

解 説

器用な手の皮膚と触覚

Tactile Sensing for Dexterous Hand

篠田 裕之*^{*}東京農工大学工学部

Hiroyuki Shinoda**Tokyo University of Agriculture and Technology

1. はじめに

20世紀は「皮膚の感覚を持たないロボット」の時代であった。人間が朝起きてから寝るまでに触覚を使っていない時間がごくわずかであることを考えれば、人間を模倣しようとするロボットのほとんどが皮膚の感覚を持っていないというのは少々意外なことである。飛行機が必ずしも鳥の飛行メカニズムに忠実である必要がないように、ロボットの構造が常に人間と同じである必要はない。世界中のロボット研究・技術者は、各時点で利用可能な技術と世の中のニーズを分析し、その時点において実現可能でしかも最も有用性が高いと思われるロボットを作ろうとする。その一連の作業の過程で、皮膚感覚センサが役に立つことはほとんど無かったのである。本稿ではまずこれまでのロボット技術と触覚センサの研究を振り返り、どのような理由からこの一見不自然な状況が生まれたかを整理する。そして現在、ロボット技術に対する社会のニーズが大きく変化しつつあること、ロボット技術の周辺にある基盤技術や通信インフラだけでなく、企業や産業の形態の変化も手伝って工学としての「皮膚感覚」がこれまでにない重要な存在になりつつあることを指摘する。後半部ではそれらの応用に向けた現時点での課題と新しい取り組みについて解説するが、今回は「器用な手」の特集ということなので、特に人間の指先に匹敵するような感覚を人工皮膚に持たせる問題に話を限定する。なお力覚と触覚の区別には諸説があるが、本稿では硬い材料でカバーした指先にも体感させることができる情報を力覚、それ以上の分布情報を触覚とよぶことにする。

先見の明がある指導教官の勧めで私が触覚の研究を始めたときは、非常に地味な印象の研究テーマであった。しかし現在そのテーマは多くの若い研究者をひきつけるであろう、非常にホットな分野になりつつある。そしてそのこと

はもっと強く認識されるべきことのようにも思われる。米国等では触覚・力覚関連の企業が高い収益を上げ始めているが、早くからこの分野に注目していた日本がこの流れから取り残され始めているようにも見えるからである。

2. 皮膚感覚センサの歴史

これまでどのような触覚センサが開発されてきたかは Nicholls と Lee の 2 本のサーベイを読めば把握することができる。そのうちの一つ [1] は 1989 年に書かれたもので、1980 年代の研究成果がまとめられている。その 10 年後、1999 年にまとめられたもう一本の論文 [2] をあわせると初期の研究から最新のものまで、主要なものはほとんど網羅される。非常によく書かれているので、触覚に興味のある方は必ず一読されることをお勧めする。また無毛部において 4 種類の機械的受容器が存在する人間の触覚の構造や、触覚の心理物理的な知見については標準的な感覚器官の教科書と文献 [3] などが参考になる。本章では個別の事例には深く立ち入らず、大雑把に研究開発の雰囲気伝えることを試みる。

1970 年代には井上ら [4]、木下ら [5] の研究など、世界全体でも数件の先駆的研究が見られるだけであった。1980 年代になると多くの研究者によって触覚センサが試作されるようになる。その時彼らが目指したことは、ゴム表面に分布した圧力を細かく検出することであり、主な目的はそれを産業用ロボットに応用することであった。工業製品を自動的に組み立てる産業用ロボットは、ほとんど唯一とも言える実用ロボットであったから、当然触覚センサもそこに応用されることが念頭におかれていた。当時の世界、特に日本は品質のよい工業製品を安く大量に作る方法を見出すことで最も高い収益を得ようとしていた時代である。その効率化の鍵は、全体の工程を簡単な作業に上手に分解することであったが、その単純化された作業、すなわち所定の部品をつまみ上げて特定の場所に運んだり穴にねじ込んだりする繰り返し作業を自動化することは触覚センサのよい応用と考えられていた。国内では感圧導電ゴムを利用した下条、石川のセンサなどが [6] 2 次元圧力アレイセン

原稿受付 2000年5月11日

キーワード: Tactile Sensor, Artificial Skin

*〒184-8588 小金井市中町 2-24-16

*Koganei-shi, Tokyo

サとしての一応の完成を見、米国や日本でも商用のセンサが作られた。

ところがこれらのセンサは、その開発の主目的である産業用ロボットに応用されることはなく、むしろ得られた教訓は「触覚センサはあまりロボットの役に立たない」というものであった。人間は皮膚の感覚が無くなるような厚い手袋をしても物をつまみ上げたりするにはそれほど支障はない。これと同じで決められた環境で決められた種類の物体を運ぶだけであれば「力覚」は必要であっても分布した皮膚感覚までは必要ない。もしそれで足りない場合もわざわざ触覚センサを開発しようとするよりは、部品の構造、工程や環境を若干ロボットがやりやすいように改良する方が簡単確実であった。

1990年代に入ると触覚に関する論文の絶対数は80年代より増加するが（それでも例えばコンピュータビジョンの約10分の1[2]）そもそも工学論文の総数が増大傾向にある中で、触覚の研究だけが活発化したという実感はない。触覚センサを有効に利用してみせた数少ない例である前川ら[7]の研究や、センサの構造に関する山田ら[8]、信太ら[9]、永田ら[10]、あるいは著者らの一連の研究があったが、実社会へのインパクトをもつには至らなかった。1990年代初頭といえば消費者の都合にきめ細かく対応する少量多品種生産を志向する傾向が顕著になり始めた頃であり、一台のロボットでより多くの種類の作業を扱いたいという要求も強くなってきていた。また電線工事ロボットなど工場の外で働くロボットも次第に実用化されはじめ、農作物の収穫の自動化なども新しい目標に設定された。これらは一世代前のものよりは多くのセンサ情報を必要とする作業であったが、多くのロボット開発者はこの問題を遠隔計測であるビジョンや他のセンサ情報を上手に利用することで解決しようとし、あえて機械的接触にさらされて消耗する触覚センサを重要視することはなかった。

以上がロボット技術における触覚センサの歴史である。触覚をフルに活用する人間の手は臨機応変にやり方を工夫しながら仕事をこなしていくのは得意であるが、決まった作業を速く・正確に・均一に繰り返すのはもともと得意ではない。そう考えれば産業ロボットにとって「手」の形態は必ずしも人間に忠実である必要はなく、そこに触覚が利用されなかったとしても特別に不思議なことではないかもしれない。

3. 皮膚感覚が必要とされる新しい分野

ところが最近になって事情は変わり、今までとは違う目的で人工的な触覚が必要とされるようになってきた。その背景の一つは、人間と共存しながら生活を支援したり、救助作業を手伝ってくれたりするロボットの実用化が現実味を帯びてきたことである。高齢化が進む日本や他の先進国

では、介護を手伝ってくれるロボットは今や切迫したニーズである。一方で計算チップの能力の向上と撮像デバイスの低コスト化などによって自律的なロボットを実現するための周辺技術も急速に整ってきた。実用化へ向けた最後の課題は、それらのロボットが人間をはじめ周囲に危害を与えないようその全身を触覚で覆うことである。また同じ機能をもったデバイスをロボットの皮膚としてではなく、宇宙空間など特殊な環境で作業する人間がセンサスーツとしてそれらを装着し、感覚を補強する応用も期待されている。

次に重要な分野は遠隔ロボットの操作や計算機へのデータ入力などを容易にするために、触覚・力覚情報を操作者に体感させる技術である。特に内視鏡による低侵襲外科手術において力覚情報をフィードバックすることの必要性は1990年初頭から認識され、そのシステムや操作訓練用のシュミレーターまでが国内外で活発に研究されている。すでにビジネスとしても急成長している分野である。この技術における次の課題は、接触表面の硬さやテクスチャ、滑りなどの触覚情報をフィードバックすることと見なされている。

もう一つの大きな変化は双方向通信の発達である。センサで触感を検出し、それを人間に本物らしく体感させることが技術的に可能であるか、という命題は古くから多くの研究者や技術者の純粋な好奇心を刺激するものではあったが、基礎研究以上の興味を引くものではなかった。指への刺激は対象物と指との相対的な位置で決まるから、例えばTVやラジオのように触感を「放送」するとういうのは原理的に難しく、触感を伝えること自体を目的としたよい応用場面が見つからなかったためである。ところがインターネットの整備によって前提が変わってしまった。クレジットカードでの購入に抵抗感がない米国では、すでに多くの人々があらゆる種類の物品をオンラインで購入している。そのとき写真だけでなく実際の手触りも知りたい、ということ是一般の利用者が感じ始めていることである。指にサックのような小型の提示装置を装着し適当な場所をなでると触感が得られる、というようなことは物理的に不可能なことではないから、触感伝送システムはいまや実用的にも非常に興味深いテーマとなった。このように情報メディアとしても触覚技術へのニーズが強く認識されるようになってきた。

4. 人間の創造活動を支援する「器用な手」

「器用な手」の意義については本特集の他の解説が様々な角度から詳述していることと思うが、それに対する期待の中身も10年前とは大きく変化している。前述のように大量生産用の製造機械として利用するのであれば、汎用・万能な「人間のように器用な手」は必ずしも実用的価値の高い道具ではない。ところがそれを人間の「作業」を符号

化し再現する汎用デバイスとして利用するのであれば、それは革命的な価値をもつ。例えばソフトウェアであればコピー、ペーストは自由自在だが、ハードウェアはそれができない。そのようなとき「器用な手」が作業を記録再現してくれれば、たまたま一回うまくできたものを何十個も作ることができるし、同じ作業を後で再現したり、多数の人がその工程を共有することが可能になる。特に日本では昨今の倒産や事業転換で貴重な製造ノウハウが消滅しようとしているが、それらの一部を永久保存することも可能かもしれない。

米国はじめ先進国の産業の興味の中心が「決まったものをどう大量生産するか」ということから「何を新しく作るか」ということへ急速にシフトし、儲けの多くも製造の労力ではなく後者の技術革新に対して与えられる傾向がはっきりしてきた。そのような状況で「器用な手」は技術革新の現場を強力に支援してくれる。それだけでなく、ハードウェア産業における研究開発と製品化の距離をソフトウェア産業と同程度にまで縮めてくれる可能性すら持っている。例えばCADデータを送付するだけでICチップやマイクロマシンのチップを作ってくれるサービスが最近定着してきている。この場合には、試作に成功したチップについては新たな設備投資をすることなく製品化が可能であり、試作と製品化の距離が極めて短い。「器用な手」は、機械加工やアSEMBリの工程を含んだハードウェアについても試作と(小規模)生産の隔たりを取り払ってくれる可能性がある。

ではこのように多くの夢をかきたててくれる「器用な手」を実現するために何がネックになっているかと言えば、大半のロボット研究者の一致した見解は「皮膚」なのである。

5. 皮膚感覚技術の課題

以上のような潜在的な可能性にもかかわらず、これまで良い触覚センサが作れなかった技術的な理由は次の二つの困難によっている。一つめは触覚の情報処理機構がまだよくわかっていないことである。例えば視覚のセンサであればそこで検出すべきはRGB 3色の光の2次元パターンであり、それでほぼ必要十分である。その具体的検出方法については人間に忠実である必要はなく、球面の網膜のかわりに平面のシリコンでもよい。ところが触覚センサにおいては接触によってセンサ自身や対象が変形し、その結果として触感が決まるから、例えばセンサ自身の弾性的性質が違えば、センスされる情報が変わってしまう。そこでどのような人工皮膚の構造を作ってもどこにどのよう働く力を検出すれば(必要)十分であるか、が明確にはなっていない。そしてもう一つの問題は、デバイス作製技術の問題である。たとえ情報処理機構がわかったとしても、柔らかい材料の中にセンサ素子を作りこんでそれらを実現することは依然難問なのである。もちろん幾

つかの手がかりはすでに得られているので、それを以下に整理してみる。なお、MIT Touch Lab のホームページ <http://touchlab.mit.edu/> は本解説とあわせて必ず目を通していただきたい。また昨年創刊された触覚・力覚専門誌“Haptics-e” <http://www.haptics-e.org/> は論文全文が無料でダウンロード可能である。

6. 皮膚が取得すべき情報

皮膚が検出する情報は 1) 機械変形, 2) 温度, 3) 化学的作用の3種類である。温度は非常に大切な触覚情報であるが、最も扱いが容易な問題でもある。熱伝導の物理的性質から皮膚内部には細かい温度分布が生じることはなく、時間的な変動も緩やかなためである。機械変形に関連して人間が検出している情報は

- 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.
- 面の曲率. 面接触であるか線, 点接触であるかの判別.
- 硬さ, 柔らかさ.
- 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.

といった言葉でその大半が網羅される。環境を限定し、このうちの一部を検出するセンサはすでに数多く提案されているが、多くのロボット研究者が熱望しているセンサは、これら全ての情報が検出データに含まれていることが保証されたセンサスキンである。そのようなデバイスが一度実現されれば、そこからどのように欲しい情報を抽出するかはソフトウェアの問題となる。

ではどのような構造の皮膚を作り、どのような物理量の分布を検出すればこの条件が満たされるであろうか? これはぜひ多くの方々にチャレンジしていただきたい問題である。この問題を考える際の留意点を以下にまとめる。

① 皮膚の摩擦と弾性的性質

センサスキンが得る情報と人間の皮膚が得る情報の整合性を保つのであれば、表面の摩擦[11]と弾性的性質が人間の指と一致していることが望ましい。例えば指が均質な円筒状弾性体の場合と、人間のように表面が硬く内側がより柔らかい場合とでは、接触面内の圧力分布や、接触力と変形量の関係が大きく異なる。また表面に沿った横方向の皮膚の伸縮量を観測することにより、滑りの予知[12][13]や摩擦、粘性などの検出が可能になると考えられるが、皮膚が横方向に伸縮できない構造ではこの検出が難しくなる。

② 観測する物理量と解像度

空間的なサンプリング密度としては人間の指先の表層受容器の密度(1mm弱の間隔)が目標となる。ただし指先以外の受容器密度は著しく小さいことを考えると、それより低い密度でも多くの触覚はカバーされるはずである。よ

り重要なのはどのような変形量を観測するかである。人間の各機械受容器は種類ごとに異なった時間応答をするだけでなく、皮膚の構造による応力集中を巧みに利用しながら空間的にも固有の応答特性を有していると考えられる。前野らの関連研究[14]は興味深い。時間応答については各素子が十分な帯域を持つよう設計しておけばよいが、空間的な観測量としては無数のバリエーションが想定可能なので、人間の皮膚内部に発生する応力と神経発射の関係について、より詳細に解明されることが望まれる。

例えば応力にはすでに6つの成分がある。法線応力、シア応力（横にずれようとする力）に加え、前述のように表面に沿った横方向の応力も摩擦の知覚のために有用であることが明らかになった。さらに以下のように複数の変形パラメータを検出することで、サンプル密度より細かい応力分布の特徴を検出することが理論上可能である。人間もこれと同等な知覚を行っている可能性は高い。この場合応力や歪みそのものでなく、その空間微分が必要とされるかもしれない。

- (1) 均質な半無限弾性体においては弾性体中の任意観測点での 3×3 応力テンソル行列のゼロでない固有値（主応力）の数1, 2および3から表面の接触次元数—点接触, 線接触および面接触—が得られる。点接触, 線接触の場合には固有ベクトルの方向からその位置が同定される[15]。図1を参照。
- (2) 変形の空間周波数について異なった選択性をもつ複数の検出子[16]があれば（視覚がRGB 3受容器の出力パターンから光のスペクトルの特徴を知るように）細かい変形成分の存在を知覚することができる。なお同じ性質の検出子であっても配置される深さが異れば周波数特性は変化する[17]。

このように皮膚の内部で観測すべき物理量の候補が複数存在することで問題が多少複雑になっている。

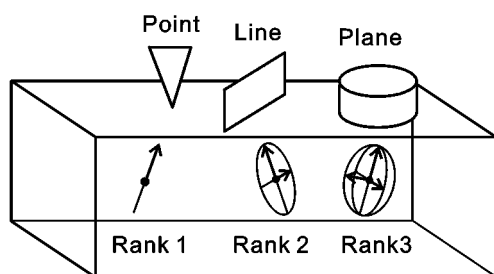


図1 接触の幾何的形態と応力テンソルの関係。点接触の場合、応力テンソル行列の3固有値（主応力）のうち2つはゼロとなり、非ゼロ固有値に対応する固有ベクトル（応力の主軸）は接触点の方向を向く。線接触、面接触の場合は非ゼロ固有値の数がそれぞれ2および3となる。ただしポアソン比が0.5に近く、弾性体の厚みが観測点の深さより十分大きい場合。

7. 皮膚の作製方法

全て柔軟な材料を用いてセンサから電子回路までの機能をもった微細構造が実現されれば理想的である。このような機能ポリマーに関する基礎研究（例えばI. W. Hunterらのプロジェクト <http://biorobotics.mit.edu/>）も進められているが、実用段階に到達するにはいくつかのブレークスルーが必要であろう。

これまでに提案されてきた触覚センサの検出機構は「柔軟性」、「機械的な丈夫さ」、「作製が複雑過ぎないこと」、のいずれかの要件を欠いたものであったと言ってよい。回路部品、電極や配線の材料、あるいはセンサ素子の多くには柔軟性がないため、それらを組み合わせて柔軟な触覚センサを作ろうとしても、よいやり方がなかなか見つからなかった。例えばフィルム状センサ[18]は数少ない実用分布圧力センサであるが、曲げることはできても伸縮ができないことが難点である。

この問題に対する一つの提案は、皮膚の底部から超音波を伝播させ、その波動を介してセンシングと信号伝達を行うことである。それならば途中で最もやっかいな構造である「配線」をする必要がない。超音波は伝播速度が適当であるため、その伝播時間から微小な変形を容易に検出でき[19]、多自由度の変形検出[20]も比較的容易である。図2に示す方法（音響共鳴型テンソルセル[21]）では、弾性体中に存在する構造は空洞のみである。皮膚底部から微細なトンネルに空中超音波を発信し、空洞を介してもう一方のトンネルの末端で受信すると、途中の共鳴空洞での音響共鳴周波数においてのみ有意な強度の音圧が観測される。この共鳴周波数の変化を追跡することによって空洞の変形を検出する。実験的な共鳴のQ値は100 kHzの基本モード（空洞径は2mm程度）において数十程度である。複数モードの共鳴周波数を計測すれば、単一の空洞から複数の変形パラメータが得られる。例えば空洞を球形にした場合には、縮退した3つのモードの周波数から空洞周囲の主応力

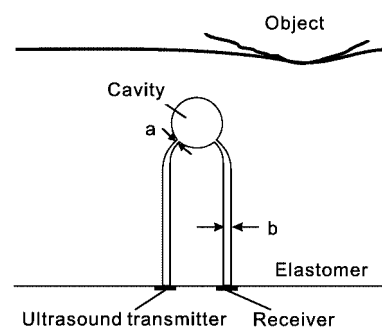


図2 音響共鳴型テンソルセル。弾性体中には空洞以外の構造は存在しない。空洞に発生する複数モードの共鳴周波数を観測することで、空洞の変形を記述する複数のパラメータが得られる。空洞の形状によって検出される情報が変わる。

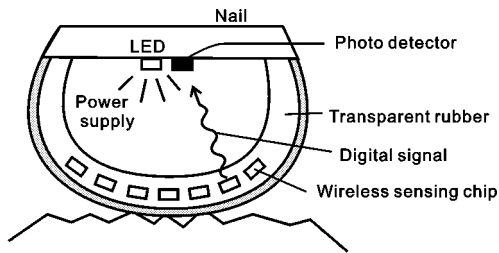


図3 光結合方式のセンサスキンの計画図(指断面図)。各素子は複数方向の応力を計測し、その符号化された信号を無線伝送する。消費電力の小さい集積回路が容易に試作できるようになったため、このような計画が可能になった。

3成分が、空洞を直方体にした場合には直交3辺に対応する3つの共鳴モードの周波数から各辺に沿った方向の垂直応力成分が得られる。

もう一つの考え方はセンサと電子回路を硬いシリコンチップの上に作り込み、ただしそのチップを微細にして柔軟体中に分散させることで柔らかさを得ることである。高密度の電子回路をチップ上に作ることに關しては、容易に実行できる環境が近年整ってきたから、人間の受容器以上に高い機能をもった微小センサチップを(しかも低コストで)実現することは夢物語ではなくなった。

現在我々が計画しているのは、1mm程度のチップに複数方向の応力を検出する機能を持たせ、そのチップへの電力供給と信号読み出しを無線で行う[22]図3のような方式である。配線を行わないことによって作製は容易になるし、実用的な丈夫さも期待できる。またセンシングはチップ上で完結し、そのデジタルデータを伝送するのであれば容易に高いSN比が得られるし、各チップのデータを順次読み出すのも容易である。無線の通信方法としては、数ミリ角以上の大きさのチップであれば誘導結合を利用するのが簡単であるが、それ以下のサイズの場合は図のような光を用いた方式が近道であろう。現在は100個程度のチップ周辺の応力を1 msec 以内で読み出し可能な人工皮膚を計画している。

参 考 文 献

- [1] H. R. Nicholls and M. H. Lee: "A Survey of Robot Tactile Sensing Technology," Int. J. Robotics Research, Vol. 8, No. 3, pp. 3-30, 1989.
- [2] M. H. Lee and H. R. Nicholls: "Tactile Sensing for Mechatronics - A State of the Art Survey," Mechatronics, Vol. 9, pp. 1-31, 1999.
- [3] H. R. Nicholls ed.: "Advanced Tactile Sensing for Robotics," World Scientific, Singapore, 1992.
- [4] 井上, 田中: "高密度に配置されたロボットの触覚," 第14回自動制御連合講演会講演論文集, pp.301-302, 1971.
- [5] 木下, 森: "学習機能をもった多素子人工触覚による対象物の形状識別," バイオメカニズム 2, pp.243-249, 1972.
- [6] 石川, 下条: "ビデオ信号出力をもつ圧力分布センサと触覚パターン処理," 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 7, pp.662-669, 1988.
- [7] H. Maekawa, K. Tanie, et al.: "Development of a Finger-

Shaped Tactile Sensor and Its Evaluation by Active Touch," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics And Automation, pp.1327-1334, 1992.

- [8] Y. Yamada and M. R. Cutkosky: "Tactile Sensor with Three-Axis Force and Vibration Sensing Functions and Its Application to Detect Rotational Slip," Proc. IEEE Int. Conf on Robotics and Automation, pp. 3550-3557, 1994.
- [9] K. Shida and J. Yuji: "Discrimination of Material Property by Pressure-Conductive Rubber Sheet with Multi-Sensing Function," Proc. IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics, pp. 54-59, 1996.
- [10] K. Nagata, M. Ooki and M. Kakikura: "Feature Detection with an Image Based Compliant Tactile Sensor," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 838-843, 1999.
- [11] H. Han, A. Shimada, and S. Kawamura: "Analysis of Friction on Human Fingers and Design of Artificial Fingers," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3061-3066, 1996.
- [12] 佐々木晋哉, Wong Huey Sheong, 中村克彦, 篠田裕之: "接触瞬間に摩擦係数を検出する触覚センサ," 第38回SICE 学術講演会予稿集, pp. 339-340, 1999.
- [13] 前野隆司, 他: "曲面状弾性体の内部ひずみ分布検出に基づく把持力制御法," 日本機械学会論文集, 64巻, 620号C編, pp. 1258-1265, 1998.
- [14] 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. 247-254, 1997.
- [15] H. Shinoda, N. Morimoto and S. Ando: "Tactile Sensing Using Tensor Cell," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 825-830, 1995.
- [16] P. Dario and G. Buttazzo: "An Anthropomorphic Robot Finger for Investigating Artificial Tactile Perception," Int. J. Robotics Res., Vol.6, No.3, pp. 25-48, 1987.
- [17] H. Shinoda, M. Uehara and S. Ando: "A Tactile Sensor Using Three-Dimensional Structure," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 435-441, 1993.
- [18] F-SCAN System. Tekscan Inc., MA, USA, 1997.
- [19] B. L. Hutchings, A. R. Grahm, and R. J. Petersen: "Multiple-Layer Cross-Field Ultrasonic Tactile Sensor," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2522-2528, 1995.
- [20] S. Ando and H. Shinoda: "An Acoustic Tactile Sensing Element with Five Dimensional Sensitivity," Proc. TRANSDUCERS '95, pp. 644-647, 1995.
- [21] H. Shinoda, K. Matsumoto and S. Ando: "Acoustic Resonant Tensor Cell for Tactile Sensing," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3087-3092, 1997.
- [22] M. Hakozaiki, H. Oasa and H. Shinoda: "Telemetric Robot Skin," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 957-961, 1999.



篠田 裕之 (Hiroyuki Shinoda)

1988年東京大学工学部物理工学科卒業。90年同大学院計数工学修士, 90年より同大学助手, 95年博士(工学)。同年より東京農工大学講師, 97年より同助教授, 現在に至る。触覚を中心としたセンサシステムとデバイス, 触覚ディスプレイ, 光・音響計測などの研究と教育に従事。1999年IEEE ICRA The Best Conference Paper Award, 1993年, 1994年, 1998年計測自動制御学会論文賞, 1998年日本機械学会部門賞, 1994年佐藤記念知能ロボット研究奨励賞受賞。計測自動制御学会, 電気学会, 日本機械学会, 日本VR学会の会員。