



ウェアラブル触覚センサにおける 2 自由度系皮膚振動モデル

Two degree of freedom skin vibration model in wearable tactile sensors

井上雄斗¹⁾, 久原拓巳¹⁾, 湯川光¹⁾, 石川博規^{2,3)}, 田中由浩^{1,4)}

Yuto INOUE, Takumi KUHARA, Hikari YUKAWA, Hironori ISHIKAWA, and Yoshihiro TANAKA

1) 名古屋工業大学 工学研究科 (〒 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町, y.inoue.091@stn.nitech.ac.jp, t.kuhara.538@stn.nitech.ac.jp, yukawa.hikari@nitech.ac.jp, tanaka.yoshihiro@nitech.ac.jp)

2) 株式会社 NTT ドコモ

3) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

4) 稲盛科学研究機構 (〒 600-8411 京都市下京区烏丸通四条下ル水銀屋町 620 番地 COCON 烏丸 7F)

概要: 筆者らの研究グループでは、皮膚を伝播する振動を計測できるウェアラブル触覚センサと振動提示装置を用いて、個々人で異なる触覚の共有を目指している。本研究では、ウェアラブル触覚センサを 2 自由度マス・バネ・ダンパ系でモデル化し、理論値と実際にセンサで取得した皮膚振動との整合性を確認した。さらに、他者の触覚情報に対して、受信者の皮膚伝達関数で補正した振動を生成し、受信者の指で他者の皮膚振動の再現を行った。

キーワード: 触覚共有, 皮膚特性, 皮膚振動モデル, 個人差

1. はじめに

触覚は身体と環境との力学的相互作用によって生じる。そのため、皮膚の硬さや水分量、指紋などの物理特性の個人差の影響で、同じものを触っても、得られる触覚情報に個人差が生じる。筆者らの研究グループでは、皮膚を伝播する振動を計測することで直接対象に触れながら触覚情報を取得できるウェアラブル皮膚振動センサと、振動提示装置を用いた触覚共有に取り組んでいる。触覚共有が実現できれば、個々人で異なる触覚を伝送・体験可能にし、遠隔地からの触覚伝送による通信販売や遠隔医療、技能・スポーツ体験や学習への応用が期待できる。

先行研究 [1] では、人差し指における 1 自由度マスバネダンパ系による皮膚振動モデルが提案されているが、実際の計測では指に触覚センサが装着された状態である。本研究では、より正確に他者の皮膚で生じた振動を再現するために、ウェアラブル皮膚振動センサの装着状態も考慮した 2 自由度モデルを提案する。さらに、振動提示デバイスを用いた触覚共有の実現に向けて、2 自由度系モデルを活用した。他者の触覚情報に対し、受信者の皮膚振動の伝達関数を用いて補正した振動を生成することで、受信者の指において他者の皮膚振動を再現した触覚共有の実現を目指す。

2. モデル解析

2.1 2 自由度系皮膚振動モデル

皮膚の力学モデルとして、有限要素法を用いたモデル [2], ウォーターヘッドモデル [3], マスバネダンパを用いたモデル [4] が報告されている。一方で、触覚センサ自体にも重さ

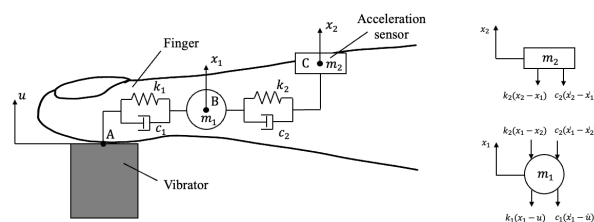


図 1: 2 自由度系マスバネダンパモデル

があり、装着したことで新たな質量や粘弾性要素も加わる。そこで、図 1 に示すように、皮膚に接触させている加速度センサも考慮した 2 自由度のマスバネダンパモデルを提案する。

図 1 のモデルにおいて、振動子から振動を提示することで、指先の接触点 A で発生した入力変位 u が皮膚を伝播し、皮膚の点 B で変位 x_1 を生じる。さらに、指に取り付けた加速度センサも含め、加速度センサの質点 C にて変位 x_2 が生じると考えると、以下の運動方程式を立てられる。ただし、質点 1 は皮膚の振動部分、質点 2 は加速度センサを仮定し、 m_1, m_2 は点質量、 k_1, k_2 はバネ定数、 c_1, c_2 は粘性係数を表す。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -k_1(x_1 - u) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{u}) \\ \quad - k_2(x_1 - x_2) - c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ m_2 \ddot{x}_2 = -k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \end{cases} \quad (1)$$

この運動方程式に対してラプラス変換を適用すると、次

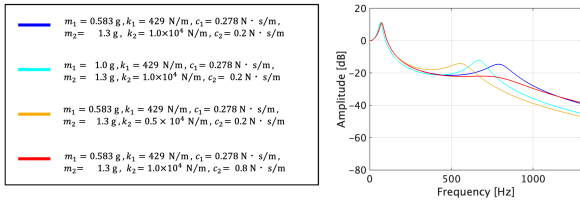


図 2: 2 自由度系モデルでの皮膚伝達関数ゲイン線図

式のようになる。

$$\begin{cases} m_1 s^2 X_1 = -k_1(X_1 - U) - c_1(sX_1 - sU) \\ \quad - k_2(X_1 - X_2) - c_2(sX_1 - sX_2) \\ m_2 s^2 X_2 = -k_2(X_2 - X_1) - c_2(sX_2 - sX_1) \end{cases} \quad (2)$$

以上より、点 A での入力変位 u に対する点 C での変位 x_2 の伝達関数は以下のように求まる。

$$\frac{X_2}{U} = \frac{\alpha\beta}{(m_1 s^2 + \alpha + \beta)(m_2 s^2 + \beta) - \beta^2} \quad (3)$$

ただし、 α と β は次式とする。

$$\begin{aligned} \alpha &= c_1 s + k_1 \\ \beta &= c_2 s + k_2 \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 皮膚伝達関数のゲイン線図のモデル化

m_1 , k_1 , c_1 は, Kawai ら [1] の推定値を参考に $k_1 = 429$ N/m, $c_1 = 0.278$ N · s/m とし, 質量については個人差を考慮し, $m_1 = 0.583, 1.0$ g の 2 通りを用いた。 m_2 は加速度センサの質量である $m_2 = 1.3$ g とし, k_2 と c_2 は, センサ取り付け時の両面テープの粘弾性やリングの締め付けなどで変化すると考えられ, 複数の値を試行的に設定し, $k_2 = 0.5 \times 10^4, 1.0 \times 10^4$ N/m, $c_2 = 0.2, 0.8$ N · s/m とした。これらの値を式 (3) に代入して, 伝達関数の変化を調べた。

図 2 にゲイン線図の結果を示す。図より, 2 つのピークゲインが生じることがわかる。指のサイズが大きい場合を想定した m_1 が大きいとき, および, 加速度センサの取り付け方が変化した場合を想定した k_2 が小さいときには, 2 つのピークゲインの内, 高周波側のピークゲインが低周波へ移動した。また, c_2 が大きくなると高周波側のピークゲインが平坦になり, 2 個のピークゲインが消失する可能性もある。以上より, 指の個人差や加速度センサの取り付け方で, パラメータが変動し, 2 つのピークゲインの周波数位置やピークの有無が変化する可能性が示唆された。

3. 触覚センサ質量に伴う皮膚伝達関数の変化

3.1 実験方法

触覚センサの質量が変わった場合の皮膚振動の伝達関数を実験的に調べた。被験者は, 図 3 に示すように振動子 (ACTUATOR 639897, Foster Electric Company), 加速度センサ (2302B, 昭和測器株式会社), ロードセル (LMA-A-20N, 株式会社共和電業) を組み合わせた装置を親指と人

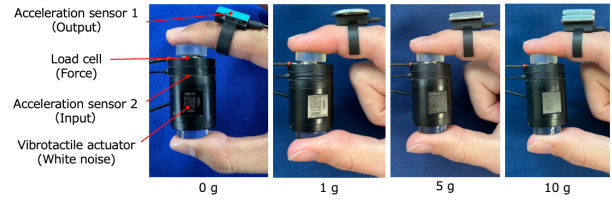


図 3: 皮膚伝達関数の取得方法

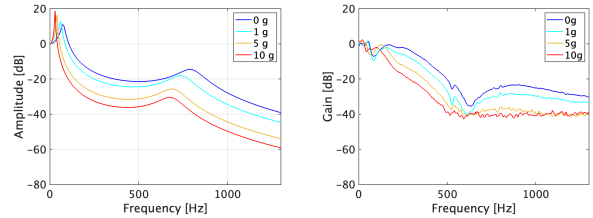


図 4: 皮膚伝達関数のゲイン線図 (左: 理論値, 右: 測定値)

差し指で挟んで握ってもらった。振動子にはホワイトノイズを提示した。加速度センサにより指先への入力振動を, ロードセルにより押し付け力を計測し 5.0 N に統制した。人差し指には, 皮膚振動を測定するために加速度センサ (2302B, 昭和測器株式会社) を装着した。センサの重さを加えた条件として, 重りを加えない場合と, 1, 5, 10 g の重りを取り付けた場合の 4 条件を準備した。

3.2 結果および考察

伝達関数は, 加速度センサで得られた皮膚を介した出力振動と, 振動子自体の入力振動のそれぞれに対し, フーリエ変換を用いて求めた。図 4 の右図に, 実験結果を示す。比較のため, 左図に加速度センサの質量 (m_2) を変化させた場合の式 (3) を用いて求めた理論値を示す。 m_1, k_1, c_1, k_2, c_2 は, それぞれ $m_1 = 0.583$ g, $k_1 = 429$ N/m, $c_1 = 0.278$ N · s/m, $k_2 = 1.0 \times 10^4$ N/m, $c_2 = 0.2$ N · s/m とした。 m_2 は実験と同一にして 4 条件についてゲイン線図を求めた。理論値と実測値のゲイン線図を比較すると, 共通して 2 つのピークゲインが生じていることがわかる。また, センサの重りを重くするほど, 2 つのピークゲインが低周波側に移動し, 全体的にゲインが低下する傾向が見られた。2 自由度系モデルを用いることで, 皮膚振動の周波数応答をより正確に説明できることが示唆された。

4. 他者の皮膚振動の再現による触覚共有

4.1 触覚伝送と無人称化

Kitamichi ら [5] は, 対象物をなぞった際の皮膚振動に対して, 予め取得した皮膚振動の伝達関数によって属人性を除去する無人称化手法を提案している。本研究では, 2 自由度系を考え, 振動子でホワイトノイズを提示し伝達関数を取得する時と, 振動子で他者の皮膚振動を伝送する時で, 指と加速度センサの状態を同じにし, 他者の皮膚振動の正

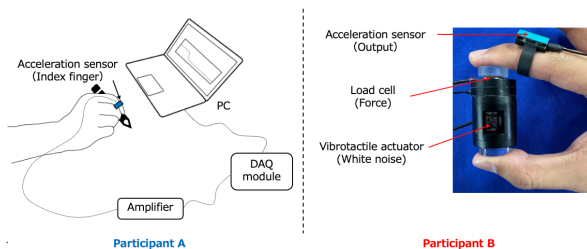


図 5: 実験方法 (左: 送信者 A, 右: 受信者 B)

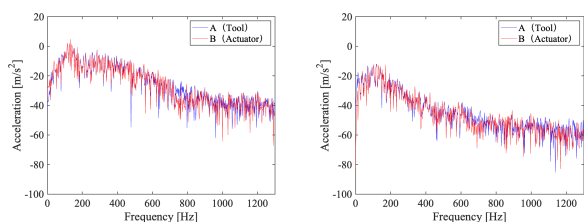


図 6: 被験者 A の道具越しの皮膚振動と被験者 B の指で再現した皮膚振動の比較 (左: 筆記, 右: 歯磨き)

確な再現を目指した。送信者 A の皮膚振動を取得し、その触覚情報に対して、受信者 B の皮膚の逆伝達関数で無人称化する。これにより、受信者 B の指で送信者 A の皮膚振動が再現可能かを検証した。

4.2 実験方法

図 5 に実験方法を示す。被験者 A からは、道具越し（筆記、ジッパー、歯磨き、カッター）の皮膚振動を取得した。次に、被験者 B に対しては、3.1 節と同様にホワイトノイズを提示し、伝達関数 f_B を取得した。ただし、今回は入力信号としてコンピュータ上の入力値を採用し、皮膚と振動子の周波数特性を考慮した伝達関数とした。被験者 A から得られた皮膚振動に対し、被験者 B の皮膚逆伝達関数 f_B^{-1} を掛け合わせて無人称化した振動と、被験者 A のそのままの皮膚振動をそれぞれ提示し、被験者 B の指に装着した加速度センサで皮膚振動を計測した。被験者 B に振動を提示するとき、力加減は全て 5.0 N に統制した。

4.3 結果および考察

図 6 に結果を示す。送信者 A の道具越しの皮膚振動と、受信者 B に振動子で無人称化した振動を提示した時の皮膚

振動の振幅スペクトルが一致していることがわかる。被験者 B の皮膚伝達関数取得時と、生成された被験者 A の皮膚振動を振動子で被験者 B に提示する時で、センサを含む指の状態が同一であり、被験者 B の皮膚特性と振動子の伝播特性が正確に打ち消され、被験者 A の皮膚振動の振幅スペクトルを再現できたと考えられる。

5. まとめ

本研究では、ウェアラブル触覚センサにおける 2 自由度系モデルを提案した。モデルの理論値と計測値を比較し、傾向が一致することを確認した。さらに、センサ装着も考慮した条件の下で、皮膚伝達関数を用いて、受信者の指で他者の皮膚振動の振幅スペクトルの再現を行った。今後は、皮膚振動の主観評価を行いたい。

謝辞 本研究は稲盛科学研究機構フェローシッププログラムの支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] A. Kawai, Y. Tanaka, “Individual differences in skin vibration characteristics and vibrotactile sensitivity at fingertip”, proceedings of IEEE Haptics Symposium 2022, 2022.
- [2] T. Maeno, K. Kobayashi, N. Yamazaki, “Relationship between the structure of human finger tissue and the location of tactile receptors”, JSME Int. J. Ser. C, vol. 41, pp.94–100, 1998.
- [3] M. A. Srinivasan, “Surface deflection of primate fingertip under line load”, J. Biomech., 22, pp. 343–349, 1989.
- [4] Y. Matsuura, S. Okamoto and Y. Yamada, “Estimation of finger pad deformation based on skin deformation transferred to the radial side,” Proc. of Eurohaptics 2014, pp.313–319, 2014.
- [5] K. Kitamichi, H. Yukawa, K. Minamizawa, and Y. Tanaka, “Intersubjective Tactile Sharing Method Based on Human Skin Vibration Characteristics”, 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pp. 299–304 (2022)