさの知覚に寄与する量検出であるといわれており⁽³³⁾、このように機能的な面での関係性が認められたのは興味深い点である。

さらに、押込み力は摩擦力に比較して FAI や FAII などの高周波数帯域との関係が強いことが分かる。これは表面の粗さの情報が硬さ知覚に利用されていることを示唆している。これらの特性が、材質に固有なものか、硬軟感の知覚において支配的なものかについては、今後さらにサンプルの種類を増やして検討を行う予定である。

〈5・2〉 振動情報に基づく硬軟感の予測 硬さ・柔らかさの知覚に関する先行研究では、皮膚と物体との接触力と接触面積を制御することで硬軟感を制御できることが報告されている⁽³⁴⁾。また、材質感の観点から Factor 2 (Hardness) は、硬軟感だけでは無く指の接触面積や温冷感などの振動以外の要素が複合的に影響していることが Table 2 でも確認されている。一方、Fig.6 より、振動情報が Factor 2 (Hardness) に十分な精度での触感評価の実現に寄与しており、硬軟感の形成において先行研究で扱われていない振動情報の寄与が生じた要因を検討した。

まず、布地固有の現象としてミクロなテクスチャーの差異が上げられる。最も硬い 8 号帆布は太く硬い繊維で織られ荒いテクスチャーを持つのに対して、最も柔らかいフリースは細い繊維による起毛構造を持っており、この構造の違いが、指の変形を経由して振動に影響を与えていることが考えられる。すなわち、布地表面を撫でた際、8 号帆布のテクスチャー構造は皮膚の変形に大きく影響するのに対して、フリースは起毛構造が降伏し皮膚の変形は小さくなり、この皮膚への影響の差異が、実験刺激間の振動の差異として現れた結果、振動情報から硬さの予測が可能になったものと考えられる。

このように表面テクスチャーの差異が振動情報として検出され、硬軟感に結び付くのは布地固有の現象とも考えられるが、今後各種の素材表面の評価を行うことで、開発した触感情報計測装置および振動情報をベースとした触感予測手法の適用範囲が広がるものと考えられる。

〈5・3〉 能動的触察行動許容のための課題 本研究では、能動的な触察行動に基づく触覚・触感を評価できる手法をめざしている。能動的な触察行動は対象物の表面性状

に影響を受け、その結果は振動情報の変化に現れる。本論文では対象物の表面性状の差異を振動情報の変化から特徴量化していることから、触感情報計測装置、および情報の分析・評価手法は能動的な触察行動への対応を念頭に置いたものである。なお、本論文においては、人間の主観的な評価との比較において、情報取得装置、および情報の分析・評価手法の妥当性を検証するために、被験者の撫で行動における撫で速度と押し込み量を統制した。今後、撫で速度については速度情報から振動周波数に補正をかけることで容易に統制解除が可能と考えられる。一方、押し込み量についてはロボットハンドの触覚に見られるように既知のフィードバック手法があるが、人間の触感再現を目的としたものではなく、補正のかけかたや触感の範囲を超えた押し込みのリミット設定など、情報の分析および触感情報計測装置の機能追加検討を行う予定である。

〈5・4〉 構築モデルによる触感予測の限界 本研究で構築した予測モデルは線形の回帰モデルであるにも関わらず高い精度での布地触感の予測が可能である。この事実は、布地触感の因子空間において布地サンプルが張る領域内の触感であれば内挿的に良い精度で予測可能であると示唆するものである。しかしながら、実験に用いたサンプルは対象となる布地を金属の硬質面に貼付けたものであるため、布地が大きく変形した際に得られる触感など布地の風合い全般を予測することはできない。これを解決するためには、本論文で提案した感性工学的手法を触れ方に合わせて拡張する試みが必要になる。なお、本論文で提案した手法は、布地に限らず表面性状を撫でた際に得られる触感の予測に広く適用が期待される。今後、様々な材質を対象としたモデル構築が推進されその知見を蓄積することで幅広い触感を予測が可能なモデル実現が期待される。

6. まとめ

本研究では、人の触感を忠実に計測評価するモデルをつくることを目標としている。本論文では人が指で物体表面を撫でる能動的触察行動と指の応答特性を模倣する計測方法として、自然な撫で動作を振動特徴量から指標化・分析・評価する方法を提案し、布地を対処として検証を行った。能動的触察行動の際の振動情報を取得するために触感情報計測装置を開発し、質感サンプルセットから選定した 13 種類の布を使った検証実験を行った結果、粗さと硬さの 2 つの因子が抽出された。また、布地を能動的に撫でた際の振動の特徴量として抽出された周波数帯域は、指の皮膚内部に存在する 4 受容器の周波数感度領域とも一致していることが確認された。さらに、各因子についての予測値と実測値の評価ではいずれの因子も決定係数が 0.85 以上と高い精度であり、抽出された因子は布地の触感因子として妥当であることから、接触面における作用力の振動計測から精度良く触感予測が可能なモデルが構築できた事が確認され、今後、幅広い物理量・材質を対象とした触感評価への適用が期待される。

謝 辞

本研究の一部は、COI STREAM「感性とデジタル製造を直結し、生活者の創造性を拡張するファブ地球社会創造拠点」によった。また、実験に協力頂いた関西学院大学理工学部の藤原大志氏に感謝する。

文 献

- (1) 日本学術会議：「人間と工学研究連絡委員会感性工学専門委員会報告 現代社会における感性工学の役割」，第1033回運営審議会（2005）
- (2) 科学研究費補助金新学術領域研究「質感脳情報学」：http://shitsukan.jp/
- (3) 科学研究費補助金新学術領域研究「多元質感知」：http://www.shitsukan.jp/ISSI/
- (4) 経済産業省編：「感性価値創造イニシアティブ 第四の価値軸の提案—感性☆（きらり）21 報告書」，経済産業調査会（2007）
- (5) H. Yanagisawa, T. Murakami, K. Ohtomi, and R. Hosaka : “Quantification Method of Product Emotional Quality Considering Its Diversity : Application to Quantification of Emotional Quality in Product Sound Design”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C, Vol.74, No.746, pp.2607-2617 (2008) (in Japanese)
柳澤秀吉・村上 存・大富浩一・穂坂倫佳：「感性の多様性を考慮した感性品質の定量化手法（製品音の設計における感性品質の定量化への適用）」，日本機械学会論文集（C編），Vol.74, No.746, pp.2607-2616 (2008)
- (6) Y. Tani, T. Fujiwara, A. Takemoto, K. Tobitani, M. Imura, and N. Nagata : “Investigation of the Integration Form for the Visuo-Tactile Information in the Impression of the Texture”, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.23, No.3, pp.115-118 (2018) (in Japanese)
谿 雄祐・藤原大志・竹本 敦・飛谷謙介・井村誠孝・長田典子：「テクスチャの印象における視触覚情報統合様式に関する検討」，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.23, No.3, pp.115-118 (2018)
- (7) K. Tobitani, T. Matsumoto, Y. Tani, H. Fujii, and N. Nagata : “Modeling of the Relation between Impression and Physical Characteristics on Representation of Skin Surface Quality”, The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers, Vol.71, No.11, pp.J259-J268 (2017) (in Japanese)
飛谷謙介・松本達也・谿 雄祐・藤井宏樹・長田典子：「素肌の質感表現における印象と物理特性の関係性」，映像情報メディア学会誌，Vol.71, No.11, pp.259-268 (2017)
- (8) K. Tobitani, Y. Mizushima, and N. Nagata : “Expression of Woven Cloth using Computer Graphics via Multi-band BTDF Model Considering Fluorescence Characteristics”, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.80, No.12, pp.1213-1218 (2014) (in Japanese)
飛谷謙介・水嶋彬貴・長田典子：「Multi-band BTDF モデルによる織布の蛍光特性の表現」，精密工学会誌，Vol.80, No.12, pp.1213-1218 (2014)
- (9) S. Kawabata : “The KES-F System and Its Applications”, Sen'i Gakkaishi, Vol.47, No.11, pp.P624-P628 (1991) (in Japanese)
川端季雄：「KES-F システムとその応用」，繊維と工業，Vol.6, No.3 pp.210-217 (1991)
- (10) M. Niwa : “Objective Evaluation of Fabric Hand and Its Applications”, Netsu Bussei, Vol.6, No.3, pp.210-217 (1992) (in Japanese)
丹羽雅子：「風合いの客観的評価とその応用」，熱物性，Vol.47, No.11 pp.12-16 (1992)
- (11) M. Egawa, M. Oguri, T. Hirao, M. Takahashi, and M. Miyakawa : “The evaluation of skin friction using a frictional feel analyzer”, Skin Research and Technology, Vol.8, No.1, pp.41-51 (2002)
- (12) E. Oshimura, H. Abe, and R. Oota : “Hair and amino acids: The interactions and the effects”, Journal of Cosmetic Science, Vol.58, pp.347-357 (2007)
- (13) J. Yip and S. Pui Ng : “Study of three-dimensional spacer fabrics:: Physical and mechanical properties”, Journal of Materials Processing Technology, Vol.206, No.1-3, pp.359-364 (2008)
- (14) Y. Tanaka, M. Tanaka, and S. Chonan : “Measurement of Tactile Sensation Using Sensor System for Collecting Tactile Information”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol.73, No.727, pp.817-824 (2007) (in Japanese)
田中由浩・田中真美・長南征二：「手触り感計測用センサシステムを用いた触覚感性計測」，日本機械学会論文集（C編），Vol.73, No.727, pp.169-179 (2007)
- (15) K. Kuramitsu, T. Nomura, S. Nomura, T. Maeno, and Y. Nonomura : “Friction evaluation system with a human finger model”, Chemistry Letters, Vol.42, No.3, pp.284-285 (2013)
- (16) T. Nishimatsu, K. Sowa, S. Sekiguchi, E. Toba, and E. Ono : “Measurement of Active Tactual Motion in Judging Hand of Materials of Fabrics”, Sen'i Gakkaishi, Vol.54, No.9, pp.452-458 (1998) (in Japanese)
西松豊典・曾和和洋・関口 定・鳥羽栄治・小野栄一：「織物の素材評価時の能動的触運動の計測」，繊維学会誌，Vol.54, No.9, pp.452-458 (1998)
- (17) H. Shirado, Y. Nonoura, and T. Maeno : “Development of Artificial Skin Having Human Skin-like Texture —Realization and Evaluation of Human Skin-like Texture by Emulating Surface Shape Pattern and Elastic Structure—”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol.73, No.726, pp.541-546 (2007) (in Japanese)
白土寛和・野々村美宗・前野隆司：「肌質感を呈する人工皮膚の開発（皮膚の表面凹凸パターンと弾性構造の模倣に基づく肌質感の実現と評価）」，日本機械学会論文集（C編），Vol.73, No.726, pp.541-546 (2007)
- (18) M. Nakatani and T. Kawasoe : “Haptic Skill Logger (HapLog): The Wearable Sensor for Evaluating Haptic Behaviors”, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.30, No.5, pp.499-501 (2012) (in Japanese)
仲谷正史・川副智行：「触感の感性評価ツール：ウェアラブル触動作センサ HapLog」，日本ロボット学会誌，Vol.30, No.5, pp.499-501 (2012)
- (19) Y. Tanaka, D. P. Nguyen, T. Fukuda, and A. Sano : “Wearable skin vibration sensor using a PVDF film”, Proceedings of the IEEE World Haptic Conference 2015, pp.146-151 (2015)
- (20) R. Tsuchiya, R. Kuhara, K. Kikegawa, N. Nagatani, and Y. Nonomura : “Tactile and Physical Properties of Cosmetic Powders with a Shittori Feel”, Bulletin of the Chemical Society of Japan, Vol.93, No.3, pp.399-405 (2020)
- (21) H. Shinoda : “Intelligence in Human Skins (<Special Issue> Dynamic Understanding of Human Intelligence)”, SYSTEMS, CONTROL AND INFORMATION, Vol.46, No.1, pp.28-34 (2002) (in Japanese)
篠田裕之：「皮膚の力学的構造に隠れている知能」，システム/制御/情報，Vol.46, No.1, pp.28-34 (2002)
- (22) T. Yoshioka, S. J. Bensmaia, J. C. Craig, and S. S. Hsiao : “Texture Perception through Direct and Indirect Touch: an Analysis of Perceptual Space for Tactile Textures in Two Modes of Exploration”, Somatosensory & Motor Research, Vol.24, No.1-2, pp.53-70 (2007)
- (23) S. Bensmaia and M. Hollins : “Pacianian representations of fine surface texture”, Perception & Psychophysics, Vol.67, No.5, pp.842-854 (2005)
- (24) S. J. Bensmaia, J. C. Craig, T. Yoshioka, and K. O. Johnson : “SA1 and RA afferent Responses to Static and Vibrating Gratings”, Journal of Neurophysiology, Vol.95, No.3, pp.1771-1782 (2006)
- (25) 橋村 勝：「質感サンプルセット」，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.17, No.1, pp.48-49 (2012)
- (26) H. Nagano, S. Okamoto, and Y. Yamada : “Research Directions in Structuring of Tactile Dimensions of Material Textures”, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.16, No.3, pp.343-353 (2011) (in Japanese)
永野 光・岡本正吾・山田陽滋：「触感的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向」，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.16, No.3, pp.343-353 (2011)
- (27) H. Shirado, M. Konyo, and T. Maeno : “Modeling of Tactile Texture Recognition Mechanism”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol.73, No.7333, pp.2514-2522 (2007) (in Japanese)
白土寛和・昆陽雅司・前野隆司：「ヒトの触感認識機構のモデル構築」，日本機械学会論文集（C編），Vol.73, No.7333, pp.2514-2521 (2007)
- (28) T. Nagatsu, Y. Enomoto, T. Kawamura, T. Kobayashi, and T. Yamabe : “Tactile Sensing Evaluation of Fabrics by Human Forefinger”, Sen'i Gakkaishi, Vol.64, No.4, pp.89-95 (2008) (in Japanese)
永津拓郎・榎本祐嗣・河村 隆・小林俊一・山辺典昭：「示指による織布の摩擦触感評価」，繊維学会誌，Vol.64, No.4, pp.89-95 (2008)
- (29) H. Shirado and T. Maeno : “Modeling of Texture Perception Mechanism for Tactile Display and Sensor”, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.9, No.3, pp.235-240 (2004) (in Japanese)

白土寛和・前野隆司：「触感提示・研究のための材質認識機構のモデル化」，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.9，No.3，pp.235-240 (2004)

- (30) S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky : "Four Channel Mediate the Mechanical Aspects of Touch," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.84, No.5, pp.1680-1694 (1988)
- (31) N. Toda : "A Cancellation Method of Periodic Interference in Pulse-Like Signals Using Adaptive Filter and Its Application to Flash ERGs", The IEICE transactions on information and systems (Japanese edition), Vol.94-D, No.10, pp.1685-1695 (2011) (in Japanese)
戸田尚宏：「パルス状信号に混入する交流雑音の適応フィルタによる除去法とそのフラッシュ光網膜電位図への適用」，信学会 D，Vol.94-D, No.10, pp.1685-1695 (2011)
- (32) K. O. Johnson and S. S. Hsiao : "Neural mechanisms of tactual form and texture perception", Annual review of neuroscience, Vol.15, No.1, pp.227-250 (1992)
- (33) M. Shimojo : "Tactile Sensing and Display", IEEE Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.122, No.10, pp.465-468 (2002) (in Japanese)
下条 誠：「触覚のセンシングとディスプレイ」，電学論 E，Vol.122, No.10, pp.465-468 (2002)
- (34) Y. Ikeda and K. Fujita : "Display of Soft Elastic Object by Simultaneous Control of Fingertip Contact Area and Reaction Force", Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.9, No.2, pp.187-194 (2004) (in Japanese)
池田義明・藤田欣也：「指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示」，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.9, No.2, pp.187-194 (2004)

山崎 陽 一



（正員）2012年愛知県立大学大学院情報科学研究科博士（情報科学）取得。2011年公益財団法人科学技術交流財団知の拠点重点研究プロジェクト統括部研究員，2016年関西学院大学にて感性工学に関する研究に従事，2021年理工学部/感性価値創造インスティテュート特任講師。主に感性工学，生体医工学，生体シミュレーション，医用画像処理の研究に従事。日本生体医工学会，IEEE など各会員。博士（情報科学）。

飛 谷 謙 介



（正員）2002年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。2004年岐阜県立情報科学芸術大学院大学（IAMAS）修士課程修了。JST 地域結集型共同研究事業特別研究員を経て，2010年岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年岐阜大学産官学融合本部研究員。2014年関西学院大学理工学部/感性価値創造インスティテュート特任講師。2020年長崎県立大学情報システム学部准教授。主に感性工学，コンピュータビジョンに関する研究に従事。精密工学会，日本顔学会，ACM など各会員。博士（工学）。

谿 雄 祐



（非会員）2015年関西学院大学にて視覚と触覚を介した物体の質感や印象の認知に関する研究などに従事した後，2020年金沢大学先端科学・社会共創推進機構にてURA（ユニバーシティ・リサーチ・アドミニストラータ）として勤務。2022年より北陸大学国際コミュニケーション学部准教授。博士（心理学）。

井 村 誠 孝



（非会員）2001年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年同研究科助手。2007年同研究科助教。2009年大阪大学大学院基礎工学研究科准教授。2015年関西学院大学理工学部教授。2021年同大学工学部教授，現在に至る。バーチャルリアリティ，ヒューマンコンピュータインタラクション，生体医工学に関する研究に従事。IEEE，情報処理学会，日本バーチャルリアリティ学会等に所属。

亀 井 光 仁



（上級会員）1971年奈良工業高等専門学校卒業。同年三菱電機（株）入社。生産技術研究所，応用機器研究所，産業システム研究所を経て1993年系統変電システム製作所。2011年名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻博士後期課程修了。2016年より関西学院大学感性価値創造インスティテュート客員教授。主として産業向けのセンサ技術，計測技術の研究開発に従事。博士（工学）。

長 田 典 子



（正員）1983年京都大学理学部数学系卒業。同年三菱電機（株）入社。産業システム研究所等において色彩情報処理，感性情報処理の計測システムへの応用に関する研究に従事。1996年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。2003年関西学院大学理工学部情報科学科助教，2007年教授。2009年米国パデュー大学客員研究員。2013年感性価値創造研究センター長を経て，感性価値創造インスティテュート所長。専門は感性工学，メディア工学等。博士（工学）。