解　説

触知覚メカニズムと指・皮膚構造

田中由浩[1†]，佐野明人[1]
[1] 名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻

要旨：触覚は，体表全体に備わっているが，特に手が果たす役割は大きい．人は触れることで，対象の形状や質感を知覚することができる．また，滑りの予知など巧みな操作に不可欠な知覚もある．触知覚は，対象と皮膚との力学的相互作用による皮膚の変形や熱の移動を機械受容器が取得することで行われている．皮膚は，機械受容器にとって一種の力学的フィルタであり，人の手や指，皮膚の構造には，触知覚のための巧妙な力学的メカニズムが仕組まれている．多くの触知覚メカニズムがまだ未解明で断片的ではあるが，本稿では，機械受容器に有益な触覚増強をもたらす皮膚構造や知覚対象に適切な指や手の構造について概観し，触覚の観点から人工の手を考察する．

キーワード：触覚，力学的メカニズム，触覚増強，触覚センサ，触覚提示

1. はじめに

人の手は，物を巧みに操るという役割とともに，対象の物理情報を取得するという役割を担っている．特に，触覚は，体表全体に備わっている感覚であるが，体性感覚野において手が関与する領域の面積は広く[1]，手が触覚に果たす役割は大きい．手においては，知覚が刺激されている身体ではなく対象に向きやすい性質がある．人は触れることで，対象の形状や質感を知覚することができる．また，滑りの検出など巧みな操作に重要な知覚もある．本稿では，人工の手の研究開発における一つの参考として，人の手が持つ触知覚特性に焦点をあてたい．

触知覚は，対象と皮膚との力学的相互作用による自身の皮膚の変形や熱の移動を機械受容器が取得することで行われている．すなわち，皮膚は，機械刺激が機械受容器に到達するまでの一種の力学的フィルタの役割を担っているといえる．また，どの身体部位を用いてどのように対象を触ったかも，取得する物理情報に関わる重要な要素となる．触覚研究は発展の途上にあり，ほんの一端ではあるが，そのメカニズムを知ると，人の手や指，皮膚の構造には，触知覚のための力学的メカニズムが仕組まれており，その巧妙さに驚かされる．本稿では，機械受容器に有益な触覚増強をもたらす皮膚の構造，知覚対象に適切な指や手の構造という観点から，筆者らの研究事例や関連する研究事例を挙げつつ，手，指，または皮膚の構造と触知覚メカニズムとの密接な関係を概観していきたい．

2013 年 10 月 21 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機能工学専攻
田中 由浩
Tel: 052-735-7443　Fax: 052-735-7446
E-mail: tanaka.yoshihiro@nitech.ac.jp

2. 触覚の基礎

皮膚には，有毛部と無毛部があり，構造が若干異なる．ここでは，指や手のひらが無毛部に分類されることから，無毛部について述べる[2]．皮膚は，図 1 に示すように，表皮，真皮，皮下組織の三層構造をしており，表皮が最も硬く，真皮，皮下組織の順に柔らかい．この皮膚内部に，時空間的に異なる特性を持つ機械受容器が固有の位置に分布している．図 1 に示すように，浅部（表皮，真皮）には，メルケル細胞とマイスナー小体が，深部（真皮，皮下組織）にはパチニ小体とルフィニ終末が分布している．個々の受容器の詳細については多くの良書があるので，そちらを参照されたい[3-5]．

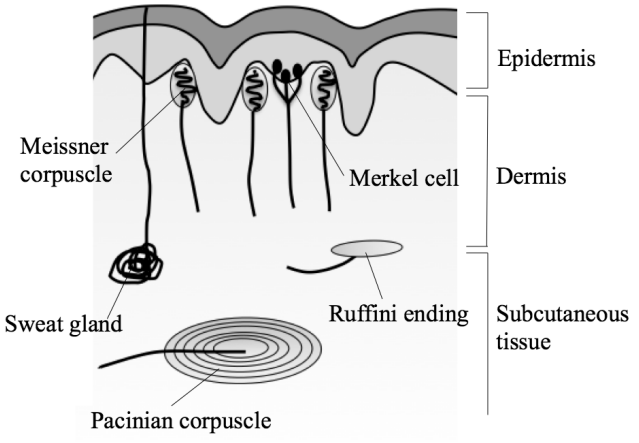


図 1　皮膚構造と機械受容器

3. 皮膚の構造と機械受容器の関係

3.1 真皮乳頭

図 2 に示す触覚コンタクトレンズは，てこの原理という単純な力学メカニズムによって，有用な機能を発現する[6]．



図 2　触覚コンタクトレンズ

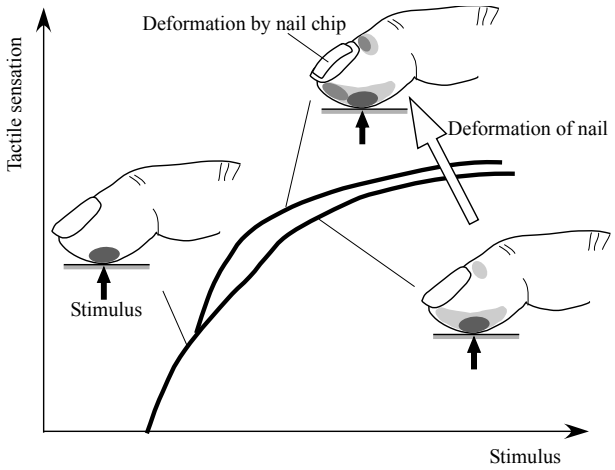


図 3　触覚ネイルチップによる感度変化

薄いシートの上に，ピンが敷き詰められた構造をしており，この上に指を乗せ，微小凹凸の上をなぞると，微小凹凸を大きく感じることができる．凹凸による機械刺激を増幅して皮膚に伝えているのである．微小凹凸の検査をする技能者は，検査時に軍手をしているのだが，軍手を使用することで，微小凹凸がわかりやすくなる．そこで，軍手に着目すると，メリヤス編みで織られており，この構造が上述したてこの機能を有していた．これに気づき，触覚コンタクトレンズが生まれた．

さらに，触覚コンタクトレンズと似た構造が皮膚内部にも存在している．図 1 からわかるように，表皮と真皮の境界面は，真皮乳頭と呼ばれる突起が並んだ構造を成している．Cauna は，解剖学的な観察から，真皮乳頭の機械刺激の増強効果を予測している [7]．前野らは，真皮乳頭を含む指横断面のモデルを用いた有限要素解析により，この構造が，メルケル細胞が分布する位置に発生する応力を増強する役割を持つことを示している [8]．また他にも，指紋が，マイスナー小体が分布する位置の応力を増強しているという解析結果も示されている [8]．

3.2　爪

人の指先の触覚は，特に敏感であり，爪の存在も大きな特徴の一つとなっている．爪は皮膚の一部が分化したものである．爪の機能としては，指先の過度の変形を抑制し，指先に力を集中させ物体把持等を支援するバックプレートとしての役割が良く知られている．しかしながら，マニキュアを爪に塗布した際に，触感の変化を感じることがある．マニキュアが爪に与える影響を調べると，爪を内側に屈曲変形させている可能性が示された．ここから，爪を屈曲変形させることで，指腹部で物体を触った時の触感を鋭敏あるいは鈍感にさせる触覚ネイルチップが提案された [9]．

図 3 に触覚ネイルチップの効果模式図を示す．触覚ネイルチップの効果を的確に得るためには，爪変形による触感変化の原理を知る必要がある．爪変形が指に及ぼす力学的影響を探る中で，爪が触覚に寄与する役割を明らかにした [9, 10]．指腹部に入力された機械刺激が爪を介して，爪根元にも応力集中を発生させており，ここにメルケル細胞が集中している．したがって，機械刺激を爪根元でも感受している可能性がある．さらに，爪により指先の剛性を上げており，指腹部に応力集中あるいは振動伝搬が起きやすくなっている．爪の変形は，これらの特性を変化させており，その結果，触覚が変化すると考えられる．爪の構造も，指の操作性だけでなく，触覚の観点からも価値がある．

3.3　皮膚の振動伝搬

Libouton らは，指先の感覚を局所麻酔でマスクしても，人が粗さの識別を行えることを示した [11]．これは，皮膚表面に伝搬する振動によるものと考えられている．皮膚は体表全体を覆う連続した弾性体である．接触している皮膚で発生した振動は対象と接触していない皮膚にも伝わり，そしてこの振動が触知覚に無意識に使用されている可能性は高い．振動伝搬については，高い周波数に敏感なパチニ小体との関係がいくつかの観点から報告されている．Bensmaia ら [12] は細かいテクスチャーをなぞった際に皮膚に発生した振動をホール素子を用いて計測し，パチニ小体の感度特性（250[Hz] 周辺で最も感度が高い）から，これらの感覚の取得が説明できることを示した．また，筆者らは指腹部に振動刺激を与えたときの指側面に伝搬する振動を加速度センサで計測し，パチニ小体が敏感な 200-300[Hz] 周辺で振動伝搬強度が高くなることを示した（図 4 参照）[13]．さらに，Scheibert らは内部に MEMS 微小力センサを有する指紋付き人工指を開発し，細かい凹凸をなぞった際に得られる振動の周波数成分が，指紋の間隔で重み付けされたことから，通常のなぞり速度（100 ～ 150[mm/s] 程度）で細かいテクスチャーをなぞった際に発生する振動が，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 [14]．

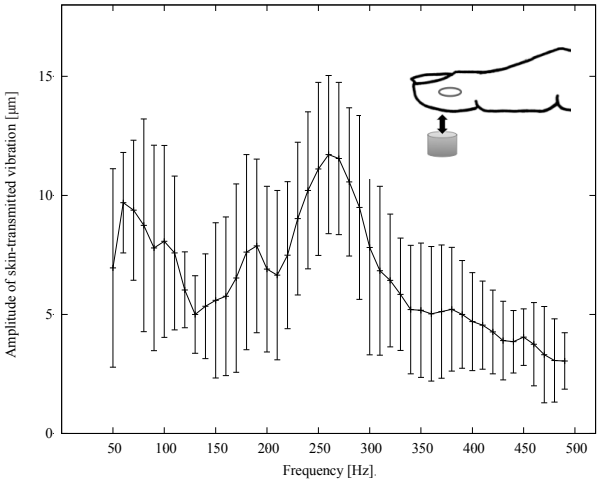


図 4　皮膚の振動伝搬特性（被験者 7 名）

パチニ小体は皮膚の深部にあるにも関わらず高い感度を有しているが，このような皮膚の力学的コーディング が高感度に貢献していると考えられる．

皮膚の振動伝搬に着目した応用として，指に非圧縮性のテープを貼付けることで，皮膚に伝搬する振動を増強させ，振動知覚を向上させることも試みられている [15]．触覚ネイルチップと同様に対象と触れる皮膚接触面には直接干渉しないことから，自然なタッチを保ったまま，触覚を鋭敏／鈍感にできる可能性がある．

4. 知覚対象と指・手の構造の関係

4.1　滑りの予知

人は滑りを予知し，把持力を最適に制御している [16]．把持動作で対象に触れた際に，指表面に局所滑りが生じる．これにより，物体との摩擦に依存する皮膚の横伸びあるいはせん断から摩擦係数が特定でき，皮膚内部のひずみ分布パターンから滑りを検出できる [17]．人は無意識の内にこれを検知し，適正な力で対象を把持できる．この知見を基に，図 5 に示す触覚センサ付きソフトフィンガを開発し，ロボットフィンガによる滑りやすい物体の把持に成功した [18]．表面は曲面を形成し，特に指紋を有している．柔軟かつ曲面形状により，対象に触れることで，接触部の周辺領域が局所的に滑りを起こすが，さらに指紋があることで皮膚が蛇腹のように伸び，局所滑りをより検知しやすくなっている．

4.2　面歪の知覚

幅が 100[mm]，高さが 0.1[mm] 程度の凹凸を指先で知覚することは困難であり，手のひらを当てて，指長手方向になぞることで，知覚がしやすくなる．このような凹凸について，軍手を使用するとさらに知覚がしやすくなる．凹凸をなぞる際の軍手の挙動に着目すると，軍手に円筒座屈が生じ，凹凸により指が微小であるが曲がることに応じて，関節付近に刺激が入っていることを突き止めた [19]．これにより，示指，中指，薬指の 3 指 3 関節に，座屈に応じた押し込み変位を与え，凹凸を感じさせることに成功した（図 6 参照）[20]．離散的な刺激でありながら，ありありと連続した凹凸面を感じることができる．手の構造および対象を触るための動作は，目的とする知覚情報と密接に関係している．

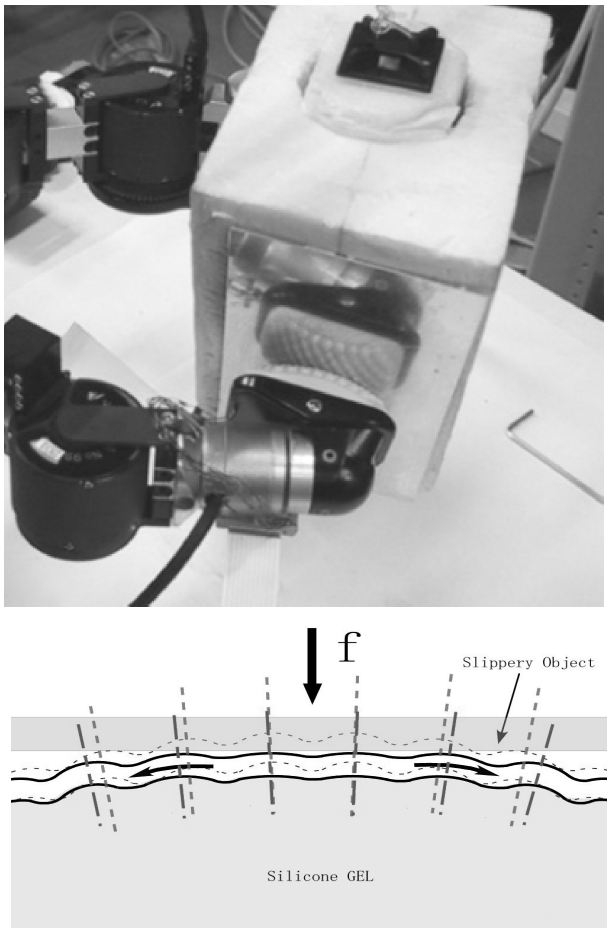


図 5　ソフトフィンガの外観と蛇腹原理

人は知覚対象に応じて，適切に身体の自由度や特性を活用している．対象とする情報に応じて，どのような動作を選んでいるかをまとめた Lederman らの研究は有名である [21]．また，触動作には，どのように指や手を動かすかという選択もさることながら，押し付け力やなぞり速度と行った量的な変化の選択肢もある．近年では，凸より凹みに対して大きな力を使用する [22]，対象の粗さに応じて，なぞり速度を変える [23]，あるいは，押付け力を変化させる [24]，なども明らかになってきている．指長手方向について，押し引きで，摩擦係数が変化するという報告も興味深い [25]．このように触覚は，運動と受容が切り離せず，双方向性を有しているが，微妙な知覚については，この貢献が大いに考えられる．例えば，熟練した検査技能を持つ職人の運動とその感覚を調べることで，触知覚に重要な人の優れた手や指の力学的構造を明らかにすることができるかもしれない．



図 6　指の屈曲による軍手の円筒座屈，触覚ディスプレイ

5．人工の手

5.1　触知覚の観点からの設計指針

人工の手を考える際に，これまで述べてきたような皮膚構造に隠された巧妙な力学原理を反映することは，有用かつ人と調和のとれた設計指針を与えるであろう．ただし，皮膚の構造は決して，触覚のためだけに進化してきたものではない．様々な目的に対して対応できるよう，妥協点も有り設計されているであろう．したがって，人工の手においては，例えば，ある作業や対象に特化させて，その機能を最大限得られるように，人の皮膚構造のバランスを変えて設計することも可能である（触覚コンタクトレンズはこの好例．ピンが当たるため，これを介しての物体操作には向かないが，触覚感度を高めることができる）．

人の手（皮膚は全身であるので実際は身体全てであるが）には，まだまだ巧妙な力学原理が潜んでいると考えている．本稿では，構造を述べてきたが，重量も重要な要素である．腕の重みが上肢の運動に与える影響や，重力が知覚にも影響を及ぼすことが明らかになっている[26]．触覚は，自己言及的である[27]．自身の運動，皮膚構造に伴い，機械受容器に入力される機械刺激も異なってくる．そして，得られる触覚は対象の情報と認知されるために，自身の特性はほとんど意識に上らない．巧妙な力学原理は，無意識の領域に潜んでいる．我々が何気なく行う日常の操作や触知覚において，また，ちょっとした触感の変化に，このような力学原理発見のチャンスが転がっていそうである．

5.2　センサ素子

人工の手において，上述のような巧妙な力学構造に加えて，触覚センサの組み込みも，大きな課題である．特に人の皮膚のような触覚センサを実現することを考えると，人と同程度の時空間特性を持つ触覚センサをどのように実現するか，配線や自由曲面への対応などの課題もある[28]．また，機械受容器で検知されていた情報がどのように統合されて，知覚されるかも未だ明らかではなく，得られたセンサ情報をどのように処理していくかも課題である．なお，人が有する触覚の能力と触覚センサに求められる仕様との対応については，文献[29]で良く解説されているので，そちらを参照されたい．

触感の評価については，主に「触感センサ」と呼ばれるセンサの開発が進められている．人の触覚は相手と自身の皮膚との力学的相互作用に基づくものであり，触ることにより相手も変形するが，自身も変形する．そこで，構造や機械受容器の観点で人に似せた人工指を用いて，人に似せた動作で対象を触り，その時得られるセンサ信号から触感を評価しようというアプローチである．田中らは，パチニ小体に似た出力特性を持つ PVDF フィルムと柔軟構造を用いて，布地の触感を計測するセンサを開発している[30]．前野らは，人と同程度の硬さを有する指紋付き人工指を開発し，マイスナー小体に相当する歪みゲージを配置し，接触による歪み分布から触感評価を行っている[31]．多田らは，複数の静的・動的機械受容器の特性に対応させて，歪みゲージと PVDF フィルムを混ぜた柔軟指を開発し，テクスチャー識別に利用している[32]．マイスナーに似た形状を持つカーボンマイクロコイルも開発されている[33]．人の指に似せたセンサや機械受容器に似せたセンサ素子が開発され，人の特性と比較されることでも，触知覚メカニズムの研究の進展が期待できる．

5.3　触覚フィードバックと一体感

身体の運動や位置に関する情報を与える深部感覚も，広義では触覚に含まれる．深部感覚は，身体イメージと密接に関係している．身体イメージの形成には，触覚フィードバックが重要となる[34]．関連する触覚の錯覚現象に，ラバーハンドイリュージョンというものがある[35]．被験者自身の手とゴムの手を置き，被験者は自身の手が見えないようにし，ゴムの手を見る．ここに，実験者が，被験者の手とゴムの手をほぼ同期させて撫でたり触ったりする．すると，被験者はゴムの手が自身の手のように感じる．視覚的な効果もあるが，触刺激をゴム手と実際の手に同時に与えることが，錯覚現象を発現させるための重要な条件になる．実際体験すると，驚くほど簡単に，身体が拡張される（ゴムの手が実際の手のように感じる）ので，未体験の方は是非お試しいただきたい．最近では，人工指のマスタスレーブシステムに応用して身体所有感を高め，その操作性を向上しようとする研究も試みられている[36]．義手や義足などに

おいても，触覚センサや触覚提示デバイスなどにより触覚フィードバックを組み込むことが期待されるが，その効果として，対象の触覚情報を体感できることに加えて，一体感，身体の拡張が起こりうる．身につけて使用するとき，一体感は，その機能を十分発揮することに加え，使用者の負担軽減に繋がる重要な要素となり得るのではないかと考える．

5.4 温度感覚とぬくもり

我々が触れた時に感じるぬくもりは，安心感に繋がる一つの要素となり得ると考えている．前述した一体感と合わせて，安心感のような，人々の心に働きかける要素も，機能的な側面に加えて，義手等の人が身につける人工物，あるいは，人とふれあうロボットにおいて，重要な設計目標であろう．

ぬくもりの知覚において，少なからず温度感覚は関与しているだろう．これまで機械的な刺激に関する触覚について述べてきたが，温度感覚も重要な触覚により得られる情報の一つである．井野らは温度が対象の材質感提示に重要であることを示している[37]．

我々はある一定の体温を有しているが，温度感覚は，体温と密接に関係している．温度感覚により必ずしも対象の温度を測定している訳ではない．基本的に温度感覚は，体温による熱が対象に触れることで移動することにより生じる．田中らは，予めセンサを体温程度に温め，対象に触れた際の熱の変化を PVDF フィルムの焦電効果により計測することで，温度感覚に関する官能評価値と良好にセンサ出力が対応することを示した[38]．ペルチェ素子により，熱の移動を再現することで，対象の質感を再現することも行われている[37]．温度感覚については，単なる熱の計測に留まらず，情動との関与も深いことから，近年，その応用技術が注目を集めつつある分野である．

6. おわりに

本稿で述べてきた指や手，皮膚が持つ優れた触知覚メカニズムは，ほんの一端にすぎない．また，感覚と自己認識や情動との関係は，さらに研究が活発になるであろう． 今後も，触覚を通じて人の理解を深め，有用な技術を創出したい．

参考文献

1) 篠原正美：3. 触覚の生理学，内川惠二（編）：聴覚・触覚・前庭感覚，102-141，朝倉書店，(2008).
2) Schmidt, R. F. (Ed): Fundamental of sensory physiology, Berlin: Springer-verlag, (1986).
3) Kandel, E. R., Schwartz, J. H. and Jessel, T. M.: Principles of neural science ed. 4, McGraw-Hill, (2000).
4) 岩村吉晃：タッチ＜神経心理学コレクション＞，医学書院，(2001).
5) 大山正，今井省吾，和気典二：新編感覚・知覚心理学ハンドブック，誠信書房，(1994).
6) Kikuuwe, R., Sano, A., Mochiyama, H., Takesue, N. and Fujimoto, H.: Enhancing haptic detection of surface undulation, ACM Transactions on Applied Perceptions, 2, 46-67, (2005).
7) Cauna, N.: Nature and functions of the papillary ridges of the digital skin, Anatomical Record, 119, 449-468, (1954).
8) 前野隆司，小林一三，山崎信寿：ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係，日本機械学会論文集，63(607)，C 編，881-888，(1997).
9) Tanaka, Y., Sano, A., Ito, M. and Fujimoto, H.: A Novel tactile device considering nail function for changing capability of tactile perception, Proceedings of the EuroHaptics Conference 2008, 543-548, (2008).
10) Tanaka, Y., Sano, A. and Fujimoto, H.: Effect of tactile nail chip for tactile sensitivity, Proceedings of the 1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics, (2010).
11) Libouton, X., Barbier, O., Berger, Y., Plaghki, L. and Thonnard, J. L.: Tactile roughness discrimination of the finger pad relies primarily on vibration sensitive afferents not necessarily located in the hand, Behavioural Brain Research 229, 273-279, (2012).
12) Bensmaia, S. and Hollins, M.: Pacinian representations of fine surface texture, Percept. Psychophys, 67(5), 842-854, (2005).
13) Tanaka, Y., Horita, Y. and Sano, A.: Finger-mounted skin vibration sensor for active touch, Proceedings of EuroHaptics 2012, 169-174, (2012).
14) 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).
15) 田中由浩，上田雄一郎，佐野明人：皮膚振動伝搬の操作による触覚感度変化の可能性，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会 ’13 講演論文集，2A2-B01，(2013).
16) Johansson, R. S. and Westling, G.: Tactile afferent signals in the control of precision grip, M. Jeannerod (Ed.): Attention and Performance, 677-713, Hillsdale, (1990).
17) Maeno, T., Kawai, T. and Kobayashi, K.: Analysis and design of a tactile sensor detecting strain distribution inside an elastic finger, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1658-1663, (1998).
18) 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).
19) 佐野明人，田中由浩，藤本英雄：軍手の第 2 の触覚増強メカニズム，第 10 回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，137-138，(2009).
20) 伊藤光，田中由浩，謝愛明，後藤祐樹，佐野明人：触覚増強機構を考慮したマイクロオーダーの面形状提示，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演

会 ’12 講演論文集，1A1-E01，(2012).
21) Lederman, S. J. and Klatzky, R. L.: The hand as a perceptual system, Connolly, K. J. (Ed): The Psychobiology of the Hand, 16-35, Cambridge University Press, (1998).
22) Gamzu, E. and Ahissar, E.: Importance of temporal cues for tactile spatial-frequency discrimination, The Journal of Neuroscience, 21(18), 7416-7427, (2001).
23) Smith, A. M., Gosselin, G. and Houde, B.: Deployment of fingertip forces in tactile exploration, Experimental Brain Research, 147, 209-218, (2002).
24) Tanaka, Y., Bergmann, T. W. M., Kappers, A. L. M. and Sano, A.: Contact force during active roughness perception, Proceedings of EuroHaptics 2012, 163-168, (2012).
25) 嶋田明広，韓鉉庸，川村貞夫：人間の手指の摩擦特性の解析，計測自動制御学会論文集，32(12)，1581-1587，(1989).
26) Sakajiri, T., Tanaka, Y. and Sano, A.: Relation between gravitational and arm-movement direction in the mechanism of perception in bimanual steering, Experimental Brain Research, 231(2), 129-138, (2013).
27) 前野隆司：ヒトの触覚受容機構 - 力学・アナロジー・錯覚という視点から -，電気学会センサマイクロマシン部門誌，122-E(10)，469-473，(2002).
28) 下条誠：触覚技術展望，計測と制御，47(7)，548-553，(2008).
29) 篠田裕之：ヒトのように触れる，日本バーチャルリアリティ学会誌，12(3)，26-31，(2007).
30) 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），73(727)，169-176，(2007).
31) Mukaibo, Y., Shirado, H., Konyo, M. and Maeno, T.: Development of a texture sensor emulating the tissue structure and perceptual mechanism of human fingers, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automatioin, 2565-2570, (2005).
32) 多田泰徳，細田耕，浅田稔：内部に触覚受容器を持つ人間型柔軟指，日本ロボット学会誌，23(4)，482-487，(2005).
33) 本間将人，森田宏，昆陽雅司，前野隆司，元島栖二：カーボンマイクロコイルを用いた触覚センサの動特性解析，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会 ’06 講演論文集，2P2-B09，(2006).
34) Kwok, R.: Neuroprosthetics: once more, with feeling, Nature 497, 176-178, (2013).
35) 本間元康：ラバーハンドイリュージョン：その現象と広がり，Cognitive Studies，17(4)，761-770，(2010).
36) 荒田純平，服部将士，市川翔平，坂口正道：RHI における身体所有感の転移を応用したマスタスレーブシステム操作性向上に関する研究 - 能動触による身体所有感の転移増強に関する報告 -，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会 ’13 講演論文集，2A2-A03，(2013).
37) 井野秀一，泉隆，高橋誠，伊福部達：物体接触時の皮膚温度変化に着目した材質感触覚ディスプレイ方式の提案 - 感覚フィードバック型ハンドための基礎的研究 -，計測自動制御学会論文集，30(3)，345-351，(1994).
38) Tanaka, Y., Tanaka, M. and Chonan, S.: Measurement and valuation of tactile warmth using a PVDF sensor, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 23(3-4), 217-228, (2006).



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機能工学専攻助教．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．



佐野明人（さの あきひと）
1987 年岐阜大学大学院工学研究科修士課程修了．1992 年博士（工学）．現在，名古屋工業大学大学院教授．触覚技術，受動歩行，歩行支援の研究に従事．2013 年度計測自動制御学会 SI 部門触覚部会主査．日本機械学会フェロー．