

新しい触感提示技術の提案と定量評価

代表研究者 山崎 陽一 関西学院大学 理工学部 研究特別任期制助教

1 はじめに

近年、Eコマースの普及[1]による市場環境のグローバル化に伴い、ユーザーニーズの多様化が進み、プロダクトのカスタマイズ化やパーソナル化に対する要求が高まっている。その実現に向け、人の嗜好や満足感といった感性価値を的確に把握し、それらを具体的なプロダクトデザインやサービスデザインに展開する方法論が注目されている。「しっとりした」や「高級感のある」といった素材の表面性状(以下テクスチャ)に対する印象は感性的質感と呼ばれる。感性的質感は物の良し悪しや好ましさを評価、判断する上で、形や色、機能と同様に重要な意味を持つ。そのため、近年プロダクトデザイン分野において感性的質感を理解・制御する技術が求められている。このような質感関連研究への社会的要請の高まりとともに、心理物理学や脳科学、計算機科学などの分野を中心に、質感を対象とした研究が横断的に行われ、多くの成果を挙げている[2-5]。

この感性的質感は、視覚や聴覚そして触覚などの知覚情報を統合することで形成される。前述のように感性的質感の製品開発への関心が高まるとともに、知覚情報のデジタルデータ化の重要性が高まっている。特に、触覚は視覚と同様に重要な知覚情報であり、これまで触覚の計測と提示手法、触覚形成メカニズムの解明など様々な観点から研究がおこなわれてきた。しかし、触覚情報のデジタルデータ化の実現には程遠い状況である。これは触覚が指物性の個人差、触覚動作、触覚対象の表面性状など複数の要因から形成されるため、その様相は複雑であり、そもそも「触覚をどのように規定するか」といった点が明らかになっていないことであると考えられる。

触覚提示について言及すると、触覚形成に関わる物理的作用(指先に加わる振動、受容器に作用する電気信号など)を再現することで実現される[6]。近年、多くの触覚提示手法が考案されているが、各手法について「どのような触覚がどのような精度で再現できるのか」を共通した尺度での比較・整理ができていない。このような現状に対して、我々は二軸接触力計測装置を用いた感性実験から、指先は対象物の表面をなでることで、対象物の表面性状の情報を複数の振動成分の組み合わせの情報に符号化する、ある種のフィルタバンクの構造を持つことを示した[7]。これは触覚を物理量の観点から符号化し利用することを可能にするのみならず、フィルタバンク構造を構成する振動成分を提示すれば精度の良い触覚提示が可能になるものと考えられる。また、この視点は、振動子数の観点から触覚提示装置の精度を定量的に取り扱うことも可能にする。本研究では、前述の触覚の符号化に基づく提示手法の妥当性を検証するため、フィルタバンク構造に基づく触覚提示装置を実装し、触覚提示の性能評価を実施する。

また、代表的な振動提示手法はモータ等の回転系を用いたものであり、電圧を制御することで幅広い周波数の振動を提示[8]できるが、瞬間的には複数の周波数成分を含む振動を提示できない。すなわち、前述の指先のフィルタバンク構造の特性から、触覚提示精度と振動素子数はトレードオフの関係にあり、精密な触覚提示を行うためには複数の振動素子が必要になる。これは、提示装置の空間的大きさ、または振動子駆動に必要なエネルギーと触覚提示精度の間にトレードオフの関係にあることを示している。一方、触覚の時間的特性[9]から、複数の振動を時分割で提示したとしても、複数の振動を同時に提示した場合と同様の触覚を提示できる可能性がある。本研究では、この触覚提示における振動時分割提示の妥当性検証も実施する。さらに、符号化的観点からの触覚提示の精度評価に関する指針を示す。

2 振動特性に基づく触覚的質感の定量化

触覚提示に用いる基礎的データを収集するため、布地表面をなでた際に得られる触覚及び指先に加わる力の計測、フィルタバンク構造(振動子の構成)の抽出を実施した。ここでは計測手法と特徴量抽出原理について示し、さらに布地を対象とした特徴量抽出の結果を示す。

2-1 指先に作用する力の計測と特徴量化

(1) 計測装置

一方向に撫でた場合、指先に作用する接触力は、撫でる方向に対して平行に働く摩擦、鉛直方向に働く押

込み力により表現される。この接触面に作用する力は、触覚的質感形成の一次情報である。我々は、この接触力の経時変化の計測を可能にする装置を試作（図1）した。

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る。原理としては、刺激を撫でた際の試料台の水平・垂直方向の動きが、それぞれ横・縦方向の振動板の歪に変換される。この歪の大きさを、振動板に設置されたロードセルにより電気信号に変換することで摩擦力・押込み力の計測が可能になる。

ロードセルから出力される信号は数 mV と微弱であり、信号増幅器と AD 変換器を介してコンピュータ上に記録する。記録された信号は電圧値であるが、電圧値と力の間には線形性があり校正係数を算出し、これを用いることで力の物理量に変換できる。なお、実験前には 100 [gf] の重りを用いた校正係数の算出を行った。

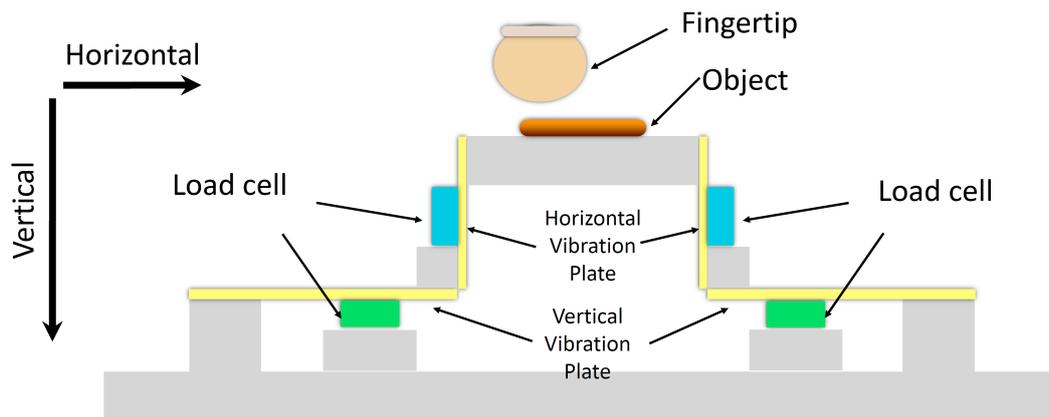


図 1. 接触力計測装置

（2）触察行動の統制

接触力の計測にあたって、振動特性の形成に影響すると考えられる押込み力・なでる速度について 100 [gf] の押込み力、5 [cm/s] の撫で速度と統制した。

（3）接触力の特徴量抽出

指が対象物表面を撫でた際に得られる触覚は振動情報を知覚することで形成される。指には振動知覚に関与する 4 つの触覚受容器が存在しており、これが指先に生じた振動を電気信号に変換し神経系を介して脳に伝達することで知覚が形成される。この触覚受容器は、それぞれ異なる周波数成分に対する感度特性を持ち、この振動の周波数特性が触覚の形成に結びついている [10]。すなわち触覚的質感と対応づけた物理量を扱う場合、接触面において生じた力の経時変化を時間周波数の観点から取り扱うことが妥当だと考えられる。

また、物体はその構造に起因した振動特性を持ち、固有振動数のように特定の周波数成分を強めるなどの現象が現れる。指と対象物が接触した系においても、その構造に依存した振動特性が存在すると考えられる。指紋や指の内部構造が触覚受容器に効率的に接触面の情報を伝達する役割を持つことが示されており、振動特性についても何らかの力学的機能が存在すると考えられる。

我々は、この指先の持つ機能により処理された振動成分を特徴量として抽出する。周波数特性は、周波数毎のパワーを並べたベクトルである。これを複数の実験刺激に対して求め、主成分分析を適用することで、特徴量を抽出する。主成分分析は、多変量解析の一種であり、あるベクトルを少数の主成分ベクトルの線形結合で表現する。周波数特性に対応付けて考えた場合、主成分ベクトルは単一振動子の周波数特性であり、線形結合により周波数特性を表現する。ここで、結合係数は主成分得点と呼ばれ、主成分ベクトルの影響の大きさに対応する。また、この主成分得点のベクトルを特徴量として採用した。

この手続により抽出される特徴量が触感の形成に寄与するものであるかを検証するためには、触感との関係性検討が必要である。本研究では、多様な触感を提示しうる材質として布地を対象とした接触力と、触感の計測を目的とした触感の計測実験を実施した。

2-2 印象評価実験

本節では、布地対象とした印象評価実験の実施概要と分析結果について示す。

(1) 実験条件

参加者

健康な大学生及び大学院生、男性 15 名、女性 5 名（平均年齢 22.2 歳±0.97 歳）である。また、参加者は右手を利き手としていた。

刺激

実験刺激は、質感サンプルセット（竹井機械工業株式会社）[11]から、「8号帆布」、「平デニム」、「綿麻」、「ガーゼ」、「タオル」、「フェルト」、「フリース」、「スウェット」、「ビロード」、「シルク」の10種について、異方性を考慮し、摩擦方向を変えた3種を加えた13種の刺激を実験に用いた。全刺激の表面性状を撮影したものを一覧として図2に示した。また、各刺激は10 x 10 [cm]の成形されたアルミ板の上に貼り付けられている。



図2. 実験刺激一覧

評価語

実験刺激の影響を適切に評価するためには、ヒトが実験刺激に対していただき得る印象を網羅した評価語を用意する必要がある。岡本等は物体が提供する材質感について関連研究を俯瞰的に分析することで、材質感はマクロ粗さ、ファイン粗さ、硬軟感、摩擦感、温冷感、の5次元で表現しようと結論づけた[12]。本実験では、この材質感を構成する各要素を満たすように評価語を選定した。

白土等は、布地を含む多様な物性の印象評価を実施しており、マクロ粗さ、ファイン粗さ、摩擦感に対応する「粗さ因子」、「凸凹因子」、「滑らか因子」を抽出している[13]。本研究では各因子を代表する語に対して温冷感に関する、ここから各因子を代表する語に対して温感に関する2語を加えた、「サラサラ」、「スベスベ」、「ゴツゴツ」、「ボコボコ」、「ザラザラ」、「しっとり」、「温かい」、「ひんやり」の8語を採用した。また、布地に特異な評価項目として、榎本等の研究を参考に「滑らかな」、「かたい」、「やわらかい」、「きめ細かい」の4項目を採用した[14]。

(2) 手続き

実験は個室において1名ずつ行った。参加者は個室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。なお、本実験手続きは関西学院大学「人を対象とする行動学系研究」倫理規定に則り行った。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。

ヒトの要因を統制するため、同意書に署名した後に、専用の触運動量計測装置を用いた触察動作の練習を実施した。練習において、実験参加者は撫でた結果をインジケータで確認することができる。このインジケータは、約100[gf]の押し込み力で、約5[cm/s]の速度で撫でた場合に、適切な長さになるように設定した。実験参加者は、このインジケータを確認し押し込み力・速度ともに適切な長さになる撫で方を習得するまで練習を繰り返した。

実験参加者は、触察動作の練習の後に、ブラインド環境下において実験刺激をなで、12語について5件法により評価した。刺激は実験参加者ごとにランダムに提示した。全13種類の刺激について評価し終わると実験は終了となった。参加者は必要に応じて実験中に休憩をとることができた。

(3) 分析結果

実験刺激の印象の素点として、13の評価語それぞれに対する20名の評価の平均点を算出した(表1)。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。因子分析は、JMP Pro 14の機能を利用し実施しており、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とし、因子は固有値が1以上のものを採用するものとして2因子抽出した(表2)。この時、2因子の累積寄与率は95.7%であり刺激が提供する触覚的質感の特徴の殆どを表現していることが分かる。

第1因子は、「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示しており、この因子は粗さに関する因子と考えられる。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いることから、硬軟感に対応した因子であると考えられる。また、この因子には「温かい」、「ひんやり」が含まれており、実験刺激の性質として硬軟感と温冷感が相関する傾向にあることを示している。

因子分析では、各刺激について各因子に関する得点が算出される。これを2因子により張られる因子空間上に全刺激を布置した結果を図3に示した。第1因子(粗さ)の両極に、非常に粗い8号帆布(HC01)と表面が滑らかなシルク(HC12)が布置されていることから、抽出した因子が刺激の持つ触覚的特徴を良く表現していることが分かる。

表1. 印象評価結果

評価語	実験刺激												
	HC01	HC02	HC03	HC04	HC05	HC06	HC07	HC08	HC09	HC10	HC11	HC12	HC13
温かい	2.4	2.8	2.5	2.7	3.7	3.8	4.6	3.4	3.3	3.5	3.8	2.3	2.6
ひんやり	2.3	2.7	2.9	2.7	1.7	1.8	1.6	1.8	1.9	2.5	1.9	3.5	3.0
サラサラ	2.2	2.5	3.4	3.1	2.7	2.6	3.9	2.6	3.0	4.3	3.9	4.2	4.0
スベスベ	1.7	2.1	2.7	3.0	2.0	2.2	3.2	2.2	2.6	3.6	3.7	4.5	3.9
ゴツゴツ	4.0	3.5	2.7	1.9	3.4	3.1	1.4	3.3	3.2	1.5	1.5	1.4	1.7
ボコボコ	4.0	4.0	2.5	2.2	4.3	3.5	1.7	4.0	3.6	1.5	1.7	1.4	1.6
かたい	4.2	3.6	3.2	2.9	2.6	2.7	1.3	2.4	2.7	2.2	2.1	3.3	3.4
やわらかい	2.0	2.7	3.1	3.2	3.7	3.7	4.9	3.8	3.5	4.4	4.6	3.2	3.1
滑らかな	1.6	2.5	3.4	3.0	2.3	2.6	4.0	2.2	2.4	4.2	3.7	4.5	4.2
ザラザラ	4.3	3.8	3.3	3.2	3.7	3.4	1.8	3.6	3.8	1.9	2.5	1.7	2.2
しっとり	1.8	2.7	3.0	3.0	2.5	2.6	3.9	2.4	2.8	3.9	4.2	4.0	3.9
きめ細かい	2.5	2.7	3.5	3.4	1.9	2.6	3.8	1.9	2.4	4.5	4.3	4.2	3.8

表2. 因子分析結果

評価語	因子1 (粗さ)	因子2 (柔らかさ)
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
寄与率[%]	67.0	29.8

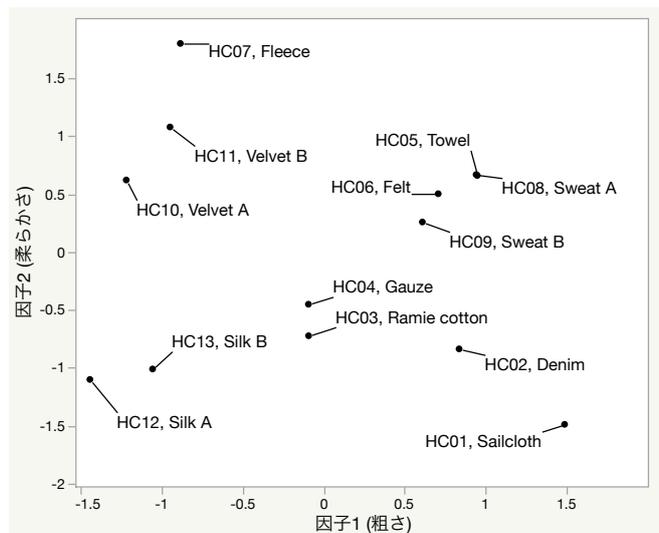


図3. 因子空間における実験刺激の分布

2-3 指先に作用する力の計測と特徴量化

本節では、布地表面をなでた際に指先に加わる力の特徴抽出を目的とした、計測実験と2-1の手続きに従い物理特徴量の抽出を行った結果を示す。

(1) 実験条件

参加者

健康な大学生及び大学院生、男性15名、女性5名（平均年齢22.2歳±0.97歳）である。また、参加者は右手を利き手としていた。

刺激

触覚的質感と物理量の対応を検討する必要があるため、実験刺激は主観評価実験に用いたものと同じ13種を対象とした（図2）。

手続き

実験は個室において1名ずつ主観評価実験の後に続けて行った。実験参加者は、ブラインド環境下において、各刺激について、図1の接触力計測装置上に設置された実験刺激を利き手人指し指により手前に向かって10回撫で、その際の摩擦力・押し込み力の経時変化を記録した。また、参加者は必要に応じて実験中に休憩をとることができた。

本実験では、印象評価実験と同様に、ヒトの要因として触察行動を統制した。実験参加者は撫でた際の押し込み力・速度が適切であるかをインジケータの長短で確認できるようにした。一回の撫で行動中の平均押し込み力が75~125[gf]、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た。

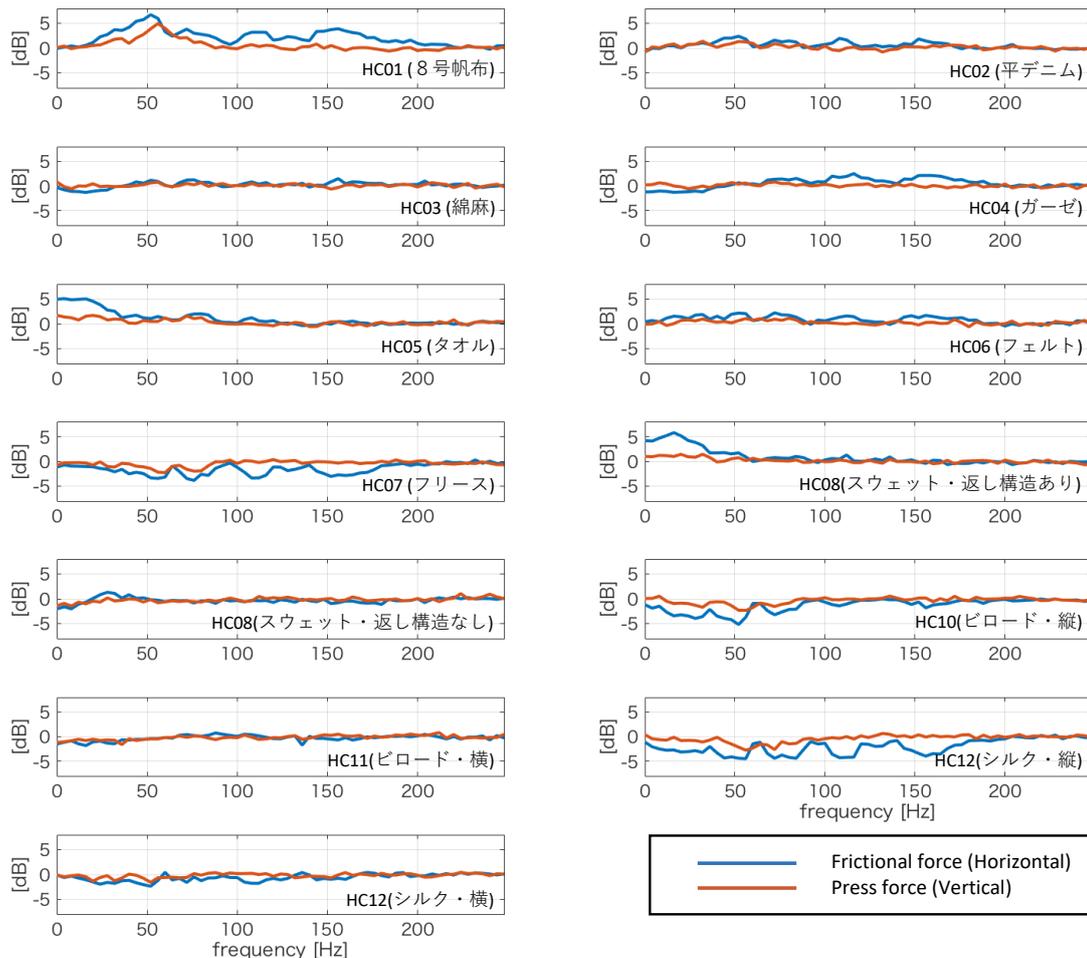


図4. 実験刺激毎の周波数特性

(2) 周波数特性の算出

計測データのサンプリング周波数は 1000 [Hz] であり、触覚受容器の周波数感度を考慮し、触知覚の形成に寄与しない高周波数成分の情報を雑音として除去するため 6 次のローパスフィルタ (カットオフ 300 [Hz]) を適用した。また、信号に含まれるハム成分については適応フィルタ処理を適用することで除去した [15]。また、触覚より力覚の形成に寄与すると考えられる低域周波数成分についてウェーブレット解析による除去 (coif5 基底, カットオフ約 8 [Hz]) を実施した。

計測された摩擦力、反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。なお解析では、主要な触覚受容器の感度を考慮し 0-250 [Hz] を解析対象とし、4 [Hz] 刻みで 63 個に分割した。また、同刺激において平均処理を行いパワーとした。

この算出されたパワーには測定系に依存した特性が加算的に含まれる。この成分は、触知覚の形成に寄与するものではなく、本実験の解析においてはアーチファクトになる。このアーチファクト成分は、全刺激のパワーに一定して含まれると考えられることから、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。

この手続により得られた実験刺激毎に摩擦力・押込み力それぞれのパワーを平均したものを図 4 に示した。触覚的質感が異なる刺激は固有の周波数特性を持つことが分かる。

(3) 物理特徴量の抽出

前節により得られた周波数特性データに対して主成分分析を適用し、刺激と指先の相互作用の結果生じる振動成分の抽出を試みた。この時、抽出された主成分に対してバリマックス回転を適用した。主成分については、累積寄与率が 75% 以上になる様に決定したところ、摩擦力は 6 個、押込み力は 18 個の主成分を抽出した。

摩擦力・押込み力それぞれの主成分ベクトルを図 5 に示した。図中の各線は対応する主成分と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、実験刺激に対して偏差が大きい要素から割り振られている。それぞれの主成分は、異なる周波数成分を代表していることが分かる。これは、指先の機械的構造により振動情報が自律的に集約されることを示している。これは、指紋や指先の機械的構造が知覚形成に関わる [16] など、その機械的構造が情報処理機能を持つことが示唆されており、それらの処理の結果として形成されるフィルタバンド的な構造を捉えたものと考えられる。

また、この主成分ベクトルに対応する主成分得点は、振動の物理的性質と対応した特徴量であり、以降ではこれを振動特徴量と呼ぶ。振動特徴量は、各刺激について摩擦力 6 次元、押込み力 18 次元のベクトルとして表現される。このベクトルの各要素の値は、触感提示において対応する振動子により提示される振動の強さと対応する。

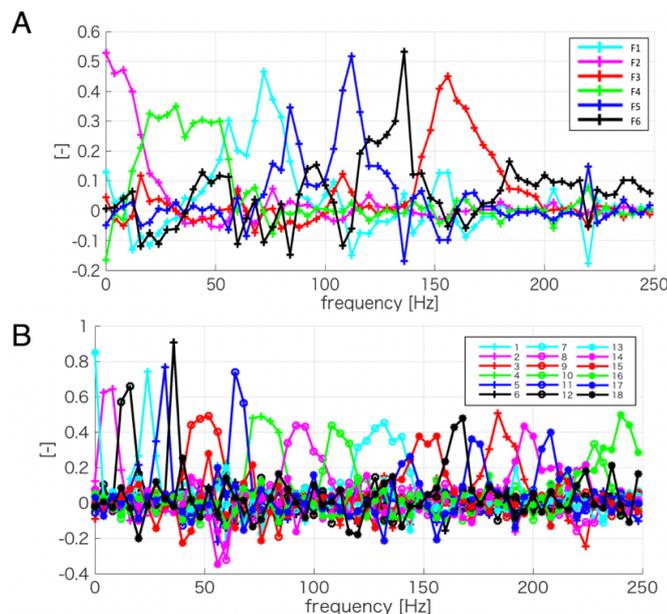


図 5. 指先に加わった摩擦力 (A) 及び押込み力 (B) の振動を構成する主成分ベクトル

2-4 触感と物理特徴量の関連付け

本章では、抽出した指先のフィルタバンク構造、そして振動特徴量が、触感形成と関係する量であることを検証するため、2-2 の印象評価の結果と振動特徴量の関係性を回帰分析により検討した。なお、振動子配置の空間的な制約から、本研究では水平方向（せん断方向）の振動提示の効果を検証対象とする。

説明変数は摩擦力の振動特徴量 6 次元、目的変数は触覚的質感を構成する因子 1(粗さ)、因子 2 (柔らかさ)の得点とした重回帰分析を実施した。分析において、AIC に基づく Stepwise 法による変数選択を行った。表 3 のように、因子 1(粗さ) は大きな決定係数を示しており振動特徴成分（摩擦力）が強く関係していることが分かる。一方、因子 2(柔らかさ)については因子 1 よりも決定係数は小さく、その影響は相対的に弱いことが分かる。硬軟感については振動特徴以外の要素の影響が小さくないため、この結果は妥当なものである。以上から、抽出された振動特徴量は触感と関係する特徴であることを確認した。

表 3. 回帰分析結果

	Determination coefficient	Principal component					
		F2	F4	F1	F5	F6	F3
		0-16Hz	20-52Hz	56-80Hz	84-116Hz	120-140Hz	144-180Hz
Factor1 (Roughness)	0.93		-0.96				
Factor2 (Softness)	0.53				2.65		-2.97

3 生理的特性に基づく触感提示系の構築

本研究では、指先が持つ生理学的特性（図 5 のフィルタバンク構造）の知見に基づいた触感提示系の構築手法を提案している。本節では、提案手法の妥当性を検証するために、提案手法により構築した触感提示系を紹介し、その能力を、触覚印象（評価実験 1）、実サンプルとの類似性（評価実験 2）の観点から評価した結果を示す。

3-1 触感提示の基本原理解

図 5 の解析は触感提示において必要な振動成分の数とその強さに関する情報を提供した。本研究ではこの情報に基づいた触感提示の実現手法を提案する。この手法で構築される触感提示系は、提示に必要な数の振動子を利用し、各振動子の周波数と振動強度を制御することで触感提示を実現する。次節では、その実装例について紹介する。

3-2 提示装置の実装

提示装置は図 6 に示したように、振動子(Vibrator)である DC モーター、振動台(Vibration platform)、基準素材(Standard material)、そしてモータードライバー(DRV8835)とコントローラ(Arduino UNO R3)、そして信号制御用の PC から構成される。触感は、提示台上面の基準素材をなでることのできる。

提案手法により構築される触感提示は、例えば基準材質の粗さを強調するといったように、基準素材の触感を加飾することで触感を提示する。そのため、基準材質の選択は本手法に基づく実装において重要な設計要素である。今回は、「粗さ」「柔らかさ」それぞれを強調するといった観点から、図 3 の H12(シルク)と同等の素材としてソフトドレープサテン(東レ)を採用した。

また、使用する DC モーター及びその制御パラメータを、摩擦力に関する 6 次元の振動特徴量の再現能力の観点から選定した。接触力計測装置(図 1)に提示台及びモーターを設置し 100[*gf*]の負荷を加えた状態で、制御パラメータ(電圧、PWM 特性(周波数、デューティ比)に対する振動特徴量を網羅的に収集しデータベースを構築しそこから選定した。その結果、表 4 に示したように振動特徴量の各要素を独立的に高低の 2 段階の強度で、一部の要素(F4)を除いて制御が可能であることが分かった。

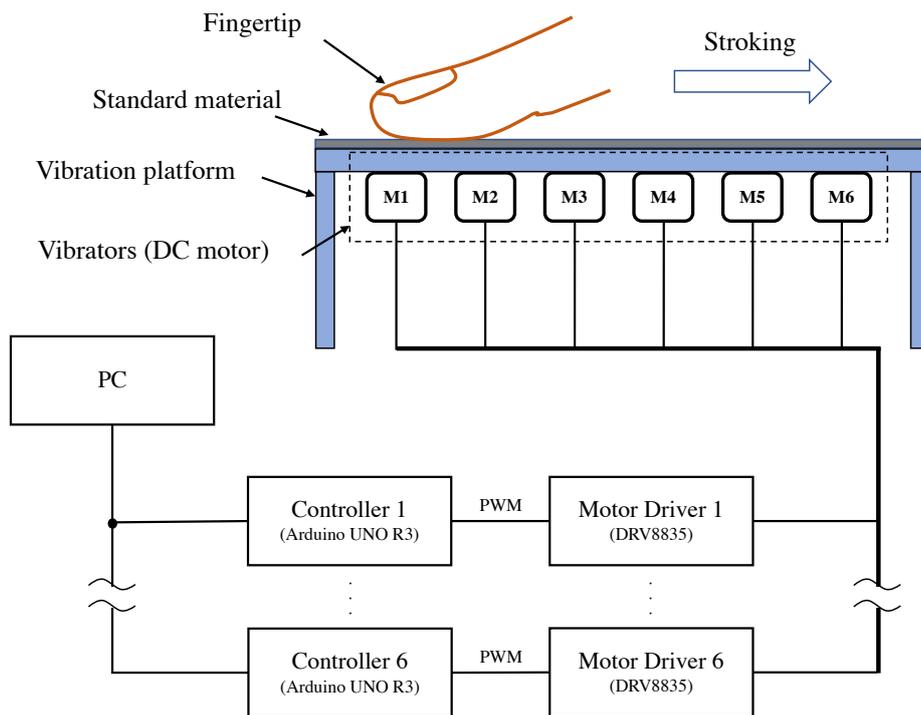


図 6. 提案手法による触感提示系の構成概要

表 4. 振動子による振動提示能力 (振動特徴量基準)

Motor ID	Vibration Intensity	Basis					
		F1 (56-80Hz)	F2 (0-16Hz)	F3 (144-180Hz)	F4 (20-52Hz)	F5 (84-116Hz)	F6 (120-140Hz)
M1	High	34.7	-5.1	2.6	4.0	-4.6	-9.4
	Low	12.0	-0.7	-5.7	3.2	-14.5	-4.3
M2	High	-10.2	30.9	1.6	-5.4	8.4	38.1
	Low	-5.2	20.2	-2.1	-0.2	17.4	37.8
M3	High	4.8	0.6	25.7	-3.0	-2.9	12.0
	Low	3.0	-0.7	13.4	-1.4	1.7	0.4
M4	High	-0.4	0.3	-2.4	9.2	-2.3	5.3
	Low	-	-	-	-	-	-
M5	High	-5.5	-1.3	12.6	1.7	41.4	11.1
	Low	-1.8	4.3	8.1	6.2	28.1	8.1
M6	High	2.7	0.9	-4.1	-2.3	9.4	21.9
	Low	-6.6	1.6	2.3	-1.9	4.0	9.7

3-3 評価実験 1: 印象評価

本研究において提案する触感提示系の構築手法の妥当性を明らかにするため、所望の触感が実装した触感提示系において提示できているかを評価した。

(1) 実験条件

参加者

健康な大学生及び大学院生、男性 2 名、女性 2 名（平均年齢 23.0 歳±1.4 歳）である。また、参加者は右手を利き手としていた。

刺激

本実験では、表 2 の「粗さ」「柔らかさ」それぞれを強調できるかといった観点から評価を実施する。刺激としては、シルクを基準素材としてみた場合に粗さが異なる H01(Sailcloth)、H03(Ramie cotton)、そして粗さに対して柔らかさが加わる H05(Towel)の触感を対象に、周波数特性から表 5 の提示に用いる制御状態を決定し、この制御状態に基づいた 4 種の振動刺激を提示する。また、提示する対象の実際の布地 4 種も実験刺激として用いた。

表 5. 実験刺激毎の振動子の制御状態

Stimuli	Motor ID					
	M2 (0-16Hz)	M4 (20-52Hz)	M1 (56-80Hz)	M5 (84-116Hz)	M6 (120-140Hz)	M3 (144-180Hz)
HC01 (Sailcloth)	Off	High	High	High	High	High
HC03 (Cotton)	Off	High	Low	Low	Low	Low
HC05 (Towel)	High	High	Low	Low	Off	Low
HC12 (Silk A)	Off	Off	Off	Off	Off	Off

評価語

2-2 の印象評価実験に用いた 12 語を使用した。

(2) 手続き

実験は個室において 1 名ずつ行った。実験参加者は、最初に 2-2 で使用したなで方を練習した。その後、モータ駆動音を遮音するためのノイズキャンセルヘッドホン (SONY, WH-1000XM3) を装着した状態で、ブラインド環境下において装着した各刺激について、触感提示装置の提示面をなで 5 段階のリッカート尺度により印象語を評価した。その後、提示データのもとになった 4 種の布地について同様に評価を実施した。また、参加者は必要に応じて実験中に休憩をとることができた。

(3) 結果

図 7 に各刺激について実際の布地 (橙色) と提示結果 (青色) それぞれについて評定値の平均値を算出した結果を示した。この結果から、H03(Ramie cotton)はその触感を良く提示できていることが分かる。また、「粗さ」を強調する方向性については全刺激について良く再現できていることが分かる。また、「柔らかさ」についても振動により変化させることができた。「柔らかさ」については表 3 の結果が振動により制御できることを示唆しており、本分析結果はこの解析結果の妥当性を示すものである。

一方、H01(Sailcloth)、H05(Towel)は「ごつごつ」や「ぼこぼこ」といったようにマクロな粗さを持つが十分に提示できていない。また、「柔らかさ」についても HC03 を除いて強調の方向性を制御できていない。基準材質としたシルクの表面は、平らであり、マクロ的な凸凹を持たない。マクロ粗さを形成する表面の凸凹はなでた際に生じる振動の振幅に対して大きく、より強い振動刺激が必要とされる可能性がある。また、

縦方向の振動が寄与している可能性もあり提示のためには振動台の形状を工夫するなど、さらなる検討が必要であると考えられる。

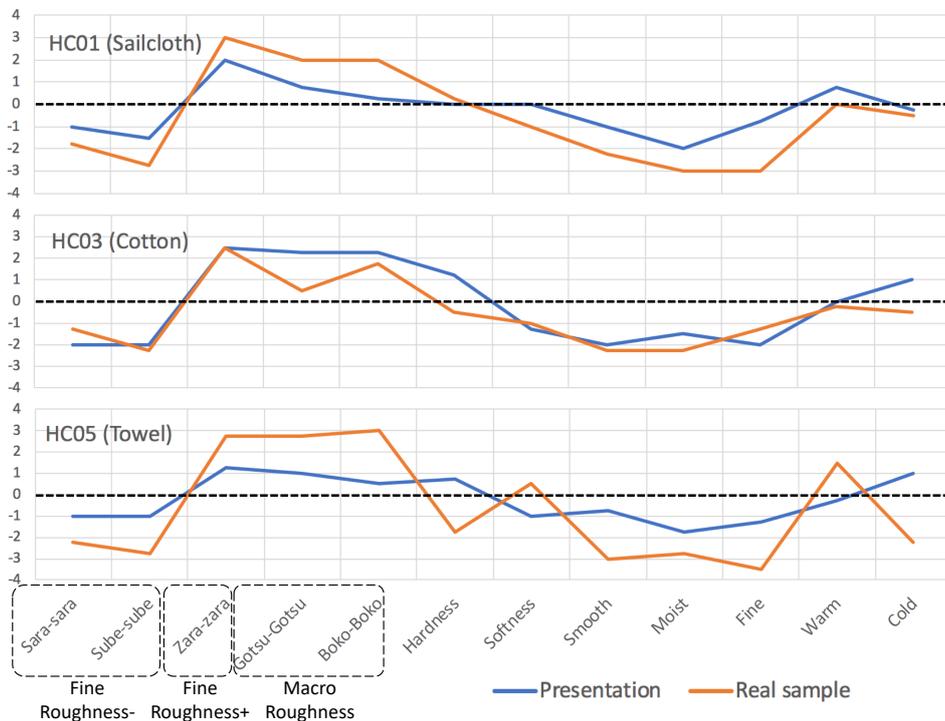


図 7. 触感提示能力の評価結果

3-4 評価実験 2: 実際の布地との類似性

ここでは構築した触感提示系の能力を、実際の布地との類似性の観点から評価した結果を示す。

(1) 実験条件

参加者

健康な大学生及び大学院生、男性 2 名、女性 2 名（平均年齢 23.0 歳±1.4 歳）である。また、参加者は右手を利き手としていた。

刺激

本実験では、3-3 の印象評価に用いたものと同じ刺激を用いた。

(2) 手続き

実験は個室において 1 名ずつ行った。実験参加者は、最初に 2-2 で使用したなで方を練習した。その後、モータ駆動音を遮音するためのノイズキャンセルヘッドホン (SONY, WH-1000XM3) を装着した状態で、触感提示装置をなでた。その上で、実験者が実際の 4 種の布地を提示し最も類似した布地を選択した。また、参加者は必要に応じて実験中に休憩をとることができた。

(3) 評価結果

表 6 に集計結果を示した。HC12 は、基準材質と類似した触感をもったものを選定しており全実験参加者が正解しており参加者が手続きにしたがい実験に参加したことが分かる。全体的な傾向として、印象評価と同様の傾向が得られており、HC03 の正答率が高い。また、HC05 の正答率は 50%であったが同程度のマクロ粗さを有する HC01 と類似していると評価されており、マクロ粗さについてもある種の方向性をもった提示ができていたことが分かった。一方、HC01 は HC03 と類似していると評価されており、HC05 と比較して硬い凸凹

した構造に起因するマクロ粗さの表現は難しいことも分かった。

表 6. 実際の布地の持つ触感と触感提示結果の類似性評価結果

		Selection				concordance rate
		HC01	HC03	HC05	HC12	
Presentation	HC01	0	3	1	0	0%
	HC03	0	3	1	0	75%
	HC05	2	0	2	0	50%
	HC12	0	0	0	4	100%

4 時分割振動提示による触感再現特性の検証

本研究では、振動を時分割に提示することで、複数の振動子を用いて振動を提示した場合と同様の触感提示が可能かを評価した。本節では、検証のために構築した触感提示装置の概要と検証結果について示す。

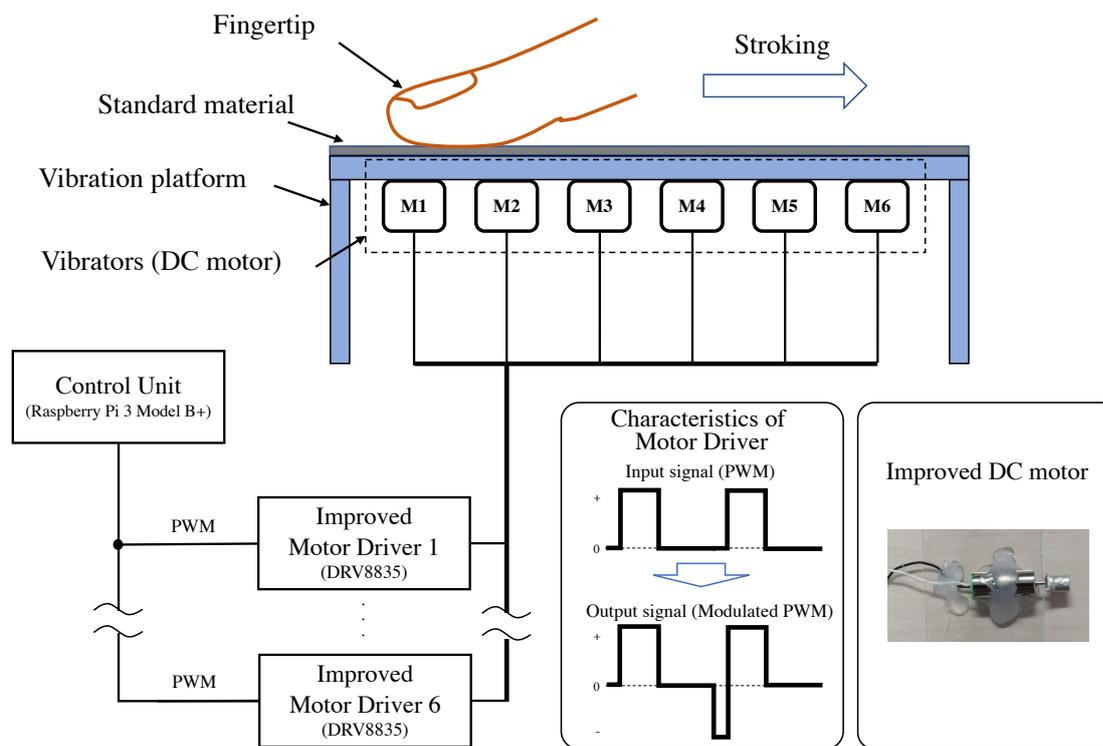


図 8. 時分割振動提示装置の構成概要

4-1 提示装置の実装及び時分割提示タイプ

提示装置は図 7 に示したように、振動子(Vibrator)である DC モータ、振動台(Vibration platform)、基準素材(Standard material)、そして改良したモータードライバー(DRV8835)とコントローラ及び制御ユニット(Raspberry Pi 3 Model B+)から構成される。また、基準素材には HC12(シルク)と同等の素材としてソフトドレープサテン(東レ)を採用した。

時分割提示の検証において用いる振動子は、(1)同じ種類の振動子を使用、(2)DC モータの回転状態の高速制御が可能、の要件を満たす必要がある。この要件を満たすため、高速回転するモータを用い効果的に振動

を提示する手法を開発した。

具体的には、図7のように高速回転が可能なモータ（50000rpm以上）の回転軸に振動子を設置し、さらにモータドライバーについて図7のようにPWM信号の入力に対して回転を停止させるための信号が出力されるように改造した。この処置により、PWM信号の周波数は振動周波数、デューティー比により振幅を、比較的独立して高速に制御できるようになった。

本研究において、時分割提示の制御要素として振動提示に用いるモータ数、すなわち時分割数と対応した次の4つのタイプ（Type of Time Division）と、各周波数成分の振動提示時間（Duration）も想定する。

- タイプ0：6つのモータを全て使用し10Hz, 40Hz, 80Hz, 100Hz, 125Hz, 160Hzの振動成分を同時に提示
- タイプ1：1つのモータに全ての振動成分(10Hz, 40Hz, 80Hz, 100Hz, 125Hz, 160Hz)を時分割で提示
- タイプ2：M2に10Hzと40Hzと80Hz、M5に80Hzと125Hzと160Hzの振動成分を時分割で提示
- タイプ3：M1に10Hzと40Hz、M3に80Hzと100Hz、M5に125Hzと160Hzの振動成分を時分割で提示

ここで、振動提示時間は10Hzの振動提示を行う必要があり100ms以上に設定する必要がある。本研究では、150msと300msを設定した。

4-2 実験条件

参加者

健康な大学生及び大学院生、男性8名、女性3名（平均年齢22.5歳±1.4歳）である。また、参加者は右手を利き手としていた。

刺激

本実験では、3-3と同様に表5の制御状態に基づき、HC01(Sailcloth)、HC03(Ramie cotton)、HC05(Towel)に対応した振動刺激を提示する。提示する刺激には、表7に示した提示タイプと振動提示時間の要因を含む22種の刺激を用いた。

表7. 実験刺激の構成要素

No.	Object material	Type of time division	Duration
1	HC12(Silk)		
2	HC01(Sailcloth)	0	
3	HC03(Ramie cotton)	0	
4	HC05(Towel)	0	
5	HC01(Sailcloth)	1	150ms
6	HC01(Sailcloth)	1	300ms
7	HC03(Ramie cotton)	1	150ms
8	HC03(Ramie cotton)	1	300ms
9	HC05(Towel)	1	150ms
10	HC05(Towel)	1	300ms
11	HC01(Sailcloth)	2	150ms
12	HC01(Sailcloth)	2	300ms
13	HC03(Ramie cotton)	2	150ms
14	HC03(Ramie cotton)	2	300ms
15	HC05(Towel)	2	150ms
16	HC05(Towel)	2	300ms
17	HC01(Sailcloth)	3	150ms
18	HC01(Sailcloth)	3	300ms
19	HC03(Ramie cotton)	3	150ms
20	HC03(Ramie cotton)	3	300ms
21	HC05(Towel)	3	150ms
22	HC05(Towel)	3	300ms

評価語

2-2の印象評価実験に用いた12語を使用した。

4-3 手続き

実験は個室において1名ずつ行った。実験参加者は、最初に2-2で使用したなで方を練習した。その後、モータ駆動音を遮音するためのノイズキャンセルヘッドホン（SONY, WH-1000XM3）を装着した状態で、ブラインド環境下において装着した各刺激について、触感提示装置の提示面をなで5段階のリッカート尺度により印象語を評価した。また、参加者は必要に応じて実験中に休憩をとることができた。

4-4 分析結果

ここでは時分割提示タイプと提示時間を要因として、それらの要因が触感提示に及ぼす影響を検討した。まず、参加者毎に時分割提示タイプと提示時間の組み合わせについて各印象の評定値の平均値を算出した。このデータを対象として、時分割提示タイプ、提示時間の2要因分散分析を実施した。

その結果、マクロ粗さと対応する「ボコボコ」と「ゴツゴツ」の時分割提示タイプの要因について主効果（ $p < 0.05$ ）が認められ、他の印象については有意差が認められなかった。これは時分割提示による触感提示への影響がないことを示唆するものであり時分割提示の有効性を示すものである。

また、主効果が認められた「ボコボコ」と「ゴツゴツ」の印象語に対して時分割タイプに関する多重比較を実施し、どちらの印象語についても振動子の数が最も少ない時間分割タイプ1が、タイプ0（時分割提示を行わない）とタイプ3に対して有意差に異なる（ $p < 0.05$ ）ことを確認した（図9）。この結果から、時間分割数が少ない（使用する振動子数が多い）ほど、触感提示の精度が全ての振動成分を同時に提示する場合に漸近する、すなわち、時間分割数が少ないほど提示精度が向上することを確認した。

以上から、提案手法により構成した触感提示系の提示精度は時分割提示数、もしくは振動子の数により、

$$\text{触感提示制度} = -a \cdot \text{時間分割数} + b$$

以上の形式で定量化できることが示唆される。ここで、 a は時間分割数の触感提示精度低下への感度、 b は全振動子を使って提示した場合の提示精度である。

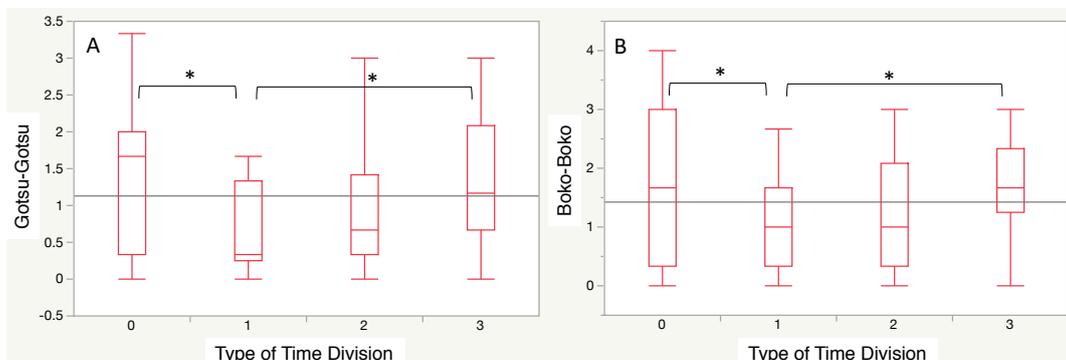


図9. 二要因分散分析の結果（A: ゴツゴツ、B: ボコボコ）

5 まとめ

本研究は試作した装置を用いた物体表面をなでた際に指先に加わる接触力の計測と感性的解析から、複数個の振動成分により触覚が再現できる可能性を見出し、さらに複数の振動成分を時分割で与えることが可能になるとの着想のもと実施したものである。

まず、布地を対象とした接触力計測と感性評価実験により触感形成に寄与する指先の振動形成に関するフィルタバンク構造を抽出した。この機械的特性に基づき触感提示系を設計・実装することで、布地の触感を構成する「粗さ」「柔らかさ」を制御できることを明らかにした。一方、マクロ的な粗さや、柔らかさの方向性の制御については、振動子の性能向上、縦方向の振動制御などの検討課題も明らかになった。

さらに、時分割提示による触感再現能力についても評価を行い、マクロ的な粗さ以外は同時に振動を提示した場合と、時分割振動提示の場合とで触覚印象上の差異がない、すなわち時分割提示で触感提示が可能であることが示唆された。また、時間分割数の増加に対して基本的に触感提示精度が低下することも確認できた。この時分割提示の知見は、応用的側面からエネルギー、そして空間的制約を大きく減らすものである。近年急速に普及してきたモバイル端末には、バイブレーション機能のために振動素子を組み込むことが一般的であり、そのような単純な振動提示系でも触覚再現ができるようになることを期待できる。

本研究は、これまで情報通信の対象ではなかった「触覚」について、その計測と再現に関する技術基盤を開発し、「触覚」をデジタルデータとして通信ネットワーク上で流通させることを目指すものである。以上の成果は、特に触覚の定量化について生理学的特性の観点からの理解を提供するものであり、触覚情報のデジタル化に寄与するものである。

【参考文献】

- [1] BIS, International Banking and Financial Market Developments, BIS Quarterly Review (2018).
- [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/ISST/>
- [4] Asai, T., Yamazaki, Y., Tani, Y., Tobitani, K., Yamamoto, H., Nagata, N.: Sensibility evaluation of an exfoliating lotion with supreme tactile impression during wiping. IFSCC 2018 CONGRESS. P-S5-373 (2018).
- [5] Takemoto, A., Tobitani, K., Tani, Y., Fujiwara, T., Yamazaki, Y., Nagata, N.: Texture synthesis with desired visual impressions using deep correlation feature, 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 739-740 (2019).
- [6] Pacchierotti, C., Sinclair, S., Solazzi, M., Frisoli, A., Hayward, V., Prattichizzo, D.: Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives, IEEE Trans. Haptics 10(4), 580-600 (2017).
- [7] 山崎, 飛谷, 谿, 井村, 長田, “触感と摩擦力の経時的特徴の関係,” 電気学会研究会資料 知覚情報・次世代産業システム合同研究会, 17-22 (2017).
- [8] イエム, 岡崎, 梶本, “DC モータを用いた触感提示,” 日本バーチャルリアリティ学会誌 21(4), 555-564 (2016).
- [9] Lederman, S.J., Skin and Touch, Encyclopedia of Human Biology 7, 51-63 (1991).
- [10] 岩村, “タッチ,” 医学書院 (2001).
- [11] 橋村, “質感サンプルセット,” 日本バーチャル・リアリティー学会論文誌 17(1), 48-49 (2012).
- [12] 永野, 岡本, 山田, “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・リアリティー学会論文誌 16(3), 343-353 (2011).
- [13] 白土, 昆陽, 前野, “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) 73(7333), 2514-2521 (2007).
- [14] 永津, 榎本, 河村, 小林, 山辺, “示指による織布の摩擦触感評価,” 繊維学会誌 64(4), 89-95 (2008).
- [15] 戸田, “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,” 電子情報通信学会 D 94-D(10), 1685-1695 (2011).
- [16] 田中, “振動に関わる皮膚特性, 触知覚, 運動特性,” バイオメカニズム学会誌 41(1), 21-26 (2017).

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Tactile Presentation Scheme based on Physiological Characteristics of the Fingertip	HCI International 2019	2019年7月 採択済み
Development of Measurement and Simulation Scheme for Digitalization of Tactile Perception	The 7th Asia International Symposium on Mechatronics	2019年7月 採択済み