指先のずれ変形呈示を目的とした触覚ディスプレイ*

新井 史人^{*1}, 盛田 英之^{*2}
福田 敏男^{*3}, 松浦 英雄^{*1}

The Tactile Display which Presents Shear Deformation on Human Finger

Fumihito ARAI^{*4}, Hideyuki MORITA,
Toshio FUKUDA and Hideo MATSUURA^{*4} Dept. Micro System Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

This paper proposes a tactile display for presenting shear deformation to the skin of the human finger. Human can get much information from the sense of tactile. Using this information, human can perform dexterous manipulation. It is thought that this information is based on the skin deformation, so we aim to present the skin deformation. For the tactile display that can present skin deformation, we fabricated the three dimensional moving stage that is driven by the hydraulic pressure. We performed experiments to present shear deformation using this display system. From this experiment, it is clear that the deformation speed influences on the perception of the skin deformation. For presenting different deformation under the condition of same normal pressure, we use an air pad that can vacuum air. Using this air pad and the hydraulic display system, we performed experiments to present shear deformation using air vacuum. From this experiment, we can present large deformation under the condition of same normal pressure.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Human Interface, Hydraulic Actuator, Recognition, Tactile Display, Air System

1. はじめに

現在多くの場所で自動制御されたロボットによる作業が行われ、人間は苦役作業からの開放が可能となっている。しかし、作業内容が高度な場合や作業対象に動作を与えた結果危険が伴う場合や、作業対象が未知物体で予想が不可能な場合では判断を人間が行い行動指令を出している。このような場合情報を人間に伝達する必要がある。従来では視覚を用いて伝達してきたが、作業内容の高度化に伴い扱う情報量が多くなり他の感覚器を用いた伝達が必要となる。

人は多くの優秀な感覚器をもっている。さらに一つの感覚器のみを利用して情報を獲得しているのではなく、多くの感覚器を用い、それぞれ獲得するのに得意な情報を獲得し、補い合いながら情報を統合している。さらに、受動的に情報を獲得するのみではなく、自らの運動により能動的にセンシングを行い、より高度な情報を獲得している。このことからさまざまな

感覚器を用いて情報を伝達したほうが好ましい。各種作業においては物体を操作することが多い。物体操作時には、視覚は物体の幾何形状の認識を行う。これに対し触覚は接触しながら移動する物体の高度な知覚を行う。触覚は接触して初めて獲得できる情報であるかわりに、他の感覚器では補うことのできない情報を獲得する。触覚情報を伝達することで、より器用なマニピュレーション等が可能であると考えられる。このように触覚に対して情報を呈示する装置としての触覚ディスプレイはさまざまなものがあるが⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾、物体を保持したり、操作したりする場合の情報呈示では、あたかも実際にひとが操作しているような感覚を呈示するほうが操作者は直感的な理解が可能であり、作業効率の向上が図られると考えられる。人間は皮膚の柔軟性を生かし器用な把持を行っている。物体把持時に皮膚では変形が生じる。人はこの変形から接触状態を認識し器用な把持を行っていると考えられる。

このため、本研究では物体把持時に重要な感覚である皮膚の変形、すなわち“ずれ”感覚を指先に仮想的に呈示することを目的とする。人間が物体を把持する場合に対象物体の摩擦状態が異なった場合の皮膚変形を求め、ずれ変形の変化を呈示する触覚ディスプレイを提案する。

* 原稿受付 2000 年 4 月 5 日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院(〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1)。^{*2} 名古屋大学大学院。^{*3} 正員, 名古屋大学先端技術共同研究センター。

E-mail: arai@mein.nagoya-u.ac.jp

2. 皮膚感覚について

2・1 各受容器について 人がもつ触覚という感覚器はさまざまな刺激に対して知覚する⁽⁵⁾。代表的な受容器として表皮に近い部分には自由神経終末(Free nerve endings), マイスナー触小体(Meissner's Corpuscle), メルケル触小盤(Merkel's Discs), ルフィニ小体(Ruffini's end Organ)があり, 一番深い皮下脂肪層にパチニ小体(Pacinian Corpuscle)が存在する。これらの受容器の中で触覚, 圧覚, 振動覚などの機械的刺激に対する受容器は4種であり, それぞれ, 順応の速さでSA(Slowly Adaptation), RA(Rapid Adaptation)に分けられ, さらに機能により, Unit 1, 2に分けられる。知覚可能な周波数帯, 知覚される刺激についての分類を表1に示す。

2・2 物体把持中の各受容器の反応 物体把持中において触覚が重要な役割を果たしていると考えられる(i)初期接触, (ii)接触方向への変形のそれぞれにおける触覚受容器の反応について述べる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

2・2・1 初期接触に対する応答 初期接触に対する激しい発火が, SA1とRA1で観察されている。RA1は初期接触で皮膚の変形の変化に反応している。SA1に関しても変形量に関して発火している。これらはテンソルひずみと圧縮応力の増加に対応していると考えられる。RA1ユニットは初期接触において, 対象物体との摩擦係数に関する情報を獲得していることが, 神経物理実験において確認されている⁽⁶⁾。これは, 小さな把持力で把持している場合に発生する小さな摩擦による滑りやずれの空間的配分パターンにより認識していると考えられる。RA1ユニットは空間的分解能, 時間的分解能ともにもち, この特徴のため初期接触状態を認識できる。また, これらの滑りに

より発生する振動数は, 対象が摩擦係数の小さい物体であるほど高くなる。

2・2・2 ずれに対する応答 ずれに対する応答としては, 初期接触期間と同様RA1とSA1の反応が見られる。これらの発火は接触後しばらく続くが, 次第に順応して発火する割合は減少していく。物体をもち上げて, 物体を空中で静止させた場合は, SA1は発火がなくなり, RA1はかすかな反応がみられる。SA2においては, 初期接触に対する目立った反応はないが, 微妙な皮膚の変形の三次元方向への発火が確認されている。SA1は皮膚の圧縮応力の大きさに対して反応しており, RA1は皮膚のテンソルひずみに対して反応していると考えられる。

物体把持時に皮膚は変形を行う。この変形に対する以上のような各種受容器の発火により, 接触状態の認識を行い把持動作を行っていると考えられる。このためずれ変形の呈示は接触状態の認識を可能にすると考えられる。ずれ変形を呈示する触覚ディスプレイを実現できれば, 接触状態をよりわかりやすく呈示できると考えられる。

3. ずれ変形に関する解析

人間が物体を把持する場合に生じる指先皮膚の機械的変形について解析を行った。物体を把持する場合にはまず, 皮膚表面に対して垂直方向の変形を行い, もち上げ動作に移るに従い接線方向への変形(ずれ変形)を行う。人間は接線方向への変形によって接触状態の認識を行っていると考えられるため, 接線方向への変形に関する解析を行った。指先の性質はゴムに似ており, ゴムの変形理論⁽⁸⁾⁽⁹⁾に基づき解析を行った。指先皮膚のモデルを図1に示す。

このとき, 接線方向に働く力 F と接線方向への変

Table 1 Characteristic of skin mechanoreceptors

Features	Cutaneous Mechanoreceptors			
	Meissner Corpuscles	Pacinian Corpuscles	Merkel's Disks	Ruffini Corpuscle
Rate of Adaptation	Rapid	Rapid	Slow	Slow
Name of based on Adaptation.	RA-1 FA-1	RA-2 (PC) FA-2	SA-1	SA-2
Mean Receptive Area	13mm ² (Small) Well Defined.	101mm ² (Large) Indistinct	11mm ² (Small) Well Defined.	59mm ² (Large) Indistinct.
Spatial Resolution	Poor	Very poor	Good	Fair
Stimulus Frequency(Hz)	20-50Hz	70-1000Hz	0-10Hz	0-10Hz
Function	Edges Velocity	Acceleration Vibration	Edges Intensity	Static Force Skin Stretch

形量 t は以下の式で表される。

$$F = k \left(t - \sigma^2 \frac{d^2 t}{dx^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{E}{k}} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 k は図1に示す板ばねのばね定数に相当する。 E は図1のばね要素の縦剛性に相当する。接触領域長さを $2a$ とすると、接触領域外部 ($x > a$) における変形量は、 $F=0$ であるので接触領域境界 ($x=a$) において、 $t=t_0$ とすると式(3)で示される。

$$t = t_0 \exp \left[\frac{a-x}{\sigma} \right] \dots \dots \dots (3)$$

接触領域内部に生じる接線方向の最大荷重は、接触圧力分布が四次関数であると仮定すると式(4)で表され、接触領域境界において微分可能性を考慮すると最大変形量は式(4)を式(1)に代入し式(5)で表される。さらにひずみは式(5)を x に関して1階微分し式(6)で表される。

$$F = \mu p_m \left(1 - \frac{x^4}{a^4} \right) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 p_m は最大圧力、 a は接触領域の長さの半分、 μ は摩擦係数とする。

Fig. 1 The tangential deformation model on human finger

Fig. 2 The tangential deformation in contact area

$$t = \left(\frac{\mu p_m}{k} \right) \left\{ 1 - 24 \frac{\sigma^4}{a^4} - 12 \frac{\sigma^2 x^2}{a^4} - \frac{x^4}{a^4} + 4 \frac{\sigma}{a} \left(1 + 3 \frac{\sigma}{a} + 6 \frac{\sigma^2}{a^2} + 6 \frac{\sigma^3}{a^3} \right) e^{-a/\sigma} \cosh \left(\frac{x}{a} \right) \right\} \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{dt}{dx} = \left(\frac{\mu p_m}{k} \right) \left\{ -24 \frac{\sigma^2 x}{a^4} - 4 \frac{x^3}{a^4} + 4 \frac{\sigma}{a^2} \left(1 + 3 \frac{\sigma}{a} + 6 \frac{\sigma^2}{a^2} + 6 \frac{\sigma^3}{a^3} \right) e^{-a/\sigma} \sinh \left(\frac{x}{a} \right) \right\} \dots \dots \dots (6)$$

これらを、 $\mu p_m/k$ を一定、 $\sigma=a$ として接触領域境界において連続とした場合のずれ量、ひずみの分布をそれぞれ、図2に示す。このように、ずれ量の分布は接触領域中央で最大となり、ひずみは中心部分では発生せず、接触領域境界付近で圧縮、引っ張りひずみが存在する。

さらに接触領域を半径1の円形と仮定して、二次元モデルで解析を行った。ただし x, y 方向の干渉はないものとし、接触円の x 方向成分の長さを接触領域として一次元モデルをもとに変形を求めた。ずれ量の分布を図3に示す。ここで、 $\sigma=1, a=2\sqrt{1-x^2}$ とした。二次元モデルでも同様に接触領域中心部分の変形量が多いことがわかる。接線方向への変形量 ($t[x, y]$) は係数に $\mu p_m/k$ をもつ。ここでの解析は接触円の半径を1と一定にしているため、 p_m は一定となる。つま

Fig. 3 The distribution of shear deformation

Fig. 4 The tangential deformation in changing the friction coefficient: $\mu p_m/k=0.2, 0.4, 0.8$

り、垂直荷重を一定として仮定している。よって指先のせん断方向の弾性係数が一定と仮定されるので、変形量($t[x, y]$)は摩擦係数に比例する。摩擦係数を变化させた場合のずれ変形を図4に示す。対象物体の摩擦係数が異なる場合、摩擦係数が大きくなると、同じ把持力(垂直荷重)の場合でも指先の最大変形量が大きくなることが確認できる。このように対象物体の表面状態に依存して皮膚のずれ変形が異なることが明らかとなった。実際にある摩擦係数をもつ対象物体が指と接触し接線方向に移動する場合、垂直荷重、摩擦係数で決まる最大ずれ変形量が存在する。

Fig. 5 The schematic of the tactile display

Fig. 6 The photograph of the tactile display

4. ずれ変形呈示ディスプレイ

ずれ変形呈示ディスプレイは指先表面に装着可能なものが要求される。さらには力覚ディスプレイと組合せることを考慮する必要がある。人間の指先がもつずれ感覚と力覚は外部からの刺激に対して機械的に直列に接続されている。このため、ずれ変形ディスプレイと力覚ディスプレイを組合せて用いることによりさらなる臨場感のある操作感が呈示できると考えられる。このような理由によりずれ変形ディスプレイは力覚ディスプレイの先端につける必要があるため、小型で軽量なものが望ましい。またずれ変形は実際は6自由度の変形をもつが、まず三次元的な変形を呈示できるものが望ましいと考えられる。ずれ知覚特性に関してはずれ速度が速い場合には変位量が小さくても知覚でき、遅くなるにつれて知覚可能なずれ量は増加することが調べられている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。直動の場合、数10 μm 程度、回転の場合は 10^{-2} deg程度のものが必要とされている。最大変形量については、垂直方向が $\pm 5\text{ mm}$ 、接線方向も $\pm 5\text{ mm}$ 程度必要とされている。応答周波数としては皮膚の機械的特徴より数10 Hzが必要となる。

以上のような要求事項のためずれ呈示ディスプレイは駆動部と呈示部を分離し、液圧駆動のアクチュエータを採用した。指先に装着される呈示部分の構造を図5に示す。図5に示すように指先表面に接する平面(ステージ)を3軸方向に移動させることが可能となる。駆動部はピストン、シリンダ、ボールねじ、DCモータ、エンコーダからなり、モータの回転がボールねじで直動に変換され、ピストンを押し液圧を発生す

Fig. 7 Configuration of the drive units and the tactile display

Table 2 The characteristics of the tactile display system

Display Weight	190g	
	Drive Part	Display Part
Diameter of the Cylinder	4.8mm	6.4mm
Stroke X,Y	15.9mm	9mm
Z	16.9mm	9.5mm
Force Extension Ratio	1	1.8
Static Friction	100gf	450gf
Work Liquid	Water	
Coefficient of Spring	60.4gf/mm	
Initial Load	450gf

Fig. 8 The schematic of air pad

Fig. 9 The photograph of the air pad

る。液圧はチューブを伝わり、呈示部のピストンを押す。これによりステージが押されて移動する。ここで、呈示部はリターン springs を用いた液圧駆動となっており、負圧発生時はスプリングの力でステージが戻る。このばね定数は静止摩擦を考慮して決定した。それぞれの諸元を表2に示す。ここで、力拡大率は駆動部ピストン面積と呈示部ピストン面積の比を意味する。駆動部と呈示部にあるピストンシリンダの移動に伴う静止摩擦係数は呈示部のほうが大きい。指先に装着した場合の写真を図6に示す。また、駆動部と呈示部の接続を図7に示す。

Fig. 10 The schematic of finger and display pose

Fig. 11 The photograph of experiment system and finger pose

5. エアシステム

解析で求めたように指先皮膚の最大変形量は同一接触圧力でも摩擦係数が異なると変化する。このため、従来の触覚ディスプレイのように、指先と接触する面が同一のままではこの変化を呈示することはできない。そこで我々はこの変化を仮想的に呈示するためエアの吸引を用いた。エアパッドの設計に当たって指先に対する垂直荷重を変化させていった場合の指先皮膚の接触面積、接触領域の形状を測定した。この結果接触領域の形状はだ円形となった。これは指先皮膚が二つの異なる曲率をもっていることを考えると妥当であるといえる。先の解析で述べたように指先の最大変形量は中心部分が大きく、周辺になるに従い小さくなることが明らかとなった。このため、吸引を行う穴のグループ分けを行った。空気孔の配置とグループ分けを図8に示す。エアパッドはアクリルで製作した。これは指先との接触状態を確認可能とするためである。エアパッドを図9に示す。

エアシステムとしては、圧力発生源としてコンプレッサーと真空発生装置を用いた。真空発生装置は300 Torr まで発生することが可能なものを用いた。圧力は電空レギュレータにより制御される。さらに各グループには電磁弁により吸引のON/OFFが制御できるようにした。

6. 感覚呈示実験

6章までに述べた触覚ディスプレイシステムを用いて“ずれ”感覚を呈示する実験を行った。はじめに人間のずれ変形に対する知覚について呈示実験を行い、エアの効果を明確に判断するため、ずれ呈示のみにおける時空間的に影響を与える因子を捉える。次にエアを用いた場合の知覚の違いについて実験を行い、エアを用いた呈示の有効性について確認する。

6・1 ずれ変形呈示実験 はじめにエアを用いずにずれ呈示ディスプレイのみで呈示を行い、ずれ変形の認識に関する実験を行った。本研究では、絶対的なずれ量の認識について実験を行った。

<呈示パターン>

時間に対する呈示面の移動量変化にはさまざまなパターン(線形, Log 型など)が考えられるが、ずれ量認識について定量的にとらえるならば、単純化した線形パターンで呈示を行い、速度の影響を考慮する必要がある。よって、ずれ変形認識における呈示パターンとしてずれ量が単調増加し、ある一定のずれ変形に到達するパターンでの、ずれの増加速度の影響について実験を行った。呈示するずれ量(428, 941, 2739 $\mu\text{m} \approx 1:2:6$)、スピード(316, 1569, 3114 $\mu\text{m/s} \approx 1:5:10$)のそれぞれ3種類のものを用いた。

<実験システム>

ずれ変形呈示用触覚ディスプレイを2セット用いて、右手の親指、人差し指の2本の指で物体を把持するような姿勢(図10)をとるように配置する。被験者の目の前には暗幕を張り、触覚ディスプレイシステムを直接見ることでできないような配置で触覚ディスプレイを卓上に固定し、被験者は机に向かって暗幕の間から手を挿入し、触覚ディスプレイに指を入れた。指先の姿勢が変わらないように、指触面より指の付け根側にリング状のサポートを取付け、バンドにより固定する。また、聴覚の影響を除くため、ヘッドホンを装着してもらった。実験システムを図11に示す。

<教示内容>

ずれ量に対する認識を調べることを伝える。速度等については聞かず、ずれ量の直感的なイメージについて、“0”～“9”までの数字で回答を行ってもらった⁽¹²⁾。

<パターン呈示順序>

呈示パターンは先に述べた通り9種類のものを用いる。初期接触状態から触面を指先表面に対して垂直方向に1mm押し込み、その後接線方向への変形(各ずれパターン)を呈示する。呈示順序としては、

Fig. 12 The ratio of subject's answer. Velocity is constant

Displacement : black = Small, dot line = Middle, gray = Large

(1) ずれ速度一定, ずれ量を変化

(2) ずれ量一定, ずれ速度変化

の2種類のものがあるが、呈示順序では、これらの変化を被験者が予測できないように、(1), (2), (1), (2)と入れ替えて行った。つまりはじめずれ速度一定でずれ量を増加させていく順で呈示し、次にずれ量一定で、ずれ速度を変化させた、その後ずれ速度一定でずれ量を減少させる順で呈示し、最後にずれ量一定でずれ速度を変化させた。

<結果>

実験に参加した被験者は健常者9人(20代男性)である。図12に9種類のずれパターンに対して、被験者にずれ量を9段階で評価してもらったときの結果を示す。図12の横軸は被験者による9段階評価の結果で、縦軸は9段階評価の回答割合(各評価の回答回数)/(全回答数)である。ずれ速度が小さい場合は、ずれ量の“中”“小”に対する回答の分布が近寄っている。さらに、ずれ速度が小さく、ずれ量が多い場合では被験者からの回答に大きなばらつきが存在することがわかる。実際に呈示したパターンのずれ量の比は、1:2:6である。ずれ速度が“中”“大”の場合は、ずれ量に対する認識がほぼこの比に近い分布を見せているが、ずれ速度が小さい場合は、ずれ量が大き

いとき分布がばらつくのと同時に、ずれ量に対する回答のピークが呈示されたずれ量より小さい方ででている。このことから、ずれ速度が小さい場合、実際のずれ量よりも、ずれ認識が小さく感じてしまうことがわかる。

以上のような結果から、ずれ量認識はずれ速度の影響を受けることが明らかとなった。

6・2 エアの吸引を用いたずれ呈示実験 吸引を含むずれ呈示の知覚に関する実験を行った。呈示パターンは前実験と同様に線形パターンを用いた。さらに、前実験で述べたように、ずれ変形認識は速度の影響を受けるため、吸引の効果を明確に判断するため、吸引を含むずれ認識に関する実験では、ずれ変形速度は一定(825 $\mu\text{m/s}$)とした。接線方向移動量に関しては、“滑り”と知覚される移動量を各被験者ごとに予備実験で求め決定した。吸引グループは中心とその外側(図8における Group: A, B), 吸引圧力は3種類(-10, -20, -30 kPa)を用いた。実験は、

(1) 吸引圧力, グループの変化による吸引効果の確認

(2) 各グループの吸引を OFF するタイミング(図13における t_a, t_b)を変化させた場合の知覚の変化

について実験を行った。被験者は9名(20代男性)で実験条件は前の実験と同様である。今回の呈示において刺激の差が微妙であると予想されるため、判断方法として一対比較法を用いた⁽¹¹⁾。

<結果>

(1) 吸引効果の確認

吸引の効果を確認する実験の結果として、吸引を行わず接線方向への移動のみを呈示した場合と吸引を行った場合の違いに関する結果を図14に示す。吸引を行わなかった場合は96.3%が“滑り”と知覚される移動量でも、吸引を行うことで“ずれ”へと知覚が変

化した。さらに吸引圧力を高めることでより高い確率で“ずれ”へと知覚が変化することがわかった。

(2) 吸引 OFF タイミングを変化させた場合

吸引を含めたずれ呈示では接線方向への呈示移動量が被験者ごとに変わるため、最大変形に至る時間 T が変化する。吸引を停止するタイミングすなわち図13における t_a, t_b (それぞれ Group: A, B の吸引 OFF タイミング)は T に対する割合を定め設定した。それぞれ最大変形に至る時間 T は4.9~5.2sで t_a を変化させる実験では、 $t_a(0.85T$ と End の2種類), $t_b(0.6T$ 固定)とし、 t_b を変化させる実験では、 $t_b(0.6T$ の End の2種類), t_a (End 固定)とした。ここで End は最大変形到達後約1s後にエアの吸引を停止した。

それぞれのグループの吸引 OFF タイミング(t_a, t_b)を変化させた場合の知覚の変化についての結果を図15に示す。それぞれの場合とも吸引停止タイミングを遅くさせることによりずれ変形認識が増加して知覚されやすいことが明らかとなった。ただし、 t_b (Group: B の吸引 OFF タイミング)を遅くしすぎると“ずれ”という感覚より、“ねじられた”という感覚になるという感想が多く、自然な“ずれ”感を呈示するには、それぞれのグループの吸着 OFF タイミングの時間的関係を $t_b < t_a$ の関係で維持したまま、それぞれを遅くすることがふさわしいことが明らかとなった。

Fig. 13 Vacuum off timing of each group

Fig. 14 The ratio of subject's answer (Using vacuum)

Fig. 15 The ratio of subject's answer (Changing vacuum off timing)

7. ま と め

本論文では、ずれ変形を呈示する触覚ディスプレイとして液圧駆動の3軸ステージ、エアの吸引を可能とするエアパッドを指先のずれ変形解析に基づき設計、製作を行った。これらの触覚ディスプレイシステムを用いて感覚呈示実験を行った。この結果から、ずれ量認識がずれ速度の影響を受けること、エアの吸引によりずれ量を変化して呈示することが可能であることが明らかとなった。

文 献

- (1) Burdea, G. C., *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, (1996), 133-165, John Wiley & Sons.
- (2) Fukuda, T., Morita, H., Arai, F., Ishihara, H. and Matsuura, H., *Micro Resonator for a Tactile Display*, *Advanced Robotics*, **12-2**(1998), 135-153.
- (3) 福田敏男・盛田英之・新井史人・石原秀則・松浦英雄, マイクロ振動子を用いた触覚ディスプレイ, *機論*, **64-621**, C(1998), 253-259.
- (4) 井野秀一・黒木速人・和田親宗・泉隆・伊福部達, 3軸移動ステージ機構を備えた触覚ディスプレイによる“ずれ”の知覚特性, 日本バーチャルリアリティー学会大会論文集, Vol.1(1996), 175-176.
- (5) Shimoga, K. B., A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation: Part 2. Finger Touch Feedback, *Proc. IEEE Virtual Reality Annual Int. Symp.*, (1993), 271-279.
- (6) Johansson, R. S. and Westling, G., Signals in tactile afferents from the fingers eliciting adaptive motor responses during precision grip, *Experimental Brain Research*, vol.66(1987), 141-154.
- (7) Westling, G. and Johansson, R. S., Responses in glabrous skin mechanoreceptors during precision grip in humans, *Experimental Brain Research*, vol.66(1987), 128-140.
- (8) Schallamach, The frictional contact of rubber, The mechanics of the contact between deformable bodies, *Proc. symp. int. Union Theoretical Applied Mech. (IUTAM)*, (1975), 359-376.
- (9) Schallamach, How does rubber slid?, *Wear*, Vol.17(1971), 301-312.
- (10) 井野秀一・泉隆・高橋誠・伊福部達, 感覚フィードバック型ハンドのための把持感覚に関する心理物理的研究, 電子情報通信学会論文誌D-2, Vol. J 75-D-2, No.11(1992), 1909-1916.
- (11) 伊福部達, 人工現実感と触覚, 日本ロボット学会誌, **10-7**(1992), 885-892.
- (12) 難波精一郎・桑野園子, 音の評価のための心理学的測定法, 音響テクノロジーシリーズ4, (1998), 43-107, 日本音響学会.