

触運動感のテレグジスタンスに関する基礎的研究

A Basic Study on Tele-existence of the Haptic Sense

代表研究者 北海道大学 電子科学研究所 助手

井野 秀一

Instructor, Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

Shuichi INO

Tactile information processing was studied based on psychophysical experiments in order to design tactile displays and sensors for tele-existence robots or virtual reality devices. The identification characteristics of the tactile sense concerned with the quality of materials were investigated when human fingertips touched the surface of various materials. In addition to obtaining the tactile characteristics, the temperature change of the skin surface of a fingertip was measured when the fingertip contacted the surface of materials. From these experimental results, the temperature difference from the normal skin temperature was found to be very important to recognize what kind of materials contacted the skin surface. Moreover, it was found that the identification characteristics were different between a passive touch and an active touch. Next, the tactile display for presenting the quality of materials was designed on the basis of the above experimental results. The tactile display system was composed of a Peltier element and a PID controller. It was proven that the tactile display has the ability to easily present a similar quality of materials to real objects.

【研究目的】

次世代の情報通信技術やロボット制御技術として、人工現実感やテレグジスタンスが注目されている。このような「人間と機械の係わり」に関連する研究開発は視聴覚や力覚の分野で精力的に行われている。一方で、このようなシステムでの最終的な操作は、人間の「手」の動作に委ねられることが多い。ゆえに、ヒトの触覚情報処理に関する研究は、ヒューマン・インタフェースにとって重要な基礎研究である。このような背景のもとで、触覚情報の検出・表示に重点をおいたテレグジスタンスシステムである「感覚フィードバック型ハンド」の研究を行っている (Fig.1)。

本研究課題では、まず、この感覚フィードバック型ハンドの構成要素である触覚ディスプレイの設計指針を得るための材質感に関する基礎実験を行い、材質感を惹起する物理量を2変量情報分析を用いて推察した。さらに、ペルチェ素子を使った触覚ディスプレイを試作し、材質感の認識において皮膚表面の温度変化が如何に重要であることを示し、ヒト手指の材質感センシングが皮膚の温度変化パターンに基づいていることを検証した。

【研究経過】

1. 材質感に関する触覚特性

物体の材質識別は視覚に頼ることもあるが、金

属やガラスあるいは木材などの認識は触覚のみでも十分に可能である。そこで、ヒトの手指における材質識別能力はどの程度であるかを「環境温度依存性」と「触察方式の違い」という観点から調べた。さらに、そのときの伝達情報量を算出して、材質感認識にとって適した環境温度を推測した。

1.1 試料と実験手順

試料には、日常生活において身近に触れている [アルミニウム][ガラス][硬い天然ゴム][アクリル][木材] の5種類を選んだ。これらは温度調節をした小型人工気象器内に長時間放置した状態で実験に用いた。被験者は男性4名である。

実験手順は、これらの試料をそれぞれ10回づつランダムな順序で被験者の指先に呈示し、その呈示した試料が何であったかを被験者に材料名で識別させ、その応答を Confusion Matrix の形式で記録した。触察動作には受動的触察と能動的触察の両方を選んだ。また、この Confusion Matrix から本実験で用いた試料群における触覚の伝達情報量を二変量情報分析法から算出した。

1.2 予備実験

材質感識別に最適な環境温度を調べる前に、呈示試料と皮膚の接触において生じる熱移動によって、どれだけ皮膚温が変化するかを調べた。結果を Fig.2 に示す。これより、環境温度と皮膚温の変化量 (ΔT) の関係はほぼ線形であることが分かった。

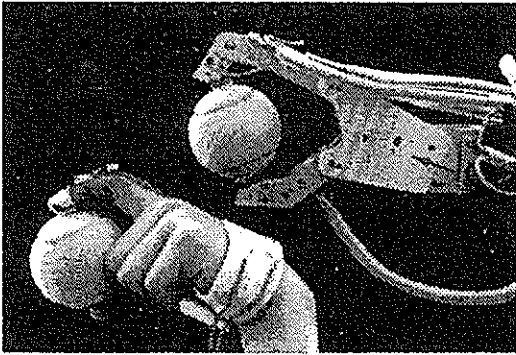


Fig. 1. Photograph of "Hand with Sensory Feedback".

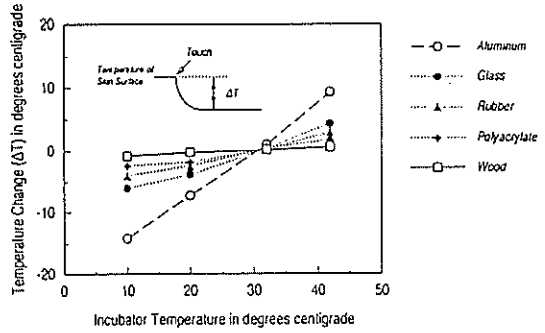


Fig. 2. Temperature change (ΔT) of the skin surface after subjects touched the sample materials as a function of temperature inside an incubator.

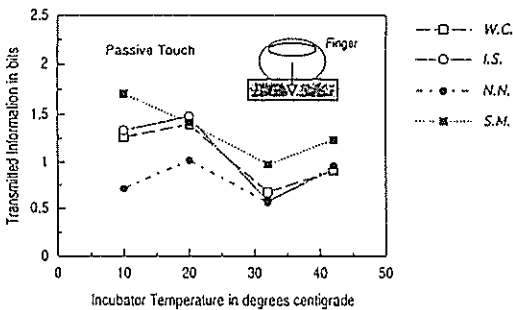


Fig. 3. The amount of transmitted information in the case of a passive touch as a function of temperature inside the incubator.

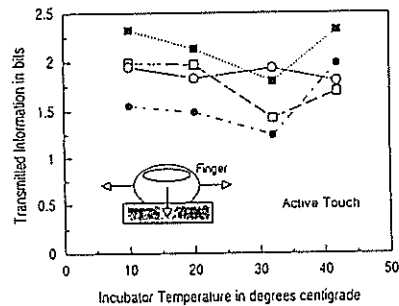


Fig. 4. The amount of transmitted information in the case of an active touch as a function of temperature inside the incubator.

1.3 受動的触察での伝達情報量

受動的触察の伝達情報量を推定した結果が Fig. 3 である。この図から環境温度と材質感の伝達情報量の関係はほぼ逆 S 字型のグラフになることが分かった。すなわち、手指の周囲温が常温である 20°C の場合に伝達情報量が最も多く、皮膚温に等しい場合に最も少ない。このことから、温冷覚が大きく関与する受動的触察での材質識別には、最適な環境温度が存在し、その温度は 20°C 前後の常温であることが示唆された。

また、温度変化情報が手指にほとんど伝わらない場合である 32°C でも、指先で材質感情報 (約 0.7 bits) を得ていることが分かる。すなわち、圧覚や試料から指先の離れる際の感覚 (粘つき感) によっても材質識別が可能であることが分かった。

さらに、プロットされた Fig. 4 のおのおのデータ値から上記の伝達情報量 (約 0.7 bits) を差し引いた値は、おもに温冷覚から得られた伝達情報量と仮定するならば、例えば、20°C では約 0.6 bits が温冷覚に起因した伝達情報量である。

1.4 能動的触察での伝達情報量

能動的触察では、環境温度が 32°C で最も材質感の伝達情報量が少なく、温度差が大きいほど情報量は増す傾向にあることが、Fig. 5 から分かった。ただし、皮膚温 (32°C) 以下の領域では、20°C 以下での伝達情報量の増加は鈍い。

また、能動的触察と受動的触察の伝達情報量の差をみると、おおよそ 0.8 bits であった。これは、能動的触察である「なぞり動作」で生じやすい皮膚表面のスティック・スリップ現象に由来する振動覚の材質感伝達情報量を主に反映したものと考えられる。

2. 材質感触覚ディスプレイ

材質感を呈示するために不可欠な情報のひとつに温冷覚情報があることが上記の実験の結果から分かった。この結果から、接触によって生じる皮膚の温度変化 ΔT と同様なパターンを人工的に指

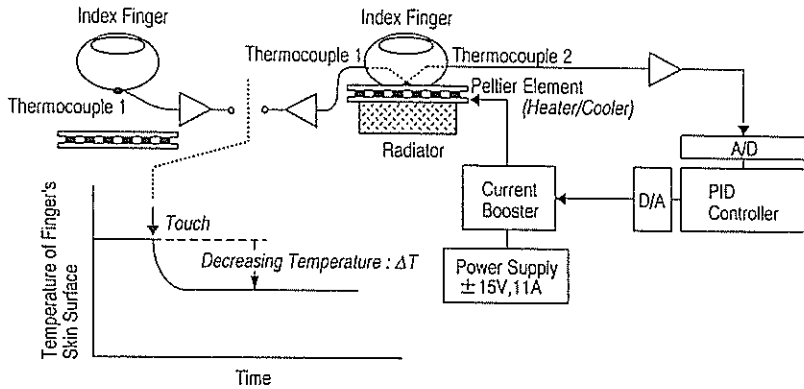


Fig. 5 Block diagram of the tactile display for presenting quality of materials by using Peltier elements.

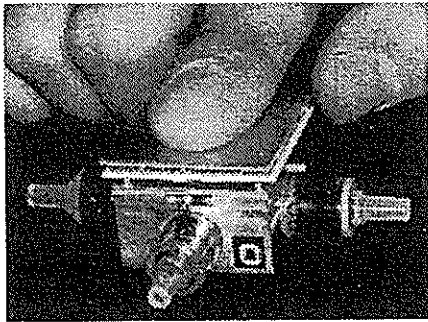


Fig. 6 Photograph of the tactile display composed of Peltier elements.

先に呈示することにより、材質感情情報がある程度は呈示可能であると推測できる。ここでは、このことを実証するために温度変化 ΔT を電氣的に制御して材質感を指先に呈示する装置であるペルチェ素子駆動型触覚ディスプレイを試作して、実際にどの程度の材質感を惹起できるかを調べた。

2.1 構造

試作した触覚ディスプレイの構造と外観を Fig. 5 と Fig. 6 に示す。ディスプレイ部は $3\text{cm} \times 3\text{cm}$ のセラミック板でペルチェ素子を挟んだ構造のものであり、電流の向きを制御することによって冷却・加熱が可能である。ディスプレイの表面温度測定には熱電対を用い、PIDコントローラによって定常偏差が目標値の 0.1°C 以下となるようにディスプレイ

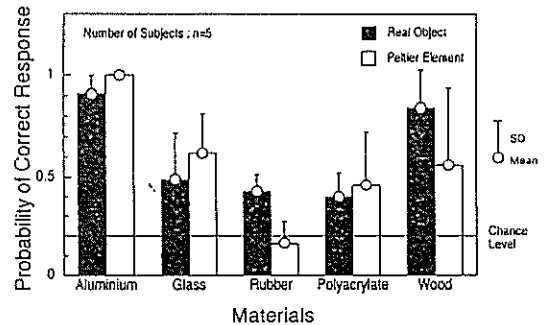


Fig. 7 Comparison of the identification characteristics of real objects with those of virtual objects produced by the Peltier element display.

の表面温度を制御した。

2.2 評価実験と結果

次に、この触覚ディスプレイによって、果してどの程度の材質感情情報を呈示できるかを検討するために、前章で用いた5種類の試料と指先の接触で生じた ΔT をこの装置によって人工的に作り出し、被験者に呈示し、どの試料に感じたかを応答させる絶対判断の実験を行った。ただし、ここでは環境温度が 20°C の場合の ΔT （接触による温度変化後の定常温）のみを被験者の示指へ受動的触察によって呈示した。被験者は男性5名と女性1名である。

Fig. 7 には、各試料における認識率に関して、実物の呈示と触覚ディスプレイによって呈示した場

合の比較結果を示す。白抜き棒は試作した触覚ディスプレイによる仮想材質の認識率であり、網目棒は実物による認識率である。これより、両者の間には類似した認識傾向が見られることが分かった。

また、被験者の応答結果から伝達情報量を推定した結果、実物の場合では1.14bits、触覚ディスプレイの場合には1.26bitsであった。さらに、両者に対して検定をおこなったところ統計学的有意差はみられなかった。

【研究成果】

手指の材質識別特性を心理物理的手法に基づいて調べた。その結果、材質感の識別特性は環境温度の影響をけることが分かった。たとえば、受動的触察では我々の生活環境における常温である20℃前後で識別特性が良かった。従って、材質感の認識機能を含めて、触覚ディスプレイを利用するには、その利用環境温度を20℃に設定することが肝要であることが示唆された。

他方、材質感の伝達情報量の算出結果から、材質感を伝達するおのおのの皮膚感覚（温冷覚・振動覚・圧覚など）の分担度を推測したところ、常温（20℃）でほぼ均等であった。すなわち、触覚の材質感には温度・表面粗さ・粘度などの物理量が互いに関わっていることが予測できた。

さらに、このような基礎実験で得た知見に基づいて、皮膚の温度変化を利用した材質感触覚ディスプレイを試作した。その結果、受動的触察に限った場合には、試作した簡単な触覚ディスプレイでも、実物に触れた感覚と同様な材質感を指先に生じさせることが可能であることが分かった。しかし、試作した触覚ディスプレイによる仮想材質と実物による材質の識別率は、傾向は似ているが完全には一致していない。このことから、材質の正確な認識には、表面粗さパターンや粘弾性などの触覚情報も欠かせないと考えられる。

【今後の課題と発展】

本報告では、触覚の材質識別能力に関する基礎研究を行い、そこで得られた知見に基づいて、材質感触覚ディスプレイを試作した。しかし、この触覚ディスプレイは受動的触察方式に対応したものであり、能動的触察を積極的に利用していない。従って、今後は、能動的触察を積極的に活かす材質感触覚ディスプレイ方式を開発するためにも、触覚と手指運動を統合したヒトの触覚情報処理機構を総合的に解明していく姿勢が必要にな

る。

また、ここで得られた研究成果は、テレロボティクスや人工現実感のための触覚インタフェースに応用するだけでなく、上肢不自由者のための電子義手や機能的電気刺激の感覚フィードバック機器あるいは視覚や聴覚に障害を持つ人達の感覚代行の装置に活かす福祉工学へ活かす研究の展開を考えている。

【発表論文リスト】

- 1) 井野秀一, 泉隆, 高橋誠, 伊福部達: "物体接触時の皮膚温度変化に着目した材質感触覚ディスプレイ方式の提案 - 感覚フィードバック型ハンドのための基礎的研究 -", 計測自動制御学会論文誌, 30-3, 345/351 (1994)
- 2) 細江文弘, 小田川哲郎, 清水俊治, 井野秀一, 泉隆, 高橋誠, 伊福部達: "ヒト触覚における「ずれ」検出機能をモデルとしたセンサの開発とその応用", 計測自動制御学会論文誌, 30-5, 577/583 (1994)
- 3) 和田親宗, 井野秀一, 伊福部達: "高度難聴者用のタクトイルボコーダにおける音声スペクトルのスウィープ表示方式の提案と評価", 電子情報通信学会論文誌A, J78-A-3, 305/313 (1995)
- 4) C. Wada, T. Ifukube, S. Ino and T. Izumi: "Proposal of a New Tactile Display Method of Speech Signals as a Nonverbal Communication for the Profoundly Hearing Impaired", IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, RO-MAN'94, July 18-20, Nagoya, 95/100 (1994)
- 5) 井野秀一, 和田親宗, 伊福部達: "皮膚表面の温度変化パターンと材質感認識", 日本機械学会第4回ロボットセンサシンポジウム, 195/200 (1994)
- 6) 井野秀一, 和田親宗, 佐藤満, 小田川哲郎, 清水俊治, 伊福部達: "温冷覚に着目したヒト手指における材質感の基礎的研究", 日本機械学会 Dynamics & Design Conference '94, 機械力学・計測制御講演論文集, 346/349 (1994)
- 7) 小田川哲郎, 井野秀一, 泉隆, 高橋誠, 伊福部達: "ヒト手指のずれ検出機能に着目した感覚フィードバック型ハンド用人工触覚の試作", 計測自動制御学会 Human Interface News & Report, 9-3, 253/260 (1994)
- 8) 小田川哲郎, 井野秀一, 黒木速人, 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3次元触覚情報センシングシステムの試作", 計測自動制御学会第5回ロボティクス・自動化シンポジウム論文集, 121/126 (1994)