ユニバーサルロボットハンドのための分布型圧力センサの開発*

中本 裕之^{*1,*2}, 小林 太^{*2}, 今村 信昭^{*3}
白沢 秀則^{*4}, 小島 史男^{*5}

Development of Pressure Distributed Sensor for Universal Robot Hand

Hiroyuki NAKAMOTO^{*6}, Futoshi KOBAYASHI, Nobuaki IMAMURA,
Hidenori SHIRASAWA and Fumio KOJIMA^{*6} Hyogo Prefectural Institute of Technology,
3-1-12 Yukihira-cho, Suma-ku, Kobe-shi, Hyogo, 654-0037 Japan

We propose a pressure distributed sensor as a tactile sensor for a five-fingered robotic hand like a human hand. The sensor has simple, three-layer structure, which composed of an urethane gel, a pressure sensitive rubber under the gel, and an electrode sheet at the bottom. The arrangement brings high productivity and smooth maintenance. The electrode sheet also provides high ratio of the detection area to the sensor and high sensitivity. First, the characteristics of response time and accuracy are investigated by ground tests. Secondly, a shape recognition method with the sensor is proposed. Finally the effectiveness and validity of the proposed method are demonstrated through laboratory experiments.

Key Words: Sensor, Recognition, Robot, Pressure Distribution, Robot Hand, Shape Recognition

1. は じ め に

これまで多数の人間協調・共存型ロボット⁽¹⁾が発表され、それらは極限作業から家庭内の家事まで幅広く人間を補助できるものと期待されている。しかしながら、そういったロボットに人間が行っているような多種多様な作業を可能とさせるためには、未だ多くの研究開発要素がある。その一つとして、人間の生活環境において、人間の使う道具を使いこなすことが可能なロボットハンドが挙げられる。このハンドは、人間の手と同等の大きさと機能を備えることが望ましい。人間の手のように多関節の指を複数本もつハンドの研究例として、MEL Hand⁽²⁾, Utah/MIT Dextrous Hand⁽²⁾や Gifu Hand⁽³⁾などの研究がある。これらの研究においては、主に力覚センサと関節角度センサを用いた制御手

法の提案等が行われているが、実作業を可能とするために、それらセンサだけでは不十分だと考えられる。ロボットハンドが器用な動作を実現するためには、把持物の形状や位置、方向などの認識が必要である。

一方、人間の皮膚には触覚があり、触覚は作業を行うために重要な役割を担っている⁽⁴⁾。そして、人間の皮膚は柔軟であり、そのことが物体との柔軟な接触を可能にしている。このような人間の皮膚の特性から、センサ素子の研究例として、非線形弾性を利用して表面応力の強さと広がりを見測するセンサ⁽⁵⁾や、構造の弾性・粘性変化を利用した高感度で測定範囲の広い圧電振動型触覚センサ⁽⁶⁾など多くの研究、試作が進められている。これらの研究では主にセンサ単体に対する評価がなされているが、ロボットハンドに適用した上での実験や計測結果の処理方法の検討は十分になされていない。また、多指ハンドの指先へ適用できる柔軟な触覚センサとして、エッジ方向の計測が可能な柔軟指先センサ⁽⁷⁾や、指紋を有した接触／非接触・固着／滑り分布の検出が可能な弾性ロボットフィンガ⁽⁸⁾、人間型柔軟指⁽⁹⁾など指先で用いるセンサの研究がある。また、筆者らは、接触面に柔軟な素材を用いることで、

* 原稿受付 2007 年 11 月 20 日。

^{*1} 正員、兵庫県立工業技術センター(☎ 654-0037 神戸市須磨区行平町 3-1-12)。^{*2} 正員、神戸大学大学院工学研究科(☎ 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)。^{*3} 正員、広島国際大学工学部(☎ 737-0112 呉市広古新開 5-1-1)。^{*4} (財)近畿高エネルギー加工技術研究所(☎ 660-0083 尼崎市道意町 7-1-8)。^{*5} 正員、フェロー、神戸大学大学院工学研究科。

E-mail: nakamoto@hyogo-kg.go.jp

産業用ロボットの指先で円筒の直径を認識可能な分布型圧力センサを提案した⁽¹⁰⁾。これらの研究では指先に特化しており、指先以外の部位まで拡張し手全体を使った研究まではなされていない。触覚センサを備えるロボットハンドに関する研究として、接触力制御⁽¹¹⁾やベン回し動作⁽¹²⁾などがある。このような研究例は少ないが、設計の段階よりロボットハンドへ搭載することを考慮し、ロボットハンドへ搭載した状態で評価実験を行うことは、アプリケーションに即したハードウェアとソフトウェアの両面の向上を図ることができる点で、触覚を備える実用的なロボットハンドの実現に重要であると考えられる。

そこで本稿では、人間の手と同様に5本の指をもつロボットハンド（以下、ユニバーサルロボットハンドとよぶ）に適用することを目的として開発した柔軟な分布型圧力センサについて述べる。この分布型圧力センサは、ウレタンゲルを用いた柔軟な表面層をもち、シート状の素材のみからなる単純な構造である点に特長がある。さらに、センサ面積に対する検出面積の割合を高くし、限られた面積の中で高感度となるような設計を行っている。また、センサの基礎特性として、ユニバーサルロボットハンドへ搭載し、計測精度と応答速度に関する評価実験を行い、その結果を述べる。さらに、ユニバーサルロボットハンドが把持状態を認識するために必要な接触面の形状を評価する方法と、その評価実験の結果について述べる。

2. 分布型圧力センサ

2.1 構造 開発した分布型圧力センサを図1に示す。この分布型圧力センサは、物体に接触する面から順に、ウレタンゲル（（株）エクシールコーポレーション製）、感圧導電性ゴム（イナバゴム（株）⁽¹³⁾製）、電極シートの3層からなる。このように単純な3層構造によって、センサ自体の製作や摩耗しやすいウレタンゲルの交換が容易となる。ウレタンゲルは、スポンジ硬度が15であり、厚さが2.5mmである。物体が接触すると、そのときの応力と接触面の形状からウレタンゲルが変形し、その変形によって感圧導電性ゴムに加えられる圧力分布が決定する。感圧導電性ゴムは、厚さが0.5mmであり、圧力を受け体積が減少するとシート内に配合される導電性の粒子が接触することから、その部位の電気抵抗値が小さくなるという特性をもつ。したがって、電気抵抗値を計測することで、その部位に加えられている圧力を求めることができる。また、電極シートとして、ポリイミド素材のフレキシブル基板にパターンを構成したものを製作した。

Fig. 1 Photo of Developed Pressure Distributed Sensor.

次に、電極シート上の電極パターンについて述べる。電極では感圧導電性ゴムの電気抵抗値を計測するため、電圧を加える電極（以下、電極Aとする）と電圧を加えた際に流れる電流を受ける電極（以下、電極Bとする）の2種類の電極をパターン化する必要がある。文献⁽¹⁰⁾ではその2種類の電極を別のシート上で製作し、2枚の電極シートで感圧導電性ゴムを挟み込む構造とした。本研究では構造の簡素化と省線化のため、複層のフレキシブル基板1枚の上に2種類の電極をパターン化した。製作した計測点1点分のパターンを図2に示す。図2において、黒色の外周部分が電極A、内側の灰色部分が電極Bであり、大きさは縦×横で3.4×1.8mmである。また電極B中に2つあるスルホールは、電極Bをフレキシブル基板の中間層へ導通させており、電極Bはその中間層で配線する。感圧導電性ゴムはパターンの上に接触させて配置する。したがって、このセンサでは電極AとBの両電極間にある白色の電気的絶縁部分（以下、絶縁部とする）の上にある感圧導電性ゴムが主な計測部分となる。感圧導電性ゴムの変形によって、パターン上には感圧導電性ゴム内の導電性粒子の接触による導電経路が複数できるが、その導電経路が多くできるほど電気抵抗値の変化が大きくなり分布型圧力センサとしての感度が高くなる。これを実現するには、電極AとBが近づくよう絶縁部の幅を小さくし、さらに絶縁部を長くすれば良い。そこで、図2で示すパターンでは、感度を高める目的で、絶縁部の幅を安定して製造できる最小値である0.2mmとし、さらに絶縁部が長くなるよう各電極を凹凸状に入り組んだ形状に設計した。

分布型圧力センサ1枚分のパターンを図3に示す。このパターンでは、縦方向に9本の電極Aを配置し、横方向に12本の電極Bを配置する。このパターンには図2で示したパターンが102点あるので、計測点も

Fig. 2 Unit of electrode pattern.

Fig. 3 Sheet of electrode pattern.

102点である。このパターンでは、物体が分布型圧力センサに接触したとき力を検出できない面積をできるだけ少なくするため、計測点間（電極A間）の間隔を0.2mmに設計した。その結果、全パターン面積に対する計測点面積の割合は約80%である。

2.2 ユニバーサルロボットハンドへの適用 分布型圧力センサを適用したユニバーサルロボットハンドを図4に示す。ユニバーサルロボットハンドは、5本のフィンガから構成されており、各フィンガは3つのリンクと4つの関節をもつ。分布型圧力センサをフィンガの各リンクの指の腹側の3部分に貼り付けており、計測点数は指先に図3で示した102点、他の2部分が70点である。各分布型圧力センサからの配線は、幅約10mmのフレキシブル基板で指の関節の隙間

Fig. 4 Universal robot hand with developed sensors.

を通じてロボットハンドの背に配置した。さらに配線は、センサ制御回路を経由してOSがRT-LinuxであるPC上のAD変換ボード、DIOボードに接続される。センサ制御回路はマルチプレクサ回路とアンプ回路で構成される。PCはDIOボードを介して、マルチプレクサ回路に対して計測点の指定ができる。したがって、全点計測の場合、任意の順で計測することが可能であるが、主に図3の左上から右下の計測点に向けて一行ずつ計測を行ない圧力分布として取得した。マルチプレクサ回路は、指定された計測点の電極Aに5Vの電圧を加え、指定された計測点の電極Bに流れた電流をアンプ回路により0~10Vの電圧値に変換する。この電圧値の範囲は、感圧導電性ゴムの電気抵抗値の変化で約20M~5kΩ分に相当し、これは計測点1点で計測する力の約0~1Nに相当する。PCはマルチプレクサ回路、AD変換ボードを介し、この電圧値を12bitの分解能、0~4095の値で取得する。なおセンサ制御回路では、零電位法⁽¹⁴⁾を用いて電流の回り込みを防いでいる。以上のような構成で、1点の計測に約150μsを要し、全点計測の場合は20msの周期で圧力分布を取得できる。

3. 計測精度と応答速度

3.1 力推定式とパラメータ決定方法 分布型圧力センサの評価実験として、計測精度の評価を行った。ここでは、分布型圧力センサで計測した力の和を、ロードセルの値と比較する。

まず、PCで計測した電圧値から計測点1点に掛かる力を推定する式を考える。ただし、計測した電圧値とその計測点1点に掛かる力の関係は、感圧導電性ゴムの特性から非線形の関係にあるので、ここでは式(1)

のように 16 変数からなる 1 次方程式を考える。

$$f = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_{16} x_{16} \quad (1)$$

ここで、 $\beta_i (i=0 \dots 16)$ は方程式の係数である。 $x_j (j=1 \dots 16)$ は計測した電圧値を代入する変数であり、計測した電圧値 (0~4095) を 16 分割し、 j が小さい x_j から順に $0 \leq x_1 \leq 255, 0 \leq x_k \leq 256 (k=2 \dots 16)$ と電圧値を代入する。例えば、電圧値が 1000 の場合、 $x_1 = 255, x_2 = x_3 = 256, x_4 = 233, x_5 = \dots = x_{16} = 0$ となり、これを式 (1) に代入することで計測点に加えられた力 f を求める。また、力 f を求めるためには係数 β_i を事前に求める必要があるが、この方程式を f の変数 x_j に対する重回帰式とみなして次のように係数 β_i を求める。

$(m+1)$ 個の変数 $F, X_1, \dots, X_m$ について n 組のデータ $(f_1, x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}), (f_2, x_{12}, x_{22}, \dots, x_{m2}), \dots, (f_n, x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{mn})$ が得られているとき、変数 F を変数 $X_1, X_2, \dots, X_m$ の関数として推定することを考える。この場合、 $X_1, X_2, \dots, X_m$ について固定し、 F に関する観測方程式として式 (2) が得られる。

$$F = X\beta \quad (2)$$

ただし、 F は定数ベクトル、 X は計画行列、 β は求める未知量のベクトルであり、

$$F = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{m1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

$$\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m]^T$$

である。ここで重量行列を単位行列と仮定すると、式 (2) の観測方程式から最小二乗法により次の正規方程式が得られる。

$$XX\beta = XF \quad (3)$$

ここで、

$$XX = \begin{pmatrix} n & \sum x_{1p} & \dots & \sum x_{mp} \\ \sum x_{1p} & \sum x_{1p}^2 & \dots & \sum x_{1p}x_{mp} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum x_{mp} & \sum x_{mp}x_{1p} & \dots & \sum x_{mp}^2 \end{pmatrix}$$

$$XF = \begin{pmatrix} \sum f_p \\ \sum x_{1p}f_p \\ \vdots \\ \sum x_{mp}f_p \end{pmatrix}$$

である。ただし、 $\sum$ は p についての 1 から n までの総和である。また、 XX は対称行列になっている。したがって、 β の推定値は、 $|XX| \neq 0$ として、

$$\hat{\beta} = (XX)^{-1}XF \quad (4)$$

で求められる。ただし、この $\hat{\beta}$ を用いて式 (1) により推定できる力は、 $\hat{\beta}$ を決める際に用いた定数ベクトル F の要素 f_n のとった範囲内の値に限る。

3.2 評価実験 提案した力推定式の評価実験を行った。電極のパターンや感圧導電性ゴムの力-抵抗値特性が不均一の場合、計測点 1 点毎に式 (4) を用いて $\hat{\beta}$ を決定する必要があるが、この評価実験では均一と考え、全計測点に共通の $\hat{\beta}$ を決定する。このとき、計測点 1 点のみの力と電圧値の関係からでも $\hat{\beta}$ を決定することができるが、2.1 で述べたように計測点間の距離が 0.2mm と短く、1 点のみに力を加えることは困難である。逆に、全計測点に力を加えるには精密な位置合わせが必要となる。そこでこの実験では、人差し指の中央の 4x4 点、図 3 の (A2,B4) から (A5,B7) を計測対象とし、それよりも一回り小さな面積をもつ一辺が 5mm の立方体の面を、ユニバーサルロボットハンドの人差し指と親指の指先同士に互いに平行に押し合う実験を行った。このとき、対象とした計測点は 16 点のみであることから、全点計測より高速な 500Hz の周期で計測を行った。また、親指の指先にはロードセルを取り付けて、人差し指に掛かる力の反力を計測した。押し合い動作の力は振幅 15N、周期 12sec の三角波として生成し、正の値をとる半周期 6sec を目標の力として押し合う力をロボットハンドを制御し実現した。したがって、1 回の押し合い動作で 6sec、3000 回の計測となり、ここでは 10 回の押し合い動作を行い取得した 30000 組の分布型圧力センサとロードセルの出力を式 (2) の F と X として、式 (4) により係数の推定値 $\hat{\beta}$ を求めた。

次に、押し合う強さを 2 段階に変化させた実験を行い、そのときのロードセルの出力と分布型圧力センサの出力から求めた計測点 16 点分の f の和との比較を図 5 に示す。図 5 の縦軸は力、横軸は時間を示す。図 5 では、3.5N 程度の小さい力に関してはロードセルと分布型圧力センサの出力が一致しない部分がある。これはウレタンゲルが分布型圧力センサに掛かる力を減衰し、感圧導電性ゴムまで力が伝わっていないことが原因と考えられる。しかし、それよりも強い力に関しては、2 段階の力が一定の状態と 2 段階間の力が変化する状態の両状態において、各出力はほぼ一致し、分布型圧力センサに加えられる力を精度良く推定できることが

Fig. 5 Outputs of load cell and developed sensor.

Fig. 6 Impact responses of load cell and developed sensor.

分かる。これは、ロードセルと分布型圧力センサの出力との重相関係数が 0.99 であることから分かる。

3.3 応答速度の評価実験 応答速度の評価として、押し合い動作を高速 (約 1.42rad/s) にした場合の、各出力を図 6 に示す。図 6 の縦軸は力、横軸は時間を示す。指を高速で衝突させたため、時刻 28ms で一度当たって跳ね返っているのが分かる。このときの分布型圧力センサの出力は、ロードセルの出力の 3 分の 1 程度であり、衝撃に対して応答できていない。しかし、その後 40ms から 50ms の約 10ms 間で分布型圧力センサの出力が 100ms 以降の 11N まで達していることから、分布型圧力センサの応答速度は 10ms 程度と評価できる。分布型圧力センサの全計測点の計測周期が 20ms であることを考慮に入ると、この応答速度は十分小さいと考えられる。

4. 接触面の形状評価

4.1 形状評価の方法 ユニバーサルロボットハンドが把持状態を認識するために、分布型圧力センサから得られた分布情報に基づいて、把持物の形状認識を行うことを考える。特に図 4 に示したような複数の分布型圧力センサを備えるユニバーサルロボットハンドが、フィンガの全体を使って物体を把持することを想定した場合、まず各分布型圧力センサの接触面に関する形状評価を行い、次にそれらの結果を組み合わせることで把持物全体の形状認識を行うことが有効であると考

Fig. 7 Example of output distribution and average distribution.

えられる。そこで、ここでは一つの分布情報に対する接触面の形状評価方法について述べる。

フィンガに搭載した分布型圧力センサは、対象物が変形しない場合、接触面の形状と加えられる力に基づいて図 7 のような分布を検出する。温度や湿度などの環境条件が一定であると仮定し、接触面に加える力を一定にすると、分布は接触面の形状によって決定される。このとき、接触面が分布型圧力センサの表面層のウレタンゲルの厚さよりも小さな起伏で単峰の形状の場合、球のような凸状のあれば、その先端部分のみが大きな値の分布となり、平板であればゆるやかな分布となる。

接触面の形状評価を次のような手順で行う。センサから得られた分布に図 7 で示すような座標軸を設定し、xz 平面に対して y 軸方向の圧力値の平均をとった平均分布を求める。yz 平面に対しても同様に平均分布を求める。次に、各平均分布を度数分布とみなし、その尖度を式 (5) によって求める。

$$\gamma = \sum_{k=1}^N z_k (c_k - \mu)^4 / (N\sigma^4) \quad (5)$$

ただし、式中の z_k ($k=1 \dots N$) は分布のデータ、 c_k ($k=1 \dots N$) はデータの階級値、 N はデータ数、 μ は平均値、 σ は標準偏差である。尖度は分布が尖っているほど値が大きくなり、ゆるやかであれば値が小さくなる。したがって、分布の尖りの程度を一つの値として表現できることから、分布すなわち接触面の形状評価に適していると考えた。

4.2 評価実験 接触面の形状評価に関する実験を行った。ユニバーサルロボットハンドの前にテストピースを固定し、分布型圧力センサにそのテストピースが接触するようフィンガの関節を動作させた。ただし、今回の実験で対象とするのは人差し指の中節に適

Fig. 8 Test pieces for this experiment.

Fig. 9 Average distribution of xz plane.

Fig. 10 Average distribution of yz plane.

用した計測点数が70点のセンサである。テストピースは図8に示すような大きさの4種類とした。実験では、図8における各テストピースの点線で示す面と分布型圧力センサの表面が平行かつ図8で示す座標軸と図7で示す座標軸が一致するよう接触させた。

実験の結果得られた分布から求めたxz平面の平均分布を図9に、yz平面の平均分布を図10に示す。ただし、センサに加えられた圧力をほぼ一定にするため、各平均分布は元の分布の各値の合計が約30000の分布から求めた。実験で用いた分布型圧力センサの電極数が、x軸方向に9本、y軸方向に8本あることから、図9と図10の横軸はそれらの本数に応じた要素数となっている。縦軸はAD変換ボードの出力値である。

xz平面を示す図9では、sphereとcylinderが同じよ

Table 1 Averages and standard deviations of kurtosis of average distributions

test piece		sphere	cylinder	square	rectangle
xz	AVE	2.67	2.68	2.40	2.38
	SD	0.026	0.057	0.032	0.011
yz	AVE	2.71	1.96	2.38	1.94
	SD	0.081	0.026	0.067	0.045

うな分布となっているが、これらは直径40mmの曲面形状にもとづく平均分布である。また、yz平面を示す図10ではcylinderとrectangleが同じような分布となっているが、これらは長さ20mmの平面形状にもとづく平均分布である。これらの結果は、開発した分布型圧力センサが各テストピースの接触面の形状に応じた圧力分布を計測できることを示している。

次に、同じ実験を5回行ったときに得られた各平均分布の尖度の平均値と標準偏差を表1に示す。sphereの両平面とcylinderのxz平面はいつでも直径40mmの曲面形状であるが、それら平均分布の尖度も近い値である。同様に、長さ20mmの平面であるcylinderとrectangleのyz平面、さらには長さ10mmの平面であるsquareの両平面とrectangleのxz平面の平均分布の尖度も近い値である。また、標準偏差に注目するとそれぞれの平均値の3%より小さい値となっており、各尖度がばらつきが小さく信頼性の高い値であることを示している。これらの結果から、接触面の形状を尖度で評価できることがわかった。

5. おわりに

ユニバーサルロボットハンドに適用することを目的とした分布型圧力センサについて述べた。この分布型圧力センサはウレタンゲルによる柔軟な表面層をもち、シート状の素材のみからなる単純な構造に特長がある。計測精度と応答速度に関する実験を行い、その結果、センサ面に掛かる力を精度良く推定でき、センサの応答速度が全点計測時の周期に比べて十分小さいことを示した。さらに、接触面の形状を評価する方法について述べた。実験の結果、その方法と尖度という指標を用いることで評価が可能であることを示した。

本稿で述べた実験やその結果は、いつでもユニバーサルロボットハンドに適用した一つの分布型圧力センサによるものである。現在、複数の分布型圧力センサを用いての把持の状態、把持物体の認識を行い、その結果からユニバーサルロボットハンドを制御する手法について研究を進めている。

文 献

- (1) Inoue, H., Hirukawa, H., HRP: Humanoid Robotics Project of MITI, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.19, No.1(2001), pp.2-7
- (2) John M. Hollerbach, Stephen C. Jacobsen, Anthropomorphic robots and human interactions, Proceeding 1st International Symposium on Humanoid Robots(1996), pp.83-91.
- (3) Mouri, T., Kawasaki, H., Yoshikawa, K., Takai, J., Ito, S., Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III, Proceeding of International Conference ICCAS2002 (2002) pp.1288-1293.
- (4) Maeno, T., Structure and Function of Finger Pad and Tactile Receptors, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.18, No.6(2000), pp.14-17.
- (5) Hoshi, T., Shinoda, H., Tactile Sensing Using Non-Linear Elastic Property, *2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 2P1-N-104, (2005)
- (6) Motoo, K., Arai, F., Fukuda, T., Piezoelectric Vibration-Type Tactile Sensor Using Elasticity and Viscosity Change of Structure, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.24, No.3 (2006), pp.408-415.
- (7) Murakami, K., Hasegawa, T., Tactile Sensing of Edge Direction of an Object using a Robotic Fingertip with Soft Skin, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.24, No.2(2006), pp.240-247.
- (8) Yamada, D., Maeno, T., Yamada, Y., Development of Elastic Robot Finger having Ridges which can Detect a Distribution of Contact Condition, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.70, No.690(2004), pp.560-566.
- (9) Tada, Y., Hosoda, K., Asada, M., Anthropomorphic Soft Fingertip with Tactile Receptors in the Skin, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.23, No.4(2005), pp.482-487.
- (10) Nakamoto, H., Saiki, T., Kitagawa, Y., Pressure Distribution Sensor, Combined Flexible Material and Conductive Rubber for Robot Hand, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.23, No.3 (2005), pp.360-361.
- (11) Johnston, D., Zhang, P., Hollerbach, J.M., and Jacobsen, S.C. : A full tactile sensing suite for dextrous robot hands and use in contact force control, Proceeding IEEE International Conference Robotics and Automation(1996), pp.3222-3228.
- (12) Ishihara, T., Namiki, A., Ishikawa, M., Shimojo, M., High-speed grasp and manipulation of a pen-shaped object using a high-speed multifingered hand with high-speed tactile sensor, *2006 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, 1A1-B39(2006)
- (13) INABA RUBBER Co., Ltd Home Page, URL://www.inaba-rubber.co.jp/index.html
- (14) Shimojo, M., Ishikawa, M., Kanaya, K., A Flexible High Resolution Tactile Imager with Video Signal Output, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.57, No.537(1991), pp.150-156.