



触力検査：触力指標で可視化する触覚感度評価の開発と検証

Touch Test: Touch Acuity Toward Haptic Sensitivity Inclusion

許 奕豪¹⁾, 梅原 路旦¹⁾, 堀江 新^{1),5)}, 西浦 弘美²⁾, 脇坂 崇平¹⁾, 田中 由浩³⁾, 石戸 奈々子^{1),2)}, 石川 博規⁴⁾, 南澤孝太¹⁾

Yihao XU, Rodan UMEHARA, Arata HORIE, Sohei WAKISAKA, Hiromi NISHIURA, Nanako ISHIDO, Yoshihiro TANAKA, Hironori ISHIKAWA, and Kouta MINAMIZAWA

- 1) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1, yihao.xu, umeharar.ab, a.horie, wakisaka, kouta@kmd.keio.ac.jp)
- 2) B Lab (〒 105-7508 東京都港区海岸 1-7-1 東京ポートシティ竹芝オフィスタワー 8 階 CiP, nanako@ishido.org)
- 3) 名古屋工業大学 (〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, tanaka.yoshihiro@nitech.ac.jp)
- 4) 株式会社 NTT ドコモ (〒 100-6150 東京都千代田区永田町 2-11-1 山王パークタワー, ishikawahiron@nttdocomo.com)
- 5) 株式会社 commissure (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学駒場キャンパス連携研究棟 507 室, a.horie@commissure.co.jp)

概要: 多様な触覚特性を理解することは、インクルーシブな環境づくりや、感覚的ニーズの異なる個人への支援において重要である。触覚の多様性を視覚・聴覚検査のように短時間で評価するため、本研究は複数の周波数における振動検出閾値を測定し、それらを統合した数値「触力」を検査し、グラフと共に可視化できる「触力検査」を提案する。実験・ワークショップを通じて、触力と主観的な触感過敏・鈍麻との関連性を検証し、手法の有効性を評価する。

キーワード: 触覚, 感覚・知覚, 計測・認識, モデル・計算, ユーザインタフェース

1. はじめに

触覚の感じ方には個人差が大きく、微弱刺激に過敏に反応する触覚過敏（日常的な素材や質感を「鋭い」「痛い」と感じる）人がいる一方で、逆に認識しにくいと感じる（刺激認識が低減する触覚鈍麻）人もいることが知られている [1], [2]。このような触覚刺激への個人差は、ASD（自閉症）や ADHD（注意欠如・多動症）などの非定型発達者に多く見られる傾向がある [3]。こうした触覚感度の個人差を、客観的かつ定量的に示すために、医療や研究の現場では Semmes Weinstein モノフィラメント検査、二点識別やニューロチオメーターなどの心理物理的な振動閾値測定が用いられてきた [4, 5]。これらは感覚閾値を精密に測定が可能で、非定型発達者と神経定型者を比較するうえで有用である一方、専用機器、訓練を受けた実施者や時間を要する。会社や学校における健康診断や職場環境の評価といった非臨床的な場面への導入が容易ではなく、日常的な場面で常設されている触覚感度検査は未だ普及していない。そのため、視覚や聴覚のように、触覚特性を数値として把握したり、環境調整の必要性を周囲に説明したりすることが難しいという課題がある。

以上の背景を踏まえ、本研究では触力検査という新しい測定手法を提案する。このシステムは、個人ごとの触覚の

感じ方の個人差を理解し、短時間で数値として可視化するものであり、日常的な場面でも使いやすいように設計されている。社会全体で触覚多様性への認識を高める必要性に動機づけられている。触覚の多様性に対する理解と社会的な認知を広げ、より多くの人が自分に合った触覚環境を選択できるようにすることである。そのために本研究では、個人の触覚感度を数値化し、ユーザにとって分かりやすく伝える仕組みを提案し、ユーザ中心の触覚振動システム設計に貢献する枠組みを構築することを目指す。

2. 触力検査システム

本研究では、触覚感度を評価するための「触力検査ツールキット」を提案する。本システムは、主に以下の 2 つの要素で構成される。

1. 所定周波数の振動刺激を精密に提示する触覚提示デバイスと、それを起動・停止するボタンデバイス構成されるハードウェア。
2. ユーザの反応を記録・計測し、全体的な触覚感度を数値化し、「触力 (Touch Acuity)」として出力するソフトウェアプラットフォーム。

2.1 ハードウェア構成

本システムのハードウェアは、触覚提示デバイスとスイッチボタンの2つから構成される(図1)。触覚提示デバイス FEEL TECH® (アクチュエータ Foster 639897 搭載)は、ユーザの利き手側に装着して皮膚に直接振動刺激を与える。

反対側の手にはスイッチボタンを保持し、ボタンを押したまま振動刺激を開始する。振動はゼロ振幅から始まり、あらかじめ設定された最大値まで徐々に線形に増加する。振動を知覚したタイミングで被験者がボタンを離すと、システムはその時点での経過時間を記録し、周波数ごとの振動検出閾値を計算する。

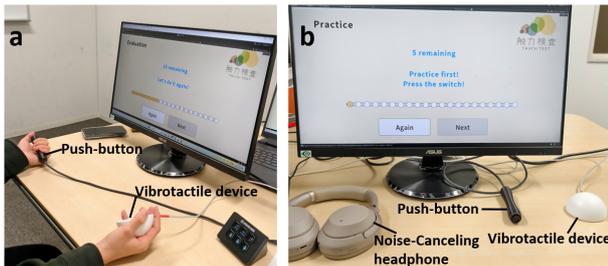


図1: (a) 触力検査実施中の参加者の様子。(b) システム構成: 触覚提示デバイス, スwitchボタン, ノイズキャンセリングヘッドホン, および PC.

2.2 ソフトウェア処理

ソフトウェアは次の三段階で構成される: (1) 基準振幅の測定とキャリブレーション, (2) システム構築と触力計算, と (3) 触力検査ユーザインタフェースである。

2.2.1 基準振幅の測定とキャリブレーション

触覚提示デバイスのアクチュエータは加速度センサ (2302B, 昭和測器) および振動計測用チャージアンプ (1607, 昭和測器) を用いてキャリブレーションを行った。より実環境を再現するために、振動提示デバイスは人工皮膚を装着した手モデルに接触させた状態で固定された。各周波数におけるデバイス出力を測定し、0 dB SPL の信号の正弦信号を入力し、加速度センサでそのときのピーク変位量を基準振幅 $RefAmp$ として記録した。

2.2.2 システム構築と触力計算

キャリブレーション後、システムは Unity 上に構築され、音声再生の制御や時間の記録を担当する。一方、Python はデータのフィッティング処理および最終的な「触力」の計算処理を担う。各試験周波数 f に対して、振幅が 0 から $0.8 \times RefAmp$ まで線形に増加する 10 秒間の正弦波刺激を提示する。この刺激により、各周波数における最大振幅は以下の式で定義される。

$$MaxAmp = RefAmp \times 0.8 \quad (1)$$

各試験周波数 3 回の試行における平均反応時間 t_f に基づき、各周波数での振動検出閾値 ($Threshold$) は以下の式で計算される:

$$Threshold = MaxAmp \times \frac{t_f}{10} \quad (2)$$

その後の処理は、3 段階のフレームワークに基づいて行われる [6], [7].

1. 周波数-閾値空間における \log -Gaussian 関数を以下の式に基づいてフィッティングする。

$$\log(T_f) = a - be^{-\frac{(\log(f) - \log(c))^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

このフィッティングには、各周波数 f とその閾値の対数 $\log(Threshold)$ で、係数 a, b, c, σ を最適化することで、周波数と閾値の関係をモデル化する。得られた最適化係数を用いて、10~1000 Hz の範囲における検出閾値配列 T_f を推定する。

2. 各周波数における感度で重み付けされたパワー $P_s(f)$ は周波数 f での入力刺激の振幅 A_f (1.0 とする) と検出閾値配列 T_f によって計算される。

$$P_s(f) = \frac{A_f^2}{T_f^2} \quad (4)$$

3. これらの値を総和し、さらに対数圧縮することで、スカラー値としての知覚強度 I_s を計算する。

$$I_s = \sum_f P_s(f)^{a_f} \quad (5)$$

ここで、 a_f は周波数依存の重み係数であり、特別な対象群を除き通常は 1.0 とする。次に、得られた知覚強度 I_s に対して対数変換を行い、強度指数 S_T を計算する。

$$S_T = 10 \log(I_s) \quad (6)$$

予備実験 ($n = 1409$) によるキャリブレーションの結果、被験者群における平均 S_T は 38.3 であった。しかし、得られたローデータ S_T (30 50) は参加者にとって直感的な理解が難しく、触覚プロファイルの把握が困難であった。この課題を解決するため、本研究では S_T を以下の式により 0~2 の範囲に正規化し、新たなスカラー値として触力 (Touch Acuity) を定義した。

$$TouchAcuity = \left(\left(\frac{S_T}{38.3} - 1 \right) \times 3.96 + 1 \right) \times 0.6 \quad (7)$$

2.2.3 触力検査ユーザインタフェース

被験者がテスト全体を円滑に進められるように、本システムでは以下の 4 つの画面からなるユーザインタフェースを開発した: 設定画面, 練習画面, 測定画面, 結果表示画面である (図 2)。

練習と測定画面では、テスト手順への習熟と本番測定の実施を行う。練習では、ボタンを押したまま振動を開始し、検出したら離すという手順を案内する。進行状況は視

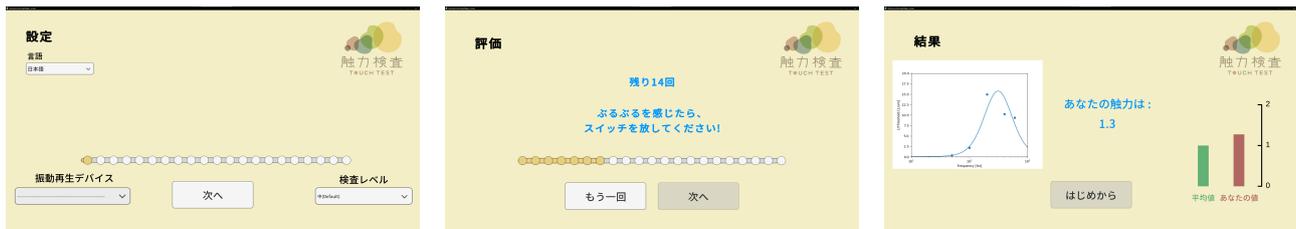


図 2: 設定画面: 言語, モード選択などの初期設定 (左), 練習・測定画面: 進捗の可視化およびバックグラウンドでの触覚感度の測定 (中), 結果表示画面: 触力数値とカーブグラフの表示 (右)

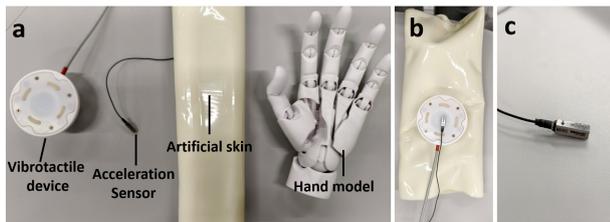


図 3: 基準振幅の測定のセットアップ: (a) 触覚振動提示デバイス, 加速度センサ, 人工皮膚, 手部モデルのキャリブレーション構成, (b) 測定実施中のセットアップ, (c) 振動提示デバイスの変位計測に用いる加速度センサ。

覚的に表示され, 残りの練習回数を確認できるようになっている。

結果表示画面では, グラフと触力が提示され, グラフ上に各周波数における検出閾値が個別のデータポイントとして表示され, それに加えて 10~1000 Hz の範囲にわたる推定逆閾値カーブが示される。また, 計測された触力が画面上に表示し, 過去のデータ (2.2.2 の予備実験) で得られた平均値と比較可能なバググラフも表示され, 触力数値が典型的な範囲よりも高いか低いか, あるいはその範囲内に収まっているかを直感的に確認できるようになっている。

3. 当事者ワークショップ

3.1 ワークショップの実施概要

プロトタイプを検証およびフィードバックに基づく改良を目的として, 2024 年 10 月に, 年齢 10~59 歳の 9 名のボランティアを対象としたワークショップを実施した。このうち 7 名は, 特定の素材や触感に対する好みや嫌悪など, 日常的な触覚困難を有していたと報告している。ワークショップでは, まず教員によるニューロダイバーシティの講義を通じて, 触覚過敏および鈍麻に関する理解を深めた。その後, 参加者は「チクチクする布地が嫌い」「柔らかい素材が好き」など, 日常生活での個人的な経験や嗜好について話し合い, ワークシートに自らの嗜好や困りごとを記入した。その後, 予備実験と同様に 3 周波数 (50, 200, 400 Hz)・各 3 回の構成 (2.2.2 の予備実験) による触力検査を実施した。

3.2 得られた知見と改善

参加者の多くは, 触力という指標の提示によって, 「自分ではもしかして触覚が敏感なのかもしれない」といった曖昧

な不安を, 具体的な数値として可視化できる点に意義を見出していた。こうした数値化された結果は, 家族や介助者と共有できる客観的な指標としても機能しうるものであり, 日常生活におけるサポートのタイミングや方法を話し合うきっかけになることが示唆された。また, ワークショップを通じて, 触力検査システムにはいくつかの改良が必要であることも明らかになった。触力の計測精度を向上させるため, 用いる周波数の種類と範囲を見直した (50, 100, 200, 400, 600 Hz)。加えて, 各周波数における振動が比較的容易に知覚され, 反応がほぼ即時であったため, 検出時間のばらつきが少なく, 感度差を評価しにくいという課題があった。より分布性のある検出時間を得て精度の高いスコアを実現するために, 最大振幅 (式.1) を定義する数式にゲイン係数を導入し, 振幅の上昇速度を意図的に遅くした。

$$MaxAmp = RefAmp \times 0.8 \times Gain \quad (8)$$

ワークショップ中には, 参加者に対してスコアとその関連グラフを提示し, そのフィードバックをもとに UI デザインの改良を繰り返した。最新版の UI は図 2.(右) に示すように構成されており, とくに左側に表示される「逆閾値カーブ」においては, ピーク値が高いほど触覚感度が高いことを直感的に示す構造になっている。

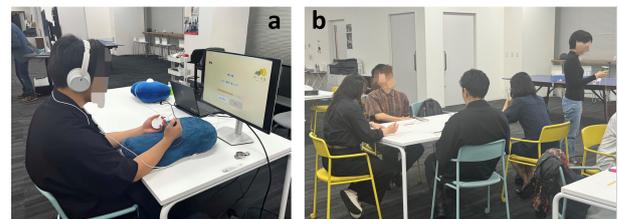


図 4: (a) 当事者ワークショップにおける触力検査の参加者, (b) ワークショップ内での触覚に関する悩みや嗜好についてのグループディスカッションの様子。

4. 実験

本実験の目的は, 改良した触力検査システムとその触力指標の妥当性および信頼性を検証することである。触力数値と Adolescent/Adult Sensory Profile (AASP) [8] における触覚感度サブスケール得点との統計的関連を明らかにし, 両者の収束的妥当性を評価した。

4.1 実験参加者

実験参加者は学生 30 名（平均年齢 26.3 歳，男性 18 名，女性 12 名）であった。全員から参加同意を取得し，本研究は所属機関の倫理審査委員会の承認を得たうえで実施した。

4.2 実験手順

最初に，AASP に基づいて作成した触覚感度サブスケール（13 項目，Likert 5 段階）に回答させ，日常生活での触覚過敏・鈍麻傾向を自己評価してもらった。続いて，衣服素材（ウール，シルク，化繊など）および振動刺激（電車の揺れやスマートフォンの振動など）の好悪を自由記述形式で回答させ，個人の触覚嗜好データを収集した。質問票終了後，触力検査を実施した。被験者は利き手に触覚提示デバイス，5 周波数（50，100，200，400，600 Hz）を各 3 回振動を与える。触力検査後に，説明とフィードバックを行った。

4.3 結果

触力指標と AASP 触覚感度サブスケール（低登録（触覚鈍麻），感覚探求，感覚過敏，感覚回避）ならびに AASP 総得点との相関を，Pearson の積率相関係数を用いて算出した。触力指標は AASP のいずれの尺度とも有意な相関を示さなかった（最大：低登録 $|r| = .154$ ， $p = .417$ （図 5））。

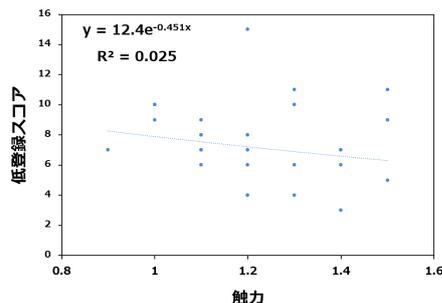


図 5: 触力と低登録スコアの散布図および回帰曲線

5. 考察

触力指標と AASP 触覚感度サブスケール（低登録，感覚探求，感覚過敏，感覚回避）との関連性を検討した結果，触力はいずれの尺度とも統計的に有意な相関を示さなかった。この結果は，振動検出閾値に基づく客観的な触覚感度と，自己申告に基づく主観的な触覚体験とが必ずしも対応せず，互いに独立した側面を捉えている可能性を示唆している。この乖離の要因には，(1) 触力は知覚上の刺激検出感度を計測しているのに対し，AASP は日常生活における情動的・行動的な反応を評価している，(2) 本試験で採用した上昇法が反応時間の遅延や学習効果の影響を受けやすい点，(3) サンプルサイズが 30 名と比較的小規模であった点，などが考えられる。今後はシステムの改善および再検査信頼性（test-retest）や他の知覚検査との比較を通じて，触力指標の妥当性を多角的に検証する必要がある。また，触覚過敏あるいは触覚鈍麻の程度が被験者群間で触力数値分布を比較することで，指標の弁別的妥当性についても検討すべきである。

6. おわりに

本研究では，5 つの周波数の振動検出閾値を 0-2 の範囲に正規化し，それらを単一の「触力」指標として提示する触力検査システムの設計と初期導入について報告した。当事者ワークショップおよび実験を行い，本システムがユーザが自身の触覚プロファイルを把握する上で有用であることが示唆された一方で，主観的評価尺度である AASP との間に有意な相関が示されなかった。今後は，大規模かつ多様な被験者群によるデータの収集と信頼性および妥当性の検証を進めるとともに，システムの測定手法やユーザインタフェースのさらなる改良を行う予定である。最終的には，本手法を健康診断やユーザ中心インタフェース設計に組み込み，触覚多様性を包摂する社会基盤の構築に寄与することを目指す。

謝辞

本研究は，NTT ドコモ，JST ムーンショット研究開発プログラム（JPMJMS2013）の助成を受け，B Lab との共同研究によって実施された。

参考文献

- [1] Roland S. Johansson and Åke B. Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neurosciences*, Vol. 6, pp. 27–32, 1983.
- [2] Joann Peck and Terry L. Childers. Individual differences in haptic information processing: The “need for touch” scale. *Journal of Consumer Research*, Vol. 30, No. 3, pp. 430–442, 2003.
- [3] Carissa Cascio, Francis McGlone, Stephen Folger, Vinay Tannan, Grace Baranek, Kevin A. Pelphrey, and Gregory Essick. Tactile perception in adults with autism: a multidimensional psychophysical study. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, Vol. 38, No. 1, pp. 127–137, 2008.
- [4] Sidney. Weinstein. Fifty years of somatosensory research: From the semmes-weinstein monofilaments to the weinstein enhanced sensory test. *Journal of Hand Therapy*, Vol. 6, No. 1, pp. 11–22, 1993.
- [5] Vera Brill, Jasna Kojic, Mylan Ngo, and Kelly Clark. Comparison of a neurothesiometer and vibration in measuring vibration perception thresholds and relationship to nerve conduction studies. *Diabetes Care*, Vol. 20, No. 9, pp. 1360–1362, 1997.
- [6] Sliman J. Bensmaïa and Mark Hollins. Pacinian representations of fine surface texture. *Percept Psychophys.*, Vol. 67, No. 5, pp. 842–854, 2005.
- [7] Sliman J. Bensmaïa, Mark Hollins, and Jeffrey M. Yau. Vibrotactile intensity and frequency information in the pacinian system: a psychophysical model. *Percept Psychophys.*, Vol. 67, No. 5, pp. 828–841, 2005.
- [8] Catana Brown and Winnie Dunn. *Adolescent/Adult Sensory Profile*. Psychological Corporation, San Antonio, 2002.