解　説

振動に関わる皮膚特性，触知覚，運動特性

田 中 由 浩[1, 2 †]
[1] 名古屋工業大学大学院，[2]JST さきがけ

要旨：振動は触覚において様々な感覚に関わり極めて重要な情報である．我々の触覚は，対象と皮膚との力学的相互作用により皮膚で発生した変形や振動，熱の変化に基づく．また，触覚の受容と運動の間には双方向の関係がある．したがって，触覚には皮膚の力学的特性や運動特性が大きく関与する．本稿では，これらの観点のもと，振動と触覚との関係を，皮膚特性，触知覚，運動特性から，概観したい．皮膚特性では皮膚で生じる振動の周波数特性や，指紋や皮下組織の構造と振動との関係を，触知覚では粗さの感覚と振動との関係を，運動特性では個人差や粗さ知覚における運動調整を主に紹介する．

キーワード：触覚，皮膚振動，皮膚特性，粗さ知覚，双方向性

1. はじめに

我々は触覚を通じて，外界との力学的相互作用を認識し，対象との接触や，対象の形状，テクスチャー，硬さ，温度などを感じ取ることができる．力学的相互作用の１つに振動があるが，基本的にモノに触れた際に振動は発生するものであり，接触の検知のみならず，多様な手触り，さらには硬さの知覚にも影響するように，振動は触覚と多様な関係を持ち，重要な要素となっている．したがって，振動に関わる触覚のメカニズムの解明は様々な応用展開の可能性を持つ．さらに，ヒトは高周波の振動に対しては空間分解能が低く，比較的単純な構成でデバイスを構築しやすく，音響など振動を扱う他の分野のセンシングや信号処理技術なども活用でき，工学的にアプローチしやすいことから，基礎から応用まで，触覚における振動に関する研究は益々盛んになってきている．

ここで，我々の触覚は，対象との力学的相互作用を自身の皮膚を通じて，すなわち，皮膚の変形や振動，熱の移動を基に取得していることに注意しなければならない．したがって，皮膚の力学的な特性，そして押し付け力や速度などの触り方も，触覚の理解や応用には重要な観点になる．さらに，触覚は，受容と運動が双方向の関係にあり，我々は，触覚を感じながら対象を触ることができ，感じた触覚を基に様々な対象や環境，目的に応じて適切に運動を調整することができる．振動と触覚の関係でもこれらの観点は重要であり，筆者らはこれらの観点を基に触覚の基礎と応用の研究を展開している．

触覚は未解明な部分が多く，様々な専門分野と関連し，まだまだ体系化されていないため，断片的にはなってしまうと思われるが，本稿では，上述した観点に関わる研究事例を紹介し，振動と触覚との関係を，皮膚特性，触知覚，運動特性から，概観したい．

2016 年 12 月 7 日受付
† 〒 466-8555　愛知県名古屋市昭和区御器所町
名古屋工業大学大学院工学研究科電気・機械工学専攻
田中 由浩
Tel: 052-735-7443　Fax: 052-735-7446
E-mail: tanaka.yoshihiro@nitech.ac.jp

2. 振動と皮膚特性

ヒトは静的な圧に比べて振動に対して敏感であり，特に 250 Hz 程度の振動に対して最も感度が高い[1, 2]．これは機械受容器の一種であるパチニ小体に関わる特性として知られているが，我々は，皮膚を介して外部からの力学的刺激を皮膚内部の機械受容器で受容しており，皮膚は機械受容器にとって，力学的なフィルタの役割をしているといえる．したがって，皮膚の力学特性を知ることは重要であり，皮膚の粘弾性や構造と触覚との関係について，興味深い知見が報告されており，そのいくつかを紹介する．

2.1　粘弾性

指先の腹部に振動を加えた際に，指側部でも振動は発生し，その振動特性が調べられている．図 1 に示すように，筆者らは，加速度センサを指側部に貼りつけ（ここでは，指全体の振動も確認するため，剛体リングにも加速度センサが付けられている），指先に各周波数の微小振動を与え，指側部の振動を加速度から算出し，入力振動と指側部で発生した振動の振幅比を求めた[3]．その結果，図 2 に示された典型例のように，100-300 Hz 周辺にピークが確認された．Matsuura ら[4]は，剪断方向の振動を指先に入力し，同様の振動特性を得ており，さらに，マス・バネ・ダンパ系で皮膚をモデル化し，各量を推定している．このように，我々の指先の皮膚は，100-300 Hz 周辺の振動を伝えやすくなっており，前述の高周波の振動検出に有利に働いているといえる．他にも，筆者らは，皮膚の伝搬振動を計測するウェアラブルセンサ[5]を開発しており（図 3），これを用いて，指先に振動が加わっ

た際に，第１関節と第２関節の間の指腹部に伝わった振動を計測し，似た傾向を得ている．ただし，全体の振動の伝わりやすさもさることながら，この周波数特性にも個人差があり，興味深い．また，押し付け力を変化させても，この特性は変化する[6]．図４に示すように，押し付け力を大きくすると，振動の伝わりやすさは全体的に大きくなり，ピークの周波数も僅かであるが高周波側に移動する．また，押し付け力が 0.5 N 程度までは変化が良く見られるが，これより大きくなると変化は小さい傾向が見られた．

2. 2　皮膚構造

粘弾性以外にも，皮膚の構造にも振動との関係が見られる．Scheibert ら[7]は内部に MEMS 微小力センサを有する指紋付き人工指を開発し，空間周波数をホワイトノイズのように様々変えた細かい凹凸をなぞる実験を行った．指紋がない

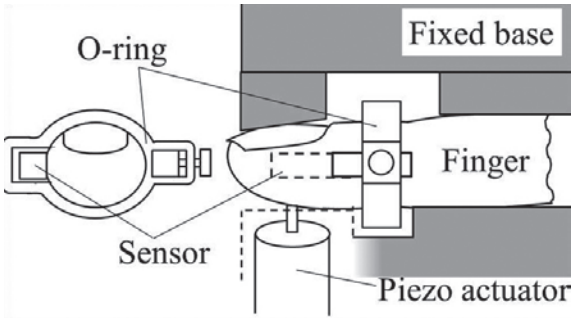


図１　皮膚で生じる振動の周波数特性実験装置（文献[3]を一部改変）

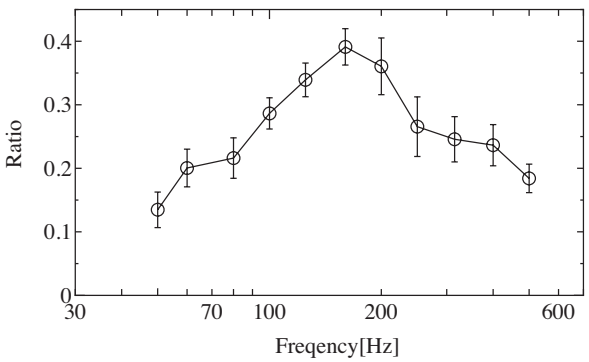


図２　指腹に加えられた振動により指側部に生じた振動の周波数特性の計測例（文献[3]を一部改変）

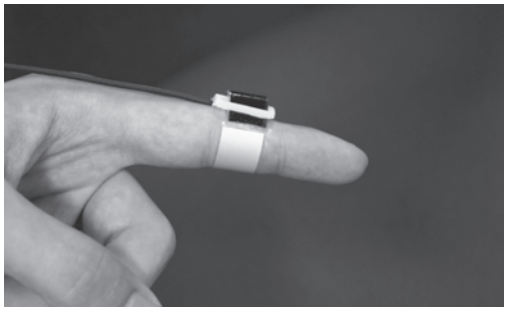


図３　ウェアラブル皮膚振動センサ

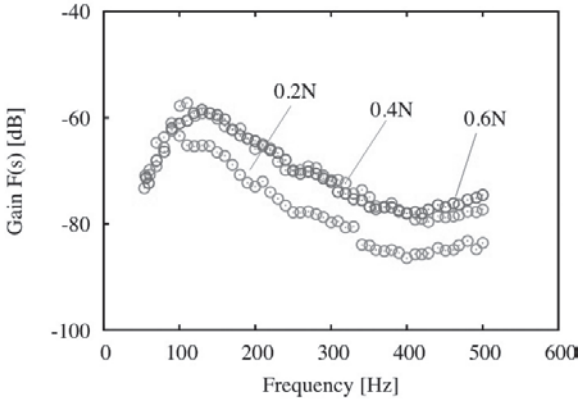


図４　押し付け力による皮膚振動の伝搬特性の変化（一名の被験者から得られた典型例．使用したセンサの電気的特性も含まれているため，相対的評価結果）（文献[6]を一部改変）

場合の人工指についても実験し，比較の結果，人工指で発生した振動の周波数成分が，指紋の間隔で重み付けされることを示した．この特性の下，ヒトがテクスチャーをなぞる際に一般的に使用する指のなぞり速度（100 ～ 150 mm/s）で発生する振動を算出すると，パチニ小体の敏感な周波数帯域で重み付けされる可能性を示した．このように指紋にも，高周波の振動，特にパチニ小体に合致した振動増強特性があることは興味深い．

筆者らは，パチニ小体が皮膚の深部に分布しているにも関わらず，高感度であることに対して，構造的特徴から考察を行っている[8]．パチニ小体は，皮下組織に分布しており[1, 2]，一般に皮下組織は均一な組織としてモデル化されることが多い．しかしながら，これではパチニ小体が広受容野を持つことは説明できるが，感度が高いことには不利な構造となってしまう．筆者らは，サル指の断面標本の顕微鏡下観察から，皮下組織に分布する膠原繊維に注目をした（図 5）．皮下組織の脂肪やパチニ小体は膠原繊維に覆われており，膠原繊維は固く，生体にとっては構造を支持する役割を担う．この特徴を反映した有限要素モデルにより，外部刺激により皮膚内部に発生するひずみエネルギー密度をシミュレーションすると，膠原繊維が，ひずみエネルギーを皮下組織に拡散させる効果を持ち，特に深部に伝えやすくしている可能性を明らかにした．図 6 に解析例を示す．この特性はパチニ小体が広受容野かつ高感度である説明の一助となり得る．なお，未だ 2 次元の数値解析であり，3 次元的な構造原理の理解と数値解析を進めている．

このように，皮膚には隠された触覚のための力学原理があり，その解明は，知覚の基礎研究のみならず，ロボットへの応用[9, 10]など波及効果があり，その発展が期待される．

3.　振動と触知覚

振動は，対象との接触において基本的に生じるものであり，様々な触知覚と関係すると考えられる．表面の手触りはもち

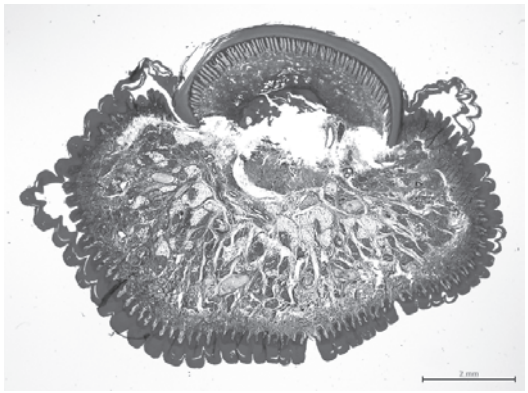


図 5　サル指の断面標本の顕微鏡下画像 [8)]

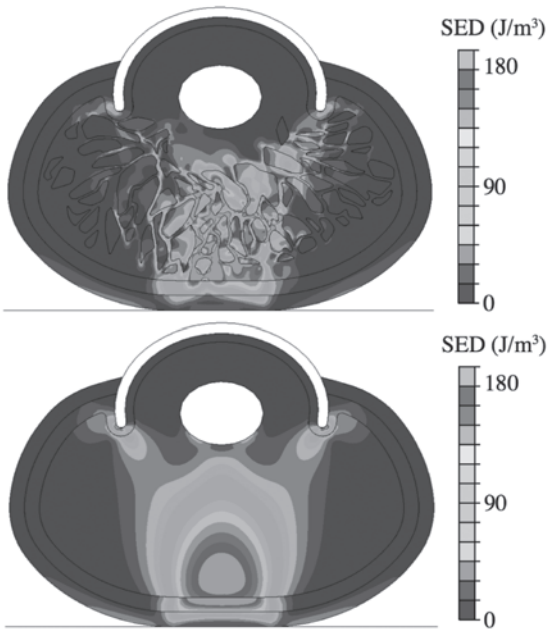


図 6　指断面モデルによる有限要素法解析結果（ひずみエネルギー密度，上：膠原繊維付きモデル，下：均一モデル）[8)]

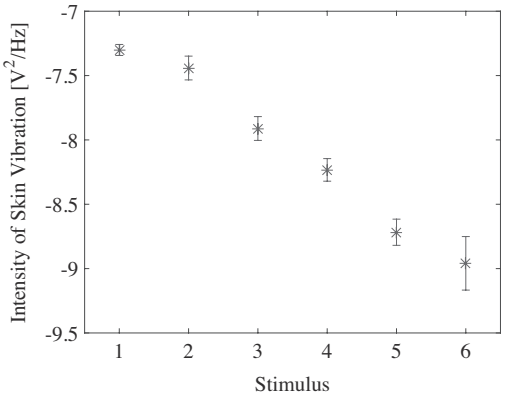


図 7　ラッピングフィルムをなぞった際に得られたウェアラブル皮膚振動センサの出力値の強度（1 名の被験者から得られた典型例．サンプル 1 ～ 6 は，順に表面粗さ *Ra*=4.6，3.0，1.7，1.1，0.7，0.2 μm）[23)]

ろんのこと，硬さとの関与 [11)] も報告されている．ここでは，比較的研究が進んでおり知見も多い粗さ感について述べる．

3. 1　皮膚振動と粗さ知覚

粗さ知覚については以前から多くの研究があり，対象の凹凸のピッチや高さ／深さを変化させて，粗さ知覚との対応関係が調べられている [12-15)]．また，動作との関係については，押し付け力による粗さ感の増大の報告 [14)] や，対象が異なるため限定的な結果と考えられるが，速度の変化に応じて粗さ感が変化しないとする結果 [12, 16)] や変化が見られたという結果 [17)] も報告されている．さらに，凹凸のピッチと粗さの識別の関係については，200 μm 程度のピッチを境界にして，相対運動の必要が分かれることが明らかにされている．200 μm 以上の間隔がある凹凸に対しては，対象に対し指を静止したままで，凹凸の間隔の違いを識別することができるが，200 μm 以下の間隔では，対象表面で指を動かさない限り，凹凸の間隔の違いを識別することができない [18-21)]．このことから，ヒトの凹凸知覚については，マクロな粗さとミクロな粗さでメカニズムが異なり，ミクロな粗さは，パチニ小体の関与が大きいとされている．

皮膚の振動と粗さ／凹凸間隔，粗さ感との関係も研究されている．Delhaye ら [22)] や筆者ら [23)] は，皮膚上の振動を計測し，約 100 Hz 以上の振動成分に対して強度を求め，表面粗さや微細な凹凸間隔と明瞭に対応することを実験的に示している（図 7）．Bensmaia ら [24)] は静止した指腹上で細かいテクスチャーを相対運動させ，その際に皮膚に発生した振動をホール素子により計測し，パチニ小体の周波数感度の特性で計測結果を重み付けしたところ，各サンプル間の粗さ感の類似度と計測結果に対して良好な相関関係が見られることを示している．このように，詳細な解析はさらに進める必要があると考えるが，皮膚の振動と粗さ感には対応関係が見られる．

3. 2　皮膚振動増強による振動知覚増強

上記の皮膚の振動と粗さ感との対応関係，また前章で述べた皮膚の振動伝搬の特性から，筆者らは，皮膚の振動増強による振動感度の向上を試みた [25)]．非伸縮性テープを指先に張り付ける．ただし，指先は対象と直接触れられるようにテープを貼付けていない．このとき，前章で述べたように振動は皮膚上を伝搬することから，非伸縮性テープにより皮膚上の伝搬振動が増強する．テープの有無における指先の 250 Hz の振動に対する検出閾値を計測した結果，テープを貼付けることで，閾値が低下する傾向が見られた（感度が向上）．さらに，振動の弁別実験を行うと，弁別閾値が向上した被験者に対してではあるが，弁別閾値の増強量と皮膚の伝搬振動の増強量との間に相関関係が確認された（図 8）．

関連して近年では，手や腕に対する複数の振動刺激による振動感覚の統合 [26)] やマスク [27)] も報告されている．振動と触知覚を考える際には，神経科学や脳科学的検討も必要になるであろう．

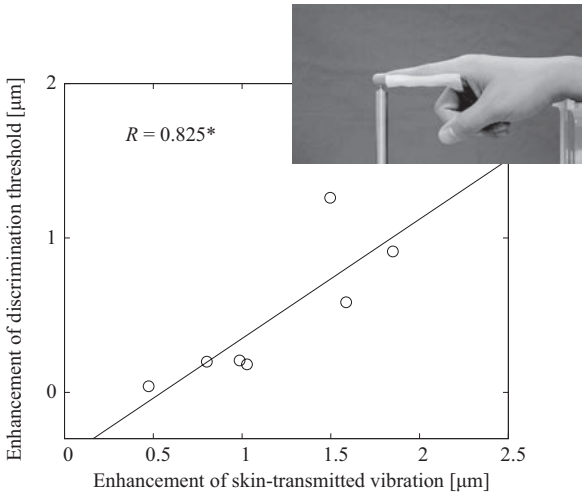


図 8　非伸縮性テープの貼付けによる皮膚伝搬振動の増強と振動弁別能力の向上（文献 [25] を一部改変）

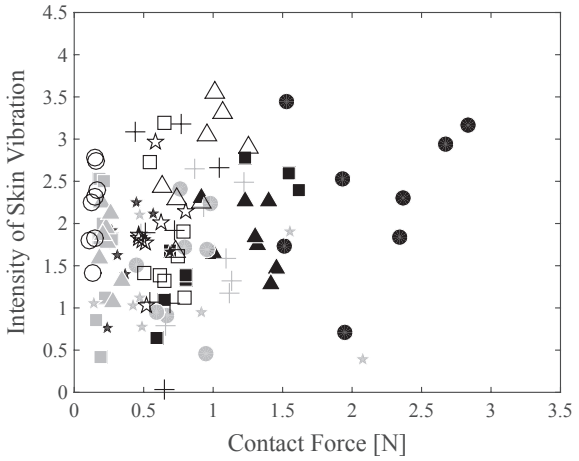


図 9　8 種類のテクスチャーをなぞった際の押し付け力と皮膚で生じた振動の強度の関係（14 名の被験者，各シンボルは同一被験者を表し，各テクスチャーに対する計測結果が示されている）[28]

4. 振動と触動作

触覚において皮膚特性に加えて欠くことができない要素は，運動特性である．どのように対象に触るか，その運動特性も，対象と皮膚との力学的相互作用に直接的に関わる重要な要素である．ここでは，振動と触動作に関する研究を紹介する．

4.1　皮膚振動と押し付け力

我々が対象表面をなぞる際に，使用する押し付け力にどの程度の個人差があるか，またその要因を検討するため，実験を行った [28]．8 種類の異なるテクスチャーを有する試料に対して，指先で表面をなぞるという指示のみ与え，その時に皮膚で発生する振動と押し付け力を計測した．被験者 14 名に対して行った結果，皮膚で発生した振動の強度よりも押し付け力の個人差が大きく，約 0.2-2.5 N の範囲であった（図 9）．また，試料間のバラツキも個人差が見られた．さらに，通常のなぞり時の押し付け力から，半分／2 倍の押し付け力で対象をなぞってもらう実験を追加して行った．その結果，図 10 に示すように，押し付け力の増強に応じて皮膚振動は増強する傾向が見られたが，同時に，押し付け力が大きくなると，試料間の皮膚振動の差が減少する傾向が見られた．この結果から，ヒトはある程度の強度とある程度の試料間の差が現れる押し付け力を使用している傾向が確認された．

4.2　押し付け力と速度の調整

触覚の受容と運動の双方向性について，Lederman ら [29] は，ヒトが目的に応じて運動を変化させることを実験的に示した．近年では，凹凸検出においては，凹に対してより大きな押し付け力を使用するなどの，触動作の量的な調整に関する報告もなされている [30]．筆者らは，粗さの触知覚について，粗さの強度および目的により，触動作がどのように変化するか実験を行った [31]．粗さの強度では，5 種類の滑らかな試料と 5 種類の粗い試料を準備し，目的では，弁別課題と識別課題を与えた．各課題について，押し付け力となぞり速度を計測し，比較を行った（図 11）．その結果，粗い試料よりも滑らかな試料に対して，より多様な押し付け力を使用することがわかった．原因として，滑らかな試料によって生じる皮膚振動が小さいため，試料に応じて押し付け力を多様に調整している可能性が考えられる．また，弁別課題について，識別課題よりも速いなぞり速度を使用していた．原因としては，速度を上げることで粗さの記憶を残し，比較精度を上げようとした可能性が考えられる．速度については，前述したように粗さ感との関係ははっきりしていないが，皮膚振動との関係では，規則的な間隔の凹凸では，なぞり速度に応じて皮膚の振動のピーク周波数が変化するが，サンドペーパーのような試料については，ほとんどピーク周波数が変化しないことが示されている [22]．筆者らも対象をなぞった際の振動をマイクロフォンで計測した際に，同様の傾向を得ている [32]．今後，

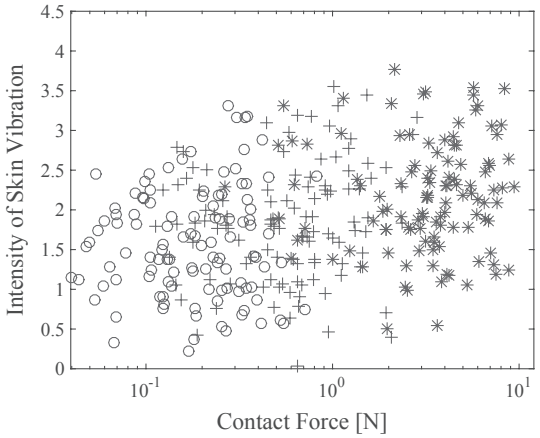


図 10　8 種類のテクスチャーを通常の押し付け力，半分／2 倍の押し付け力でなぞった際の押し付け力と皮膚で生じた振動の強度の関係（14 名の被験者，各シンボルは各条件を表し，全被験者の全テクスチャーに対する計測結果が示されている）[28]

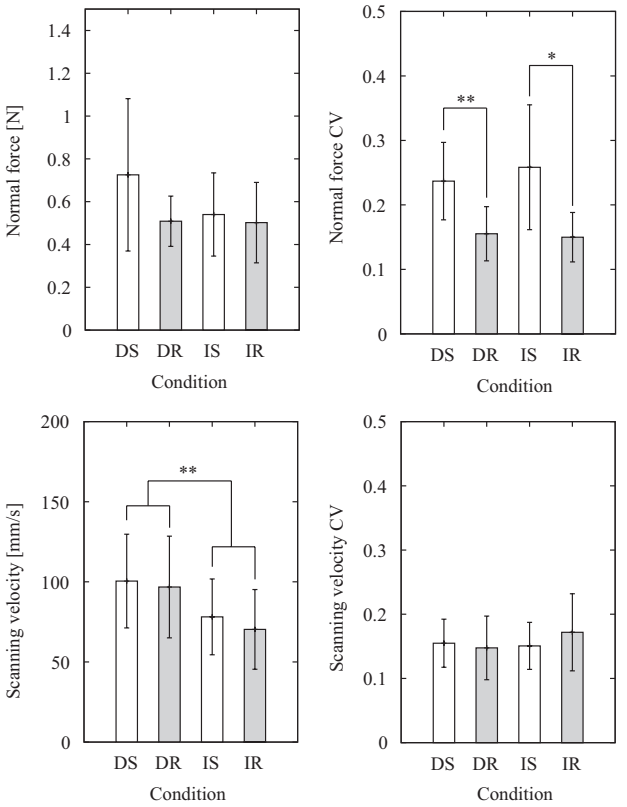


図 11　粗い試料群（R）と滑らかな試料群（S）に対する粗さの弁別課題（D）と識別課題（I）における押し付け力と速度の平均および分散係数（$*p < 0.05$, $**p < 0.01$）[31]

皮膚振動と触動作の関係，さらに前節で紹介したように個人差を見ることで，より詳細に触知覚メカニズムや，ヒトの巧みさが明らかになるであろう．

5. まとめと応用展開

本稿では，触覚が自身の皮膚を通じて得る情報であり，触覚の受容と運動の間には双方向の関係があるという観点のもと，振動と触覚との関係について，皮膚の粘弾性や構造，触知覚，運動特性から，研究事例を紹介した．触覚において振動は対象との接触に加え，様々な感覚と関わりを持ち，工学的にも比較的扱いやすい．例えば，図 12 に示す触覚ディスプレイは，図 3 に紹介したウェアラブル皮膚振動センサで取得した皮膚振動を基に，1 自由度の振動子でこれを呈示することで，指先で触っている触覚を伝えることができる [33]．単純な構成であるが，比較的自然で納得できる触覚を体感することができる．ただし，本ディスプレイでは，取得した皮膚振動をそのまま呈示するのではなく，皮膚振動の伝搬の周波数特性を計測し，この逆関数をイコライザを使用して，取得したセンサ信号にかけている．これにより，自然な触覚を呈示できる．このように構成は単純であるが，ヒトの振動に関わる触覚特性に基づくことが，質を高めるために極めて重要になる．また，触覚は，身体と密接であり，対象の検出のみならず，操作性の向上や身体認識，情動への作用など，多様な応用展開の可能性を有している．このような際にも振動は有用な触覚情報として活用が期待できる [34]．

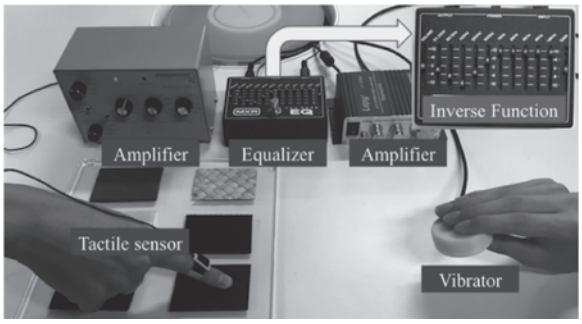


図 12　皮膚振動を用いた振動子による触覚呈示 [33]

なお，振動以外にも，機械刺激の空間的分布情報，温度など他の情報も触覚には重要であり，多様な情報を統合して我々は感覚を得ている．触覚技術の創出と向上に向けて，多様な展開で触覚研究が進むことが重要である．

参考文献

1) Kandel, E. R., Schwartz, J. H. and Jessel, T. M.: Principles of Neural Science ed. 4, McGraw-Hill, (2000).
2) 岩村吉晃: タッチ＜神経心理学コレクション＞, 医学書院, (2001).
3) Tanaka, Y., Horita, Y. and Sano, A.: Finger-mounted skin vibration sensor for active touch, Proceedings of Eurohaptics 2012, 169-174, (2012).
4) Matsuura, Y., Okamoto, S. and Yamada, Y.: Estimation of finger pad deformation based on skin deformation transferred to the radial side, Proceedings of Eurohaptics 2014, 313-319, (2014).
5) Tanaka, Y., Nguyen, D. P. and Sano, A.: Wearable skin vibration sensor using a PVDF film, Proceedings of the IEEE World Haptic Conference 2015, 146-151, (2015).
6) 田中由浩，佐野明人：ウェアラブル皮膚振動センサの応用に関する基礎検討（接触力がセンサ出力に及ぼす影響），日本機械学会 2015 年度年次大会論文集，J1610105，(2015).
7) Scheibert, J., Leurent, S., Prevost, A. and Debregeas, G.: The role of fingerprints in the coding of tactile information probed with a biomimetic sensor, Science, 323, 1503-1506, (2009).
8) Tanaka, Y., Ito, T., Hashimoto, M., Fukasawa, M., Usuda, N. and Sano, A.: Collagen fibers induce expansion of receptive field of Pacinian corpuscles, Advanced Robotics, 29(11), 735-741, (2015).
9) 佐野明人，西恒介，宮西英樹，藤本英雄：触覚情報に基づく遠隔臨場感多指ハンドシステムの構築，計測自動制御学会論文集，40(2)，164-171，(2004).

10) Sonoi, Y., Tanaka, Y., Hashimoto, M., Fukasawa, M., Usuda, N., Otake, Y., Fukumoto, M. and Sano, A.: Basic study on a soft tactile sensor based on subcutaneous tissue with collagen fibers, Proceedings of Eurohaptics 2016, 35-43, (2016).
11) Higashi, K., Okamoto, S. and Yamada, Y.: What is the hardness perceived by tapping?, Proceedings of Eurohaptics 2016, 3-12, (2016).
12) Lederman, S. J.: Tactile roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro- and microsurface structure, Perception & Psychophysics, 16(2), 385-395, (1974).
13) Lederman, S. J., Loomis, J. M. and Williams, D. A.: The role of vibration in the tactual perception of roughness, Perception & Psychophysics, 32(2), 109-116, (1982).
14) Lederman, S. J. and Taylor, M. M.: Fingertip force, surface geometry, and the perception of roughness by active touch, Perception & Psychophysics, 12(5), 401-408, (1972).
15) Taylor, M. M. and Lederman, S. J.: Tactile roughness of grooved surfaces: A model and the effect of friction, Perception & Psychophysics, 17, 23-36, (1975).
16) Meftah, E. M., Belingard, L. and Chapman, C. E.: Relative effects of the spatial and temporal characteristics of scanned surfaces on human perception of tactile roughness using passive touch, Experimental Brain Research, 132(3), 351-361, (2000).
17) Cascio, C. J. and Sathian, K.: Temporal cues contribute to tactile perception of roughness, Journal of Neuroscience, 21(14), 5289-5296, (2001).
18) Hollins, M. and Risner, S. R.: Evidence for the duplex theory of tactile texture perception, Perception & Psychophysics 62, 695-705, (2000).
19) Hollins, M., Bensmaia, S. J. and Roy, E. A.: Vibrotaction and texture perception, Behavioural Brain Research, 135(1-2), 51-56, (2002).
20) Hollins, M. and Bensmaia, S. J.: The coding of roughness, Canadian Journal of Experimental Psychology, 61(3), 184-195, (2007).
21) Ballesteros, S., Munoz, F., Sebastian, M., Garcia, B. and Reales, J. M.: ERP evidence of tactile texture processing: Effects of roughness and movement, Proceedings of the IEEE World Haptics Conference 2009. 166-171, (2009).
22) Delhaye, B., Hayward, V., Lefevre, P. and Thonnard, J. L.: Texture-Induced vibrations in the forearm during tactile exploration, Frontiers in Behavioral Neuroscience, 6, 37, (2012).
23) Natsume, M., Tanaka, Y. and Sano, A.: Skin-propagated vibration for roughness and textures, Proceedings of the 2016 World Automation Congress, 1570256175, (2016).
24) Bensmaia, S. and Hollins, M.: Pacinian representations of fine surface texture, Perception & Psychophysics, 67(5), 842-854, (2005).
25) Tanaka, Y., Ueda, Y. and Sano, A.: Effect of skin-transmitted vibration enhancement on vibrotactile perception, Experimental Brain Research, 233(6), 1721-1731, (2015).
26) McIntyre, S., Birznieks, I., Andersson, R., Dicander, G., Breen, P. P. and Vickery, R. M.: Temporal integration of tactile inputs from multiple sites, Proceedings of Eurohaptics 2016, 204-213, (2016).
27) Tanaka, Y., Matsuoka, S., Bergmann Tiest, W. M., Kappers, A. M. L., Minamizawa, K. and Sano, A.: Frequency-specific masking effect by vibrotactile stimulation to the forearm, Proceedings of Eurohaptics 2016, 335-345, (2016).
28) Natsume, M., Tanaka, Y. and Sano, A.: Individual differences in skin vibration and contact force during active touch, Proceedings of Eurohaptics 2016, 335-345, (2016).
29) Lederman, S. J. and Klatzky, R. L.: Hand movements: A window into haptic object recognition, Cognitive Psychology, 19(3), 342-368, (1987).
30) Smith, A. M., Gosselin, G. and Houde, B.: Deployment of fingertip forces in tactile exploration, Experimental Brain Research, 147(2), 209-218, (2002).
31) Tanaka, Y., Bergmann Tiest, W. M., Kappers, A. M. L. and Sano, A.: Contact force and scanning velocity during active roughness perception, PLOS ONE, 9(3), e93363, (2014).
32) Tanaka, Y., Ueda, Y. and Sano, A.: Roughness evaluation by wearable tactile sensor utilizing human active sensing, Mechanical Engineering Journal, 3(2), 15-00460, (2016).
33) Takekawa, Y., Hasegawa, T., Tanaka, Y., Minamizawa, K. and Sano, A.: Tactile display based on the skin-propagated vibration, Proceedings of the Asia Haptics 2016, (2016).
34) 田中由浩，河島則天，吉川雅博，神田将輝：振動の検知と呈示による義手への触覚付与に向けた基礎検討，計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集，(2016).



田中由浩（たなか よしひろ）
2006 年東北大学大学院工学研究科博士課程修了．同年博士（工学）．現在，名古屋工業大学大学院工学研究科電気・機械工学専攻准教授．2014 年 より，JST さきがけ研究者を兼任．触覚デバイス，触知覚メカニズムなどの研究に従事．2007 年日本機械学会賞（論文），2010 年ロボット学会研究奨励賞などを受賞．日本機械学会，日本ロボット学会，計測自動制御学会などの会員