

人工現実感における触覚ディスプレイのための 心理物理的研究

井野 秀一・細江 文弘・泉 隆・高橋 誠・

伊福部 達(北海道大学・応用電気研究所)・木村 廣文(NTT電子応用研究所)

ABSTRACT: Tactile information processing was studied based on psychophysical experiments in order to design the tactile display for tele-existence robots or virtual reality. The characteristics of the tactile sense were obtained when strain forces with various velocities and directions were applied horizontally on a fingertip surface. The absolute thresholds of the contactor displacement were measured as functions of the contactor temperature, roughness and viscosity. From the experimental results, it was found that the minimum threshold was 32 degrees centigrade. The display method of the tactile information was discussed from the viewpoint of the physical parameters which determine the sensation of the material quality.

KEYWORDS: Tactile information processing, Tele-existence robot, Virtual reality, Psychophysics, Tactile display.

1. はじめに

宇宙、海底など危険な環境下で作業を行ったり、寝たきり老人や重度身障者を介助するためのロボットの社会的な必要性は、ますます増大していく傾向にある。しかし、ロボット自身の感覚で検出した情報をもとにロボット自身が判断して行動する、いわゆる自律型ロボットを実現することは容易ではない。そのため、ロボットが検出した情報をできるだけ忠実に人間に伝達・呈示し、人間の判断のもとでロボットが行動するシステムであるテレグジスタンス型ロボットの開発が必要とされている。このようなテレグジスタンス型ロボットや人工現実感の研究は視聴覚¹⁾の分野で盛んに行われている。また、触覚の分野では、手や指に力を与える研究^{2, 3, 4)}が始まったばかりである。しかし、手指の皮膚と物体が直接接触することによって生じる感覚である「圧覚⁵⁾」

6)・「ずれ覚」や「材質感」などをヒトの手や指先に如何に再現するかと言う研究はきわめて少ない⁷⁾。

我々は、このような触運動感覚および手指・腕の筋感覚の呈示・検出に重点をおいたマスタ・スレーブ型ロボットハンドとしての「感覚フィードバック型ハンド(図1)」^{8, 9)}に関する研究を行っている。

本稿では、この感覚フィードバック型ハンドにとって重要な構成要素である、触覚ディスプレイの設計方策を探ることを目的とした心理物理実験の結果を報告する。ここでは、把持や操り動作に重要な役割を果たす「ずれ」の触覚情報の検出能力は、把持物体との速度・方向・回転、あるいは表面状態によって、どのような影響を受けるかについて調べた。また、把持感覚や材質感には、どのような物理量の刺激が関与するのかについても推察し、触覚の呈示に関する考察をおこなった。

A Psychophysical Study for the Design of a Tactile Display Tele-existence Robots and Virtual Reality
INO Shuichi, HOSOE Fumihito, IZUMI Takashi, TAKAHASHI Makoto,
IFUKUBE Tohru (Research Institute of Applied Electricity, Hokkaido University), KIMURA Hirobumi (NTT Appl, Electronics Lab.)

2. 把持状態での「ずれ」の知覚に関する実験方法

2-1 実験方針

ヒトは視界の効かない状態でもコップなどをすべって落とすことなく把持することができるだけではなく、滑り落ちないぎりぎりの把持力で効率よくものをつかみ上げている。このことは、物体を把持したときに皮膚に必ず生じる僅かな「ずれ」の大きさと方向を検出する機能をヒトの触覚は備えている証拠でもある。従って、感覚フィードバック型ハンドにおいても、このようなずれをヒトの手指に呈示する機能は触覚ディスプレイにとって大切な機能のひとつである。特に、微妙な操り動作の場合には不可欠である。それでは、触覚ディスプレイではどの程度の精度でずれ刺激を発生するように設計すればよいのであろうか。そこで、触覚ディスプレイのずれ

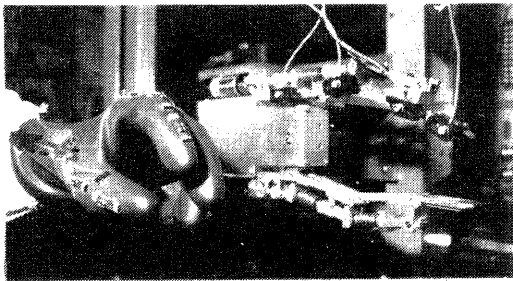


図1 触覚の人工現実感を目的とした「感覚フィードバック型ハンド」

発生機構に要求される性能を探るために、ヒトはどのくらいの検出能力を備えているかを実験的に調べた。ここでは、ずれの生じる様々な状況を「速度」「方向」「回転」という「触運動の状態」と「温度」「粗さ」「粘度」という「表面の状態」という観点からコントロールして実験を行った。触覚には、能動性(haptic perception)と受動性のふたつの状況があるが、「ずれ」は主に受動的触覚であるので、ここでは受動的触覚に限った実験を行った。

2-2 ずれの刺激閾の計測方法

ヒトのずれに対する検出能力を定量的に明らかにするために、手指のずれに対する刺激閾 (absolute threshold) の計測を行った。

実験装置の構成を図2に示す。本装置はずれ刺激を指先の皮膚に与える接触子を取付けたX・Y・Zテーブル(移動量精度: $\pm 1\mu\text{m}$)とそれを自由に駆動する制御装置などから構成されている。但し、ここでは、コップや本のように指腹面よりおおきな物体を把持する場面を想定し、接触子は指腹面より十分に大きい面積をもつものを選んだ。また、回転におけるずれの場合にはハーモニックキヤードタイプの5相ステッピングモータ(分解能: 0.0072deg/s)を使用した。これらの実験装置には、ずれ以外の刺激が指先に伝わらないように、モータからの振動を抑える工夫を施してある。

接触子の動きに関する聴覚および視覚情報を被験者から遮断するために、被験者は耳栓をして顔を閉

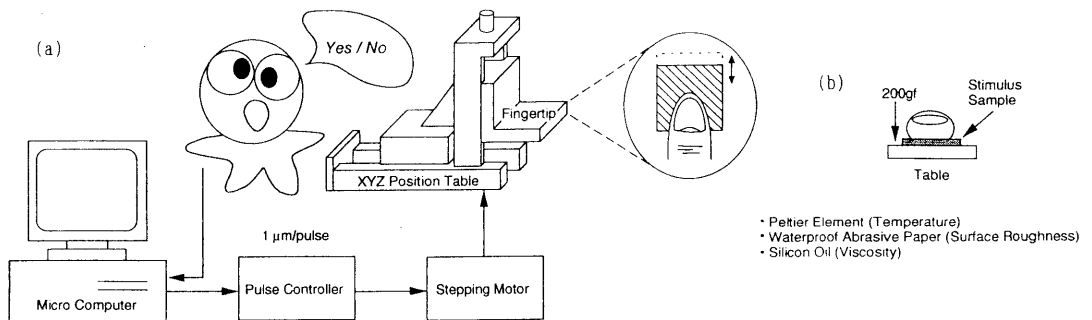


図2 「ずれ」の刺激閾の計測に用いた心理物理実験装置
(a) 全景 (b) 指先と刺激用試料の様子

じた状態とした。ずれの判別に用いるのは左手であり、刺激部位は示指・遠位指関節・遠位指節の手掌面（いわゆる、指先の腹）である。触運動の刺激の方向は、指の長軸と直交する横方向、平行な縦方向、これらの中間である斜め方向（45 deg）の3方向と回転の4種類とした。ずれの刺激パターンを図3に示す。例えば、縦方向の場合には、まず遠位から近位に接触子が移動し、0.5秒間停止の後、再び、近位から遠位の移動を行い、もとの位置で停止する。横および斜め方向の場合も同様に、側方から正中側に移動し、停止の後に再び側方に戻る。回転の場合は手背側から見て、まず時計回りに回転し、0.5秒停止の後に再び逆回転し、元の位置に戻る。指先の接触子に対する押圧力は、ほぼ200gf一定となるように被験者に指示を与えた。この場合の皮膚の接触面積は、210mm²程度であった。

本実験では、ずれの刺激閾を求める心理物理的計測手法として、被験者に意図的修正が行われる可能性の最も少ない恒常法を用いた。ここでは、被験者のずれ判断の形式として、刺激の「有/無」を応答する2件法を用いた。具体的には、まず、予めおよその閾値を予備実験で決める。その閾値を中心に5段階の刺激を設定する。これらの刺激をランダムな順序で50×5回反復呈示する。各刺激のずれ判断の確率を正規確率紙にプロットし、最小自乗法によって直線近似式を求める。これより、ずれ判断の確率が50%のとなるずれの変位量を推定し、その値をずれの刺激閾とする。図4に計測データを正規確率紙にプロットした一例を示す。これより、ずれ判断の応答はほぼ正規分布に従うことが確認された。

以上の実験における、ずれ刺激の制御・応答の記録・ずれ刺激閾の算出は、図2に示す計算機によって行った。被験者は22～26才の男性4名である。

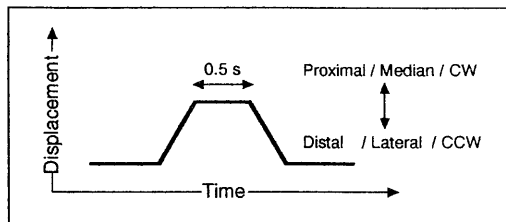


図3 心理物理実験に用いたずれ刺激呈示用接触子の変位時間パターン

2-3 試料

ずれ刺激を指腹面に与える試料について述べる。触運動の状態の違いにおけるずれの閾値の違いを調べるための試料には、中心線平均粗さ(Ra)が0.44μmのアルミ製平板を用いた。ただし、回転の場合にはステンレス製円盤(Ra=0.08μm)を使用している。ここでの刺激試料とは、前述のX・Y・Zテーブル、およびモータの回転軸に取り付けた接触子のことである。

表面状態の違いによる影響を調べるために用いた試料は、温度に関してはペルチェ素子、粗さには二次元的凹凸をもつ耐水研磨紙、粘度にはニュートン流体のシリコンオイルである。温度は、PID制御によって定常偏差が目標値の±1℃以下になるようにした¹⁰⁾。測定温度は低温やけどが起らないような15～40℃の範囲で行った。ペルチェ素子の表面のRaは1.08μmである。耐水研磨紙はグリッド番号が#80,#150,#320,#700,#2000の5種類である。また、シリコンオイルは500cSt,3000cSt,30000cStの3種類とし、これらは示指の指腹が十分浸される程度にプラスチック製容器へ満たして使用した。

3. 結果と考察

3-1 触運動の影響

ずれという受動的触運動を構成する要素として、速度・方向（直動）および回転を考え、その各要素のずれの閾値への依存性について調べた。

【速度/方向】

測定結果を図5に示す。横軸は示指指腹面に対す

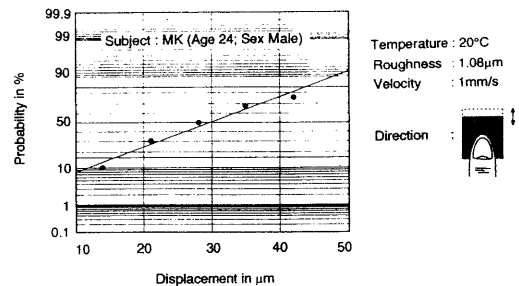


図4 5段階のずれ刺激の応答確率を正規確率紙にプロットして刺激閾を求めた一例（各点における試行回数は50回）

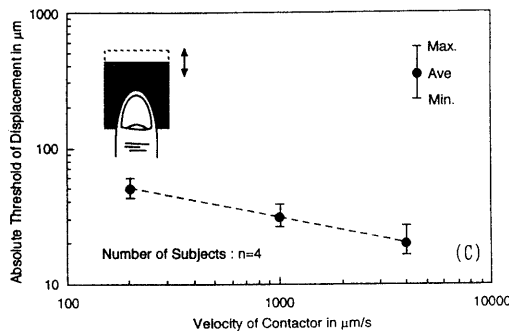
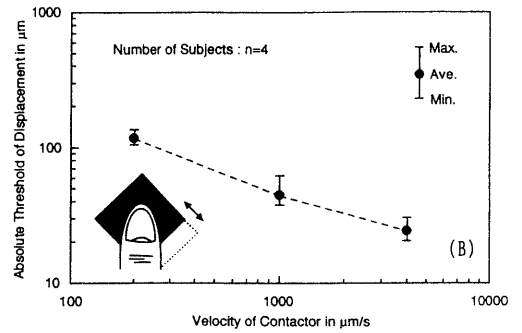
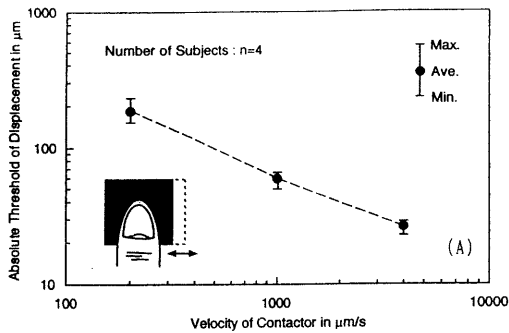


図5 示指指腹でのずれ刺激閾の速度依存性と方向依存性 (図中の各点はそれぞれ4名の被験者の試行回数250回の判断から求めた刺激閾の平均値)

- (A) 指の長軸に垂直な方向 (横方向)
- (B) 指の長軸に対して45deg傾斜した方向
- (C) 指の長軸に平行な方向 (縦方向)

るずれの速度、縦軸はそのずれをやっと知覚したときの変位量 (刺激閾) である。これより、皮膚表面に対するずれの刺激閾は速度に大きく依存し、変位速度が速い場合には変位量が小さくてもよく知覚でき、遅くなるとかなりずらさなければ知覚できないことが分かった。例えば、縦方向のずれでは、0.2mm/sでは 50 μ m、4mm/sでは 20 μ mであった。一方、被験者の内観報告によれば、ずれの速度が非常に速く、変位が小さい場合には、何かの刺激があったことは感知できるが「コッ」と叩かれたような感じになり、いわゆる「ずれ」による感じとは違うようである。即ち、変位速度により、ずれの感じや刺激閾はかなり異なっていることから、この場合には同一の触覚受容器のみでなく、速度によって違う受容器が関与している可能性がある。

また、ずれの方向に対しても刺激閾は非常に影響を受けることが、図5のA,B,Cを比較することから分かった。具体的には、変位速度1mm/sにおいて、横方向のずれに比べて、縦方向では刺激閾が約1/2となっており、全体的に見てもずれの刺激閾と方向の関係は 縦<斜め<横 になっている。また、この傾向

は刺激速度が遅いほど顕著である。

このような方向依存性の生じる原因のひとつとして、触覚受容器のなかに方向依存性を持つもの存在が予測される。例えば、図6に示すように、Johanssonらは、神経生理学的実験から機械受容器の一種であるSAIIのなかに縦方向の引っ張り以外の刺激には反応を示さないものが存在することを報告している¹¹⁾。これらの神経生理学的および心理物理学的結果を総合すると、ある方向に関してに選択的に反応する触覚受容器があると考えざるを得ないし、また、このような方向依存性のある触覚受容器は、手先での巧妙な操り動作を可能とするために必要な微妙なずれの方向をも検出する役割を担っているともいえよう。

次に、各方向でのずれ速度に対する閾値の測定結果を冪関数で近似した。その結果、冪指数は、横方向:-0.65, 斜め方向:-0.53, 縦方向:-0.30であった。すなわち、ずれ速度に対する刺激閾の減衰率は、横方向:-13dB/dec, 斜め方向:-11dB/dec, 縦方向:-6dB/dec である。これらから、ずれの方向が指の長軸に平行な方向から直交する方向なるにつれ、刺激閾

SAII

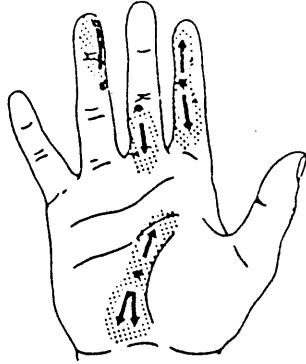


図6 SAII型触受容ユニットの応答方向¹¹⁾
(矢印方向以外に引張る刺激は無効)

に及ぼす速度の影響が大きくなることを示している。あるいは、ずれ速度が大きくなるにつれて、方向の違いによる閾値の差が縮小し同一値に近づく傾向にあるともいえる。つまり、ずれ閾値の速度依存性と方向依存性は互いに独立ではなく依存性のあることが示唆された。

以上の結果から、触覚ディスプレイの設計には、ずれ発生機構として、数十 μ m程度のものを備える必要があり、また速度/方向依存性も考慮する必要があることも分かった。

【回転】

物体を把持して持ち上げる際には、上記のような直動のずればかりではなく、モーメントによる回転のずれも生じる。ここでは、回転によるずれの刺激閾を調べた。測定結果を図7に示す。横軸は示指指腹面に対するずれの角速度、縦軸はその刺激に対する刺激閾である。これより、皮膚表面に対するずれの刺激閾は角速度に大きく依存し、角速度が速い場合には変位角が小さくてもよく感知でき(21.6deg/sのときは0.046deg)、遅くなるとかなりずらさなければ感知できない(0.72deg/sのときは0.265deg)ことが分かった。ずれ角速度に対する減衰率は、ほぼ-9 dB/decであった。

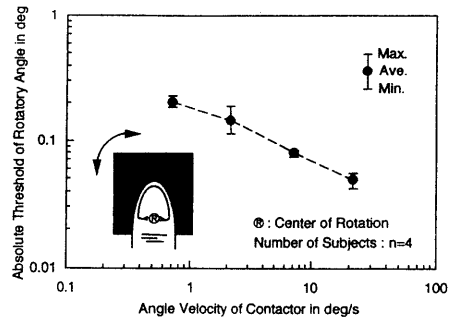


図7 ずれ回転刺激の角速度とずれ刺激閾の関係

以上の結果から触覚ディスプレイの回転ずれ発生機構には 10^{-2} deg程度のものが要求されることが分かった。

3-2 表面状態の影響

同じ形で重さも等しくても指先が接触する表面の状態が違えば、触覚や把持のしやすさにかなりの違いが生じる。ここでは、表面状態を構成する要素として、温度・粗さ・粘度の3種類を主要な物理量と考え、その各要素のずれの閾値への影響について調べた。ただし、ずれの触運動については、速度:1 mm/s, 方向:指の長軸に平行とした。

【温度】

表面温度の違いが、どの程度ずれの閾値に関与するかを測定した結果を図8に示す。横軸は示指指腹面に接触している接触子(ペルチェ素子)の表面温度、縦軸はずれの刺激閾である。これより、接触面の温度が32℃付近でずれ覚の刺激閾が最小になることが分かった。この温度は、被験者の指先の皮膚表面温度と一致しており、いわゆる温度感覚の完全な順応の起こる温度範囲である無関帯(neutral zone)に属している。また、表面温度がずれ覚の最も敏感になる32℃を越えると急激に閾値が大きくなっていく

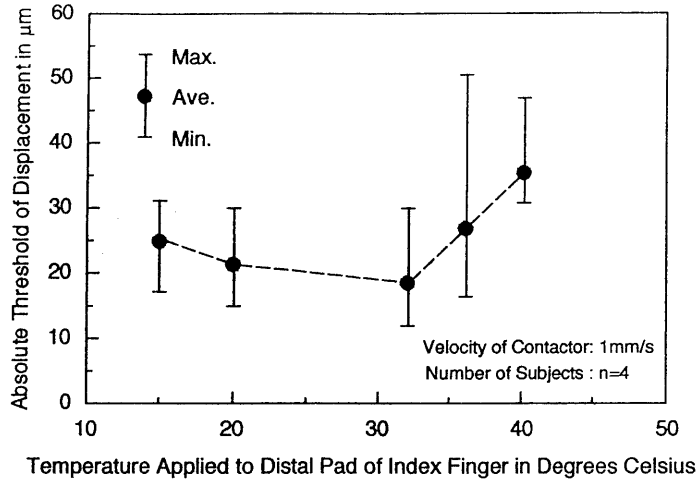


図8 ずれ刺激を呈示した接触子の表面温度に
対するずれ刺激閾の依存性

る。これに関して、被験者は、「接触子の変位によるずれの知覚と熱い部位によって指先が脈打つように『じんじん』する感覚が混在して、ずれの知覚が困難になった」と内観報告している。これは、温覚（熱覚）によってずれ覚が、かなりのマスキング効果を受けているためと推測される。また、一方で32℃以下の冷覚域でもマスキング効果が働いていると思われるが、その効果は温覚域に比べて弱いため、刺激閾がさほど大きくならないのであろう。

以上のことから、ずれの感受性に関与する機械受容器の検出力は、温度に対して非常に影響されることが分かった。また、触覚ディスプレイを常温で用いることを想定すると、ディスプレイの表面温度を32℃（使用者の手指の皮膚温）に設定することで、このディスプレイからヒトは最も効率よく把持（ずれ）情報を得ることができる。

【粗さ】

表面粗さに関する結果は、刺激試料の表面の粒子径が細くなるにつれて、若干の傾向として、ずれ覚の刺激閾が大きくなる程度である（図9）。具体的には、平均粒子径75μmでずれ覚の刺激閾35μm、一方、平均粒子径8.5μmでは刺激閾41μmであった。

これより、2次元的空間周波数（表面粗さ）の違いは、さほど刺激閾に影響をもたらさないことがわかった。この理由のひとつとして、ずれという触運動の主因が、把持物体表面と指腹面には滑りのない皮膚の歪みであることが挙げられる。もし、能動的触運動によって、「ずれ」から「滑り」の状態に移行したとすると、スティック・スリップ現象が起きる。その結果、表面の凹凸空間パターンに起因する皮膚への振動（時間的）が発生し、これが周波数依存性のある振動受容器（Pacini小体など）を刺激する。よって、滑りの閾値には、粗さの違いが、ずれの場合よりも大きく影響すると推察される。

以上のように、粗さの影響は、ずれのような受動的触運動の場合にはあまり見られなかった。従って、触覚ディスプレイをずれの認識に的を絞って使用する場合には、あらさの違いはさほど考慮する必要はない。ただし、「ざらざら」のような能動的触運動から得る情報に依存する材質感の呈示に関してはこのかぎりではない。

【粘度】

粘性に関する実験結果を図10に示す。この実験の場合は、粘度が3000cStや30000cStでは、変位速

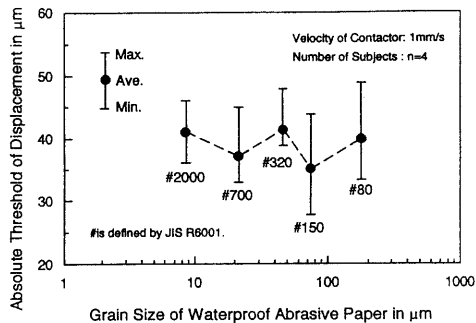


図9 ずれ刺激を呈示した接触子の表面あらさと
ずれ刺激閾の関係

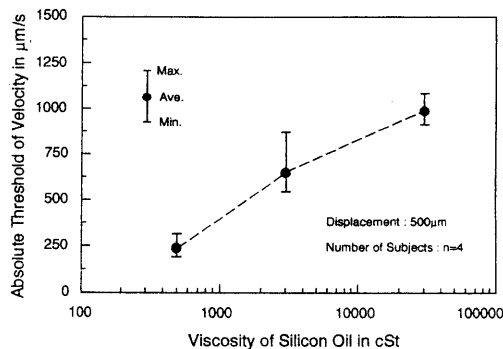


図10 シリコンオイルの粘性と500μmのずれ刺激
を知覚するのにに要した変位速度との関係

度1mm/sの場合にずれを全く知覚できず、速度依存性が高いことが予備実験で明らかになったので、ずれの刺激閾を計測する代わりに、変位量 500μm に対する変位速度の刺激閾を測定した。測定結果から、変位速度の刺激閾は把持物体の表面に付着しているものの粘度が大きくなるにつれて増大することが分かった。例えば、粘度500cStは、比較的ゆっくりした移動速度である233μm/sでも接触表面の移動を知覚できたが、30000cStでは986μm/sの速さでなければ500μmのずれを知覚できない。また、冪関数で近似した場合の冪指数は0.34である。従って、粘度に対するずれ速度の刺激閾の変化率は、約6.9dB/d ecである。

このように、ずれの知覚は粘度の違いによってかなり左右されることが定量的に分かった。また、厳密な意味では、この実験状況の場合は、ずれと滑りの混在した状態である。ただし、滑りがあると皮膚表面に生じる特徴的な現象である スティック・スリップは、粘物質の付着による摩擦係数の低下のためにほとんど生じていないといえる。

以上の粘度に関する結果から、把持物体の表面にオイルのような粘物質が付着している場合には、ヒトは受動的触運動であるずれを非常に知覚し難いと判断できる。そこで、触覚ディスプレイには、粘度の違いによって、発生させるずれの変位量および速度を抑制する機構が必要になる。

4. おわりに

触覚に関する人工現実感やテレグジスタンスに欠かすことのできない ヒューマン・インタフェースである触覚ディスプレイに要求される機能を定量的に探るための心理物理実験を行った。本稿では、ハンドリングにとって最も基本的かつ重要な「ずれ」に焦点を絞って報告を行った。

この手指の把持感覚にとって重要なずれの知覚は、接触面の移動状況（変位速度・方向および回転）や接触面自体の状況の違い（表面温度・粗さ・粘性）によって、かなりの影響を受けることが定量的に明らかになった。また、ここでは、ずれ覚の刺激閾の定量化に焦点を絞った報告を行ったが、被験者の内観報告からは、以上のパラメータを変化させると「触れた感触も異なったものとなる」ことも定性的に分かった。

今後は、このような感触（材質感）がどのようにして知覚されているかを探りながら、ヒトの触感覚は、どのような基本要素で構成されているかを明らかにして、感覚フィードバック型ハンドのための触覚ディスプレイの試作を行っていきたい。

謝辞

本研究は一部、平成3-4年度文部省科学研究費（特別研究員奨励費0154）の補助を受けた。記して感謝する。

【参考文献】

- 1) 箱: 三次元空間のサイバネティック・インタフェース, 日本ロボット学会誌, 7-6, 745/751 (1989)
- 2) 佐藤, 平田, 河原田: 空間インタフェース装置SPI DARの提案, 電子情報通信学会論文誌, J74-D-II/7, 887/894 (1991)
- 3) 岩田, 野間, 中島: フォースディスプレイによる仮想立体の認識と操作に関する評価実験, 計測自動制御学会: ヒューマン・インタフェース部会, 第16回研究会, News and Report 6, 114/121 (1991)
- 4) 広田, 橋本, 広瀬: 力覚ディスプレイのCAD/CAEへの応用, 計測自動制御学会 第7回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, 95/98 (1991)
- 5) T.Oomichi, T.Miyatake, A.Maekawa, T.Hayashi: Mechanics and Multiple Sensory Bilateral Control of A Fingered Manipulator, #4 ISRR, The MIT Press (1987)
- 6) 井野, 高橋, 泉, 伊福部, 木村: 感覚フィードバック型ハンドのための圧覚呈示に関する一方式, 日本ロボット学会 第8回学術講演会予稿集, 261/262 (1990)
- 7) 伊福部: 触覚のテレグジスタンスに関する研究, ロボット, 77, 104/111 (1991)
- 8) 井野, 泉, 伊福部, 木村: チップコイルを用いた指関節角度センシングと多関節人工指の遠隔操作への応用, 計測自動制御学会論文誌, 26-10, 1186/1192 (1990)
- 9) 伊福部: 感覚フィードバック型ハンド, 日本ロボット学会誌, 7-5, 496/500 (1989)
- 10) 泉, 井野, 高橋, 伊福部, 木村: 触覚フィードバックにおける温度の役割, 計測自動制御学会: ヒューマン・インタフェース部会, 第16回研究会, News and Report 6, 134/139 (1991)
- 11) R.S.Johansson, A.B.Vallbo: Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand, Trends in Neuroscience, 6, 27/32 (1983)

Memorandum