

## 四軸荷重測定用柔軟接触センサの弾性体形状がセンサに及ぼす影響

## Effect of the form of the Elastic Model of a Flexible Sensor for four-axis Load Measurement

○ 田中航平(信州大) 中山昇(信州大) 春日翔平(信州大)

Kohei TANAKA, Shinshu University  
Noboru NAKAYAMA, Shinshu University  
Shohei Kasuga, Shinshu University**Abstract:**

To prevent the gap falling of object, robot hand need to measure three axis load and torque. In this study, we develop a flexible contact sensor for four axis load measurement. The developed sensor is composed of elastic body and load measurement layer using pressure-sensitive conductive material. In this paper we describe relationship between load measurement and form of elastic model.

**Key Words:** Force Sensor, Four axis, Flexible, Robot hand**1. 緒論**

近年、医療・介護の分野において義手などに用いるロボットハンドが開発されている。物体を把持する際に、指先には対象物を押さえる力、対象物がずれ落ちる力、対象物の重心の偏りによって生じるモーメントが作用する。よって、ロボットハンドが安定して物体を把持するためには三軸方向の荷重およびモーメントの測定が可能なセンサを指先に設置する必要がある。また、対象物に損傷を与えないためにもセンサは柔軟な接触部を有することが求められる。現在開発されている柔軟なセンサは、画像処理を用いて荷重を測定するセンサがあげられるが、情報量が多い、小型化が難しいといった問題がある<sup>(1)</sup>。また、感圧導電性ゴムを用いたセンサでは垂直荷重の測定は可能であるが、せん断荷重やモーメントを測定することができない<sup>(2)</sup>。

そこで、弾性角柱と感圧導電性材料を応用した、四軸荷重測定用柔軟接触センサが開発された。また、このセンサに用いる弾性角柱の平面形状を20×20mmの正方形から20×30mmの長方形に変化させることで、センサに必要とされる電極数を8つから4つに減らすことが可能であることがわかった。そこで、本研究では弾性角柱の形状がセンサの荷重測定に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。センサに用いる弾性角柱の長辺の長さを変化させ、垂直荷重、せん断荷重、モーメントの測定を行った。

**2. 四軸荷重測定用柔軟接触センサの荷重測定原理**

センサの模式図を Fig.1 に示す。Fig.1 に示すように x, y, z 軸を決め、センサに負荷される各軸方向の荷重を  $P_x, P_y, P_z$ 、z 軸周りのモーメントを  $M_z$  とする。

本センサは弾性角柱と荷重検出層から構成され、弾性角柱の下面にゾーン1、ゾーン2、...ゾーン  $m(m=1, 2, 3, 4)$  の4分割された荷重分布域を定義する。本センサでは、各ゾーンに負荷される垂直荷重の関係を回帰分析することで弾性体上面に負荷された任意の荷重を四軸方向に分離して測定することを可能としている。

荷重検出層は4分割された上部電極、感圧導電性樹脂、面形状の下部電極を積層して構成され、上部電極の分割面は各ゾーンに対応して配置されている。感圧導電性樹脂は垂直荷重が負荷されることによって電気抵抗値が変化する機能性材料であるため、荷重が負荷されると分割された上下電極間で電圧が変化する。よって、各ゾーンに負荷され

る垂直荷重を  $P_m(m=1, 2, 3, 4)$ 、各ゾーンに生じる電圧変化量を  $\Delta V_m(m=1, 2, 3, 4)$  とした場合、両者の関係は Eq.(1) に示すように近似関数で表わすことができる。この時に各ゾーンで算出される垂直荷重を  $\Delta F(\Delta V_m)$  と定義する。

$$P_m = F(\Delta V_m) \quad (1)$$

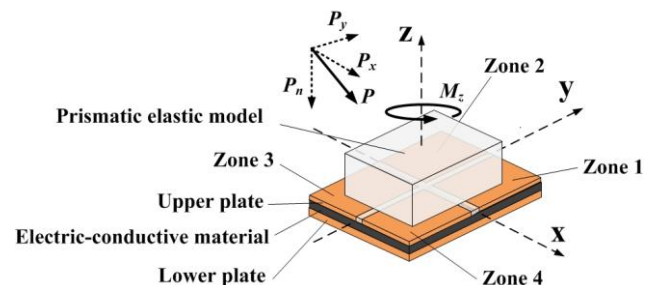
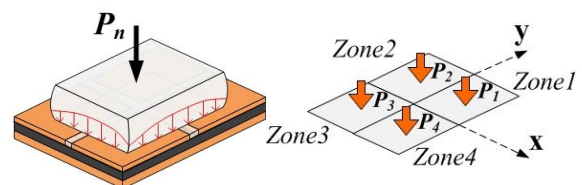


Fig.1 Pattern Diagram of Developed Sensor

センサに負荷される垂直荷重を  $P_n$  と定義する。センサに垂直荷重  $P_n$  が負荷された際の模式図を Fig.2 に示す。垂直荷重  $P_n$  は力のつり合いの関係から、各ゾーンで検出される荷重の総和と等しいため、Eq.(2) のように表わすことができる。

Fig.2 Pattern Diagram of sensor is loaded normal load  $P_n$ 

$$P_n = |P_z| = F(\Delta V_1) + F(\Delta V_2) + F(\Delta V_3) + F(\Delta V_4) = \Delta F P_n \quad (2)$$

センサにせん断荷重が負荷された際の模式図を Fig.3 および Fig.4 に示す.  $x$  軸の正方向に荷重が負荷された場合,  $x$  軸の正方向に配置されたゾーンに負荷される垂直荷重が増加し, 負方向に配置されたゾーンに負荷される垂直荷重は軽減される. よって, せん断荷重  $P_x$  は Eq.(3) に示すように  $x$  軸の正方向に配置されたゾーンと負方向に配置されたゾーンで算出される荷重の差  $\Delta F_{P_x}$  で表すことができる.  $y$  軸方向に対しても同様に考えられるためせん断荷重  $P_y$  は Eq.(4) に示すように  $y$  軸の正方向に配置されたゾーンと負方向に配置されたゾーンで算出される荷重の差  $\Delta F_{P_y}$  で表している.

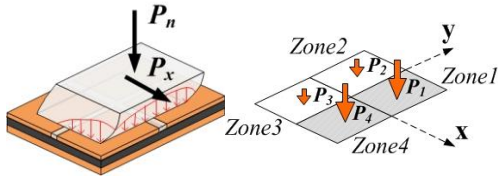


Fig.3 Pattern Diagram of sensor is loaded Shearing load  $P_x$

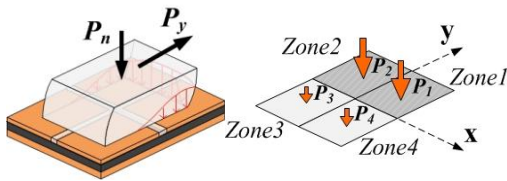


Fig.4 Pattern Diagram of sensor is loaded Shearing load  $P_y$

$$P_x \propto F(\Delta V_1) + F(\Delta V_4) - F(\Delta V_3) - F(\Delta V_2) = \Delta F_{P_x} \quad (3)$$

$$P_y \propto F(\Delta V_1) + F(\Delta V_2) - F(\Delta V_3) - F(\Delta V_4) = \Delta F_{P_y} \quad (4)$$

センサにモーメント  $M_z$  を負荷した際の模式図を Fig.5 に示す. センサにモーメント  $M_z$  を負荷した場合, 隣接されたゾーンに負荷される荷重に差が生じる. よって, 式(5) に示すように  $z$  軸まわりのモーメント  $M_z$  はゾーン 2, ゾーン 4 で算出された荷重とゾーン 1, ゾーン 3 で算出された荷重の差  $\Delta F_{M_z}$  で表している.

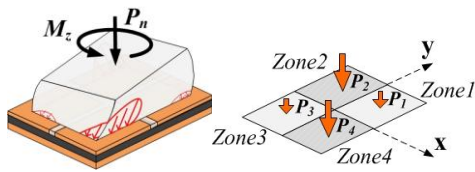


Fig.5 Pattern Diagram of sensor is loaded of Torque  $M_z$

$$M_z \propto F(\Delta V_2) + F(\Delta V_4) - F(\Delta V_1) - F(\Delta V_3) = \Delta F_{M_z} \quad (5)$$

### 3. 四軸荷重測定用柔軟接触センサの構造

センサの模式図を Fig.6 に示す. 本センサは弾性角柱, 荷重検出層から構成される. 荷重検出層は柔軟なポリイミド製の上部基板, 感圧導電性材料, ガラスエポキシ製の下部基板から構成される. 上部基板の電極形状は面常に 4 分割し, 隣接する電極が接触しないように 0.3mm の間隔を設

けた. 下部基板は 42×42mm 形状の面電極とした. 感圧導電性樹脂には PC(ポリカーボネイト)に VGCF(気相成長炭素繊維)を重量比で 20% 添加した PC/20wt.%VGCF を用いた. 弾性角柱のヤング率は 0.404MPa, ポアソン比 0.492 である. 弾性角柱の形状は厚みを 10mm, 短辺の長さを 20mm 一定として長辺の長さ  $L$  を変化させて実験を行った.

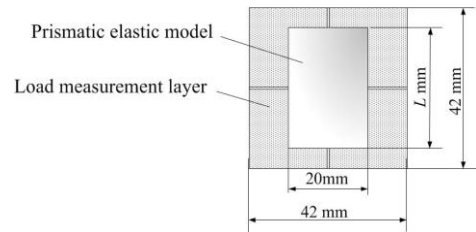


Fig.6 The detail drawing of developed sensor

センサの回路図を Fig.7 に示す. 本センサでは各上部電極に固定抵抗を接続し, それらを並列に構成した並列回路を採用した. また, PC/20wt.%VGCF は荷重が負荷されると電気抵抗値が変化するため, 可変抵抗と考えることができ, Fig.7 のように表すことができる. また, 各ゾーンの可変抵抗と置き換えられた部分に生じる電圧を  $V_m (m=1, 2, 3, 4)$ , 荷重が無負荷の状態の際に生じている電圧を  $V_{m0} (m=1, 2, 3, 4)$  と定義し, Eq.(6) を用いて各ゾーンの電圧変化量  $\Delta V_m$  を求める. また, 本研究では固定抵抗  $R=100\Omega$ , 安定化電源からセンサに供給する電圧  $V_0$  は 5V 一定として実験を行った.

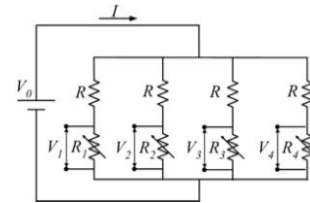


Fig.7 Circuit diagram of sensor

$$\Delta V_m = V_{m0} - V_m \quad (m=1, 2, 3, 4), \quad (6)$$

## 4. 実験結果

### 4-1 垂直荷重の測定

弾性角柱が 25% 圧縮変形するまでセンサに垂直荷重  $P_n$  を負荷した. 例として弾性角柱の長辺の長さ  $L=25\text{mm}$  とした場合の垂直荷重  $P_n$  と各ゾーンにおいて計測された電圧  $V_m$  の関係を Fig.8 に示す. 垂直荷重  $P_n$  が増加するに伴い各ゾーンにおいて計測される電圧は減少していることが確認できる. センサに荷重を負荷することによって PC/20wt.%VGCF の電気抵抗値が減少し, 電圧が減少していることがわかる.

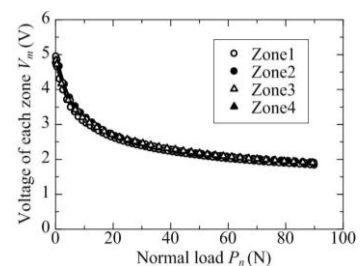


Fig.8 Relationship between normal load  $P_n$  and voltage in each zone  $V_m (m=1, 2, 3, 4, L=25\text{mm})$

計測された電圧  $V_m$  から Eq.(6) を用いて各ゾーンの電圧変化量  $\Delta V_m$  を求める。ロードセルで計測した垂直荷重の値から各ゾーンに負荷される垂直荷重  $P_m$  を計算し、各ゾーンに生じる電圧変化量  $\Delta V_m$  との関係性を求めたものを Fig.9 に示す。Fig.9 から各ゾーンに負荷される垂直荷重  $P_m$  と各ゾーンに生じる電圧変化量の関係を最小二乗法により 7 次関数にて近似し、得られた実験式を Eq.(7) に示す。Eq.(7) に電圧変化量  $\Delta V_m$  を代入することにより各ゾーンに負荷される垂直荷重  $F(\Delta V_m)$  を算出できる。

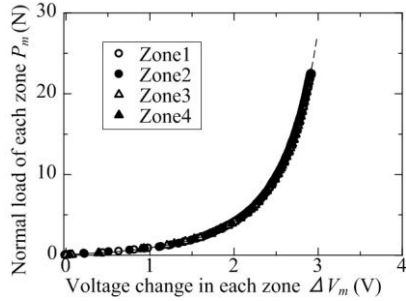


Fig.9 Relationship between normal load  $P_n$  and voltage change in each zone  $\Delta V_m$  ( $m=1, 2, 3, 4, L=25\text{mm}$ )

$$P_m = F(\Delta V_m) \\ = 0.297 \Delta V_m^7 - 2.612 \Delta V_m^6 + 9.409 \Delta V_m^5 \\ - 17.152 \Delta V_m^4 + 16.739 \Delta V_m^3 - 7.828 \Delta V_m^2 + 2.079 \Delta V_m \quad (7)$$

各ゾーンで算出された垂直荷重  $F(\Delta V_m)$  とセンサに負荷された垂直荷重  $P_n$  の関係を Fig.10 に示す。センサの中心に垂直荷重  $P_n$  が負荷されているため、各ゾーンで算出される垂直荷重  $F(\Delta V_m)$  が均一に増加していることがわかる。

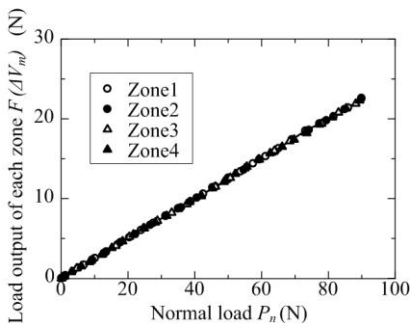


Fig.10 Relationship between normal load  $P_n$  and load output in each zone  $F(\Delta V_m)$  ( $m=1, 2, 3, 4$ )

弾性体長辺の長さを  $L=25, 30, 35\text{mm}$  と変化させた際の  $F(\Delta V_m)$  の値を Eq.(2) に代入することで  $\Delta F_{P_n}$  を求めた。垂直荷重  $P_n$  と  $\Delta F_{P_n}$  の関係を Fig.11 に示す。垂直荷重の増加にともない  $\Delta F_{P_n}$  が線形的に増加していることが確認できる。以上のことから本センサは測定した電圧を関係式に代入することで、垂直荷重  $P_n$  を計測可能であることがわかった。また、長辺の長さ  $L$  が増加するに従い弾性体の変形抵抗が大きくなり、弾性角柱を 25% 圧縮変形させた際に測定可能な最大垂直荷重が増加していることがわかる。

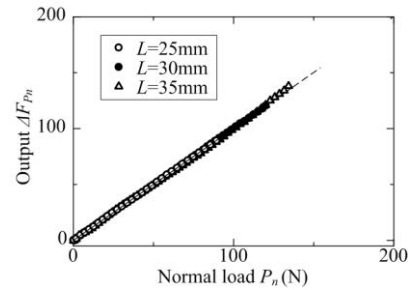


Fig.11 Relationship between normal load  $P_n$  and Output  $\Delta F_{P_n}$

#### 4-2 x 軸方向のせん断荷重の測定

センサに対し  $P_n=10\text{N}$  となるまで垂直荷重を負荷した状態でせん断荷重  $P_x$  を負荷した。例として弾性体の長辺の長さを  $L=25\text{mm}$  としたときの電圧から算出された各ゾーンに負荷される垂直荷重  $F(\Delta V_m)$  とせん断荷重  $P_x$  の関係を Fig.12 に示す。x 軸の正方向に荷重を負荷しているため、せん断荷重の増加に伴ない正方向に位置するゾーンで算出される垂直荷重は増加し、負方向に位置しているゾーンでは、算出される垂直荷重が軽減されていることがわかる。

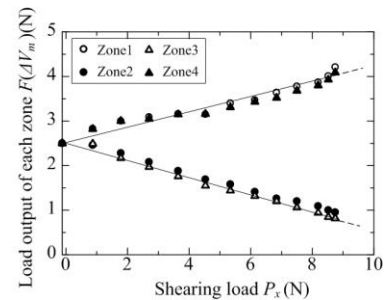


Fig.12 Relationship between shearing load  $P_x$  and load output in each zone  $F(\Delta V_m)$  ( $m=1, 2, 3, 4, L=25\text{mm}$ )

荷重測定原理より、せん断荷重  $P_x$  を測定するには Eq.(3) より  $\Delta F_{P_x}$  を求める必要がある。そこで、弾性角柱の長辺の長さ  $L=25, 30, 35\text{mm}$  と変化させた際の  $F(\Delta V_m)$  の値を Eq.(3) に代入し  $\Delta F_{P_x}$  を求めた。センサに負荷されたせん断荷重  $P_x$  と  $\Delta F_{P_x}$  の関係を Fig.13 に示す。せん断荷重  $P_x$  の増加にともない  $\Delta F_{P_x}$  が線形的に増加していることが確認できる。また、弾性角柱の長辺の長さ  $L$  が大きくなるにつれて傾きが小さくなっていることが確認できる。このことから、長辺の長さ  $L$  が大きくなるにつれて、対面するゾーン間に生じる垂直荷重の差が小さくなっていることがわかる。

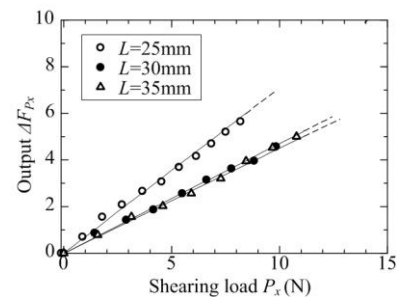


Fig.13 Relationship between shearing load  $P_x$  and output  $\Delta F_{P_x}$

#### 4-3 y 軸方向のせん断荷重の測定

センサに対し  $P_n=10\text{N}$  となるまで垂直荷重を負荷した状態でせん断荷重  $P_y$  を負荷した。例として弾性角柱の長辺の長さを  $L=25\text{mm}$  としたときの各ゾーンで算出された垂直荷

重  $F(\Delta V_m)$  とせん断荷重  $P_y$  の関係を Fig.14 に示す. y 軸の正方向に荷重を負荷しているため, せん断荷重の増加に伴ない正方向に位置するゾーンで算出される垂直荷重は増加し, 負方向に位置しているゾーンでは, 算出される垂直荷重が軽減されていることがわかる.

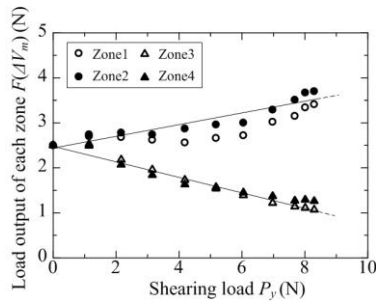


Fig.14 Relationship between shearing load  $P_y$  and load output in each zone  $F(\Delta V_m)$  ( $m=1, 2, 3, 4, L=25\text{mm}$ )

荷重測定原理より, せん断荷重  $P_y$  を測定するには Eq.(4) より  $\Delta F_{P_y}$  を求める必要がある. そこで, 弾性角柱の長辺の長さ  $L=25, 30, 35\text{mm}$  と変化させた際の  $F(\Delta V_m)$  の値を Eq.(4) に代入し  $\Delta F_{P_y}$  を求めた. センサに負荷されたせん断荷重  $P_y$  と  $\Delta F_{P_y}$  の関係を Fig.15 に示す. せん断荷重  $P_y$  の増加にともない  $\Delta F_{P_y}$  が線形的に増加していることが確認できる. また, 弾性角柱の長辺の長さ  $L$  が大きくなるにつれて傾きが小さくなっていることが確認できる. このことから, 長辺の長さ  $L$  が大きくなるにつれて, 対面するゾーン間に生じる垂直荷重の差が小さくなっていることがわかる.

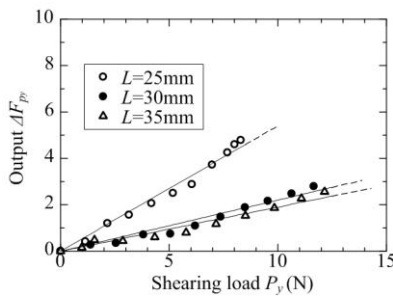


Fig.15 Relationship between shearing load  $P_y$  and output  $\Delta F_{P_y}$

#### 4-3 z 軸周りのモーメントの測定

センサに対し  $P_n=10\text{N}$  となるまで垂直荷重を負荷した状態でモーメント  $M_z$  を負荷した. 例として弾性体の長辺の長さを  $L=25\text{mm}$  としたときの各ゾーンで算出された垂直荷重  $F(\Delta V_m)$  とモーメント  $M_z$  の関係を Fig.16 に示す. センサに負荷されるモーメントが増加するにつれて隣接されたゾーンで算出される垂直荷重に差が生じていることがわかる.

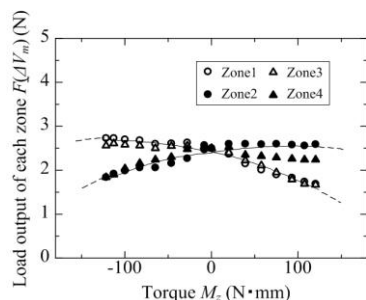


Fig.16 Relationship between torque  $M_z$  and load output in each zone  $F(\Delta V_m)$  ( $m=1, 2, 3, 4, L=25\text{mm}$ )

荷重測定原理より, モーメント  $M_z$  を測定するには Eq.(5) より  $\Delta F_{M_z}$  を求める必要がある. そこで, 弾性角柱の長辺の長さ  $L=25, 30, 35\text{mm}$  と変化させた際の  $F(\Delta V_m)$  の値を Eq.(5) に代入し  $\Delta F_{M_z}$  を求めた. モーメント  $M_z$  と  $\Delta F_{M_z}$  の関係を Fig.17 に示す. モーメント  $M_z$  の増加にともない  $\Delta F_{M_z}$  が線形的に増加していることが確認できる. また, 弾性角柱の長辺の長さ  $L$  が大きくなるにつれて傾きが大きくなっていることがわかる. このことから長辺の長さ  $L$  が大きくなるにつれてモーメントを負荷した際に隣接されたゾーン間に生じる垂直荷重の差が大きくなることがわかる.

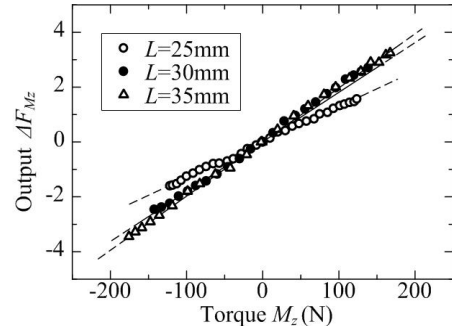


Fig.17 Relationship between torque  $M_z$  and load output  $\Delta F_{M_z}$

#### 5. 結論

本研究では四軸荷重測定用柔軟接触センサに用いる弾性体の形状がセンサに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした. そこで, センサに用いる弾性角柱の長辺の長さを変化させ, 荷重の測定を行った結果以下のことがわかった.

- (1) 弾性角柱の長辺の長さを変化させて垂直荷重を負荷した結果, 長辺の長さが増加するに従い, 測定可能な垂直荷重の最大値が大きくなることがわかった.
- (2) 弾性角柱の長辺の長さを変化させてせん断荷重を負荷した結果, 長辺の長さが増加するに従い, せん断荷重を負荷した際に対面するゾーン間に生じる垂直荷重の差が小さくなることがわかった.
- (3) 弾性角柱における長辺の長さを変化させてモーメントを負荷した結果, 長辺の長さが増加するに従い, モーメントを負荷した際に隣接されたゾーン間に生じる垂直荷重の差が大きくなることがわかった.

以上より, 四軸荷重測定用柔軟接触センサに用いる弾性体の形状がセンサに及ぼす影響を明らかにすることができた. 本研究の結果から, 弾性角柱における長辺の長さを短くすることでせん断荷重に対する感度を向上させることができ, 長辺の長さを長くすることでモーメントに対する感度を向上させることが可能であると考えられる.

#### 参考文献

- (1) M.Ohka, H.Kobayashi, Sensing Precision of an Optical Three-axis Tactile Sensor for a Robotic Finger, IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN06), (2006), pp.214 – 219
- (2) 岩下貴史, 下条誠, 等電位法に基づく分布型オーバーサンプリング AD 変換を用いた触覚センサ, 電子情報通信学会論文誌 C 編, Vol.J90, No.10, (2007), pp.683 – 692.