

ヒト指の構造と触覚認識機構のモデリング

Modeling of Structure and Tactile Sensation of Human Finger

白土 寛和*・前野 隆司**

* ソニー(株) 品川区北品川 6-7-35
 * Sony Corporation, 6-7-35 Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0001 Japan
 ** 慶應義塾大学 理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1
 ** Faculty of Science and Engineering, Keio University, Hiyoshi,

Kohoku-ku, Yokohama 223-8522 Japan
 ** E-mail: maeno@mech.keio.ac.jp

キーワード：触覚(tactile sensation), 触感(texture), 有限要素解析(finite element analysis), モデリング(modeling)

1. はじめに

人間などの生命体の特徴のひとつは、身体を介してオープン環境の情報を入出力していることであり、極言すればコンピュータとの違いは身体を持つことだと言っても過言ではあるまい。したがって、人間の身体デジタルモデルを構築する際には、単に力学系のモデルを構築するのみならず、感覚系および運動系との連関をも含めてモデル化することが重要である。すなわち、究極のデジタルヒューマンは心を持ったコンピュータ内ロボットとなる。これが実現すれば、単に人工物と身体の力学的インタラクションのみならず、人工物と接する人間の運動から行動に至るあらゆる応答のシミュレーションが可能となる。このような極論は置いておくとしても、人間の力学系モデルとしてのデジタルヒューマンは、今後、感覚系と運動系のモデルを含む形で発展してゆくことになる。このため、本稿では、ヒトの身体のうち指先を、感覚認識系のうち触覚を、それぞれ対象とした筆者らの研究例について述べる。

筆者らが触覚を研究対象としている理由のひとつは、味覚等と並んで原始的な感覚であると同時に、触感などの高度な認知にも関わっているからである。すなわち、触覚は、脊髄反射・把持力調整反射といった反射的な機能から、大脳による意識下の認識まで、ヒトにとって本質的な様々な機能を担っている¹⁾。このため、“ずっしりとした低音”や“しっとりとした赤”など、触感を想起する言葉によって質が表現される他の感覚も多い。また、脳にダメージを受け触覚のみを失った女性が、生きている実感を得られないために苦悩している様子が報告されている²⁾といった例のように、触覚は、視覚などに比べ情報量は圧倒的に少ないにも関わらず、その網羅的な特徴により生命のために極めて重要であると考えられる。一方、ヒトと接する人工物の触感を改善する、触感評価のための触覚センサを開発する、触感を遠隔地に伝達する、ロボットに触感を具備させるといった工学的な用途のためにも、ヒトの触覚情報処理機構を明らかにすることは重要である。

ところが、触覚の情報処理機構はほとんど明らかにされていない。ヒトの皮膚には複数種の触覚受容器が配置されており、各受容器のインパルス発火特性はそれぞれ特徴を有することが生理学的に明らかにされている。また、脳科

学の分野において、大脳皮質の体性感覚野の構造が明らかになりつつある。しかし、皮膚への物理的接触から、“ざらざら”などの複雑な触覚の想起に至る過程はこれまでほとんど明らかにされていなかった。その理由のひとつとして、触覚受容器は、他の感覚受容器とは異なり、刺激を直接センシングするのではなく皮膚の変形を介してセンシングしているという点が挙げられる³⁾。すなわち、触覚情報は、受容器に伝達される以前に、物体と皮膚の接触および皮膚の変形という物理的な非線形変換が行われ、情報が取捨選択されている。したがって、触覚の情報処理機構を明らかにするためには、まず、皮膚の力学的インターフェイスを理解することが不可欠である。

以上の背景に鑑み、筆者らは、有限要素法を用いたヒト指の皮膚構造のモデリング、および、脳の情報処理機構に学んだ触覚認知機構のモデリングを行ってきた。本稿ではこれらの概要について述べる。

2. ヒト指の有限要素モデル

筆者らは、ヒト指腹部⁴⁾断面の有限要素モデルを構築し、ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係についての研究を行ってきた^{5)~8)}。まず、ヒトの新鮮屍体を用いた計測により、表皮、真皮、皮下組織の材料定数を決定した⁵⁾。同定した縦弾性係数の値は、表皮、真皮、皮下組織の順に0.136MPa, 0.080MPa, 0.034MPaであり、ポアソン比は全て0.48であった。なお、皮膚の応力-ひずみ特性は実際には非線形性を有するが、平板へ指を2mm程度押込んだ範囲では、線形解析でも十分に精度の良い解析結果が得られることを確認したため、線形モデルを用いている。

また、本モデルを用いて、触覚の知覚に関する様々な解析を行ってきた。例えば、真皮乳頭や指紋、触覚受容器の配置位置と受容感度との関係⁵⁾や、凹凸面を持った対象を接触させた際の各受容器の反応⁷⁾、ヒトが物体を把持する際の接触部における固着・滑り分布⁹⁾、指紋形状の応力分布と受容器発火の関係¹⁰⁾、柔らかさを呈示する触覚ディスプレイ¹¹⁾、ヒトに物体把持時と同様の“局所滑り覚”を呈示する触覚ディスプレイ¹²⁾などの解析を行なった。

しかし、当初のモデル⁵⁾は、角質層がモデル化されていなかったうえ、指紋表面の分割数が粗かったため、微細な凹

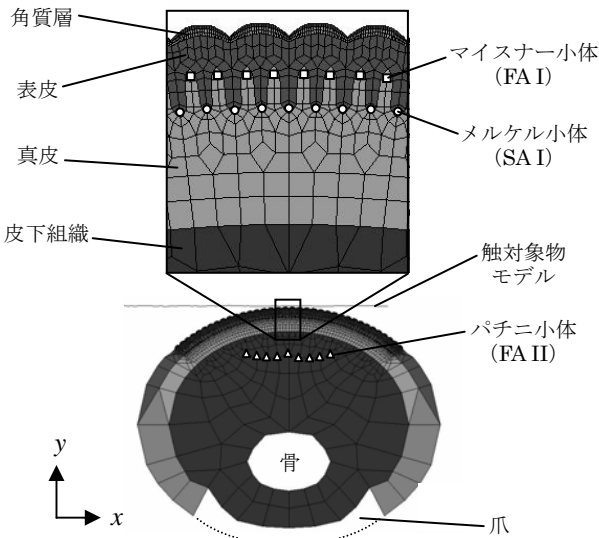


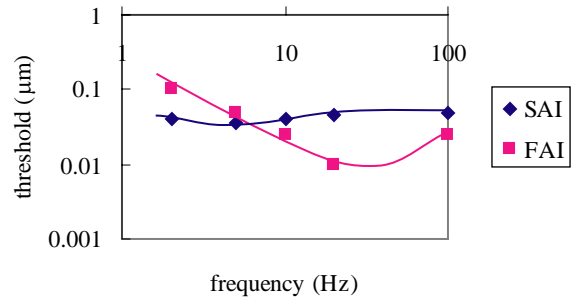
図1 ヒト指腹部の有限要素モデル¹³⁾

凸を有する対象物と指との接触状態を解析することは困難であった。このため、筆者らは、最近、新たな二次元指断面モデルを構築した¹³⁾。

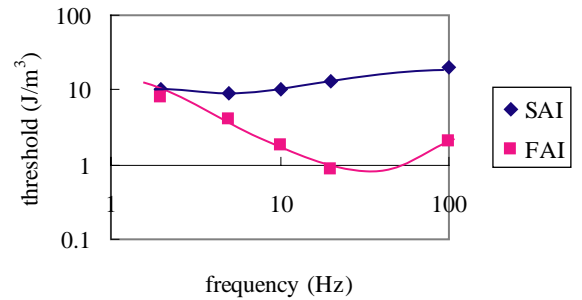
図1に筆者らが構築したヒト指腹部の有限要素モデルを示す。図1のモデルは、従来のモデル⁵⁾の指紋形状を現実¹⁰⁾に近づけるとともに角質層の詳細なモデルを加えたものである。

本モデルの全体形状は、ヒト指と同等の曲率を有する楕円形をしている。この曲率は、指が対象に接触した際に特徴的な応力分布に基づき物体を把持する際の局所滑りを生じさせる要因となる。従来のモデル同様、モデル上部には指紋(epidermal ridge)を表す小さな突起を複数配置し、その内部には真皮乳頭(papilla)と同様の凹凸の境界を有している。ヒト指の弾性構造は、表皮(epidermis)、真皮(dermis)、皮下組織(subcutaneous fat tissue)の3層に大別できる。表皮と真皮の境界である真皮乳頭の表皮から見て凹部にマイスナー小体(Meissner corpuscle, FA I)が、凸部にメルケル小体(Merkel's discs, SA I)が、真皮内部にルフィニ終末(Ruffini endings, SA II)が、皮下組織内部にパチニ小体(Pacinian corpuscle, FA II)が配置されている。各受容器は、それぞれ特有の周波数特性を有している。本モデルでは、図1において、○、□、△で示した箇所のひずみ状態を解析することにより、各受容器の応答状態を調べることができる。

物体との接触部である表皮の内部は多層構造化していることが知られている¹⁴⁾。これは、表層の構成要素であるケラチンが角化するためである。実際に、最表層の角質層(stratum corneum)の剛性は、表皮内部の剛性と比べ数倍高いことがモルモットの皮膚弾性計測により知られている¹⁵⁾。ところが、従来のモデル⁵⁾は、表皮の縦弾性係数を



(a) SAI および FAI の振動検出曲線¹⁶⁾



(b) 指モデルを用いた解析によって得られたひずみエネルギーによる振動検出曲線⁶⁾

図2 受容器の振動検出域曲線とそれに相当するひずみエネルギー閾値

均一としていたために、角質層部分が相対的に柔軟にモデル化されていたことになる。このため、指紋とオーダーの近い微小な凹凸を有する物体と指とが接触することにより表皮部が局所的に変形するような解析を行う場合には、接触現象の再現性および解析の収束性に問題があった。このため、図1のモデルでは、角質層を詳細にモデル化している。まず、角質層内の弾性の変化を表現するために、角質層を外層と内層に分けてモデル化した。角質層外層および内層の縦弾性係数は、同定結果と文献値を考慮し、それぞれ0.816MPa、0.408MPaとした。ポアソン比は全て0.48とした。

また、筆者らは、ヒト指腹部の有限要素解析と従来の生理学的実験結果との比較を行うことにより、本モデルの有効性を確認している。すなわち、Freemanらが行ったサルに対しての実験¹⁶⁾で用いたのと同じ刺激面と本有限要素モデルとの接触解析を行った結果、モデルにおけるメルケル小体の存在位置の単位体積あたりのひずみエネルギー(Strain energy density)と、Freemanらが測定したメルケル小体のインパルス発射特性はほぼ同じ傾向を示すことを確認している⁶⁾。

Freemanらによって調べられた振動検出閾値曲線をもとに、筆者らが構築した図1のモデルによって同等の振動刺激を

与えて解析したひずみエネルギーの値を図 2 に示す。図 2 より、実際の振動検出閾曲線(a)と、ひずみエネルギーによる振動検出閾曲線(b)は、ほぼ同じ傾向を示すことがわかる。ひずみエネルギー曲線は、触覚受容器が発火する閾値を表す。したがって、本モデルを用いて各受容器位置のひずみエネルギーを算出すれば、各受容器のインパルス発火状態を見積もることができる。

本有限要素モデルは、前述のように、指紋とオーダーの近い微小な凹凸を有する物体と指との接触解析を行う際に有効である。このため、筆者らは、低周波振動刺激による静的圧覚呈示ディスプレイ¹⁷⁾の研究のために本モデルを用いてきた。同様に、本モデルは、触感ディスプレイを設計する際や、人工物の触感を解析する際に有効であると考えられる。モデルの 3 次元化や非線形モデルへの拡張、手のモデルとの連成解析等は今後の課題である。

3. 触感認知モデル

2章で述べた有限要素モデルと神経伝達機構や脳の情報処理機構のモデルとを組み合わせれば、実際にヒトが日常感じる触感の情報処理機構をシミュレーションすることが可能となる。このため、筆者らは、ヒトの触感認知系を指先の受容器と脳内の認知部に分け、それぞれをモデル化し結合することにより、触感認知モデルを構築した¹⁸⁾。系への入力は加工紙や金属などの表面形状、出力はその素材を

触った際の感覚量とした。筆者らが構築した触感認知モデルの概略図を図 3 の右側に示す。図 3 の左側には、認知モデル構築のために行った官能評価実験の入出力を示す。

認知モデル構築のために用いる実素材としては、剛体と仮定でき、かつ多様な触感を呈示できることを考慮し、加工紙を中心に 14 種類の素材を選定した。このうち、10 種類をモデル構築用、4 種類をモデル評価用とした。選定した素材に対して、レーザー変位計により表面凹凸パターンデ

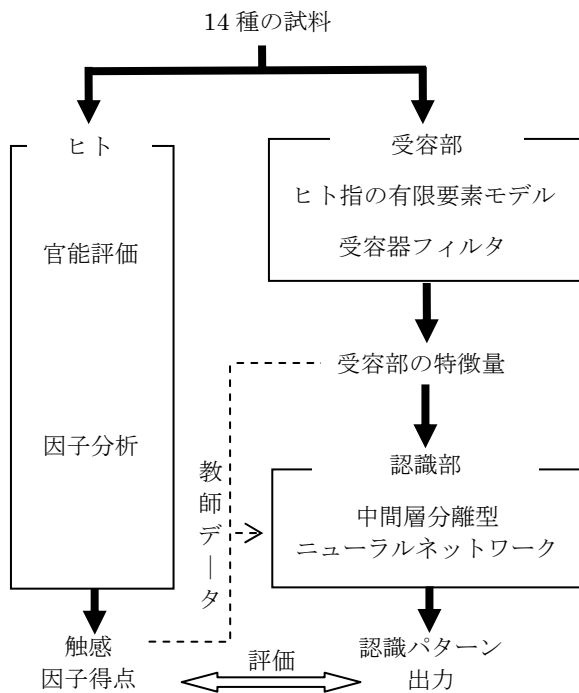


図 3 触感認知モデルの構築手順概要

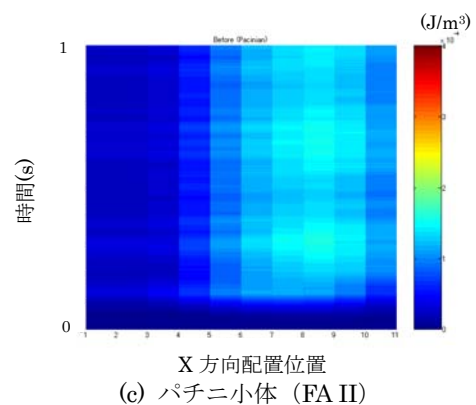
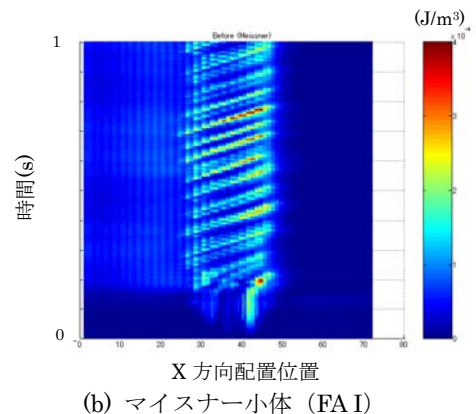
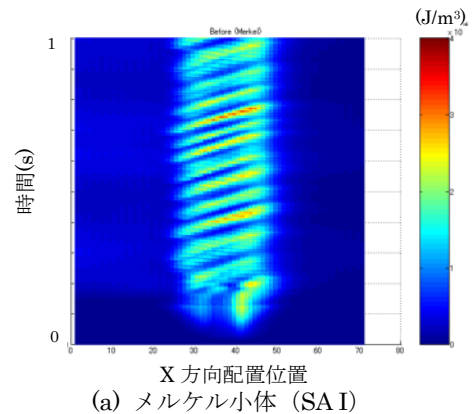


図 4 微細な表面粗さを有する試料モデルと本モデルの接触解析による各受容器配置位置におけるひずみエネルギーの時空間分布解析結果

ータを、ひずみゲージを用いた自作装置により動摩擦係数を測定し、モデルへの入力とした。また、触感認知モデルの定量的な出力を得るため、上記の14種類の素材を被験者30人に触らせた官能評価および因子分析を行った。その結果、粗さ、凹凸、冷たさ、滑らかさに関する因子が抽出された。本モデルでは冷温覚を除くため、冷たさ因子を除く3因子の因子得点を触感認知モデルの出力値および評価値とした。

まず、受容部では、図1のヒト指腹部の有限要素モデルと素材表面のモデルとの接触解析を行い、受容器配置位置のひずみエネルギー時空間分布を算出した。前述のとおり、各受容器配置位置のひずみエネルギーはその受容器のインパルス発射頻度と相関関係にある⁹⁾。有限要素解析した結果の一例を図4に示す。図4より、素材の表面形状や摩擦特性といった表面物性が、各受容器配置位置のひずみエネルギーの時空間分布により表現されていることがわかる。すなわち、表層のメルケル小体およびマイスナー小体では、接触部におけるひずみエネルギーが時空間内で進行波状に伝播していることがわかる。これは、メルケル小体、マイスナー小体は表層にあるため、対象の表面形状がほぼ減衰なく受容器配置位置に伝播していることを表している。また、マイスナー小体では、メルケル小体と比較し、ひずみエネルギーの低周波数情報が除去され、対象の凹凸の特徴が捉えられていることがわかる。これは、マイスナー小体が弾性の異なる真皮乳頭に配置されているために、指紋の振動情報を検出し易くなっているためであると考えられる。一方、深層のパチニ小体では、ひずみエネルギーは空間方向にはゆるやかに分布しつつ、時間方向には高周波振動を呈していることがわかる。これは、パチニ小体が深部に存在しているために、ひずみエネルギーの強度は減衰するものの、複数の指紋からの振動の重畳の結果、高周波振動は保持されているためと考えられる。また、パチニ小体において、空間方向にひずみエネルギーが分布していないことは、指紋一つ一つの振動よりも指全体の挙動の情報を検出していることを表しており、生理学的知見と一致する。

次に、本モデルでは、図4のような各受容器配置位置におけるひずみエネルギーに対し、各受容器の応答特性をモデル化したフィルタを用いて畳み込み積分を行った。なぜなら、各触覚受容器は表1に示すような固有の時刻歴応答特性を有している¹⁰⁾ため、実際に脳内に伝達される受容情報は、この受容器自身のフィルタリングによって情報変換されていると考えられるからである。

フィルタリングの結果、各受容器の触感受容における役割が明確になった。すなわち、メルケル小体は接触圧や低周波数の凹凸、マイスナー小体は粗さパターン、パチニ小体は高周波数の粗さや固着・滑り情報、運動の変化を検出していると考えられる。

次に、各素材に対しフィルタリングしたひずみエネルギー

表1 各触覚受容器のフィルタ特性

Receptor	SA I	FA I	FA II
Type	Low-pass	Band-pass	Band-pass
Order	1st	1st	2nd
Band pass frequency (Hz)	50	70	120
Central frequency (Hz)	-	40	250
Gain	0.04	0.1	10

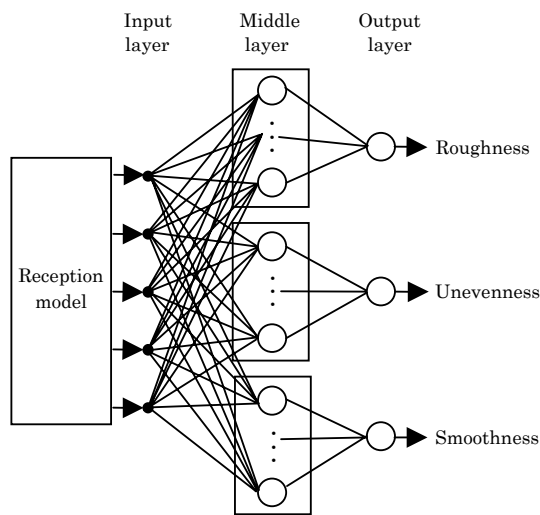


図5 ニューラルネットワークによる認識部のモデル

一の時間方向の振幅の平均値を算出し、受容部の特徴量とした。また、算出した特徴量は実際のインパルス発射頻度と一定の相関関係があることを確認したうえで、触感認知部モデルの入力値とした。

視覚の認識においては、物体の運動・形状・色彩等の結び付け問題を解くために視覚野が階層およびモジュール構造を有していることが、解剖学・計算論的神経科学により明らかにされている¹⁹⁾²⁰⁾。この知見を触覚に適用し、触感認知部モデルでは、指の有限要素解析およびフィルタリングにより算出された受容部の特徴量と、ヒトの触感評価との関係を、中間層分離型のニューラルネットワークにより表現することとした。すなわち、ヒトはそれぞれ独立したモジュールにより、前述の因子分析により求めた3つの因子を認識すると仮定し、図5に示すような、モジュール別に中間層を独立させた3層のフィードフォワード型ニューラルネットワークにより認識部のモデルを構築した。ネットワークのそれぞれの重みは、モデル構築用の素材10種の入出力値を教師データとして、誤差逆伝播法を用いて学習させた。構築したネットワークに、評価用素材4種の受容特性の特徴量を入力し、出力値を算出した。その結果、認

識パターンの出力値がほぼ全ての因子得点の誤差範囲に収まっていた。これより、触感認識機構をニューラルネットワークにより再現できたといえる。また、中間層を分離したネットワークと一体のネットワークとを比較した結果、中間層分離型のネットワークの方が誤差および学習回数が少なかった。すなわち、中間層をモジュール化したモデルによって、情報処理の精度および計算速度が向上したといえる。この触感認識のシミュレーションを通して、体性感覚野の情報処理系においても、視覚野同様の階層性・モジュール性²⁰⁾が用いられていることが示唆されたといえる。

このような感覚系のモデル化を行い、刺激と認識の関係をシミュレーションすることにより、感覚評価システムや新規デバイス開発への示唆を得ることができると考えられる。また、ロボットのように外部環境に対してオープンな機械の認識機構の構築にもつながると考えられる。冷温覚などの他の感覚との統合、リアルタイムな認識システムへの拡張などは今後の課題である。

4. おわりに

本稿では、まず、筆者らが行ってきたヒト皮膚の有限要素解析について述べた。触覚は、皮膚自身の弾性変形を検出する感覚である。そのため、皮膚の力学的特性を解析することが触覚認識機構解明のために重要である。有限要素解析により、ヒトの知覚機構を解明するのみならず、触覚センサや触覚ディスプレイといった次世代感覚デバイス開発のための指針を得ることができる。次に、有限要素解析、受容器フィルタリング、触感認識部のニューラルネットワークモデルから成る触感認知モデルについて述べた。有限要素モデルのひずみエネルギーは受容器の発火信号と相関があるため、脳の認識機構のモデルと結びつけることにより、ヒトの触覚認識の入出力過程をモデリングすることが可能である。認識過程をコンピュータ上で再現できることは、皮膚構造による非線形情報変換、各受容器の役割、体性感覚野のシステムなどを定量的に検証できることにつながる。これは、ロボットのような人工物にヒトと同様の感覚系を付与することにもつながるであろう。今後、触覚を含めた感覚システムの工学的研究と、脳科学や生理工学、認知情報学、心理学等の研究とがスパイラルに進展することが、新しい人間理解および物創りの発展に寄与するものと考えている。

参 考 文 献

- 1) 前野隆司：システムとしての触覚に学ぶ，日本機械学会誌，109巻1049号，pp. 269-272 (2006)
- 2) オリバー・サククス：妻を帽子とまらがえた男，昌文社，初版，pp. 91-110 (1992)
- 3) 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，Vol.

- 122-E, No. 10, pp. 469-473 (2002)
- 4) 前野隆司：ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能，日本ロボット学会誌，18巻6号，pp. 772-775 (2000)
- 5) 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巻607号C編，pp. 881-888 (1997)
- 6) 小林一三，前野隆司：ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係(第2報)，日本機械学会論文集，Vol. 64, No. 628 C編，pp. 4798-4805 (1998)
- 7) 小林一三，前野隆司：ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係(第3報)，日本機械学会論文集，Vol. 65, No. 636 C編，pp. 3321-3327 (1999)
- 8) 前野隆司：触覚のモデリングと有限要素解析，日本バーチャルリアリティ学会誌，9巻2号，pp. 72-77 (2004)
- 9) 広光慎一，前野隆司：物体保持時におけるヒト指腹部の固着・滑り分布と触覚受容器応答，日本機械学会論文集68巻667号C編，pp. 914-919 (2002)
- 10) 前野隆司，山田大介，佐藤英成：ヒト指紋形状の力学的意味，日本機械学会論文集71巻701号C編，pp. 245-250 (2005)
- 11) 鄭森介，前野隆司：ヒト指腹部における軟らかさ分布検出特性に及ぼす触覚呈示法の影響，日本機械学会論文集C編，Vol. 67, No. 658, pp. 1926-1933 (2001)
- 12) 毛利優之，前野隆司，山田陽滋：バーチャル保持のための局所滑り覚呈示法，日本機械学会論文集72巻717号C編，pp. 1582-1589 (2006)
- 13) 昆陽雅司，前野隆司：微細テクスチャ触感の評価のための精密なヒト指腹部有限要素モデルの構築，第18回計算力学講演会講演集，OS-27A 2702 (2005)
- 14) 橋本健：皮膚の電頭のみかた，金原出版 (1979)
- 15) 松村淑子，生田直子，松本健郎，他：モルモットの角層・表皮・真皮の単軸引張特性，日本機械学会2003年度年次大会講演論文集，Vol. V, pp. 39-40, 2003
- 16) Alan W. Freeman and Kenneth O. Johnson : A Model Accounting For Effects for Effects of Vibratory Amplitude on Responses of Cutaneous Mechanoreceptors in Macaque Monkey, Journal of Physiology, Vol. 323, pp. 43-64 (1982)
- 17) 横田求，昆陽雅司，前野隆司，田所諭：低周波振動刺激を用いた圧覚ディスプレイの開発—振動子形状の影響の評価—，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06講演論文集，2P2-B30 (2006)
- 18) 白土寛和，昆陽雅司，前野隆司：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 (投稿中)
- 19) 岩村吉晃：タッチ (神経心理学コレクション)，医学書院，東京，初版，pp. 218-228 (2001)
- 20) 川人光男：脳の計算理論，産業図書，初版，pp. 303-386 (1991)

[著 者 紹 介]

しろ と ひろ かず 君
白 土 寛 和 君



2004年慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業。2006年慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻前期博士課程修了。2006年ソニー㈱入社，現在に至る。専門は，機械工学，人間工学，センサ工学。

まえのたかし 前野隆司君（正会員）



1986年東京工業大学理工学研究科機械工学専攻修士課程修了，同年キャノン株式会社入社，1995年慶應義塾大学工学部機械工学科専任講師，同大学助教授を経て現在教授。博士（工学）。ロボティクス，触覚，超音波モータ等の研究に従事。日本機械学会，日本ロボット学会，IEEEなどの会員。