

# 力覚提示装置を用いた硬さ提示における 視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討

佐々木博<sup>\*1</sup> 藤田欣也<sup>\*2</sup>

Experimental Analysis of Role of Visual Information in Hardness Cognition  
Displayed by a Force Display System and Effect of Altered Visual Information

Hiroshi Sasaki<sup>\*1</sup> and Kinya Fujita<sup>\*2</sup>

**Abstract** - The cognitive rate of four levels of hardness was experimentally examined in ten normal volunteers with actual object as well as virtual object displayed by a glove-shaped force display, in order to discuss the role of visual, tactile and proprioceptive sensation in cognition of the hardness of an object. The experiment was carried out under five conditions as follows, 1) actual object; 2) actual object without tactile information about the object deformation; 3) actual object without proprioceptive information; 4) virtual object using a force display and 5) virtual object with visual information. The cognitive rates were 94, 82.8, 92.6, 83.6, 90.4%, respectively. The role of visual information was greater than proprioceptive information, however less than tactile information. A method to enhance the hardness display performance by alternating the visual information was proposed and its effectiveness was shown experimentally as the increase of the hardness cognition rate from 90.4 to 93.0%.

**Keywords** : force display, artificial reality, visual sensation, tactile sensation, proprioceptive sensation, hardness

## 1. はじめに

対象に触れることは、人工現実感システムを特徴づける固有技術の一つである。触れることによって使用者が知覚する情報量は増大し、対象物の認知はより正確になる。仮想空間に存在する物体の性状の認知は、触れる、つまむ、なでる、などの能動的な動作に対する対象物の反応を、触覚や固有感覚などの体性感覚情報から知覚する、という相互作用にもとづく作業である。

このうち、物体をつまんだときの硬さの認知は、つまみ動作によって外力を加えたときの変形を知覚する能動触課題であり、認知される硬さは、つまみ動作が終わったときに知覚される力（終端力）が基準となっている、とする報告などがある[1]。すなわち物体の硬さを表現することは、手指の動きと力の関係を制御することに相当する。実現方法には、つまみ力を検出して指先位置を制御する方法、あるいは逆に、指先位置を検出して反力を制御する方法の2種類が考えられる。マニピレータのコンプライアンス制御などでは前者の方法も見られるが、人工現実感における力覚提示方法としては後者が多く見受けられる。

物体の硬さのうちでも、特に、手指でつまんだときの硬さを提示するためのシステムとしては、ワイヤ類を用いて指先を牽引する方法がいくつか報告されている[2,3]。われわれも、硬さ提示のための簡易型指先力覚提示装置を開発し、仮想物体の硬さ識別実験をとおして評価をおこなってきた[4]。また、マニピレータ型の力覚提示装置を複数組み合わせ、それぞれ指先への反力を制御する方法も可能である。

いずれの方法によっても、使用者が知覚可能な対象物の変形情報は、筋紡錘などの固有感覚によって得られる指先の変位のみである。一般には、つまむ対象物が柔らかいと指先が埋没することにより接触面積が増加するため、発火受容器数が増大し、触覚を介した硬さ手がかりも得られる。しかし、力覚提示装置を用いた硬さ提示では、この触覚からの硬さ情報を欠いた状態（以下、単に触覚情報欠如と表記）での硬さ認識を使用者に要求することになる。この触覚情報欠如の問題に関して、力覚のみの硬さ識別は特殊な課題であるため、表面が硬い対象物のメンタルモデルを形成することで硬さ識別率が向上したとの実験結果はあるが[5]、指先が埋没するような様な物体の表現には適用できない。

触覚情報の提示に関しては、ロボットマニピレータの遠隔操作において、振動子を用いて指先に振動感覚をフィードバックすることで誤り率が減少したとする研究[6]、同じく振動子を用いて全身に情報提示できるように

\*1:岩手大学 工学部

\*2:東京農工大学 工学部

\*1: Faculty of Engineering, Iwate University

\*2: Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

したものの[7]、アクチュエータとしてER流体[8]や弾性波動[9]を用いてテクスチャを表現するものなど、さまざまなものが研究、開発されている。しかし、これらの装置は接触の有無や物体表面のテクスチャを提示するためのもので、硬さ認知に関連すると思われる指先接触面積の変化を制御することはできない。接触面積の変化を提示可能な触覚提示装置としては、マトリクス状に配置されたピンによって物体の形状を表現するもの[10]などがあるが、分解能などの点から、現状では力覚提示装置がほぼ唯一の硬さ提示方法と考えられる。

また、人工現実感環境では視覚情報も同時に提示されるため、視覚情報の硬さ認知への影響も考慮する必要がある。Richardらは提示画像のフレームレートに着目し、フレームレートが低い場合には、提示映像をステレオ画像にしたほうが、動く仮想物体をつかむ試行において試行完了時間が短くなる事を示した[11]。飯田らは、線分を提示する際の視覚と触覚のずれの認識について調べた[12]。さらに、視覚と力覚による提示硬さを矛盾させたときの識別結果を調べた研究では、視覚が優位であるとの結果が示唆されている[13]。

すなわち、力覚提示装置だけでは識別できない微小な硬さの差も、視覚情報を改変して硬さ感覚を強調することによって識別が容易になることが推論される。しかし、硬さ感覚の強調という観点から感覚情報を矛盾させた研究はこれまで見られなかった。

そこで本研究では、まず硬さ識別実験をとおして、力覚提示装置を用いて提示される硬さ認知への視覚の影響を、固有感覚および触覚と比較した。その結果、視覚情報は硬さ認知において固有感覚よりも識別率への寄与が大であるが、力覚提示装置では提示されない触覚情報の欠落を補償するには至らないことが示唆された。そのため、さらに視覚情報を改変することによる硬さ提示能力の向上可能性を実験的に検証したので報告する。

## 2. 人間の硬さ認識機構と硬さ提示における問題点

### 2.1 人間の硬さ認識機構

物体の硬さは、外力を加えて変形させたときの、力と変形量の比と考えることができる。物体をつまむ力に関する情報は、固有感覚受容器である腱紡錘からの筋収縮力情報（能動的力感覚）、指先圧受容器の発火頻度の増大（受動的力感覚）、から得られる。さらに筋収縮は大脳運動野からの運動指令にもとづいて発生するので、運動野から感覚野への遠心性コピーも得られる。

物体の変形に関する情報には、対象物がつぶれることによる指先間隔の減少と、指先が埋没することによる接触面積の増大、視覚によってとらえられる物体自体の変形の認知、の3つが存在する。指先間隔の減少は、手指関節角度の変化として、関節受容器や筋紡錘といった固有感覚受容器から得られるとともに、視覚情報から知覚することもできる。指先の埋没による接触面積の増大は、発火する圧受容器数の増大として知覚可能である。さらに、視覚情報からも物体自体の変形を知覚できる。

つまみ動作を介した物体の硬さを認知は、このように、つまみ力と対象物の変形に関する多数の知覚情報を統合することによってなされている。人間の硬さ認知における感覚情報統合過程の構造は明確ではないが、本研究では硬さ知覚に関連する感覚情報を整理するために、図1のように変形と力を知覚した後に、これらの情報から硬さを認知するという2段階の硬さ認知モデルを仮定し、特に力覚提示装置を用いて硬さを提示する場合の問題点と対処方法を検討する。

### 2.2 力覚提示による硬さ提示の問題点と先行研究

力覚提示装置を用いて仮想物体の硬さを提示した場合、使用者が知覚する物体の変形情報は、固有感覚を介した指先変位情報である。すなわち力覚提示装置は、物体が変形して指先が埋没することによる接触面積の変化を表現する機構を持たないため、知覚される触覚情報は

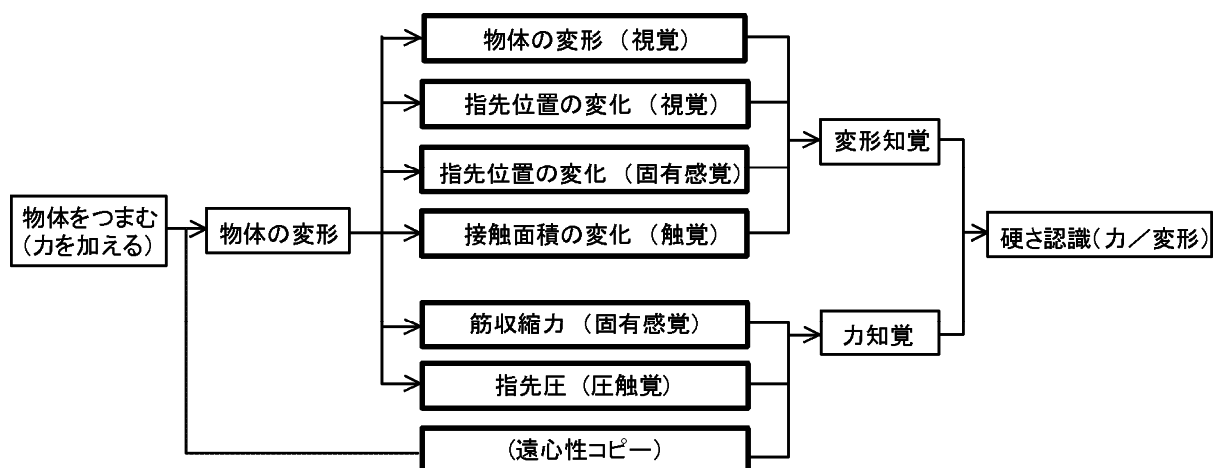


図1 人間の硬さ認識モデル

硬さに関する手がかりを含まない．これが力覚提示装置を用いた硬さ提示の問題点である．

しかし、この触覚欠如の問題に関する検討は、わずかにSrinivasanらの報告がある程度であった．彼らは、触覚と固有感覚の関係について調べ、変形して指が埋没する物体では触覚が優位に、2枚の板ではさんだバネのように指が埋没しない物体では固有感覚が優位に働く、と実験的に述べている[14]．この実験では局所麻酔を用いて触覚を除去し、その前後での硬さ識別率を計測しているが、麻酔後の認識率が約50%と確率レベルであることから、麻酔の固有感覚受容器への影響が否定できない．さらに、バネと板を組み合わせた物体を用いて触覚による硬さ手がかりを除去した実験では、一様に柔らかい物体での実験と硬さの設定が同一でないなど、細部には問題があった．

また、実際の仮想現実感環境では力覚提示装置による固有感覚と併せて視覚情報も提示されるため、視覚情報によっても触覚による硬さ手がかりの欠落は補完される．しかし、硬さ認知への触覚や視覚の寄与率が明らかでない現状では、触覚の欠落に対する補完が十分かどうかは不明である．視覚情報のみでの触覚欠落の補償可能性を検討するためにも、硬さ認知における視覚の寄与率を固有感覚や触覚に対して明らかにすることが重要である．

これまでに、われわれもグローブ型の力覚提示装置[4]と実物体を用いて、触覚、視覚の有無が硬さ認知に及ぼす影響の実験的な検討を行ってきた[5]．実物体を用いた4段階の硬さ識別実験では、触覚が欠如した固有感覚のみの提示に比べて、触覚が存在する場合には約8%と有意な識別率の向上が見られ、力覚提示装置を用いた固有感覚のみの提示法に比べて、映像による視覚情報を加えた場合には約13%の識別率の向上が見られた．しかし、この研究では、力覚提示装置の駆動部分から取得した変位情報を用いて提示映像を生成していたため、提示される物体の変形量は実際の指先変位量と異なっており、視覚情報の寄与が過大に評価されていた．また、能動触課題での実験であったため、固有感覚の硬さ認知への寄与率も不明であった．

そこで3章では、示指のみでの触課題として受動触課題を加えた実物体での硬さ識別実験、および力覚提示装置とは独立に指先変位を計測して映像を生成するように改善した力覚提示実験系を用いた硬さ識別実験、をおこない、触覚、視覚、固有感覚の寄与率を識別率の点から検討する．

### 2.3 視覚情報の改変による硬さ感覚の強調

視覚と力覚による提示硬さを矛盾させたときの硬さ識別では、視覚が優位であるとの報告[13]から類推すると、視覚からの変位情報を改変することで硬さを強調して表示すれば、システム全体としての硬さ提示能力が向

上することが期待される．視覚情報を改変すると固有感覚と視覚での変位情報が矛盾するが、固有感覚の絶対位置精度は低いため、HMDを用いた没入型の人工現実環境であれば視覚優位の位置知覚がおこなわれ、矛盾は表面化しにくいものと予想される．したがって、位置精度が要求される遠隔手術や実空間と仮想空間が重畳する開放型の環境では問題があるが、閉鎖型人工現実環境を利用したアミューズメント等の応用では、むしろ視覚情報の改変により実物体を素手で触るのと同等の硬さ感覚が提示可能なのであれば、触覚提示装置を用いるよりも積極的に視覚情報改変手法を用いる方がコスト面で有利になると期待される．

そこで4章では、視覚情報の改変による硬さ感覚の強調という新たな概念を提案するとともに、視覚情報を改変することによる効果を識別率の面から検証し、視覚情報改変の有効性を示す実験を行った．さらに5章では、4章での実験結果にもとづき、視覚情報改変時の、改変量と知覚量の関係を実験的に検討する．

## 3. 提示情報間の寄与率評価実験

### 3.1 力覚提示グローブ

本実験では、硬さ提示装置として図2の指先力覚提示グローブを用いた[4]．本装置は、図2のように、指先に仮想物体からの反力を提示するグローブ部、ワイヤを牽引する牽引装置、牽引装置のモータを制御するモータ制御回路、によって構成される．使用者がつまみ動作をおこなうと、ワイヤが牽引され、ワイヤの変位がポテンシオメータにより検出される．サーボ回路は、この引き出し変位に比例した電流をモータに供給するので、指先変位に比例した反力が、牽引装置によって指先に提示される．駆動にはDCコアレスモータを使用し、ロータ慣性の影響を低減した．ワイヤ牽引部の静止摩擦は約0.3Nである．

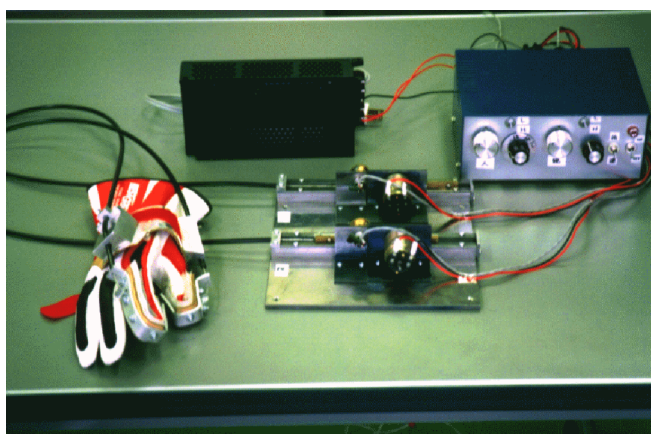


図2 仮想物体の硬さを表現する力覚提示グローブ

3.2 実験方法

実験では、指先力覚提示装置および、実物体として軟式テニスボールを用いた識別実験をおこなった。被験者は21歳から37歳の健常男子被験者10名で、課題は、以下の5課題である。

- ・課題1 (P+T)  
素手での実物体の硬さ判別
- ・課題2 (P)  
塩化ビニル板付指サック装着での実物体の判別
- ・課題3 (T)  
素手で、指先に押し付けられた実物体の硬さを判別
- ・課題4 (P)  
力覚提示装置での仮想物体の硬さ判別
- ・課題5 (P+V)  
力覚提示装置+モニタ上に物体表示  
(V: 視覚, P: 固有感覚, T: 触覚)

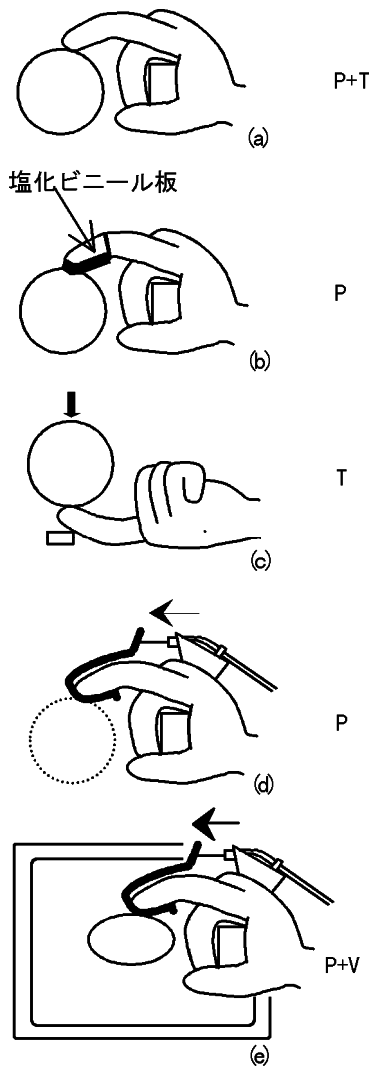


図3 実験条件(a)課題1, (b)課題2, (c)課題3, (d)課題4, (e)課題5 (V: 視覚, P: 固有感覚, T: 触覚)

人間の硬さ知覚量は物理量の対数に比例するため、力覚提示装置では、対数が等間隔になるように4段階の硬さを設定した。実物体は、実験時の硬さが力覚グローブで提示される実際の硬さと同一になるように、以下の手順で硬さを調節した。1)グローブのアタッチメントと指先の間に荷重計を設置して、変位と荷重の関係を測定し、2)計測された硬さと同じ傾きになるように、マイクロメータヘッドを用いて荷重計をボールに押しつけ、ボールの硬さを調節した。ただし力覚提示装置での硬さ測定に際しては、指先のクリープ現象の影響を受けないよう、各位置における反力が定常状態になった時の値を測定した。図4が設定した硬さである。今回の実験では、力覚提示装置の硬い物体の提示特性の低下を反映し、硬さCとDが近い設定になっている。また実験時に接触する部分の表面曲率が全硬さで同程度になるように、実物体は塩化ビニル製のリングで拘束した。

実験では、被験者は全ての課題において、示指のみを用いて硬さを識別させた。課題2では、触覚による硬さ手がかりを排除し、固有感覚のみで物体の硬さ判別をさせるため、被験者の示指に塩化ビニル板を取り付けた指サックを装着した。課題3では、固有感覚を欠落させるために、手の甲を下にして被験者の手を台の上に固定し、示指の指先に等しい力でボールを押し付けた。視覚の寄与率を調べる実験は、実物体では試料(ボール)の外観から硬さ識別が可能であるため実験不可能であったため、力覚提示グローブを用いて実験をおこなった。課題4では力覚提示装置のみとし、課題5では仮想物体の変形をコンピュータのディスプレイを介して被験者に提示した。力覚提示装置のポテンショメータが検出する変位は、ワイヤの屈曲などにより指先位置を正確には反映していないため、ディスプレイに表示する変位は、指先に取り付けられたゴニオメータの検出する指の曲げ角より算出した。

各課題とも、提示された2つの硬さを比較し、1)前者が硬い、2)後者が硬い、3)硬さが同じの3つの中から1つを回答させる、三者択一の対比較課題とし、全組み合わせ(同じ硬さを含む10組)を5回識別させた。実験では、全課題において前腕および手を箱で覆い、視覚情報を遮断した。また、被験者の習熟度の個人差を低減

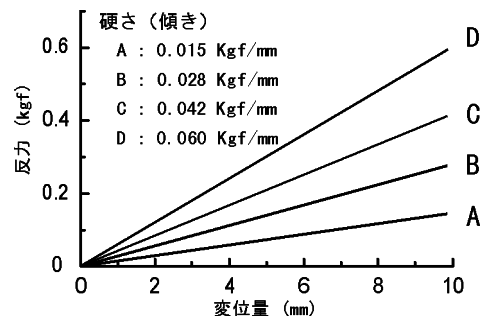


図4 設定したボールの硬さ

するため、全被験者とも事前に実験課題と同一の硬さ識別課題をおこない、1週間以上経過後に実験課題をおこなった。また実験時には、各条件での課題開始前に、全硬さ各1回の触作業をおこなった後に実験をおこなった。

### 3.3 実験結果

識別率の各条件での平均を図5に示す。誤差棒は識別率の標準偏差である。二つの固有感覚のみの提示法（課題2, 4）による識別率は82.8%と83.6%と、ほぼ同一の値となっていることから、力覚提示装置と実物体の硬さがほぼ一致していることが確認できる。

固有感覚と触覚が存在する場合（課題1）には、約11%の識別率の向上が見られた。識別率には個人差があるため対応つきt検定をおこなったところ、危険率1%で有意であった。それに対し、触覚のみの提示法（課題3）と固有感覚と触覚が存在する場合（課題1）の両者を比較すると、1.4%の差しかない。さらに、力覚提示グローブによる固有感覚のみの提示法（課題4）と視覚情報を強調なしに提示した場合（課題5）の両者を比較すると、視覚情報によって6.8%と有意（危険率1%）な識別率の向上が見られた。

さらに、各硬さ組合せの識別率をもとに、統計的に心

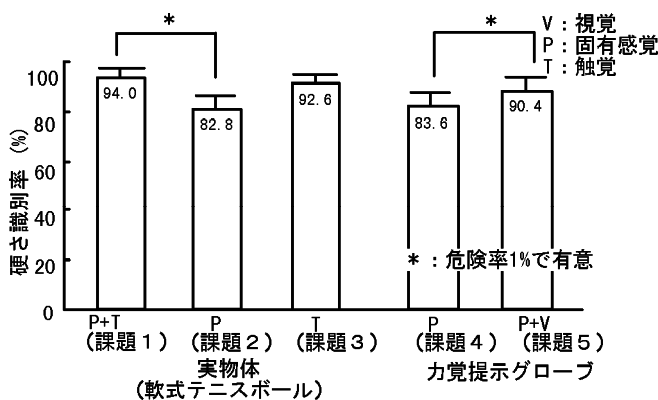


図5 変位情報が特定感覚に提示されたときの硬さ識別結果（10人）

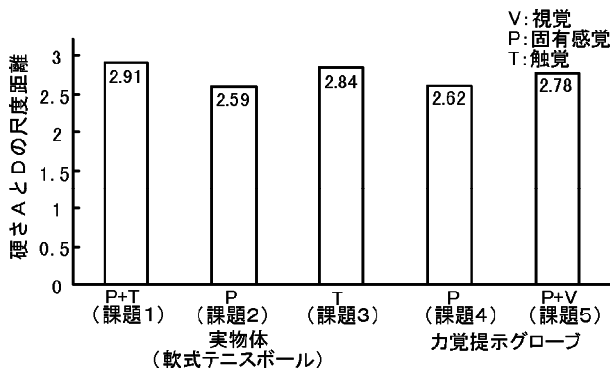


図6 各条件での組合せ別識別率から間隔尺度を構成したときの硬さAから硬さDまでの距離

理的間隔尺度を構成する手法の一つであるThurstoneの方法[15]に準じて、硬さの間隔尺度を条件ごとに算出したときの、硬さAから硬さDまでの距離をまとめたものが図6である。それぞれの心理的距離は、各条件での硬さ感覚提示能力を反映しているものと見なすことができる。触覚の欠落による間隔尺度の減少は0.32、固有感覚が0.07、視覚が0.16と、各条件での平均識別率である図5と同様の傾向となった。

### 3.4 検討

感覚の有無による識別率の変化は、触覚11%、固有感覚1.4%に対して、視覚は6.8%であった。実物体と力覚提示装置、と実験環境は異なるが、硬さを認識する上での変位情報の中では、触覚の寄与が大きく、次いで視覚の寄与が大きい結果となった。固有感覚欠落時の識別率低下が1.4%と小さいのは、課題3では、自分で指を動かさなくても良い分、識別に集中できたとの指摘が複数の被験者からなされたことからもうかがえるように、他の能動触の課題と異なり、課題3では被験者の指に物体を押し付ける、いわゆる受動触の課題であるため、認知過程における各種知覚情報の重みが変化して、普通に物体を触らせた課題1よりも触覚の寄与が大きくなったためではないかと考えられる。

いずれにしても、比較的狭い硬さ範囲での実験ではあるが、力覚提示装置が提示できる固有感覚のみでは硬さの提示能力は十分ではなく、視覚は固有感覚より大きく硬さ認知に寄与するが、触覚の欠落を補償するものではない。すなわち、識別率の面から見ると、視覚情報をそのまま提示しただけでは、視覚情報によって触覚情報の欠落の影響を補うのは難しいといえる。そこで次章では2.3節で提案した、触覚情報の欠落を補うために視覚情報を改変し、それによって硬さ感覚を強調する方法の有効性を実験的に検討する。

## 4. 視覚情報改変による効果の検証実験

### 4.1 実験条件

本実験では、3章の実験で用いた力覚提示グローブとディスプレイを用い、3章の実験と同一の被験者に對し、以下の2課題で実験を行った。

- ・課題6 (P+V改変, 硬さA基準)  
力覚提示装置 + モニタ上に表示する物体の変位を, 対数軸上で, 一番柔らかい硬さAを基準として改変
- ・課題7 (P+V改変, 中央値基準)  
力覚提示装置 + モニタ上に表示する物体の変位を, 対数軸上で, 中央値を基準として改変

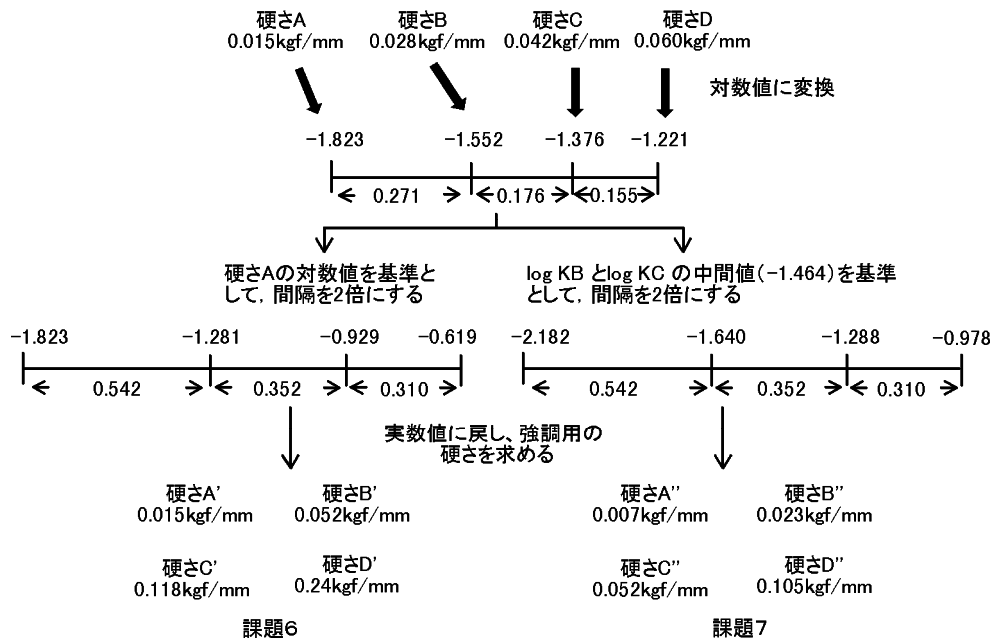


図7 硬さ強調のための視覚変位情報の改変過程

課題6, 7では、以下の手順に従って視覚情報改変の割合を決め、仮想物体の変位を改変して被験者に提示した。

- 1) ボールの硬さを対数に変換し、図7に示すように、課題6では硬さAに、課題7では硬さBと硬さCの中間点を基準として各硬さの間隔を2倍にする。
- 2) 1)で算出した値を実数値に戻し、視覚情報改変のための硬さを求める。

このようにして求めた硬さに従って提示するための変位を求め、反力は図4に示したままで、ディスプレイに表示する物体の変位のみを改変して被験者に提示した。以上の過程を式にまとめる。実変位をX(mm)、基準値をR、対数軸上で間隔を広げた割合をM、とすると、提示する硬さがK (kg/mm) ( : A, B, C, D)のときの改変された変位X (mm)は、

$$X = \frac{K \cdot X}{10^{R+M(\log K - R)}} \quad (= \text{硬さ}') \quad (1)$$

表1 実変位1mmに対する視覚提示変位

	課題6	課題7
硬さA	$1 \times (\text{硬さA} / \text{硬さA}') = 1.0\text{mm}$	$1 \times (\text{硬さA} / \text{硬さA}'') = 2.28\text{mm}$
硬さB	$1 \times (\text{硬さB} / \text{硬さB}') = 0.53\text{mm}$	$1 \times (\text{硬さB} / \text{硬さB}'') = 1.22\text{mm}$
硬さC	$1 \times (\text{硬さC} / \text{硬さC}') = 0.36\text{mm}$	$1 \times (\text{硬さC} / \text{硬さC}'') = 0.82\text{mm}$
硬さD	$1 \times (\text{硬さD} / \text{硬さD}') = 0.25\text{mm}$	$1 \times (\text{硬さD} / \text{硬さD}'') = 0.57\text{mm}$

のように表される。今回は対数軸上での間隔を2倍にしたので、課題6, 7共にMの値は2である。また、課題6では、基準は硬さAの対数値なので、R=-1.823、課題7では基準は硬さBと硬さCの対数値の中間値なので、R=-1.464となる。課題6, 7において、実変位が1mmのときの、各硬さに対応する表示変位を表1に示す。

本実験においても、各課題は3章と同一の三者択一の対比較課題であり、識別させた回数、設定した物体の硬さ、大きさはいずれも3章と同じである。

#### 4.2 実験結果

識別結果は図8のように、視覚による変位情報を改変しないで提示する提示法(3章の実験の課題5)に対し、硬さAを基準として視覚による変位情報を改変した提示法(課題6)では、有意差は得られなかったが、2.6%の識別率の向上が得られ、硬さの対数値の中央値を基準として視覚による変位情報を改変した提示法(課題7)では、課題5と比べて3%と統計的に有意(対応つき

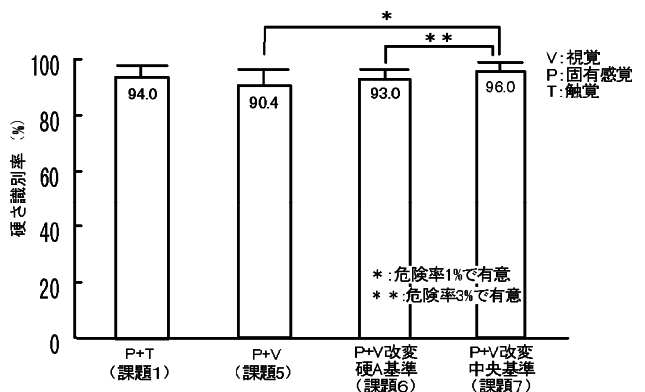


図8 視覚情報による硬さ識別率の向上 (10人)

t検定で危険率1%)な識別率の向上が得られた。さらに、課題6、課題7ともに素手で軟式テニスボールを触る課題(3章の実験の課題1)と比べて、ほぼ同等あるいは以上の識別率が得られた。

#### 4.3 検討

上記の通り、課題6、7において、課題1とほぼ同等の識別率が得られたことより、視覚情報の改変によってシステム全体の硬さ提示能力がさらに向上し、少なくとも識別率の面では、触覚の欠落による影響を一部ではあるが補える事が示された。これより、視覚情報改変が許容される環境下では、触覚提示装置を用いるよりも、視覚情報を改変したほうが低コストで硬さ提示能力を向上させ得ることが示された。

しかし、課題6では課題5との差を認識できなかった被験者が見られたのに対し、課題7では、変位の改変量が大きすぎたために、固有感覚との矛盾による多数の被験者が違和感を指摘した。今後は、違和感を感じさせない改変率の範囲を明確にしていくことが、力覚提示装置の提示能力改善のためには重要と考えられる。

またここで、視覚改変の手法に着目すると、課題6に対し、課題7では3%と、統計的に有意(危険率1%)な識別率の向上が見られた。一般に、感覚の知覚量は、その感覚の物理量の数値に比例するといわれており、力覚提示装置を用いた硬さ認知でも同様であった[4]。課題6と7は、強調の基準が異なり、課題6では硬い仮想物体ほど変位量を少なく提示する操作を、課題7では硬さA、Bの仮想物体は変位量を多く、硬さC、Dの仮想物体は変位量を少なく提示する操作をしている。そのため、先に図7、表1で示した通り、改変後の変位は2条件で差があるが、対数軸での硬さ間隔および変位の対数の間隔は、両条件で同一である。視覚改変による強調効果が、力覚提示装置単体での硬さ知覚特性と同じく、硬さの対数に比例するのであれば、両者の識別率は同程度となるはずである。しかし実験結果から見ると、視覚改変時の硬さ感覚強調効果は、硬さの対数拡大率ではなく、視覚的に提示した変位操作量に比例する傾向を示した。そこで、硬さ感覚強調効果は視覚的変位操作量に比例するとの仮説をたて、次章に示す検証実験を行った。

表2 各課題での硬さ拡大率と変位操作量

	硬A基準	中央基準	硬D基準	4章課題7
$X_A - X_D$ (提示変位の差)	12.5mm	14.3mm	14.3mm	28.5mm
$\log X_A - \log X_D$ (変位の対数の差)	1.204	0.784	0.724	1.455
硬さ拡大率	2	1.3	1.2	2

提示変位は0.2Kgf印加時の値

## 5. 視覚改変効果と視覚的変位の関係の解析

### 5.1 実験方法

上記の実験課題6、7と同様に、最も柔らかい硬さA、中央値を基準にして対数軸での硬さの間隔を拡大する手法のほかに、最も硬い硬さDを基準として対数軸での間隔を広げる条件を加え、3つの実験条件を設定した。さらに、改変後の変位の差を3つの課題間で一定に近づけるために、硬さAを基準とする場合は対数軸上での間隔を2倍に、中央を基準とする場合は1.3倍に、硬さDを基準とする場合には1.2倍に拡大した。よって、4.1で示した式(1)において、硬さAを基準とする場合には、 $R=-1.823$ 、 $M=2$ (4章の課題6と同一の値)、中央値を基準とする場合には、 $R=-1.464$ 、 $M=1.3$ 、硬さDを基準とする場合には、 $R=-1.221$ 、 $M=1.2$ を代入し、提示変位を求めた。0.2Kgfの力を加えたときの、各課題下における硬さAと硬さDを提示した場合の画像提示変位の差と、その対数値を表2に示す。今回の3条件では変位の差がほぼ一定であること、硬さ拡大率および変位の対数の差は異なっていることが読み取れる。

この3条件で、先の実験の被験者10名に対し、同様の三者択一の対比較課題による検証実験を行った。なお、提示した硬さ、物体の大きさ、被験者への指示や手順は先の実験と同一とした。

### 5.2 実験結果

識別結果は図9のように、硬さA基準、中央基準、硬さD基準の3条件において、識別率はほぼ同等であり、有意差もなかった。さらに、3条件の識別率は93~94%と、4章の実験における課題6の判別率とほぼ同等の値が得られた。

### 5.3 検討

視覚改変時の硬さ感覚の差が、変位改変に用いた硬さの対数の差ではなく、視覚的に提示される変位の差に比例するという仮説が正しいのであれば、今回の実験では、各課題における識別率の間には、大きな差は生じないはずであり、また、各課題における識別率は、4章の

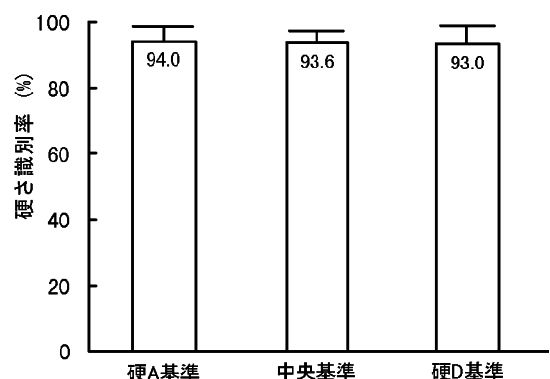


図9 検証実験における硬さ識別結果(10人)

実験の課題6の識別率とほぼ等しい値となるはずである。上記の通り、各条件の識別率は、ほぼ同等であり、4章の実験における課題6の判別率とほぼ一致する値を示した。また、3つの条件の違いが認識できず、同一の条件を3回繰り返していたと誤認する被験者も多かった。このことから、力覚提示装置を用いた硬さ知覚は物理的硬さの対数に比例する対数則に従う[5]が、視覚変位の硬さ感覚の強調効果は、硬さの対数拡大率ではなく視覚的に提示される変位の改変量に比例することが明らかになった。視覚的に知覚される変位情報は、「見え」の距離が同一であれば視角の対数ではなく視角に比例する[16]、といわれていることから考えると、比例則となったことは妥当な結果と考えることができる。

さらに、本章の実験では、4章の課題7ほどの大きな違和感を感じた被験者はおらず、また、3条件のうちのどれか特定の条件に対して際立った違和感を感じた被験者もいなかった。このことから、変位の改変量が違和感の主たる要因であったと考えられる。

## 6. まとめ

人間の硬さ認知における視覚の寄与を触覚、固有感覚と実験的に比較し、力覚提示装置を用いた硬さ認知における視覚情報改変の効果、実物体と力覚提示装置を用いて実験的に検証した。その結果、固有感覚よりも触覚の方が優位であること、さらに視覚よりも触覚のほうが優位であること、視覚情報を改変して提示することにより装置の硬さ提示能力が向上し、固有感覚、触覚の双方が存在する場合の硬さ識別とほぼ同等の識別率が得られること、が明らかになった。

この実験結果より、視覚情報改変が許容される環境下では、触覚提示装置を用いずとも、視覚情報を改変して提示することによって、力覚提示装置を用いた硬さ提示における触覚情報からの硬さ手がかり欠如の問題を、識別率の点では補えることが示された。

さらに、視覚改変の手法が異なる2つの課題間での識別率に有意差が生じたことから、視覚改変による硬さ感覚強調効果は、硬さの対数拡大率ではなく、視覚的変位の改変量に比例するとの仮説が得られ、検証実験により確認された。

今後は、力覚提示装置の使用者に違和感を与えずに高い強調効果を得られる改変量の範囲を明らかにすることで、力覚提示を持つ人工現実感システムを構成する際に、目的に応じたコストと識別率のトレードオフが可能になるものと期待される。

## 参考文献

[1] H.Z.Tan, N.I.Durlach, G.L.Beauregard, and M.A.Srinivasan, "Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force

and work cues", *Perception & Psychophysics*, vol.57, no.4, pp495-510(1995)

- [2] 岩田, 中川, 中島: "仮想立体の硬さを表現するためのフォースディスプレイ", *ヒューマンインターフェースシンポジウム*, pp55-58(1991)
- [3] 金井, 高橋: "人工現実感生成システムの自由曲面モデリングへの応用", *日本ロボット学会誌*, vol.10, no.7, pp898-902(1992)
- [4] 藤田: "グローブ型仮想物体硬さ感覚提示装置の試作と評価", *電子情報通信学会論文誌*, vol.J81-D, no.10, pp2394-2400(1997)
- [5] 藤田, 奥田: "仮想物体の硬さ認識における力覚と触覚の寄与の検討", *ヒューマンインターフェースN&R*, vol13, no.2, pp139-142(1998)
- [6] A.M.Murray, R.L.Klatzky and K.B.Shimoga, "Touch Feedback Using Binary Tactor Displays: Unexpected Results and Insights", *Proceedings of ASME Dynamic Systems and Control Division*, vol.61, pp3-9(1997)
- [7] 矢野, 小木, 廣瀬: "振動子を用いた全身触覚提示デバイスの開発", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.3, no.3, pp141-147(1998)
- [8] 野間, 北原, 宮里: "電気粘性流体を用いた触覚提示装置の開発-実験機のための数値シミュレーション", *ヒューマンインターフェースN&R*, vol.13, no.2, pp143-150(1998)
- [9] 奈良, 柳田, 前田, 館: "弾性波動を用いた皮膚感覚ディスプレイ", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.3, no.3, pp89-97(1998)
- [10] 下条, 篠原, 福井: "3次元触覚ディスプレイにおける提示ピン配置密度と形状判別特性", *電子通信学会論文誌*, vol.J80-D, no.5, pp1202-1208(1997)
- [11] P.Richard, G.Birebent, P.Coiffet, G.Burdea, D.Gomez, N.Langrana, "Effect of Frame Rate and Force Feedback on Virtual Object Manipulation", *Presence Teleoperators and Virtual Environments*, vol.5, no.1, pp95-108(1996)
- [12] 飯田, 奥戸, 柳田, 前田, 館: "線分提示角度差異の視触覚融合に与える効果", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.3, no.3, pp107-110(1998)
- [13] M.A.Srinivasan, G.L.Beauregard and D.L.Brock, "The impact of visual information on the haptic perception of stiffness in virtual environments", *Proc. ASME Dynamic Systems and Control Div.*, vol.58, pp555-559(1996)
- [14] M.A.Srinivasan, and R.H.Lamotte, "Tactual Discrimination of Softness", *Journal of Neurophysiology*, vol.73, no.1, pp88-101(1995)
- [15] 増山, "心理学的尺度構成法", *新編感覚・知覚心理学ハンドブック*, 大山, 今井, 和気編, 誠信書房, pp41-67(1994)
- [16] 東山, "空間知覚", *新編感覚・知覚心理学ハンドブック*, 大山, 今井, 和気編, 誠信書房, pp768-801(1994)