

特集 ■アクチュエータ・テクノロジー ～ヒトとの親和性を目指して～

圧電アクチュエータの基礎と応用

～圧電材料の駆動メカニズムと触覚ディスプレイへの応用～



大岡昌博

名古屋大学

OHKA MASAHIRO

1. はじめに

触覚では機械的な刺激が面を介して皮膚内の触覚を感じ取る感覚細胞(受容器)に伝達され、その結果として接触状態が認知されている。Cauchyの応力原理[1]によると、表面力の応力ベクトルは内力の応力テンソルと釣り合うので、触覚の受容器は皮膚表面で発生している垂直力(圧覚)とせん断力(滑り覚)を感じる能力があれば、力学的には十分であると言える。触覚ディスプレイは、このような触覚を人工的に生成する装置である。

VR(人工現実感)やテレプレゼンス(遠隔臨場感制御)に要求される性能の高まりに伴って、触覚ディスプレイへ寄せられる期待はますます高まっている。触覚ディスプレイについては、電動モータ、圧電アクチュエータ、ソレノイド、空気圧アクチュエータ、ICPF(Ionic Conducting Polymer Gel Film)アクチュエータ、電磁クラッチなど様々なアクチュエータ技術を利用して研究開発が進められている[2]。

一方触覚の受容器は、ヒトの手および掌に多数分布して存在するとともに、触覚を得るときに対象面を撫で回して情報を獲得しているために、一つの触覚呈示ポイントが垂直力とせん断力を同時呈示できると有効である。宮岡らの研究によると、せん断と垂直方向の振動を別々に皮膚に伝達したときの心理応答から、振動方向別に触覚の受容器が反応している可能性が議論されている[3][4]。

触覚の受容器には4種類のものがあることがわかっており、形状・機能はそれぞれ異なっているため、垂直力とせん断力を別々の受容器が獲得していることは十分考えられる。ちょうど光の三原色に個別に対応する網膜受容器があって自然な色を感じる原理に類似している。どの受容器が垂直力とせん断力を獲得しているかは、今後

の研究次第であるが、いずれにしても一つの呈示ポイントで垂直力とせん断力を生成する方式には効果が期待できる。

このような触覚の特性を考慮して高品位な触覚ディスプレイに役立てることを目的に、著者らの研究グループでは文部科学省特定領域研究「ブレイクスルーを生み出す先端アクチュエータ研究」[5]の中で圧覚のみならず滑り覚も与えることのできるマイクロアクチュエータアレイの開発が進められている。本稿では、一連の開発で基本要素として採用している圧電アクチュエータの基礎式について導出過程を解説した後に、著者らが開発を進めている種々の触覚ディスプレイに関する研究成果の概略を紹介する。

2. 圧電アクチュエータ

2.1 圧電材料の構成方程式

圧電材料とは、外力により生じさせられたひずみに応じて電荷が誘起されることによって電圧を発生し、逆に電圧を印加されるとひずみを発生して変形する材料のことである[6]。この電気-機械連成系の間で生じる効果は次の構成方程式で表される。

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E \sigma_{kl} + d_{kij} E_k \quad (1)$$

$$D_i = d_{ijk} \sigma_{jk} + \epsilon_{ik}^{\sigma} E_k \quad (2)$$

ここで S_{ij} と σ_{ij} は、それぞれひずみと応力の2階のテンソルである。 D_i と E_i は、それぞれ電束密度と電界ベクトルである。 d_{ijk} は圧電定数の3階のテンソルである。 s_{ijkl}^E は電界一定の条件で求められる弾性コンプライアンスの4階のテンソルである。 ϵ_{ij}^{σ} は応力一定の条件で求められる誘電率の2階のテンソルである。添え字 i, j, k および l は直交デカルト座標系の座標軸に対応して1から3までの値をとる。また次式で例示される Einstein の総

和規約が適用される。

$$s_{ijkl}^E = s_{ij11}^E + s_{ij22}^E + s_{ij33}^E \quad (3)$$

数式中に同じ添え字が現れるとそれについて総和をとるので、数式 s_{ijkl}^E は $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ 個の成分を持っているのに対して、式 (3) では 9 個の成分に減じられている。

2.2 板状圧電材料

圧電効果をアクチュエータとして利用する場合、バイモルフ形と積層形の二つの形式が採用されている。これらの圧電アクチュエータは、発熱が少なくがた・遊びがなく、集積化も比較的容易であるために、触覚ディスプレイに適しているアクチュエータの一つである。以下では、これらの圧電アクチュエータの変位や発生力を算出するための基礎式を導出する。

式 (1) と (2) に示したように圧電材料の構成方程式は電気-機械連成系であるために、解を得るには有限要素法などの数値シミュレーションが必要となる。しかし、アクチュエータの設計の場合には通常発電に対する情報は必要ではなく、発生力と変位の見積もりのみ必要となるために、式 (1) について応力 0 や電界 0 などを仮定することにより単純化した式が用いられている。

圧電アクチュエータの基礎式を導出するために、基本要素として図 1 に示すような板状の圧電材料を考える。図 1 中には直交デカルト座標系の座標軸が 1 から 3 の数字で示されている。上下の面の間に電圧 V を印加したとき圧電材料に加えらる電界は、 t を材料の厚さとする、 $E_1 = 0$, $E_2 = 0$, $E_3 = V/t$ で表される。また周囲を応力についてフリーな状態にすると、式 (1) の 9 個の成分の内重要な成分は次式だけになる。

$$S_{11} = d_{311} \frac{V}{t} \quad (4)$$

$$S_{33} = d_{333} \frac{V}{t} \quad (5)$$

一方、電界が加えられていない場合には、重要な成分は次式となる。

$$S_{11} = s_{1111}^E \sigma_{11} \quad (6)$$

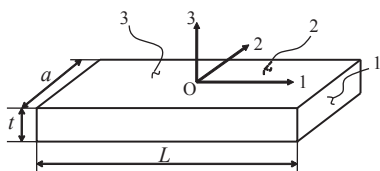


図1 板状圧電材料

$$S_{33} = s_{3333}^E \sigma_{33} \quad (7)$$

板幅を a とすると、1 の面に発生する力 F_1 は、

$$F_1 = a t \sigma_{11} \quad (8)$$

で計算される。

また、3 の面に発生する力 F_3 は、

$$F_3 = a L \sigma_{11} \quad (9)$$

で計算される。

圧電材料が等方線形弾性体であるとする、 $s_{1111}^E = s_{3333}^E = 1/Y$ (Y はヤング率) であることから式 (4), (6) および (8) より F_1 は最終的に次式となる。

$$F_1 = d_{311} a Y V \quad (10)$$

同様に、式 (5), (7) および (9) より F_3 は最終的に次式となる。

$$F_3 = d_{333} \frac{a L Y}{t} V \quad (11)$$

上述の式 (4) と (10) はバイモルフ形圧電アクチュエータの基礎式として設計に用いられている。また、式 (5) と (11) は積層形圧電アクチュエータの基礎式となる。ここで注意したいのは、式 (4) と (10) あるいは式 (5) と (11) は同時に成立するのではなく、応力フリーのとき式 (4) と (5) が成り立ち、ひずみを固定した場合に式 (10) と (11) が成り立つことである。なお、製造会社が示している性能表では、圧電定数テンソル d_{kij} の第 2 添え字と第 3 添え字をまとめて、 d_{ir} ($i = 1, 2, 3$ $r = 1, 2, \dots, 6$) で表すことが多い。ひずみテンソルが対称であり、添え字を入れ替えても同じ値であることやマトリックス表示のほうが一般にわかりやすいことからこのような簡略形をとる。同様に弾性コンプライアンステンソル s_{ijkl}^E についても、 s_{sr}^E ($s = 1, 2, \dots, 6$, $r = 1, 2, \dots, 6$) という表示を採用するようである。

2.3 バイモルフ形圧電アクチュエータ

図 2 に示すように、 O - xy 面に設置した十分に薄い中間電極板の上下面に図 1 の板状圧電材料を貼付することによってバイモルフ形圧電アクチュエータを構成するとする。以下ではこのアクチュエータの基礎式を定式化する。

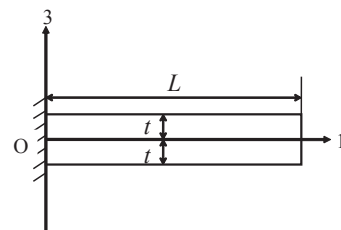


図2 バイモルフ形圧電アクチュエータ

る。自由端に集中荷重 W が作用する場合の 3 軸方向変位 u_3 と集中荷重 W の関係は、材料力学の教科書 [7] に載っているように次式で計算できる。

$$W = \frac{3YI}{L^3} u_3 \quad (12)$$

ここで、 I は 2 軸まわりの断面二次モーメント

$$I = \frac{2at^3}{3} \quad (13)$$

である。

上下の圧電材料の長手方向にそれぞれ $-S_{11}$ と S_{11} のひずみが一様に発生した場合の 3 軸方向の変位 u_3 は、材料力学のバイメタルの練習問題 [7] と同じ要領で計算でき、結果は次式となる。

$$u_3 = \frac{3S_{11}L^2}{2t} \quad (14)$$

式 (14) に式 (4) を代入することにより、

$$u_3 = \frac{3d_{311}}{2} \left(\frac{L}{t}\right)^2 V \quad (15)$$

が得られる。

一方、変位を拘束した場合の発生力は式 (15) を式 (12) に代入することによって得られる。すなわち、

$$W = \frac{9d_{311}YI}{2Lt^2} V \quad (16)$$

なお、変位と印加電圧の関係において圧電材料はヒステリシス特性を示すことも知られている。ヒステリシス特性は制御の上で問題となるため、電荷制御などの工夫がこれまでもなされているが改良の余地がある。第 3 章では、そのための取り組みについても紹介する。

2.4 点字ディスプレイ

バイモルフ形圧電アクチュエータは、積層形圧電アクチュエータに比べて発生力は 0.1N 程度と小さいが 1mm 程度の大変位を発生できる。また、薄型であるためにずらして重ねることによって集約化が可能である。このような考えのもとに、図 3 に示すような点字ディスプレイ (SC2, KGS 社) が開発されている。

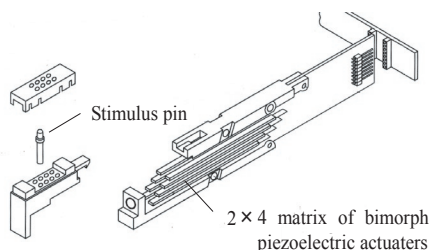


図 3 点字ディスプレイ

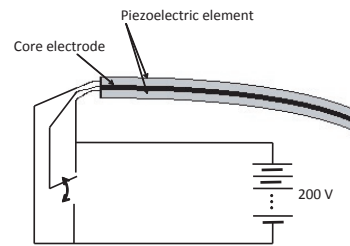


図 4 点字ディスプレイに使われるアクチュエータの駆動回路

この点字ディスプレイの駆動回路を図 4 に示す。中間電極に 0V か 200V を加えることによって、バイモルフ形圧電アクチュエータの先端を上下動させ、触知ピンの出入りを制御している。

点字ディスプレイでは、on-off の二値制御で十分であるが、これを触覚ディスプレイに適用するには中間値も出力する能力が求められる。後述の著者らの触覚ディスプレイでは、中間電極に 0-200V のアナログ電圧を加える回路を別途製作して制御に用いている。

3. 触覚ディスプレイへの応用

3.1 マウス搭載形分布圧覚呈示装置

インターネット上で容易に使用できる触覚マウスの研究が進められている [8][9]。著者らが、試作した触覚マウスの使用状況を図 5 に示す。このマウスの呈示面には、直径 0.3mm のピンが 8×8 のアレイ状に配列されている。この呈示面では、バイモルフ形圧電アクチュエータにより、仮想テクスチャのパターンに応じてこれらのピンが上下運動する。この呈示面にはせん断力分布の呈示機能はないが、この上に人差し指を乗せた状態でマウスを操作すると凹凸を感じることができる。

このディスプレイのアクチュエータとして前述の点字ディスプレイを採用している。点字ディスプレイは点字を呈示することを目的に開発されたために点字とカーソ

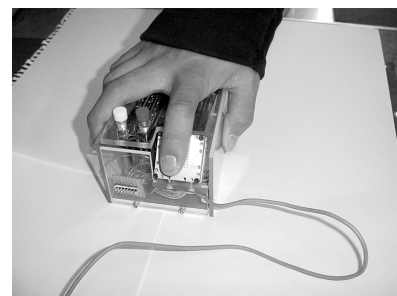


図 5 触覚マウス

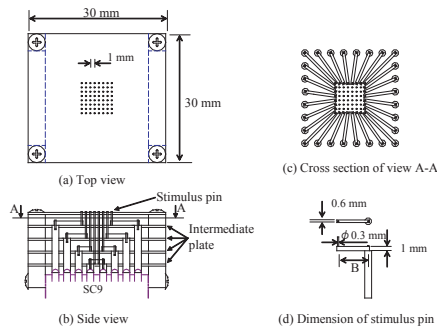


図 6 ピン間隔変換器

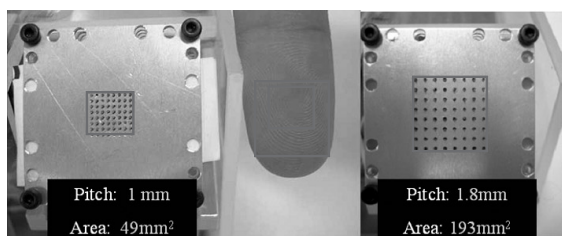


図 7 触覚ディスプレイのピッチとサイズ

ルを一単位 2×4 のアレイとして構成されているために、触知ピンは等間隔に並んでいない。触知ピン間隔を等間隔配列するために製作した変換器を図 6 に示す。点字ディスプレイの触知ピン間隔は鍵の手形のレバーにより狭められている。図 7 に示すようにピン間のピッチとして 1.8mm と 1mm の 2 種類のを設計製作した。

1mm よりピン間隔を減少させて小型化を図るには、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) を利用することが好ましいようにも思われる。このため、いくつかの試みが進められている [13][14]。しかし、受容器の間隔に等しい 0.5mm ピッチのアクチュエータアレイを製作する場合には、各アクチュエータに最低求められるスペックとして、静止状態で 0.1N 程度の推力が発生でき、フリーな状態で 0.5mm 以上の変位を発生できる能力が必要である。このような大きな推力と変位を実現するには、MEMS 技術のブレイクスルーが必要と思われる。

3.2 圧覚・力覚融合形呈示装置

圧覚のみの触覚ディスプレイでも力覚(力とモーメントの感覚)を同時呈示することによってどの程度呈示品位が向上するかを検討するため、図 8 に示すようなマスタ・ハンド・アームシステムが開発された [15]。このマスタハンドに搭載するために、前述の触覚マウスで製作した触覚ディスプレイをマスタハンド用に改良したマスタハンド用触覚ディスプレイの構造を図 9 に示す。この

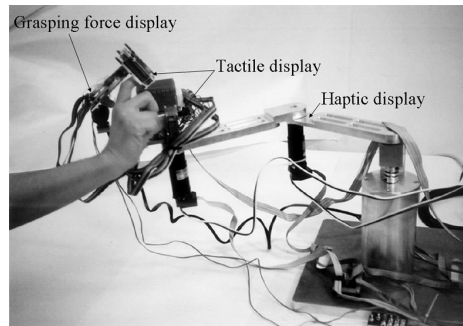


図 8 触覚と力覚の複合ディスプレイ
* 口絵にカラー版掲載

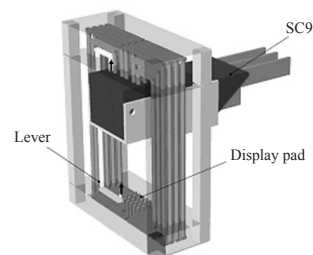


図 9 分布圧覚呈示装置

触覚ディスプレイでは、マスタハンドの触知ピンに伝達するための微細レバーアレイが組み込まれている。

実験では、作業療法(粗大運動を伴わないリハビリテーション)に役立てることを目指して、被験者にペグ差し運動を行わせた。実験の結果、圧覚と力覚による融合呈示の方が、仮想ペグの姿勢角度の最終値が仮想ホルの軸方向とよく一致した。このことから、圧覚と力覚による融合呈示の方が、力覚の単独呈示よりも挿入精度が向上する。しかし、圧力分布の回転移動によりペグの姿勢変化を知ることは難しいようである。3.1 節の触覚マウスによる実験でも実テクスチャを被験者に判断させたほうが約 1/3 の閾値を示すなど圧覚のみの仮想呈示の場合には、指と対象面の間に相対運動がないことが原因となって顕著にリアリティが低下するものと思われる。本圧覚・力覚呈示装置においても同様なことが言え、せん断力呈示の必要性を支持する結果となっている。

3.3 圧覚・滑り覚融合形呈示装置

滑り覚と圧覚を同時に呈示するためには、一つの呈示ポイントで 2 軸以上の運動を発生させることができ、しかも多量のアクチュエータを制御するためにセンサレスの仕組みが必要となる。前述の Cauchy の原理からわかるように 3 軸アクチュエータが理想的であるが、x-z および y-z の 2 種類の 2 軸アクチュエータを市松模様状に配列すれば、全体として 3 軸呈示が可能となるから、

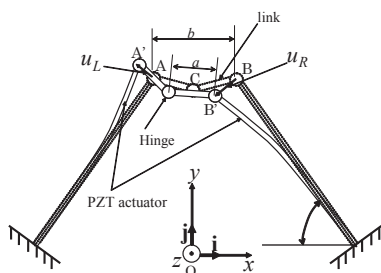


図 10 2 軸アクチュエータの構造

2 が必要最小限の軸数である。

そこで、二つの圧電アクチュエータにより 2 軸の位置制御が可能な構造が考案された [16]. 考案されたアクチュエータの模式図を図 10 に示す. 図 10 に示すように、このアクチュエータでは二つのバイモルフ形圧電アクチュエータがある角度をもって設置されており、その間を三つの関節を含む二つのリンクで繋げた構造を有している. 左右のバイモルフ形圧電アクチュエータを独立に制御することにより中央の関節 C を 2 次元平面内で自由に移動させることができる.

2 章で述べたように圧電アクチュエータにはヒステリシス現象があるために、センサレスで駆動する場合にそれを補償する必要がある. 著者らは、図 11 に示すような

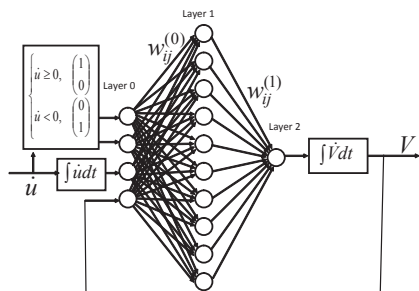


図 11 フィードバック回路のあるニューラルネットワーク

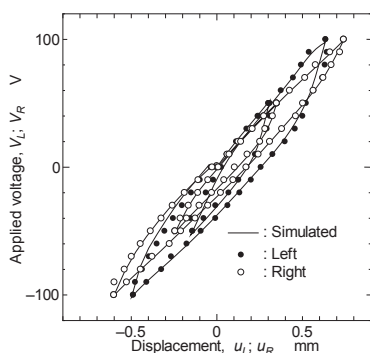


図 12 左右のアクチュエータの学習結果

ニューラルネットワークを用いてヒステリシス現象を補償する研究を進めている [17]. このニューラルネットワークモデルでは、ある瞬間に出すべき変位増分は、現在の瞬間の電圧値、変位値、除荷・負荷の別の情報によって決定論的に算出されるという考えが基礎になっている.

図 11 のニューラルネットワークを用いて図 10 の左右のバイモルフ形圧電アクチュエータのヒステリシス特性を学習させた結果を図 12 に示す. 図 12 の●と○からわかるように、左右のバイモルフ形圧電アクチュエータには顕著な差があることがわかる. 実線は学習結果を示しており、実線は、●や○と重なっていることから上述のヒステリシス特性を精度良く補償できることがわかる.

4. おわりに

本報告では、触覚ディスプレイのキーパーツであるバイモルフ形圧電アクチュエータの設計に必要な基礎式について導出がなされた. 引き続いて、触覚ディスプレイの呈示品位を向上することを目的として進めている各種触覚ディスプレイの開発の現状について解説がなされた. 冒頭で述べたように、触覚ディスプレイの研究にはこれまでも数多くの研究事例があるがせん断力呈示に関してはほとんど研究がなされておらず、スペックを決定するための基礎データを蓄積することから始める必要がある. このため、ヒトの触覚に関する心理物理実験、アクチュエータの製作、センサレスの制御方式、触覚ディスプレイによる実証実験など多方面から研究が進められている. 本研究によりパフォーマンスが向上した触覚ディスプレイを社会に提供して、ロボットの新しい操縦方法の開拓やリハビリテーション技術の向上などに貢献できれば幸いである.

参考文献

- [1] Y・C・ファン著(大橋義夫, 村上澄男, 神谷紀生 共訳): 固体の力学/理論, 培風館, pp. 62-65 (1970)
- [2] 大岡昌博: 触覚ディスプレイ装置におけるアクチュエータ技術, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.7, pp. 758-761 (2003)
- [3] T. Miyaoka: Measurements of detection thresholds presenting normal and tangential vibrations on human glabrous skin, Proc. of the 20th Annual Meeting of the Int. Society for Psychophysics, 20, pp. 465-470 (2004)
- [4] T. Miyaoka: Mechanoreceptive mechanisms to determine the shape of the detection-threshold curve presenting tangential vibrations on human glabrous skin, Proc. of the 21st Annual Meeting of The Int. Society for Psychophysics,

- 21, pp. 211-216 (2005)
- [5] T. Higuchi (Head Investigator) : Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, Proceedings of The 1st International Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, pp. 3-4 (2006)
- [6] アクチュエータシステム技術企画委員会編:アクチュエータ工学, 養賢堂, pp. 21-30 (2004)
- [7] 大橋義夫:材料力学, 培風館 (1976)
- [8] 池井寧, 福田収一:触覚ディスプレイのための画像データ変換, 日本バーチャル・リアリティ学会論文誌, Vol.5, No.4, pp.1-7 (2000)
- [9] 渡辺哲也, 久米祐一郎, 伊福部達:触覚マウスによる図形情報の識別, 映像情報メディア学会誌, Vol.54, No.6, pp. 840-847 (2000)
- [10] 大岡昌博, 毛利行宏, 杉浦徳宏, 三矢保永, 古賀浩嗣:分布圧覚ディスプレイ装置による仮想形状呈示, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.674, pp. 2970-2976 (2002)
- [11] 大岡昌博, 古賀浩嗣, 宮岡徹, 三矢保永:高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状仮想テクスチャ呈示(第1報:高密度ピンアレイ形触覚マウスの試作と性能評価実験法の確立), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.711, pp. 3174-3180 (2005)
- [12] 大岡昌博, 古賀浩嗣, 宮岡徹, 三矢保永:高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状仮想テクスチャ呈示(第2報:触知ピン間隔, テクスチャ密度および凹凸高さの検討), Vol.72, No.715, pp. 865-871 (2006)
- [13] Hasegawa, Y., Shikida, M., Shimizu, T., Miyaji, T., Sakai, H., Sato, K. and Itoigawa, K.:“A Micromachined Active Tactile Sensor for Hardness Detection,” Sensors and Actuators (A Physical), Vol.114, Issue 2-3, pp.141-146 (2004)
- [14] Ogura, D., Hasegawa, Shikida, M., Suzuki, Y. and Sato, K.: “Fabric Tactile Sensor Using Artificial Hollow Fibers and Its Application to Clothes,” Proc. of the 24th Sensor Symposium, pp. 263-266 (2007)
- [15] 大岡昌博, 加藤圭太郎, 藤原健洋, 三矢保永:圧覚と力覚の複合ディスプレイ装置の試作, 電気学会論文誌 E, Vol.126, No.4, pp. 150-157 (2006)
- [16] M. Ohka, Y. Sawamoto, S. Matsukawa, T. Miyaoka and Y. Mitsuya: A Two-axis Bimorph Piezoelectric Actuator Controlled by a Multi-layered Neural Network, Proc. of Actuator 2006, 10th Inter. Conf. on New Actuator, 14-16 June, Bremen, pp. 503-506 (2006)
- [17] 大岡昌博, 澤本泰宏, 松川志保, 宮岡徹, 三矢保永:二軸マイクロ・ピエゾアクチュエータのニューラル制御, 電気学会論文誌 E, Vol.127, No.12, pp. 524-532 (2007)

【略歴】

大岡昌博 (OHKA Masahiro)

名古屋大学大学院 情報科学研究科 准教授

1986年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。
1986年4月株式会社富士電機総合研究所, 1992年7月名古屋大学工学部講師, 1993年4月静岡理工科大学助教授を経て, 2003年4月より名古屋大学大学院情報科学研究科助教授。2007年4月より同准教授。触覚センサ・触覚情報処理, 触覚ディスプレイおよび触覚の心理物理学の分野で研究活動を行う。1998年と2003年に日本機械学会論文賞, 2006年にAEM学会著作賞, 2007年に機械学会船井賞受賞。日本機械学会, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 人間工学会, 電気学会, AEM学会会員。工学博士。