

PVDF フィルムを用いたヒトの指に学ぶ 静摩擦覚を有するフィンガスキンの開発

藤本 勲^{*1} 山田 陽 滋^{*1} 前野 隆 司^{*2}
森 園 哲 也^{*1} 梅 谷 陽 二^{*1}

Development of Artificial Finger Skin with Static Friction Sensation Imitating Human Finger Using PVDF Film

Isao Fujimoto^{*1}, Yoji Yamada^{*1}, Takashi Maeno^{*2},
Tetsuya Morizono^{*1} and Yoji Umetani^{*1}

The goal of our study is development of a sensor which has static friction sensation using paired pieces of PVDF film strips. In order to develop the sensor, we recall that the sensing function is supposed to be attained through incipient slip detection. First is designed the artificial finger whose characteristics are associated with those of a human finger with respect to the shape and a part of the sensing functions enabling the incipient slip detection: The finger skin has ridges on the surface in each of which a pair of artificial **FAI** receptors are embedded. The design process of two phases is also shown to secure useful information without any plastic deformation of the film strips. Design phase #1 is to design the characteristics of a **FAI** receptor. As the transducer for the **FAI** receptors, we choose PVDF film sheets which have a dynamic stress rate characteristic. Design phase #2 involves determination of the shape and size of the artificial finger skin, and the location of the transducers in a ridge. Signals from the transducers are analyzed concerning where the best position for each of the transducers is to utilize the information acquired from the transducers in the future process. We analyze the stress in the finger skin when incipient slip occurs at the surface. The experimental results reveal that the differential output voltage signal from a pair of artificial **FAI** receptors embedded in a ridge captures low-frequency vibration to generate a predictive signal which warns incipient slip of the ridge. The results also show, that high-frequency vibratory signal itself cannot be detected using the artificial **FAI** receptors and suggests a need of artificial **FAII** receptors in static friction sensory information processing.

Key Words: Tactile Sensor, Static Friction Sensation, Incipient Slip, PVDF Transducer, Stress Rate, **FAI** Receptor

1. はじめに

これまで、心理学物理実験を通じて現象論的に記述された触知覚に関する知見を拠り所として、これを実現するのに適したセンサを作り、その信号処理方法を考案したり力学的な特性を求めたりするのが、高次の触知覚研究分野において当然視されてきた唯一の方法であった。しかし、多種類の触知覚機能 [1] をロボットハンド上に一挙に実現すべく、それぞれの目的にかなうセンサをすべて作り上げて、ロボットの指先という小さな空間に収めようとする、機能を増やすにつれて、センサ同士が相互に場所や特性の邪魔をするようになり、個々のセンシ

ング機能の高い性能を維持しつつ多くの触知覚機能を達成することができなくなる。これに対し、ヒト指は、様々な機械的刺激をわずか数種類の機械受容器だけによって分業的にピックアップするようにできており、種々の触知覚は、それぞれの機械受容器からの性質の異なる情報を統合的に処理することによって達成できるようになっていると考えられる。

本研究の目的は、ヒトの触知覚機構の中でもロボティクスの分野における大きな貢献が見込まれる静摩擦覚について、それを検出可能なセンサを開発することである。静摩擦覚は、把持物体の摩擦係数および重さを知ることなく、最小の把握力で物体を把持することができる知覚機構のことであり、その背景に初期局所滑りの関与が早くから示唆されてきた [2]。その際、上記のこれまでの触覚センサに与えられた問題を解決すべく、ヒトの触知覚機構の実現方法から学んだセンサの開発を行った。

ロボティクスの分野において、初期局所滑りを検出ターゲットとした研究が数多く報告されてきた。なかでもまず、Tremblay

原稿受付 2003年8月28日

^{*1}豊田工業大学工学部大学院工学研究科

^{*2}慶應義塾大学理工学部機械工学科

^{*1}Graduate School of Toyota Technological Institute

^{*2}Department of Mechanical Engineering, Keio University

ら [3] は、人工皮膚内に組み込むトランスデューサとして加速度センサを用いて、得られる情報から初期局所滑りの検出が可能であることを示した。しかし、一般に加速度センサの超小型化は困難であり、ロボットフィンガに多数埋め込む触覚センシングの用途には適さない。これを受けて、センサの小型化の可能性を持つ研究として、Son ら [4] が行った研究が著名である。彼らは、ゴムで成形した皮膚に、初期局所滑りをより生じやすくするために nib と呼ばれる高アスペクト比の突起形状のものを多数配置した。そして、トランスデューサとして 4 枚の PVDF フィルムを用い、接触状態の変化に対して変化する出力電圧をモニタすることにより、初期局所滑りの検出を実現した。PVDF フィルム群は、nib 群が生える下地の中に埋め込まれており、nib が高感度な振動検出を可能にする役割を果たしていた。しかし、突起状 nib は、やはりロボットフィンガの表面としては、力学的解析の立場からも、応用の観点からも受け入れにくいと判断されよう。これを受けて、より高度な情報処理技術を指向した代表的な研究例として、Gaetano ら [5] の報告が取り上げられよう。彼らは、把持物体と接触する面が平面状の人工皮膚を作製し、把持物体を接触させた際に生じる垂直、水平成分の力に対して高い検出感度を持つ触覚センサ素子を 1 列に分布列した。そして、それらからの出力信号をニューラルネットワークに入力して、物体の滑り出す信号パターンを推定するアプローチを提案した。しかしながら、この場合、人工皮膚の形状は平面であり、皮膚内に直交座標系を設けてセンサ素子を垂直および水平方向に整然と配置する設計アプローチがとられているということは、出発点から、構造ならびに期待される情報処理機構が、ヒト指の場合、すなわち柔軟な組織の内部に直接埋め込まれた受容器の情動的振る舞いとかけ離れていると筆者らは考えた。すなわち、上記の先達の研究に対して、筆者らの研究で目指すところは、ヒト指に学んだ静摩擦覚機構の実現であり、人工皮膚の構造および機械特性がヒトのそれとやがては同等となるように設計を進めることにした。本研究における人工皮膚の形状設計には、ヒト指の特性に関する知見 [6]~[8] および FEM を用いた機械受容器の配置と応力分布に関する知見 [9] [10] を用いる。形状と同時に大きさに関してヒト指と同等にするためには、トランスデューサを小型化することが要求される。本研究では、将来的にこの要求を達成することを期して PVDF フィルムを選択した [11]。

ロボティクスの分野において、PVDF フィルムの有用性を初めて示したのは Dario ら [12] であった。彼らは、PVDF フィルムが高感度の触覚センサ素子として利用が見込まれ、ロボットハンドに柔軟性を有すること、さらに小型化の可能性を持っていることを示した。その後、Patterson ら [13] により報告された、シリコンゴム内に組み込んだ PVDF フィルムを用いた動的な触覚情報に基づく物体の表面粗さセンシングが振動覚情報の有用性を知らしめる啓発的な研究結果と位置づけられよう。さらに、Howe ら [14] によって、PVDF フィルムの持つ動特性が後段の増幅器と結合されることによって、stress rate、いわゆる応力の 1 階時間微分特性を示すことが明らかにされた。また、筆者らによって PVDF からの出力について、後段に接続する回路に工夫を与えると種々の周波数特性を実現できることも示

された [15]。

本研究では機械的に柔らかいスキンを構築する上で、極めて重要なファクタであるトランスデューサそのものの柔軟性を陽に活かした PVDF フィルムを、特に外力に対するひずみの大きい指紋構造に組み込む提案を行う。PVDF フィルムをトランスデューサとして用いた場合に、その信号処理回路も含めた（以下 PVDF 回路と呼ぶ）周波数特性がこれまで詳細に議論されたことはなく、PVDF 回路の解析結果は有用であると考えられる。そして本研究では、PVDF フィルムをロボットの皮膚に適用することによって与えられる検出対象を、静摩擦覚機構を実現する上で筆者らが極めて重要と考えている「初期局所滑りの検出」と定める。その際、初期局所滑りはヒト指の中の FAI 受容器によって検出されるという知見を用いる [9]。

以下本論文では、ヒト指を模倣した人工皮膚（以下フィンガスキンと呼ぶ）を作製するために、我々が提案する設計プロセスを 2 章に示す。これに従って、まずヒトの機械受容器の特性を模倣した PVDF の回路設計および等価回路のモデル化を 3 章に示す。また、4 章において、ヒトの指紋形状を模倣したフィンガスキンについて、初期局所滑り検出実験を行った結果について述べる。そして 5 章において、本研究で提案する静摩擦覚を持つフィンガスキンを、ロボットハンドによる物体の把持力制御に適応した場合に、フィンガスキンから得られる情報がどのような意味において有用であるかを考察し、本研究のヒト指に学ぶスキンの設計アプローチの意義を主張する。最後に 6 章において、本研究のまとめを行う。

2. フィンガスキンの設計プロセス

フィンガスキンの設計プロセスを、Fig. 1 に示す。本プロセスは、プロセス A、プロセス B と 2 段階のプロセスで構成される。プロセス A では、以下に記述するような二つのフェーズ（フェーズ #1、フェーズ #2）を並列に行う。フェーズ #1 では、フィンガスキン内に組み込むトランスデューサを開発する。本研究において、トランスデューサとして PVDF フィルムを選択した。初めに、PVDF フィルムの応力-電圧信号変換特性を調べるべく、それに増幅回路を加えた回路全体、すなわち PVDF 回路について周波数特性を調べる。同時に、明確に表されていない PVDF フィルムの特性を明らかにすべく、PVDF 回路の等価回路を導出する。得られた結果から、人工皮膚による種々

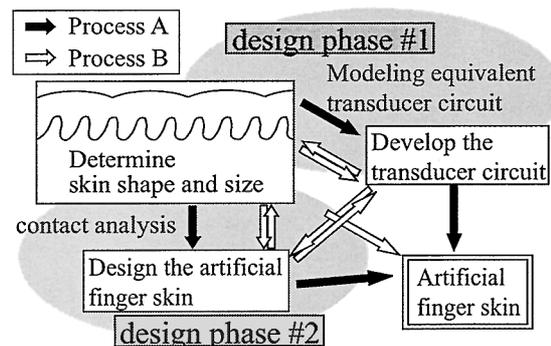


Fig. 1 Design processes of artificial finger skin

の知覚情報処理に必要とされる信号について考察を深めていく。また、フェーズ #2 では、フィンガスキンの形状設計を行う。本研究において、ヒト指の機能および構造に注目し、その特徴を模擬することによりフィンガスキン形状の設計を行った。さらに、接触モデルとして、初期局所滑りをフィンガスキンに与えたときのフィンガスキン内におけるひずみおよび応力分布を解析する。そして解析結果から、PVDF フィルムをどこに配置するか、また、どのような信号を検出することによってフィルムが破断することなく有用な情報が取得できるかを考察する [10]。プロセス B では、プロセス A から得られた結果をもとに、ヒトの指先により近づけるべく、プロセス A の各フェーズを再考し、フィンガスキンの改良検討を行う。

本研究において、設計したフィンガスキンはヒト指の指紋と比べて大きく、かつ粘弾性特性が異なる。しかし、3.5 節および 4.3 節で述べるようにフィンガスキンの形状は、FAI 受容器の初期局所滑りへの関与についての原理的な特性を調べる意味では、本質を捉えていることを追記する。そして、プロセス B によってサイズおよび構造をヒト指により近づけていくことは、今後の課題となる。

3. デザインフェーズ #1: PVDF 回路の周波数特性の同定

3.1 トランスデューサとして PVDF フィルムを選択した理由

初めに、本フィンガスキン内に組み込むトランスデューサについて検討を行う。フィンガスキンは将来小型化を視野に入れているため、小型化が期待できるものが選択肢の一つとなる。本論文では、そのなかで PVDF フィルムとひずみゲージが期待できるものの一つであると考え、さらに、両者のどちらが優れているのかについて検討を行った。

文献 [10] では、ひずみゲージ (共和電業製 KGF-1N-120-C1-11 L1M2R) をトランスデューサとして用いた初期局所滑り検出を行っている。本研究では、柔軟な皮膚を用いたフィンガスキンの開発を行っており、フィンガスキン内部に組み込まれた 2 枚のひずみゲージのひずみの差分は 10% を超える大きな値となることが報告されている。したがって、フィンガスキン表面に生じる力にそれ以上の大きさの力が加わったとき、ひずみゲージの破損が容易に予想される。PVDF フィルムは、応力検出型トランスデューサであり、それ以上の力がフィンガスキン表面に与えられても、十分機能する可能性を持っている。このように、フィンガスキン内のトランスデューサという観点ではひずみゲージよりも PVDF フィルムを用いる方が有用であることがいえる。

3.2 PVDF 回路の設計

本研究で設計した PVDF 回路を、Fig. 2 に示す。同回路構成においては、PVDF の両極に生じた同相ノイズを極力除去するために、OP アンプを用いた高い入力インピーダンスを持つ差動増幅回路が用いられている。得られた出力電圧 v_{out} は、Howe らが提唱する stress rate 特性を有すると考えられる [14]。さらに出力信号 v_{out} について、これにカットオフ周波数が 200 [Hz] で 2 次のフィルタ特性を有するデジタルローパスフィルタ $H_2(\omega)$

を適用し、出力信号 s_{out} を得る。これは、ヒト指内の FAI 受容器の特性を真似るためであり、その詳細な根拠は 3.5 節および 4.3 節で述べることにする。同様に、人工 FAII 受容器を作製するために、出力信号 v_{out} について、時間差分を行い、さらにこれにカットオフ周波数が 1,400 [Hz] で 4 次のフィルタ特性を有するデジタルローパスフィルタを適用し、出力信号 u_{out} を得る。

3.3 PVDF 回路モデリング

設計した PVDF 回路について、その等価回路モデルを Fig. 3 のように設定した。同図は、PVDF の等価回路 (C_{PV} , R_{PV} , i_{PV}) および OP アンプの等価回路 (C_{OPi} , R_{OPi} , R_{OPo}) について示している [17]。

PVDF に正弦波荷重 l_0 が与えられたとき、PVDF の両面に蒸着されたアルミ両電極に以下の値だけ電荷 q_{PV} が生じる。

$$q_{PV} = d_{33} l_0 \quad (1)$$

d_{33} は圧電ひずみ定数である。電荷の時間微分成分が電流となることから、

$$i_{PV} = \frac{dq_{PV}}{dt} \quad (2)$$

ここで、以下の入出力を表す伝達関数 $Gain$ を定義する。

$$Gain(*) = 20 \log_{10} \left| \frac{*}{l_0} \right|, * = v_{out}, s_{out}, u_{out} \quad (3)$$

式 (3) において、 $Gain(*)$ は PVDF フィルムに加える荷重 (l_0) を入力、Fig. 2 に示された PVDF 回路出力電圧 v_{out} , s_{out} および u_{out} を出力とした比をデシベル表示した値である。

Fig. 3 から $Gain$ を算出すべく、Kirchhoff の電圧則を用いて、PVDF 回路内に構成される回路方程式をすべて導出し、得られた方程式群を $Gain$ についてまとめると以下の式で表すことができる。

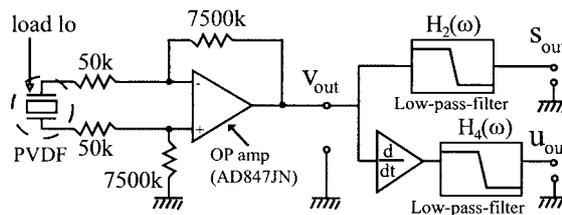


Fig. 2 Circuit diagram of a PVDF circuit (a PVDF transducer + a differential amplifier) + signal processing

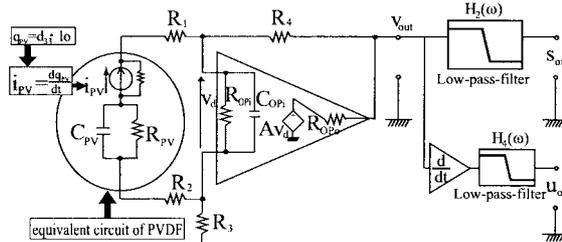


Fig. 3 Overall equivalent circuit of the PVDF circuit and signal processing

$$Gain(v_{out}) = 20 \log \left| \left(\frac{1}{A_4} - R_{OPo} \right) \frac{d_{33} j \omega e^{j \omega t}}{A_3 A_2} \right| \quad (4)$$

同式において、 A_2 から A_4 は、以下に示す値である。

$$A_2 = \frac{R_{PV} R_{OPi}}{1 + R_{PV}(R_1 + R_2) + R_{PV} R_{OPi} - A_1} \quad (5)$$

$$A_3 = \frac{1}{1 + j \omega C_{OPi} R_{OPi} - A_2} \quad (6)$$

$$A_4 = \frac{j \omega C_{OPi}}{1 + j \omega C_{OPi}(R_3 + R_4 + R_{OPo}) - A_3} \quad (7)$$

また、式 (5) の A_1 は以下に示す式で表される。

$$A_1 = \frac{j \omega C_{PVd}}{R_{PV} + j \omega C_{PVd}} \quad (8)$$

また、 $Gain(s_{out})$ は、式 (4) で表される $Gain(v_{out})$ に、デジタルローパスフィルタを乗した値となる。デジタルローパスフィルタは、以下の伝達関数 $H_2(\omega)$ に基づきインパルス応答不変法によって検討した。

$$|H_2(\omega)| = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{400\pi} \right)^2} \quad (9)$$

同様に、 $Gain(u_{out})$ は、 v_{out} について時間差分を行い、それにデジタルローパスフィルタを乗した値となる。デジタルローパスフィルタは、以下の伝達関数 $H_4(\omega)$ に基づきインパルス応答不変法によって検討した。

$$|H_4(\omega)| = \frac{1}{9.23 \left\{ 1 + \left(\frac{\omega}{2800\pi} \right)^2 \right\}^2} \quad (10)$$

ここで、式 (4) から式 (8) について、Table 1 に等価回路で用いた素子パラメータの各数値を表す。

Table 1 において、回路内の抵抗および OP アンプのインピーダンス値および、圧電ひずみ定数 d_{33} は、公証の値を掲げている。他方、PVDF の等価回路パラメータ (C_{PV} , R_{PV}) は、正確な値が求められていないため、本研究において実験的にその値を決定した。

3.4 実験方法・結果

PVDF 回路の周波数特性を測定する実験装置を、Fig. 4 に示す。同図において、力覚センサ (KISTLER 製 9213A1) と加振器 (IMV 製 PET-05) の振動子の間に初期荷重 20 [N] を与えた状態で、PVDF フィルム (呉羽化学製 KF ピエゾフィルム) を挟み込む。PVDF フィルムは、長さ 30 [mm] 幅 2 [mm] 厚さ 80 [μ m] に切断したシート状のものに配線を施してあり、試料片として 10 枚を用意した。このとき、力覚センサは直径 4 [mm] の円形平面状を有しており、PVDF フィルム片よりも大きい形状のものが接触している。PVDF フィルムと力覚センサの接触面積は、8.7 [mm²] であった。

発振器から入力された周波数 $f_{PV} = \omega_{PV}/2\pi$ で加振器が

Table 1 Equivalent circuit parameters

C_{PV}	3.0×10^{-11} [F]	C_{OPi}	1.5×10^{-12} [F]
R_{PV}	9.0×10^3 [Ω]	R_{OPi}	3.0×10^5 [Ω]
d_{33}	35×10^{-12} [C/N]	R_{OPo}	15 [Ω]

駆動され、PVDF フィルムに周波数 f_{PV} の正弦波荷重が加わる。このとき、PVDF フィルムと直接接触している力覚センサによって得られる PVDF フィルムに加える荷重 l_o と、PVDF 回路の出力電圧 v_{out} を、オシロスコープによって測定した。 l_o はいずれの周波数帯においてもその振幅は 4.0 [N] とした。測定周波数範囲を $10 \leq f_{PV} \leq 1,000$ [Hz] とし、式 (3) に示す関数 $Gain$ を用いて PVDF 回路の周波数特性を評価する。実験は、10 枚の PVDF について調べ、平均と標準偏差をそれぞれ算出した。

v_{out} および s_{out} に関する $Gain$ の評価実験結果を、Fig. 5 に示す。同図において、エラーバーは 10 枚の PVDF のデータにおける最大値と最小値を示す。また、図中の実線は 3.3 節で行ったモデルの計算結果を表す。

v_{out} に関して、実験で得られたそれぞれの周波数における平均値を用いて $Gain(v_{out})$ の近似曲線を算出した。その結果は統計的に以下の式で表されることが分かった。

$$Gain(v_{out}) = a \log_{10}(f_{PV}) + b \quad (11)$$

得られた近似曲線における、 a および b の値は、 $a = 18.4$ [dB/dec], $b = -46.9$ [dB] となった。また、それぞれの PVDF について、試料ごとに近似曲線を算出したとき、10 枚の PVDF の間に生じる a の標準偏差が 0.126 であり、ばらつきの小さい特性を得ることができた。また、先に報告した [18] の同じ評価値に対する実験データにつき、10 [Hz] から 1,000 [Hz] 周波数範囲において近似曲線を引いた結果、 $a = 18.1$ であることが分かった。PVDF は stress rate, すなわち 1 次のフィルタ

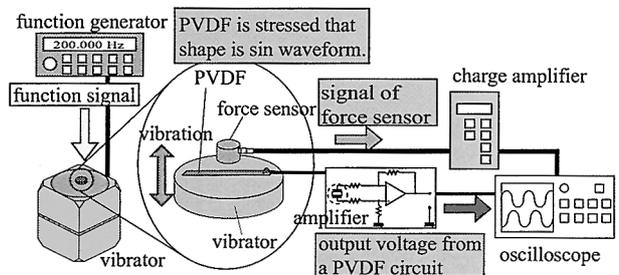


Fig. 4 Experimental setup for examining the frequency characteristic of a PVDF circuit

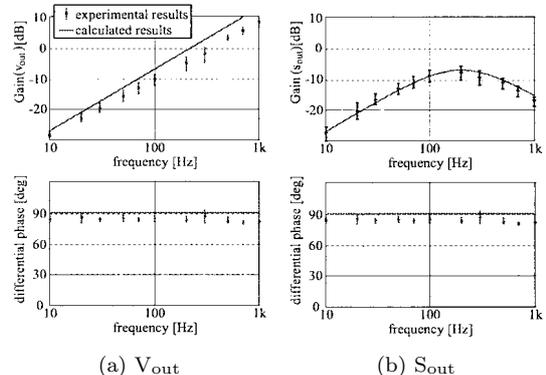


Fig. 5 Experimental results showing the frequency characteristics of PVDF circuits without and with a low-pass filter

特性 ($a = 20$) を持つとされてきたが [14], 危険率 1% でこれに有意に差を持つ結果となった。

この現象について, 理論式 (2) 内の係数 d_{33} は, PVDF フィルムに与える初期荷重に依存するのではないかと考え, さらに実験的調査を行った. これは, OP-amp などの他の回路素子に周波数の依存性がないことは予備実験で確かめており, 他に原因となる要素が考えられないことが前提にある. 実験は, 上記の実験方法と同様であるが, 正弦波荷重を 0.2 [N] から 0.3 [N] の間で保ち, 初期荷重を 2 [N] から 50 [N] の間で変化させて, 得られた周波数特性の近似式 (11) の値 a と初期荷重の依存性について調べた. 実験結果を Fig. 6 に示す.

5 枚の試験片のデータには, ばらつきが見られたため, 同図においてはそれぞれの試験片のデータの平均値を表し, 最大値と最小値をエラーバーで表現した. 同図を見て分かるように, 初期荷重が 10 [N] を超えると a の値の減少が見られるが, 初期荷重が 0 [N] となった際に, a の値が 20 [dB/dec] となる根拠は得られなかった. この点に関しては, 今後の課題とする.

3.5 出力信号の周波数特性のまとめ

3.4 節において, 得られた信号 v_{out} , s_{out} , u_{out} の特性についてまとめたものを Fig. 7 に示す. 同図から, 人工 FAI 受容器を想定した信号 s_{out} は 200 [Hz] を, 人工 FAII 受容器を想定した信号 u_{out} は 1,400 [Hz] を中心周波数としたバンドパス特性を有している. ここで, 信号 v_{out} , s_{out} , u_{out} とヒト指内の機械受容器との関連について以下に述べる. Fig. 8 は, PVDF

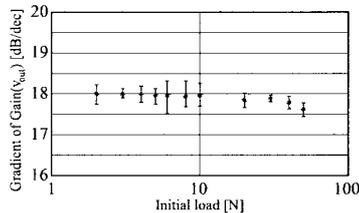


Fig. 6 Experimental results showing the relationship between initial load and gradient of G_{ain} of a

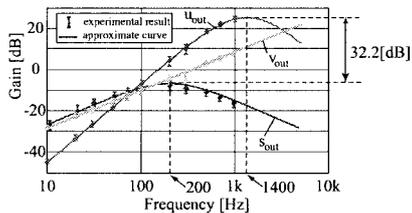


Fig. 7 Experimental results showing the frequency characteristics of v_{out} , s_{out} and u_{out}

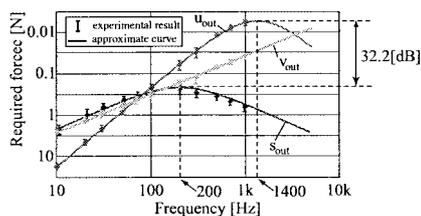


Fig. 8 Required force in order to obtain the 0.1 V of v_{out} , s_{out} and u_{out}

回路出力 (v_{out} , s_{out} , u_{out}) に現れる信号電圧の振幅が 0.1 [V] を得るために必要とされる, PVDF フィルムに加える正弦波荷重の振幅を表した図である. その値は Fig. 7 に示した G_{ain} を元に, 0.1 [V] の出力電圧を得るために必要とする荷重を算出した結果である. 同図から, G_{ain} が大きい周波数帯に関しては小さな力で 0.1 [V] の出力電圧を得ることができるのに対し, G_{ain} が小さい周波数帯に関しては 0.1 [V] の出力電圧を得るために大きな力が必要となることが分かる.

PVDF フィルムに荷重を与えたとき, その出力電圧は, 主に高周波ノイズの成分として, 約 0.05 [V] の振幅を持つノイズが信号に重畳することが実験的に分かっている. したがって, 信号として 6 [dB] 以上の S/N 比を得ることを考えると, 0.1 [V] の振幅を持つ信号成分が要求される. 逆に, PVDF フィルムに加える力が小さいとき, 出力電圧は 0.1 [V] を下回り, それゆえ S/N 比が 6 [dB] より低くなり, 信号としての信頼性が欠けることになる. このため, S/N 比が低く信号成分がノイズ成分に埋もれると考えられ, このとき「正弦波荷重が測定できない」と筆者らは捉えることとした. Fig. 8 において, 「正弦波荷重が測定できない」領域は, 同図の曲線よりも値が低い, すなわち同図における曲線よりも上の部分を表す.

他方, ヒト指内の機械受容器の振動閾値の場合 [8], その閾値曲線が「曲線が示す振幅よりも小さい振幅の振動を与えてもヒトはそれを感じることができない」ことを示している. この原因こそ工学的に製作された PVDF 回路の信号特性の場合と異なるであろうことが容易に想像されるが, 「それ以上小さい振幅では正弦波振動が検出できない閾値を表す」という意味では, 上記の PVDF 回路の議論と同じ解釈と捉えることができる. それゆえ, ヒト指の機械受容器の特性と PVDF 回路の信号特性が周波数特性の観点で等価であるならば, 周波数特性の観点で PVDF 回路の信号 s_{out} は人工 FAI 受容器と, u_{out} は人工 FAII 受容器であるといえよう. 周波数特性の観点で PVDF 回路の信号を人工機械受容器に等価にさせるためには, (i) ヒトの機械受容器が有するバンドパス特性の中心周波数, (ii) その中心周波数の G_{ain} の値を等価にさせなければならない. (ii) に関する記述を以下に行う.

PVDF 回路の信号 s_{out} および u_{out} の G_{ain} について, 中心周波数における G_{ain} の差は約 32.2 [dB] である. 同時に, ヒトの機械受容器の特性 [8] に関して, ヒト指の FAI 受容器の中心周波数の振動検出域の値と FAII 受容器のその差も約 32.2 [dB] である. よって, 中心周波数の振幅の比を真似するという意味で, PVDF 回路の信号 s_{out} および u_{out} の特性がヒト指内の機械受容器と同等の特性を有しているといえよう. また, (i) に関する議論は 4.3 節に示しており, s_{out} および u_{out} がヒト指の機械受容器と同等の特性を有していることを示している.

4. デザインフェーズ #2: フィンガスキンと初期局所滑り検出

4.1 フィンガスキンの大きさ・形状の設計

フィンガスキンを作製するために, ヒト指による物体把持の際に生じる機械的ふるまいについて解析し, 以下に示す特徴を模擬した. 第 1 に, ヒト指は骨を除いて柔軟構造を有し, 指内

の機械受容器は物体把持の際に生じた接触情報を検出する。第2に、ヒトの指は指紋の凹凸以外に巨視的に見て曲線構造となっている。これは、初期局所滑りが生じた際に滑り状態遷移を効果的に発生させることができる。第3に、一つの指紋において、真皮乳頭の上部に二つ一組のFAI受容器が配置されており[6]、ヒト指にせん断荷重が生じた際、二つのFAI受容器の間に応力差が生じることが考えられる。筆者らは、ヒト指の形状・機械受容器の配置を詳細に再現した際のFEM解析によりこれを確認している[19]。したがって、初期局所滑りが生じた際には、FAI受容器によってせん断荷重の変化が検出されると仮説を立てることとした。

以上をふまえて設計したフィンガスキンの構造をFig. 9に示す。同図(a)はフィンガスキンの全体図を示す。九つのridge(指紋)で構成されており、巨視的に曲率を持つ構造を有している。また、同図(b)は一つのridgeの詳細な寸法を示す。ridge内部に2枚のPVDFを組み込んでおり、これらはFAI受容器を想定している。また、フィンガスキンは、この上面全体を覆うだけの大きさを持つ平板によって上部から4[N]の力で押し当てたとき、九つのridgeと接触することになる。

4.2 初期局所滑り検出実験

設計したフィンガスキンに、初期局所滑りを生じさせる実験を行う。実験装置をFig. 10に示す。

同図における実験方法を以下に示す。初めにz軸ステージを用いて、アルミニウム板とフィンガスキンとの接触力(z_{ex}軸方向)が4[N]に達するまで実験装置座標系:Σ_{ex}のz_{ex}軸負の方向に移動させる。次に、x軸ステージを用いてフィンガスキンをx_{ex}軸正の方向に動かし、フィンガスキンとアルミニウム板に相対的な変位を与える。この変位は、Fig. 9におけるフィンガスキン座標系:Σ_{fi}のx_{fi}軸負の方向にアルミニウム板が移動す

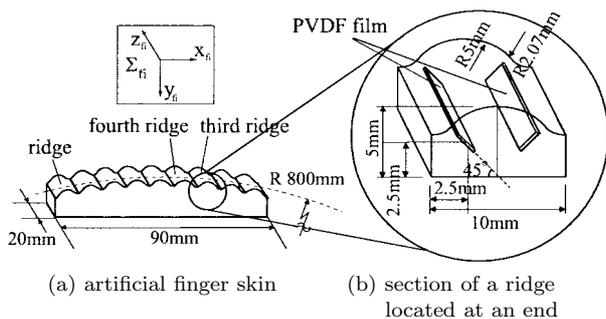


Fig. 9 Design of an artificial finger skin

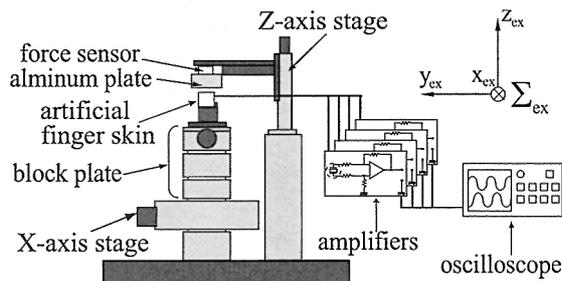


Fig. 10 Experimental setup

ることと等価である。フィンガスキンとアルミニウム板の接触面における相対変位がある移動量を超えたとき、両者の間に初期局所滑りが生じる。このとき、フィンガスキン内のPVDFからの信号を増幅回路で増幅し、その情報をオシロスコープでモニタする。オシロスコープのサンプリング周波数は10[kHz]である。本研究では、初期局所滑りが遷移する過程を観測する目的で、ridge3およびridge4に注目し、これらのridgeに埋め込まれた4枚のPVDF回路信号についてモニタした。

4.2.1 トランスデューサ出力評価

Fig. 11に示すPVDFフィルムの中で、まず、#3-1と#3-2のv_{out}差(以下ridge3の出力電圧と呼ぶ)、および#4-1と#4-2のv_{out}差(以下ridge4の出力電圧と呼ぶ)をそれぞれFig. 12(a)に示す。

同図(a)について、フィンガスキンおよびアルミニウム板の両者に相対変位が生じてから、初期局所滑りが生じる直前まで、ridge3およびridge4の出力電圧が緩やかに上昇した。本研究では、この上昇が初期局所滑りを検出するために重要な役割を果たすと考えており[21]、この観点から本論文でも、フィンガスキン内のPVDFフィルムの力の1階時間微分の値が上昇を意味する信号を予兆信号と呼ぶこととする。予兆信号はフィンガスキン内に組み込まれたPVDFフィルムに加わる力を信号v_{out}に変換した値の上昇、すなわちPVDFフィルムに加わる力の1階時間微分の値の上昇を意味している。したがって、Fig. 9に示す座標系Σ_{fi}において、x_{fi}方向への外力成分の上昇が現れたとき予兆信号が現れる(5章参照)。予兆信号は、後述の初期局所滑りを表す滑り信号の前に必ず現れる信号である。

また、同図の↓に示すように、ridge4の出力電圧がridge3のそれに比べて予兆信号が先に現れていることが分かる。これは、フィンガスキンが巨視的に曲率を持っており、アルミニウム板から受ける垂直力の大きさがridge3よりもridge4の方が大きい。それゆえ、ridge4のアルミニウム板から受けるせん断力がridge3のそれより大きくなるためと考えられるからである。さ

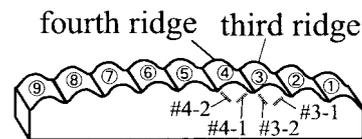


Fig. 11 Definition for the name of the PVDF transducers embedded in two ridges

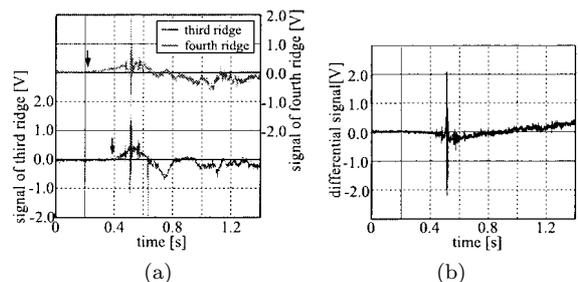


Fig. 12 Signal of differential output voltage signals of the third and the fourth ridges: (a) v_{out}, (b) differential v_{out} between #3-2 and #4-1

らにその後、初期局所滑りを示すインパルス波形（以降滑り信号と呼ぶ）が生じており、今度は ridge3, ridge4 におけるインパルス状の滑り信号が互いに同時に生じた。巨視的な曲率を持っているため、滑り信号は ridge3 → ridge4 と段階を経て起こると事前に予測したが、実際は異なった。この理由としては、実際は、初期局所滑りが段階を経て起こるが、最初に初期局所滑りを生じた場所から生じる高周波振動が他の ridge に伝播し、結果的には、互いに近傍に配置されたどの ridge についても同時にその信号が生じてしまうと考えられる。具体的には、フィンガスキンの縁に位置する ridge1 において初期局所滑りが初めに生じた際に、高周波振動が生じ、この振動が他の ridge においても同時に滑り信号として高感度に検出されると考えられるのである。この詳細な考察については、4.2.2 項で述べる。

Fig. 12 (b) は、 $\#3-2$ と $\#4-1$ の v_{out} の差について評価を行った結果を示している。滑り信号は観測できるのに対し、予兆信号は観測できなかった。つまり、 $\#3-2$ と $\#4-1$ から得られる信号を処理した場合、初期局所滑りは観測できても、その予兆は検出できないことが分かる。したがって、初期局所滑りの予兆を検出するためには、隣り合う PVDF フィルムのうち、ridge をまたぐ PVDF フィルムの信号の差分を観測するよりも、ridge 内の 2 枚の PVDF フィルムの信号の差分を観測するほうが、予兆信号を検出できる意味で有用であるといえる。

4.2.2 滑り信号伝播の検証

4.2.1 項の中で、初期局所滑りが生じたとき、その振動が他の ridge に伝播する可能性を述べた。これを確かめるために、実験方法を以下のように改めた。それは、アルミニウム板をフィンガスキン全体に接触させず、ridge4~8 の五つの ridge とアルミニウム板を接触させ、初期局所滑りを生じさせるという実験方法である。これにより、アルミニウム板と ridge3 とは接触していない状態となり、PVDF $\#3-1$, $\#3-2$ において何らかの有意な信号が得られれば、それは、ridge3 以外の ridge からの接触力が伝達され ridge3 によって検出されたことを意味する。

実験結果を Fig. 13 に示す。同図より、ridge4 の出力電圧は予兆信号および滑り信号ともに生じている。それに対し、ridge3 は、ridge4 の隣であるため PVDF $\#4-1$ が引っ張り力を受け、その影響が PVDF $\#3-2$ に現れたためにわずかに信号を生成するが、予兆信号と判断される信号成分はほとんど生じなかった。これに対して、インパルス状の滑り信号は、ridge3 においても顕著に観測されることが確認できる。この結果から、滑り信号は、他の ridge に存在する受容器に伝播されることが分かる。した

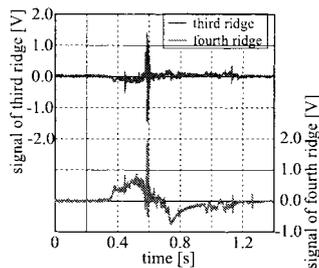


Fig. 13 Signal of differential v_{out} of the third and the fourth ridges

がって、滑り信号はそれが生じた場所を特定することが比較的困難である。

4.3 人工機械受容器の出力評価

Lundstrom は、ヒト指の表皮のインピーダンス値を推定している [7]。推定されたインピーダンス値から、ヒト指の固有振動数を算出した結果、1,320 [Hz] であることが分かった。また、FAI 受容器および FAII 受容器が有するバンドパス特性の中心周波数は約 40 [Hz] および約 250 [Hz] であることが実験的に明らかにされ報告されている [8]。この比（指紋の固有振動数：FAI 受容器のバンドパス特性中心周波数：FAII 受容器のバンドパス特性中心周波数=1320:40:250）を保つようにフィンガスキン内の PVDF 回路の後段フィルタのカットオフ周波数を設定する。フィンガスキンの固有振動数は FEM 解析結果より 7,680 [Hz] であることが分かっている。そこで、上記の比を保つようにバンドパス特性を決定するには、人工 FAI 受容器に関しては 233 [Hz] の中心周波数を設定すればよい。本研究では、233 [Hz] の近似値として、200 [Hz] のカットオフ周波数を持つ 2 次のローパスフィルタを付加することにより、ヒト指と同等の人工 FAI 受容器の特性を有する信号 s_{out} を得た。同様の議論から、1,400 [Hz] のカットオフ周波数を持つ 4 次のローパスフィルタを付加することにより、ヒト指と同等の人工 FAII 受容器の特性を有する信号 u_{out} を得た。その結果が、Fig. 7 に表す周波数特性となる。 s_{out} は、200 [Hz] を中心周波数とする、20 [dB/dec] の上昇勾配と -20 [dB/dec] の下降勾配を有するバンドパス特性を有し、 u_{out} は、1,400 [Hz] を中心周波数とする、40 [dB/dec] の上昇勾配と -40 [dB/dec] の下降勾配を有するバンドパス特性を有する。したがって周波数特性の観点から、 s_{out} および u_{out} はそれぞれヒトの FAI 受容器、FAII 受容器と等価であることがいえよう。

Fig. 12 (a) で示された信号 v_{out} に関して信号処理を行い、 s_{out} および u_{out} を得た。これらの結果を、それぞれ Fig. 14 に示す。

同図において、 s_{out} には Fig. 12 (a) で示した v_{out} 信号のインパルス波形を取り除いた出力が生じている。したがって、 s_{out} は予兆信号の検出が可能であるが、滑り信号の検出ができないことが分かる。逆に、 u_{out} については、 v_{out} 信号の予兆信号を取り除いた出力が生じている。したがって、 u_{out} は滑り信号の検出が可能であるが、予兆信号の検出ができないことが分かる。したがって、 s_{out} と u_{out} は、ともに滑り信号と予兆信号の両方を検出することができない。これをヒト指内の機械受容

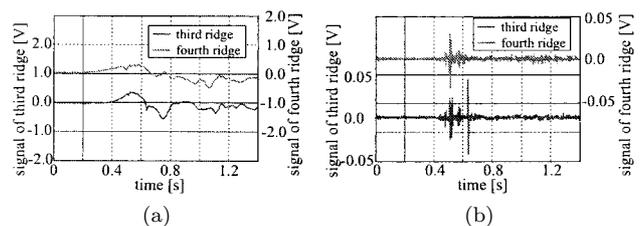


Fig. 14 (a) Differential output voltage signal s_{out} of third and fourth ridges, (b) Differential output voltage signal u_{out} of third and fourth ridges

器に当てはめると、FAI 受容器は滑りの予兆を検出することができるが、滑りそのものを検出できない可能性を示唆する結果となった。

5. PVDF フィルムを用いた静摩擦覚機構を持つスキンの把持力制御への適用有用性の考察

4章で述べてきた、フィンガスキンをを用いた実験から、初期局所滑りを検出するために重要な点について以下に考察する。

第1に、単一 ridge における予兆信号は、滑り信号に比べて低い周波数成分で構成されており、結果として、低い周波数の刺激に対して発火しやすい人工 FAI 受容器により検出することができた。これに関して、単一の ridge における片方の FAI 受容器だけの信号を用いて情報処理することは難しい。なぜなら、受容器には初期局所滑りが生じたときに変化するせん断方向の情報だけでなく、垂直方向の情報も生じるため、単一の信号から情報を特定することは困難であるからである。しかし、同じ ridge 内に存在する FAI 受容器の差分をとることにより垂直方向の情報が相殺され、せん断方向の情報を効果的に検出することが可能となる (Fig. 15 参照)。これは、4.2.1 項における、実験結果すなわち人工 FAI 受容器が予兆信号を検出できることから明らかである。ただ、複数の ridge にまたがる隣り合う FAI 受容器は予兆信号を検出できないことが、Fig. 12 (b) の結果からも考えられる。

予兆信号を検出することは有用性が高いと考えられる。なぜなら、初期局所滑りが生じたことをセンサが検出して把持力制御を行うよりも、その予兆を検出した段階で把持戦略を行うほうが、より確実な把持力制御の実現性を持つと考えられるからである。しかしながら、Fig. 12 (b) の結果からも考えられるように、ridge をまたぐ人工 FAI 受容器の差分を検出すると、初期局所滑りの予兆が検出できないため、検出すべき信号の選択が必要となることを追記する。

第2に、滑り信号の検出については、ヒトの FAI 受容器を模倣・再現した、人工 FAI 受容器のみで検出することは困難であることが分かった。これは、4.3 節で得られた結論から、信号 s_{out} は初期局所滑りが生じた際の滑り信号が検出できなかった。これは、人工 FAI 受容器の周波数帯域の問題で、すなわち滑り信号は、人工 FAI 受容器の周波数帯域ではノイズ信号を超えるほど有意な信号が得られない周波数帯域で生じているということである。したがって、より高い周波数成分の信号検出を得意とする機械受容器が重要となることがいえよう。ヒトの機械受容器を参考にすると FAII 受容器がこれに該当し、Fig. 14 の結果からも、 u_{out} が検出される周波数帯域で滑り信号が検出できている。また、FAII 受容器は FAI 受容器とは異なる場所に配置されているが、滑り信号が伝播する特徴を考えると、FAII 受容器がそれを検出できる可能性が高いと考えられる。したがって、人工 FAII 受容器の開発を行い、検証することが重要となると考えている。また、本フィンガスキンによる、滑り領域の特定が困難であることが分かった。これは、4.2.2 項における結論から、予兆信号は他の ridge 内の人工 FAI 受容器に伝播しないのに対して、滑り信号はそれに伝播することが分かったからである。すなわち、ある ridge 内に組み込まれた人工 FAI

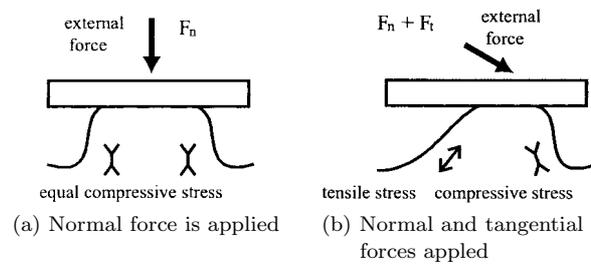


Fig. 15 Distribution of stress inside a ridge [10]

受容器が検出する信号は、その ridge 内の滑り信号だけでなく、それ以外の ridge の滑り信号も検出するため、どの ridge 上に初期局所滑りが検出できるのか分からないのである。すなわち本フィンガスキンによれば、滑り領域の厳密な特定が困難であるという欠点はあるが、把持力制御には有用な情報が得られると結言される。

6. おわりに

本研究では、知覚機構の中でロボティクスの分野への貢献が大きいとされる静摩擦覚を取り上げ、その機構上重要な役割を演ずると考えられる初期局所滑りに焦点を当て、ヒト指の皮膚の構造・機能に学ぶフィンガスキンの設計・製作を行った。まず、本研究における提案骨子の一つである人工皮膚設計プロセスのフェーズ #1 において、PVDF フィルムがフィンガスキン内に組み込むトランスデューサとして、最も適していることを述べた。また、FAI 受容器の特性にある 1 次のバンドパス特性に合わせて PVDF 回路の周波数特性を与えた。次に、フェーズ #2 において、設計したフィンガスキンをを用いて初期局所滑り検出実験を行った。その結果、初期局所滑りを効率よく検出するためには、ridge 内に対向配置した二つの受容器が受ける応力の差の時間微分を検出することが重要であることが分かった。また、初期局所滑りが生じた際には、高周波成分の信号が生じることが分かった。また、本フィンガスキンにより初期局所滑りを検出するために、同じ ridge 内の 1 組の人工 FAI 受容器の信号の差分をとることによりその予兆を検出することが可能であることを示した。また、初期局所滑りそのものを検出するためには、ヒトの FAI 受容器を模擬した人工 FAI 受容器よりも高い周波数帯の検出を得意とする機械受容器の開発が必要であることが分かった。最後に課題として、PVDF 回路の周波数特性の理論的導出が未達成であることが課題として残った。

現在はさらに、予兆信号の有用性を示すべく、人工ニューラルネットを用いた高信頼な初期局所滑りの検出を行っている [21]。

謝辞 本研究の遂行に当たり、ヒトの触覚受容器に関する有用な助言ならびに資料をご提供いただきました静岡理科大学に宮岡徹先生に感謝をいたします。また、本研究の遂行に当たり、仔細にわたり議論をしてくださいました山田大介氏 (現 (株) 豊田中央研究所) に感謝いたします。また、本研究は科学研究費補助金 (基盤 (B) (1) 12450168) により実施されたものであり、ここに改めて謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] 山田陽滋：“触覚”，日本ロボット学会誌，vol.16，no.7，pp.893-896，1998.
- [2] R.S. Johansson et al.：“Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand,” Trends in NeuroSciences, vol.6, no.1, pp.27-32, 1983.
- [3] M.R. Tremblay et al.：“Estimating friction using incipient slip sensing during a manipulation task,” IEEE International conference on robotics and automation, pp.429-434, 1993.
- [4] J.S. Son et al.：“A Tactile Sensor for Localizing Transient Events in Manipulation,” Proceedings of 1994 Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.471-476, 1994.
- [5] G. Canepa et al.：“Detection of Incipient Object Slippage by Skin-Like Sensing and Neural Network Processing,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, vol.28, no.3, pp.348-356, 1998.
- [6] D. Fred: Foundation of Neurobiology. '97, W.H. Freeman, 1997.
- [7] R. Lundstrom：“Local Vibrations-Mechanical Impedance of the Human Hand's Glabrous Skin,” Journal of Biomechanics, vol.17, no.2, pp.137-144, 1984.
- [8] L. Kruger: Pain and Touch. Academic Press, pp.37-41, 1996.
- [9] T. Maeno et al.：“FE Analysis of the Dynamic Characteristics of the Human Finger Pad in Contact with Objects with/without Surface Roughness,” Proc. 1998 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, DSC-vol.64, pp.279-286, 1998.
- [10] D. Yamada et al.：“Artificial Finger Skin having Ridges and Distributed Tactile Sensors used for Grasp Force Control,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.14, no.2, 2002.
- [11] Y. Yamada et al.：“Slip phase isolating: impulsive signal generating vibrotactile sensor and its application to real-time object regrip control,” Robotica, vol.18, pp.43-49, 2000.
- [12] P. Dario et al.：“Piezoelectric Polymers: New Sensor Materials for Robotic Applications,” 13th International Symposium on Industrial Robots and Robots 7, vol.2, pp.14-34-14-49, 1983.
- [13] R.W. Patterson et al.：“The induced vibration touch sensor – a new dynamic touch sensing concept,” Robotica, vol.4, pp.27-31, 1986.
- [14] R.D. Howe et al.：“Dynamic tactile sensing: Perception of fine surface features with stress rate sensing,” IEEE transactions on robotics and automation, vol.9, no.2, pp.140-151, 1993.
- [15] Y. Yamada et al.：“Primary Development of Viscoelastic Robot Skin with Vibrotactile Sensation of Pacinian/ Non-Pachinian Channels,” Proceeding of the 3rd International Conference on Advanced Mechatronics, pp.879-885, 1998.
- [16] 前野隆司：“ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.6，pp.772-775，2000.
- [17] S. Franco: Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits. pp.28-33, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [18] Y. Yamada et al.：“Identification of Incipient Slip Phenomena Based on The Circuit Output Signals of PVDF Film Strips Embedded in Artificial Ridges,” SICE Annual Conference, pp.3272-3277, 2002.
- [19] 前野隆司他：“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，vol.63，no.607，pp.881-888，1997.
- [20] T. Miyaoka：“Measurements of detection thresholds when presenting normal and tangential vibration to the skin,” XXVII International Congress of Psychology, 51602.07, 2000.
- [21] I. Fujimoto et al.：“Development of Artificial Finger Skin to Detect Incipient Slip for Realization of Static Friction Sensation,” IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems 2003, pp.15-20, 2003.



藤本 勲 (Isao Fujimoto)

1978年8月24日生。2001年豊田工業大学工学部制御情報工学科卒業。2003年同大学大学院工学研究科修士課程修了，同年同大学大学院博士後期課程入学，現在に至る。計測自動制御学会の学生会員。（日本ロボット学会学生会員）



前野隆司 (Takashi Maeno)

1962年1月19日生。1986年東京工業大学理工学研究科機械工学専攻修士課程修了，同年キヤノン株式会社入社。1990～1992年カリフォルニア大学バークレー校 visiting industrial fellow。1995年慶應義塾大学専任講師，2001年ハーバード大学 visiting professor，現在慶應義塾大学助教授。工学博士。1995年日本音響学会技術開発賞受賞，1997年日本機械学会賞（論文）受賞。アクチュエータ，センサ，ロボット等の研究に従事。日本機械学会，日本音響学会，日本デザイン学会等の会員。（日本ロボット学会正会員）



梅谷陽二 (Yoichi Umetani)

1932年12月12日生。1956年京都大学工学部機械工学科修士課程修了。1956年東京大学生産技術研究所助手，講師。1970年東京工業大学工学部助教授，教授。1993～2003年豊田工業大学教授。工学博士。自動制御，バイオメカニクス，ロボティクスの研究に従事。人間と協調・共存できるロボット，宇宙ロボットなどに興味を持つ。（日本ロボット学会名誉会員）



山田陽滋 (Yoichi Yamada)

1956年7月13日生。1981年より The University of Texas に留学，M.S.取得。1983年名古屋大学工学部修士課程修了。同年より，豊田工業大学制御情報工学科助手勤務。以来，ロボットのセンサ，通信，情報処理などの研究に従事，1993年助教授。同年スタンフォード大学客員研究員。工学博士。（日本ロボット学会正会員）



森園哲也 (Tetsuya Morizono)

1968年6月14日生。1993年立命館大学大学院理工学研究科修士課程修了。1998年同博士後期課程修了。同年豊田工業大学助手，現在に至る。博士（工学）。ウェアラブルロボットなどの人間・機械共存システム，力覚呈示装置の制御の研究に従事。平成14年度日本機械学会 ROBOMECH 表彰。日本機械学会，日本バーチャルリアリティ学会などの会員。（日本ロボット学会正会員）