

草稿

特集 ■ VR と MEMS 技術

人のように触れる



篠田裕之

東京大学

SHINODA Hiroyuki

1. はじめに

ここ数年、触覚の研究者は急増してきている。この傾向をうけて 2005 年から世界の触覚研究者が集まる World Haptics の開催が始まった。国内のロボットやセンシングに関係する学会においても、触覚のオーガナイズドセッションは投稿論文数が多く、会場は大変活気がある。触覚に興味を持つのは大学の若手研究者だけではない。大手から中小までかなりの数の企業が今後の研究開発のターゲットとして触覚に注目している。現在は実用開発の一手手前で慎重にアプリケーションを探している段階であるが、将来的な可能性に対する期待は非常に大きい。

触覚センシング技術に対するニーズは、時代とともに変化してきている。おもに 2000 年までの流れについては文献 [1] を参考にさせていただくこととし、本稿では特に最近の開発動向、研究課題について述べていくこととする。触覚という言葉には皮膚に分布する受容器で検出される情報(皮膚感覚)と、筋肉が発生する力の情報(力覚)の両方が含まれる。ここでは特に皮膚感覚に焦点をあて、そのハードウェアの技術と MEMS 技術の関係について解説する。

2. 研究開発の三つの方向性

人間の触覚に関連するセンシング技術には現在少なくとも三つの方向性があり、それぞれに開発すべき内容と優先順位が異なっているように思われる。1 番目のターゲットはロボットの全身触覚である。この開発における目下の目標は、実用的な丈夫さを持ち柔らかく自由曲面を覆うことができるデバイスを開発することである。当面の目的において皮膚の一点でのセンシング能力はそれほど高くなくてもよい。まずは全身にくまなく触覚を実装できることが必要であり、センシングの解像度や能力(その内容は後述する)はその後で徐々に高めていけば

よいというのが研究開発の基本姿勢となる。本稿では仮にこれを「全身型皮膚センサ」と呼ぶ。

2 番目の方向性は、VR における触感を忠実に計測できるセンサを実現することである。多くの VR 研究者は触覚までも忠実に再現したいと望んでいるが、そのためにはまず皮膚が対象物に触れたときの触感をデータ化するセンサが必要になる。この目的において最も重要なのは、ヒトが取得しているのと同様な触覚情報を知覚するセンサを実現することである。その目的が達せられればそのセンサがロボットの表面に容易に実装できるものでなくても当面は問題ではない。全身のような広い面積ではなく、まずは体の一部(できれば指先)を代替するのが実現できれば十分である。このような目的のセンサを仮に「触感センサ」と呼ぶ。触感センサは、VR だけでなく工業製品の表面の触感を定量化し、触感という面から製品の品質向上を目指す上でも注目される技術領域である。医師の触診の自動化も、触感センサの応用分野となるであろう。

第 3 の用途は自動作業するハンドの指先のセンサである。ロボット工学と同時に始まった触覚センサの最初の目標は、自動作業をするロボットの指先に取り付けて物体把持の状態を計測することであった。このような目的のセンサをここでは「マニピュレータ触覚センサ」と呼ぶこととする。1980 年代に想定された触覚応用の本命は、ロボットハンドで物体を巧みに把持することであったが、これまでマニピュレータ触覚センサがロボットの指に取り付けられて活用される場面は皆無であった。このあたりの事情については文献 [1] に記されている。しかし最近では完成度の高い触覚センサの開発例も見られるようになっており [3]、また触覚情報を用いた高速マニピュレーションなども実現されるようになってきた [4]。この応用にとって、触感検出の能力が必ずしも人間のそれと同じ特性を持つ必要はない。指の表面における力分

布がベクトルとして正確に計測できることが重要で、その精度、時間応答はむしろ人間の能力を超えたものになることが望ましい。

以上の三つの方向性におけるアプリケーション領域は異なっており、技術開発の力点や実現されるデバイスの形態もそれぞれ異なる。しかしそれらの根底にある問題の多くは共通であり、触覚関連技術が実用化されて技術が成熟した後は結局一つのデバイスに収束していくように思われる。すなわち人間の皮膚のように薄く柔らかく自由な形で成型でき、かつ人間の皮膚のような触感を得ることができるシートが、VRをはじめ様々な領域で活用されていると考えられる。本稿ではその共通問題を整理し、最終形態にいたるまでの開発の道筋を展望する。

なお、前述の三つの方向性に加えて近年重要性を増してきている研究領域として、コンピュータインタフェースのための接触センシング技術が挙げられる。人間の皮膚と環境との相互作用を計測することで、現在のタッチパネルや携帯電話のボタン以上に便利でわかりやすいインタフェースを実現しようという目的である。この場合は、人間の触覚と同じような感覚を検出できるセンサを作ることが第一目的ではない。どのようなインタフェースが使いやすいか、という全体システムの構想と、どのような情報がセンシングできるかという要素技術の知見が同時に勘案され、開発が進められることになる。これに関連する研究についても後ほど言及する。

また、対象表面の硬さなど何らかの機械特性を計測するセンサを触覚センサに含めて考える場合もある。人間の肌や生体組織などの弾性的性質を計測するセンサがいくつかのアプローチで研究されている [5-7]。内視鏡手術において微細なマニピュレータ先端に取り付けられる小型触覚センサも興味深い応用分野であるが [29]、ここでは深くは立ち入らない。

3. 「完全触覚」センサ

前述のように、三つの目的にむけて触覚センサを開発するときの最初の一步はそれぞれ異なるが、人間の触覚の本質について一定の知識を持って開発に取り組むことは有益である。例えば表面での接触の有無だけを検出する大面積の柔軟センサが実現されたとすると、すぐに次のテーマとしてせん断力と垂直力を見分けたり、テクスチャや滑りなどまで検出したくなるであろう。このとき最初に選んだ方法がこれらの検出のための拡張性を持たないものであれば、最初から開発をやり直さなければならない。そこでまず、人間の皮膚と同等な能力をもつ皮膚センサに求められる条件を考察してみる。まず人間の触覚が得ている情報を言葉で列挙すると以下のようになる [1,2]。

- ・接触の場所、力とその方向
- ・滑りと滑りの予知 (滑りそうかどうか)、摩擦
- ・面の 3 次元曲率、鋭い先端の知覚
- ・硬さ、柔らかさ
- ・粘性、ねとねと、ぬるぬる
- ・テクスチャ、布や毛皮などの微細な構造
- ・温度、熱伝導度、かゆみなど機械的刺激以外のもの

さて、人間が得ているこれらの情報を完全にカバーするにはどのような仕様の触覚センサを実現すれば必要十分であろうか。後述するように「必要十分条件」を明示するのはそれほど簡単ではないが、十分条件はある程度の確度をもって述べるができる。それは以下のような仕様で皮膚表面での応力分布を計測するセンサであり、仮にこれを「完全触覚センサ」と呼ぶこととする (ここでは機械刺激の知覚に限定する)。

<完全触覚センサ>

- (1) 皮膚表面でのサンプリング間隔は 1 mm 以下
- (2) 各計測点において力の 3 次元ベクトルが計測される
- (3) サンプリング周波数は 1 kHz 以上
- (4) 計測精度は 16 bit 以上
- (5) センサの弾性的性質が皮膚と同等であること
- (6) センサ表面の摩擦特性が皮膚と同等であること

上記 (1) は指先触覚受容器の配置密度を根拠にしている。そもそも弾性体のローパスフィルタ特性によって、それ以上に細かい空間周波数成分は受容器の存在する深さまで到達することができない [2]。ただし (1) の項目は、人間が 1 mm より細かいパターンの違いを見分けられないと言っているわけではない。人間はミクロンオーダーの表面凹凸形状が変化すればその違いを触感の違いとして検出することができる。ただしそれは表面凹凸の詳細な写真を撮ることとは事情がかなり異なっている。対象物体に触れて指を滑らせると、対象物体の凸部と指紋の凸部の間で不規則に固着と滑りが繰り返される。その結果、表面凹凸の空間周波数は高いものであったとしても、皮膚表面には低い空間周波数を持つ振動成分も同時に発生する。ヒトの触覚はこの成分の違いによって触感の違いを識別しているということである。

上記 (3) は触覚受容器感度の周波数特性に基づいている。人間の触覚は 1 kHz 以上の振動成分にも感度があると言われており、厳密にはこの倍以上のサンプリング周波数が必要になることになるが、ここでは目安としての値を示している。(4) は人間の皮膚を単純なバネと仮定した上で、皮膚の変位を 0.1 μm [8] から数 mm 程度まで知覚できることを根拠にしている。

項目 (5), (6) はきわめて重要な要件である。触感は指

が対象物に触れ、相互が変形することではじめて生じる感覚である。例えば人間の指より硬いものに触れれば指だけが変形して対象物は変形しない。逆に指の方が硬ければ対象物の方が変形する。人間はこのような現象を利用して対象物の硬さを識別していると考えられるが、センサ指の硬さが実際と違うのであればこのような判別が行えなくなる。そもそも指が硬い材料できていると、硬い対象物体とは点でしか接触することができなくなり、ヒトが物体を把持している場合とは異なる状況で物体に触れていることになる。

4. 完全触覚センサは過剰性能

もし完全触覚センサがすでに実現されていれば、触覚技術は多くの場面で実用されているであろう。しかし完全触覚センサのハードルは低くない。やっかいなことにこれらのスペックのうちいくつかを緩和すると触覚センサとして役に立たないものになってしまい、なかなか実用化に結びつかない。

前記 6 項目のうち、これまで問題を難しくしていた主犯格は (5) であったと思われる。板状あるいはフィルム程度までの硬さの基板の上であれば 1 mm 程度の間隔でセンサを並べることはすでに実現できていると言ってよい [9]。ただしこのような材料では (5) の要件を満たさないために触覚のセンサとして適用対象はきわめて限定されたものとなる。フィルムは一方向に曲げることができるが、指先形状にしてしまうともはや変形できない。表面にゴムのカバーをすればやわらかくなるが、センサがゴムの奥にあると、細かい分布はセンサまで届いてくれない。

条件 (5) を含む全ての項目を満たすことは現時点で難問であるが、これら全ての条件を満たすことは明らかに過剰性能である。人間が皮膚から取得している情報はこれよりはるかに少ない。どのようにオーバースペックであるのか、それにもかかわらずどうして単純にスペックを緩和できないのか、を以下簡単に説明する。

<空間分解能 --- 前腕部触覚センサを作るには>

指先などの一部の部位を除き、人間の皮膚の二点弁別閾はそれほど大きくない。二点弁別閾とは 2 点を同時に触れた時、それが 2 点であると判別できる最小距離のことであり、指先でこそ 2 ~ 3 mm と言われているが、手のひらで 1 cm 弱、前腕部では 4 cm 程度の人もいるとされている。前腕部であっても指先と同じように布地やその他の触感を見分けることができていることを考えると (少なくとも我々はそのように思いこんでいる)、前腕部の触覚を忠実に模倣するセンサがあれば触感センサとしても有用と思われる。

では、例えば 1 辺が 3.5 cm 角の力センサを配列すれば前腕部の触感センサになるであろうか。そうならないことは明白である。前腕部であってもボールペンのペン先と丸いキャップは容易に見分けることができるが、1 辺 3.5 cm の力センサではこれらを見分けることができない。ボールペンを横に移動したとき、人間はそれを容易に認識できるが、前述のセンサではその横ずれ量が 3.5 cm を超えるまでそのことを認識できない。したがって、触感センサを作りたいのであれば、単純に力センサアレイの解像度を粗くしてしまうことは許されない。

しかし人間と同様な情報を獲得するための方法は、センサアレイの要素を細かくする以外にも存在し、おそらく人間もそのようなセンシングを行っていると思われる。例えば接触物体の接触面積の検出は、前述の 3.5 cm 角の触覚ユニットごとに (ユニット内表面の応力分布に対して) 異なった非線形応答特性を持つ 2 層の触覚素子を備えることで可能になることが示されている [10]。つまりセンサアレイの 1 ユニット分の出力として最低 2 自由度あれば、皮膚に接触しているものが鋭利な物体であるか滑らかな物体であるかの識別は可能である。また各ユニットの感度がなめらかに変化し、となりあう素子と適当にオーバーラップしていれば、(となりあう素子の出力比の変化を観察することによって) 接触力の重心の移動をユニット長以下の分解能で検出することもできる。

<計測精度>

皮膚の無毛部には 4 種類の受容器があると言われており、そのうちの 3 種類の存在についてはほぼ定説となっている。実は各受容器が識別している信号強度の段階数は 16 bit よりはるかに小さいと考えられている。確かにヒトは 200 Hz の微小振幅振動を認識すると同時に、1 mm と 3 mm の変形の違いも識別できる。しかもあらかじめ 3 mm 変形した上で微小振動した場合でもそれを認識することができるから、単一のセンサでこのような識別を行うためには単純計算で十数ビットの分解能が必要になる。

人間の場合には異なる周波数特性を持つ複数の受容器がうめこまれている。パチニ小体はその物理構造をうまく利用し、200 Hz で指先の広い面が振動する場合については 0.1 μm の表面変位を検出できる (変位が局所的である場合、知覚可能な最小変位はもっと大きい)。しかし静的な変形には感度がなく、逆に微小振動と同時に静的な大変形が与えられても振動検出の感度が鈍ることはない。これによって物体をかたく握りしめながら微小な振動を検出できる。このように人間の触覚は、特性の異なる複数種類の受容器を用いてゆっくりとした大変形

と微小振幅振動を同時計測している。特性の異なる受容器の反応を組み合わせることで特徴抽出しているのであって、正直に 16 bit もの分解能を持っているわけではない。

5. 触覚センサの取り組みと MEMS 技術

上述のように、人間の触覚は完全触覚センサほどの情報量を取得していないことは多くの研究者によって信じられている。しかし、情報量をはるかに少ないからといって、人工的なセンサとして作り易いとは限らない。完全触覚センサは過剰な素子数を必要とするが、それらの仕様は明確でしかも均質でよい。むしろまい作り方を発見できれば工学的にはそちらの方が作製しやすい可能性もある。したがって本稿では完全触覚センサを当面の目標仕様として、前記三つの方向性について開発の現状と問題点を整理してみる。

<1> 全身型皮膚センサ

大面積センサとしてもっとも古くから研究されているのは感圧導電性ゴムを用いた手法である [30]。そのようなデバイスを曲面に実装する手法 [11] も近年提案されている。最近では、人間型ロボットの表面に 1,000 素子をこえる規模のセンサを実装した例が報告されはじめている。研究 [12] においては光学式のセンシング手法を上手に使い、電気信号を伝送する部分と柔軟皮膚の部分を分離した。また計測と信号伝送用の回路を分散させ、自由な形状の領域にセンサが配置できるようにすることで実装が可能になった。なお局所的な読み取り回路を皮膚の背面に配置し、それとは分離された皮膚の変形を計測するセンシング手法は、テレメトリックスキンとして [13] において導入されている。このような考え方を発展させて知覚情報をさらに高度化していくには、表面の皮膚に新たな構造を持ち込んで皮膚背面から多自由度の変形量を計測できるようにするか、あるいは無配線で信号を読み出せる微小な変形センサを分散させることが考えられる。そこに MEMS 触覚素子 [14-16]、特に (近接) 無線通信回路 [17] を一体化した触覚素子が必要となる。研究 [18] においては、皮膚背面に読み取り回路を設置するのではなく、柔軟体皮膚の内部を伝播するマイクロ波によってセンサ情報を読み取る方式が提案されている。この方式が実現されれば皮膚の実装はさらに簡単になる。ここで埋め込まれる触覚素子においても、通信インタフェースを備えた MEMS 触覚素子が期待される。

<2> 触感センサ

触覚の受容器が物理レベルでどのような情報を取得しているかについては [19], [20] 等の研究によってかなり明らかになってきた。また、[21] では皮膚の機械的

特性や、表面の摩擦特性を考慮した人工皮膚の検討が行われている。複雑な知覚機構を経て認識されていると思われていた触感が、ごく簡単な構造の触覚ディスプレイで呈示される実例なども見出されており、触感知覚のメカニズムに関する基礎研究は着実に進展してきている [31]。しかし VR における触感センサについては、本格的な実用化まで課題山積と感じる研究者は多いであろう。その理由はデバイスに求められる合格水準が非常に高いことによる。日本で最初にブラウン管テレビを実証した実験は「イ」の字をディスプレイに表示するというものであった。このとき表示された画面は近年の VR に用いられているような高精細な映像とは程遠いものであったが、人々はその有用性をただちに理解することができた。エジソンやベルが電話を発明したときも、その音質は現在の高品質音響と比べればきわめて質の低いものであったが、その中に認識可能な言葉や音楽を聞き取ることができたことで、人々はそれを十分リアルなものであると感じた。

これをそのまま触感の伝送に置き換えてみると、デバイスに課せられるハードルはこれよりずっと高いことがわかる。表面のおおまかな形状をセンサで計測し、ピンを配列したディスプレイで提示する、というシステムはすでに試作されているが、これだけではその適用場面がなかなか見つからない。本物と見分けがつかないような毛皮の触感が合成されるのであれば、インターネットでの買い物にただちに応用できるが、実際にそのような応用が可能になるためにはきわめて高いリアリティが要求される。そしてそのようなリアリティで皮膚に多様な触感を提示する装置が存在しない現段階においては、有用な触感センサとはどのような情報を得るセンサであるかも (一部を除いて) 明確にはなっていない。

しかしそれだけに基礎研究としては可能性が大きく魅力的な研究領域である。なお特定の製品の品質管理を目的とし、一部の触感因子を定量化するセンサについては、製造現場に近いレベルでの開発も始まりつつある。

<3> マニピュレータ触覚センサ

近年提案された [3] はこれまでにない完成度を持った光学式のセンサである。弾性体表面付近の微小マーカの移動を指に埋め込まれたカメラで撮影し、その変形分布から表面の応力を計算する。小型の高精細撮像素子が安価に入手できるようになったこと、その後のパターン処理もリアルタイムで行えるよう周辺技術が進歩したことから、実用的なセンサが実現できるようになった。現在は皮膚の一面をカメラで撮影するため指先全体がセンサになっているが、これを既存のフィンガの表面に実装できるようになるとさらに幅広い応用

が可能になると考えられる。また研究 [4] のグループは、触覚フィードバックによる高速な「ペン回し」と「ひも結び」を実現している。垂直力とその重心位置の計測値をもとに、指リンクの範囲内から対象が外れないように把持制御を行っている。

〈補足〉 ヒューマンインタフェース用触覚センサ

コンピュータインタフェースのための触覚センシング技術についても面白い発想のものが提案されているのでここで言及しておく。文献 [22] の爪装着型センサは、指先が対象物に触れたことを爪の色の变化から読み取るセンサであり、指と物体との接触面にデバイスを装着することなく指先力を検出できることが特徴である。研究 [23] は指先に装着した光学アレイセンサで表面の模様を読みとりそれを電気触覚ディスプレイで指先に提示するというもので、人間の触覚の能力を拡張する面白い試みである。指先の振動を指の付け根やその他の部位で読み取るセンサをヒューマンインタフェースとして利用する試みも [24], [25] に報告されている。また触覚そのものではないが、前腕部の筋電分布を計測する柔軟サポート状デバイス [26] は、手に何も装着しないまま指先の力を検出する新しいインタフェースの提案であるが、このような応用においても通信回路とセンサが一体となった MEMS チップが必要とされている。

6. MEMS を皮膚に展開する二次元通信技術

これまであげてきた触覚センサが、万能とも言える人工皮膚デバイスに収束していくためには、柔軟体に高密度の微小素子を実装する新しい基礎技術の開発が必要である。一つの考え方が、機能素子を含めた回路要素を生物同様に柔軟な素材で実現することである。有機トランジスタの回路を印刷技術で実現する研究が進められている [27]。今後物性、機械的特性両面での耐久性が実用レベルに達すれば、皮膚デバイスとしても期待がふくらむ。これと並行するもう一つの考え方が、センシングと近接通信の機能を微細なシリコン素子内部に集積し、それらを配線工程なく柔軟素材に実装するというものである。著者らが現在開発を進めている二次元通信 [28] は、そのような実装を実現する技術であり、最後に概略を紹介させていただく。

二次元通信とは、その名の通り薄い二次元シート内を伝搬する電磁波で通信する技術である。通信シートの表面に近接したコネクタは、通信シートに低損失で電磁波を送出するとともにシートからエネルギーを吸収する。現在はおもに卓上・室内規模で情報機器やセンサを結合するマイクロ波帯での技術開発が進行している。普段は電磁波がシート内部に閉じ込められていることから機器を

動作する電力も安全に伝送することができる。

この技術は皮膚のような大面積柔軟素材に多数の MEMS を集積、実装するのに有効な技術であると考えられる [18]。センサ素子と 2 層の導電層からなる通信層の間に電気的な接続は不要であり、センサ素子は通信層に沿って横ずれすることも許容される。通信媒体として導電繊維を用いた場合、特定の繊維に素子を接続してしまうと、シート全体の柔軟性が損なわれる上にその部分が破断しやすくなる、マイクロ波による近接結合ではこの問題が回避される。なお二次元通信層内においては、電磁波長よりも著しく小さいコネクタによって良好な近接結合が確立できる。現在は二次元通信のプロトコルを実装した通信回路開発の段階であるが、近い将来これが MEMS 技術と結合され、やわらかい人工皮膚が実現されるよう、日々努力しているところである。

参考文献

- [1] 篠田裕之：器用な手の皮膚と触覚，日本ロボット学会誌，Vol.18, No.6, pp.767-771 (2000)
- [2] 篠田裕之：皮膚の力学的構造に隠れている知能，システム制御情報学会誌，Vol.46, No.1, pp.28-34 (2002)
- [3] K. Kamiyama, K. Vlack, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi: Vision-Based Sensor for Real-Time Measuring of Surface Traction Fields, IEEE Computer Graphics & Applications Magazine, Jan-Feb, Jan-Feb, pp. 68-75 (2005)
- [4] T. Ishihara, A. Namiki, M. Ishikawa, M. Shimojo: Dynamic Pen Spinning Using a High-speed Multifingered Hand with High-speed Tactile Sensor, Proc. 2006 IEEE RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.258-263 (2006)
- [5] T. Shiina, Y. Murayama, Y. Hatakeyama, S. Takenoshita, S. Omata: Development of a breast cancer checker using a tactile array sensor and a tactile display system, Proc. of the 22nd Sensor Symposium, pp.402-405 (2005)
- [6] 田中信行, 金子真：ひきつれ効果に着目したヒト肌の動特性評価，計測自動制御学会論文集，Vol. 43, No. 4, pp. 256-263 (2007)
- [7] M. Shikida, T. Shimizu, K. Sato, and K. Itoigawa: Active tactile sensor for detecting contact force and hardness of an object, Sensors & Actuators: A103, pp. 213-218 (2003)
- [8] S. J. Bolanowski, Jr. et al.: Four Channels Mediate the Mechanical Aspects of Touch; J. Acoust. Soc. Am, Vol.84, No.5, pp.1680-1694 (1988)
- [9] <http://www.tekscan.com/>
- [10] 星貴之, 篠田裕之：接触力と接触面積を計測する非線形触覚素子，計測自動制御学会論文集，Vol. 42, No. 7, pp. 727-735 (2006)
- [11] M. Shimojo: Development of tactile sensors using liquid

- type pressure sensitive material, 1st IEEE Technical Exhibition Based Conference on Robotics and Automation (2004)
- [12] Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi, and A. Nagakubo: Conformable and Scalable Tactile Sensor Skin for Curved Surfaces, Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, May, pp. 1348-1353 (2006)
- [13] M. Hakozaki, H. Oasa and H. Shinoda: Telemetric Robot Skin, Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 957-961 (1999)
- [14] M. Sohagawa, M. Noda, Y. M. Huang, K. Yamashita, T. Kanashima, M. Okuyama, and H. Noma: Studies on Deflection Control of Bilayer Cantilever Fabricated by Surface Micromachining Process on SOI Wafer, Proc. of the 23rd Sensor symposium, pp.165-168 (2006)
- [15] K. Noda, K. Hoshino, K. Matsumoto, I. Shimoyama: A Shear Stress Sensor for Tactile Sensing with the Piezoresistive Cantilever Standing in Elastic Material, Sensors and Actuators A, vol. 127, no. 2, pp. 295-301 (2006)
- [16] H. Takao, K. Sawada, and M. Ishida: Integrated Silicon-MEMS Multifunctional Tactile Image-Sensor Aimed at Realization of Artificial Fingertip Tactile Sense, Proc. of the 22nd Sensor symposium, pp.380-383 (2005)
- [17] S. Sasaki, T. Seki and S. Sugiyama: Batteryless Accelerometer Using Power Feeding System of RFID, Proc. of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, pp.3567-3570 (2006)
- [18] H. Chigusa, Y. Makino, and H. Shinoda: Large Area Sensor Skin Based on Two-Dimensional Signal Transmission Technology, Proc. World Haptics 2007, Mar., Tsukuba, Japan, pp. 151-156 (2007)
- [19] 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 C編, 63巻, 607号, pp.881-888 (1997)
- [20] K. Dandekar, B. I. Raju and M. A. Srinivasan: 3-D Finite-Element Models of Human and Monkey Fingertips to Investigate the Mechanics of Tactile Sense, Transactions of the ASME, Vol. 125, pp. 682-691 (2003)
- [21] 白土寛和, 野々村美宗, 前野隆司: 肌質感を呈する人工皮膚の開発(皮膚の表面凹凸パターンと弾性構造の模倣に基づく肌質感の実現と評価), 日本機械学会論文集 73巻 726号 C編, pp. 541-546 (2007)
- [22] S. Mascaro, and H. Asada: Measurement of Finger Posture and Three-Axis Fingertip Touch Force Using Fingernail Sensors, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 20, no. 1, pp. 26-35 (2004)
- [23] H. Kajimoto, M. Inami, N. Kawakami, and S. Tachi: SmartTouch - Augmentation of Skin Sensation with Electrocutaneous Display, Proc. 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 40-46 (2003)
- [24] M. Fukumoto, and Y. Tonomura: Whisper: A Wristwatch Style Wearable Handset, Proc. CHI '99, pp.112-119 (1999)
- [25] T. Iwamoto and H. Shinoda: Finger Ring Tactile Interface Based on Propagating Elastic Waves on Human Fingers, Proc. World Haptics 2007, Mar., Tsukuba, Japan, pp. 145-150 (2007)
- [26] Y. Makino and H. Shinoda: Comfortable Wristband Interface Measuring Myoelectric Pattern, Proc. World Haptics 2007, Mar., Tsukuba, Japan, pp. 433-438 (2007)
- [27] H. Kawaguchi, T. Someya, T. Sekitani, and T. Sakurai: Cut-and-Paste Customization of Organic FET Integrated Circuit and Its Application to Electronic Artificial Skin, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 40, No. 1, pp.177- 185 (2005)
- [28] H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai: Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer, Proc. Fourth International Conference on Networked Sensing System (INSS07), pp. 201-206 (2007)
- [29] B. L. Gray and R. S. Fearing: A Surface Micromachined Microtactile Sensor Array, Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1-6 (1996)
- [30] 下条誠, 石川正俊: 薄型フレキシブル位置覚センサとその応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.11, pp. 1250-1252 (1985)
- [31] 白土寛和, 前野隆司, 触感呈示・検出のための材質認識機構のモデル化: 日本バーチャルリアリティー学会論文誌 Vol.9, No.3, pp. 235-240 (2004)

【略歴】

篠田裕之 (SHINODA Hiroyuki)

東京大学 大学院情報理工学系研究科 准教授

1988年東京大学工学部物理工学科卒業, 1990年同大学院計数工学修士, 1990年より同大学助手, 1995年博士(工学). 同年より東京農工大学講師, 1997年より同助教授, 1999年UC Berkeley 客員研究員, 2001年より現職. 触覚を中心としたセンサシステムとデバイス, センサネットワーク, ヒューマンインタフェース, 光・音響・生体計測などの教育と研究に従事.