

グローブ型仮想物体硬さ感覚呈示装置の試作と評価

藤田 欣也^{*}

Development and Evaluation of Force Feedback Glove for Hardness Display of Virtual Object

Kinya FUJITA^{*}

あらまし 仮想物体の硬さ呈示を目的としたグローブ型力覚呈示装置を試作した。本装置では、母指と示指に装着したアタッチメントをワイヤを介してDCサーボモータでけん引することで、指尖部への反力を制御する。手指のMP関節およびPIP関節に作用するトルクの比率が実際に物体を把持したときと同一になるように、人間の身体比率に基づいて、アタッチメントおよび手背の台座部分の高さを最適化した。本装置によって呈示可能な硬さ情報の評価を被験者12名で行ったところ、4段階の硬さ判別実験で平均識別率73%を得た。感覚軸上での間隔距離を求めたところ、硬さの知覚量は、聴覚等と同様に、硬さの物理量の対数に比例することが示された。

キーワード 力覚フィードバック、人工現実感、人間機械系

1. ま え が き

人工現実感システムにおいて現在主流となっているのは、グローブ状の入力装置とプロジェクタやヘッドマウンテッドディスプレイなどの出力装置を用いたものである。この種のシステムでは、柔らかいボールの把持のような操作者と仮想物体との力学的相互作用を伴う作業を行おうとすると、物体からの力学的情報が得られないため作業が困難であった。これを改善するためには、視覚に加えて、触覚や力覚といった体性感覚系への情報フィードバックが重要と考えられ、さまざまな研究が行われてきた。

対象物からの反力を呈示するためには、使用者の動作を検出して仮想物体との相互作用による反力を算出すると共に、その反力を呈示する装置が必要となる。このとき、反力呈示装置の設計上の重要なパラメータとなるのが自由度数と可動範囲である。一般に、自由度数が多く、可動範囲が大きくなるにつれ、力覚呈示装置の実現は困難になる。

反力を伝達する方法は、大型のマニピュレータを用いて、手の位置変化に対する反力をフィードバックするシステム[1]や、動作範囲を限定してパラレルリンクを用いて精度を改善し、手指への反力呈示を付加したシステム[2]などがある。また、糸を用いて指先の移動

に対する反力を呈示する方法[3]や、XYプロッタを用いた2次元作業平面での手先の移動に対する反力呈示[4]なども試みられている。更に、作業空間座標系ではなく、関節座標系での力覚を呈示する方法なども提案されている[5],[6]。中でも、仮想物体の硬さを呈示する方法としては、指先への反力呈示をマニピュレータを用いて行う方法や、ワイヤを用いて行うシステムなどがある[7],[8]。

本研究で想定した仮想物体の硬さ呈示に限定すると、マニピュレータ型は、手の可動範囲を大きくとるとマニピュレータのアーム長が大きくなり、動作範囲にも身体が邪魔になるなどの理由で制限が生じやすい。また、硬さ呈示のためには、床など装置が固定されている部分から各指への反力を独立に制御するため、非常に高い装置剛性と制御精度が必要になる。対して装着型は、柔らかい生体に装着するため、生体の変形による誤差が生じやすいが、上肢の運動を制限しない点が利点となる。また、手に装置を固定しての手から手指への反力呈示であれば、構造を小型化、簡略化できるため、つまみ動作における物体からの反力呈示は、比較的容易に実現可能である。

しかし装着型は、各関節への反力を個別に制御しようとする構造が複雑化して制御が困難になり、更に指先まわりの突出部が大型化して、実空間において作業の障害になる可能性がある。そこで本研究では、人間の手の幾何学的構造に基づいて、1本のワイヤで指

^{*} 岩手大学工学部情報工学科, 盛岡市
Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka-shi, 020-8551 Japan

の2関節への反力を同時に制御すると共に、アタッチメントを用いて指先突出部を小型化した。硬さ呈示のためのグローブ型指先力覚ディスプレイ装置の試作を行った。

また従来の力覚呈示装置の評価報告は、視覚など他の情報呈示装置との併用環境での作業効率の評価が主であり、力覚呈示システムを単独で用いたときの硬さ知覚量計測の試みは見受けられない。そのため力覚呈示装置単体での知覚情報呈示能力は不明であった。そこで本研究では、仮想物体の硬さ識別実験によって、硬さ感覚の呈示能力の評価を行い、単純化したワイヤ式硬さ呈示装置単体によっても、硬さの呈示が可能であることを確認した。

2. 硬さ呈示装置

2.1 装置の構造

本装置は、図1のように、指先に仮想物体からの反力を呈示するグローブ部、ワイヤをけん引するけん引装置、けん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行うと、ワイヤがけん引され、ワイヤの変位はポテンショメータにより検出される。サーボ回路は、この引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、けん引装置によって指先に呈示される。

2.1.1 グローブ部

本装置では、図1のようにアタッチメントを採用することで、ワイヤのけん引力を指先への反力に変換し

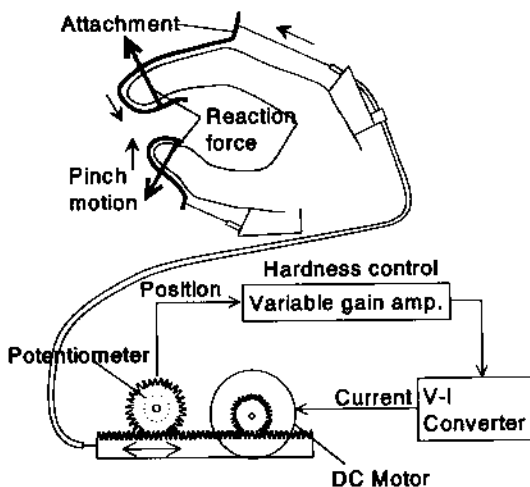


図1 硬さ感覚呈示用指先力覚ディスプレイ装置の概要
Fig. 1 Fingertip force display system to display the hardness of a virtual object.

た。手指を支点とした回転運動によって、指の軸方向のけん引力を指先への反力に変換する方法である。生体を支点とするため機械の精度は低下するが、指先まわりの突出を最小限にすることができるため、力覚呈示装置の指先まわりの突出による作業制限が抑制できるのが利点である。

本装置では指の制御を単純化するために、図2(a)のように示指ではDIP関節（遠指節間関節）を固定してPIP関節（近指節間関節）とMP関節（指節基節骨関節）の2関節をワイヤ1本で制御した。ここで、実際に物体を把持したときの、MP関節およびPIP関節まわりのトルクは、図2(b)のように物体からの反力の関節まわりの成分と関節から指先までの距離の積($F_m \cdot L_m$ および $F_p \cdot L_p$)となる。CCDカメラと画像取込みボードおよ

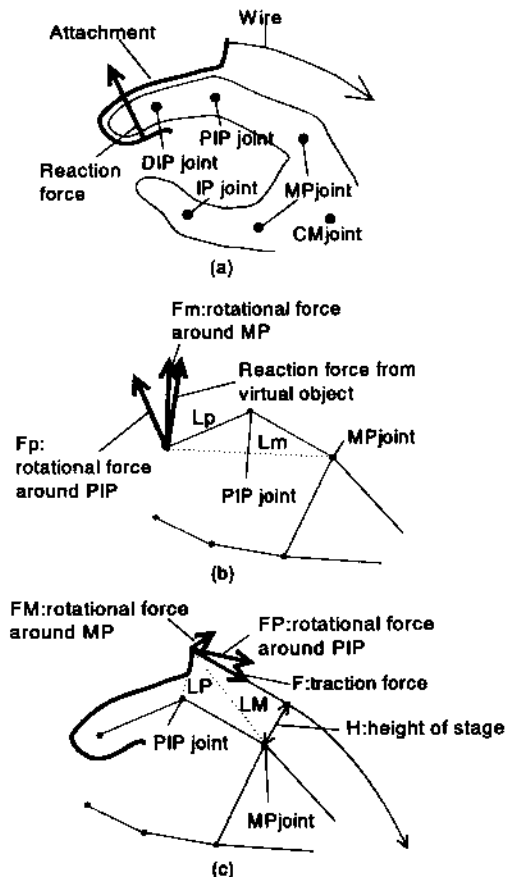


図2 指先力覚ディスプレイ装置における(a)関節位置と力の幾何学的関係、および(b)物体つまみ時と(c)力覚ディスプレイ使用時の力とモーメント
Fig. 2 Geometrical relationship between finger joints and applied forces(a). Applied forces and joint moments in actual pinch motion (b), and pinch motion with the force display system.

び計算機を用いて実測した、物体把持中の手のモデルに基づいて計算したところ、トルク比率は物体の大きさが70 mmのときの示指でMP:IP=67:33、母指で73:27であった。

一方、ワイヤけん引によって発生するPIPとMP関節のトルクは、図2(c)のようにアタッチメントがけん引される力の関節まわりの成分と、関節からアタッチメントけん引部までの距離の積(FM・LMおよびFP・LP)となる。図2(c)の両関節まわりのトルクの比が図2(b)におけるトルクの比に等しいとき、ワイヤけん引によるトルクは、実際に物体をつまんだときと同様の効果をもつ。そこで、ワイヤ台の高さ、アタッチメントの高さ、アタッチメントの角度を変数として、2関節のトルクの比が等しくなるように計算機を用いて最適化を行った。その結果、アタッチメントの屈曲角度105度、アタッチメントのアーム長20 mm、台座部の高さ35 mm(母指は10 mmと24 mm)が得られた。

また母指と示指をけん引するワイヤのガイドを固定する二つの台座部分が十分強固に固定されていないと、母指のCM関節(手根中手関節、図2(a))が運動し、2指の指先間距離が変化して硬さの誤差要因となる。そこで、図3のように、グローブの手背部に厚さ0.5 mmの金属板を装着し、その上に台座を固定することで、CM関節の運動を制限した。

2.1.2 ワイヤけん引装置

けん引装置部は、上肢の運動を妨げないように、また、その質量が動作時の負荷とならないように、ワイヤ長を1 mとして、けん引装置部は据置きにした。その結果、グローブ部分の質量は300 gとなった。けん引は、図1のようにラックとピニオンギヤを用いてモータの回転トルクをワイヤけん引力に変換した。ワイヤ

の変位は、ポテンシオメータを用いて検出した。ポテンシオメータの出力は、指先変位を反映しているの、本装置は反力呈示装置として働くと同時に、入力装置としての機能も有している。モータのロータ部分の慣性モーメントは、モータ非駆動時に負荷として作用するため、DCコアレスモータを使用して、ロータ慣性の影響を低減した。ロータ部分の慣性モーメントは18 gcm²である。

2.1.3 モータ制御回路

図4の回路は指の屈曲/伸展によるワイヤ変位を検出し、電圧-電流変換回路を介してDCモータ電流を制御するフィードバック回路である。仮想物体の大きさは差動増幅回路により、仮想物体との接触/非接触は整流回路によって表現した。仮想物体の硬さは、指先での物体押込み量と、物体表面から指先への反力の比であり、本装置では、電圧-電流変換回路の前の可変ゲイン増幅器によって実現した。仮想物体の大きさおよび硬さは、外部電圧による制御可能である。また本システムでは反力呈示対象が母指と示指のみであり、2指つまみ動作において2指への反力は同一であることから、両指への反力は両指先変位の平均値に基づいて呈示した。回路上は、各指への個別フィードバックも可能である。

2.2 駆動部の電気機械的特性

ワイヤけん引装置単体での特性を図5に示す。図5中の数値Gは、図4中の可変ゲイン増幅器の倍率で、仮想物体の硬さに相当する。ラック部分の変位と指先の変位の関係は、示指の場合の実測値でラック変位の10 mmが指先変位の40 mmに相当し、図示した4段階の指先での硬さは、0.066, 0.18, 0.50, 1.32 N/mmとなる。このときのダイナミックレンジは約26 dBである。モータ保護回路の電流制限によるけん引力の飽和が約10 Nで見られる。事前に荷重計を用いて計測したところ、成

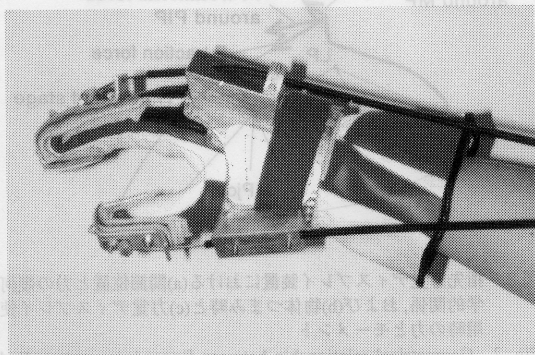


図3 力覚ディスプレイ装置の概観

Fig. 3 Overview of the developed force display system.

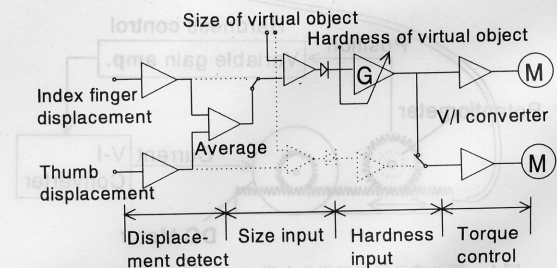


図4 力覚制御回路の動作

Fig. 4 Reaction force control circuit.

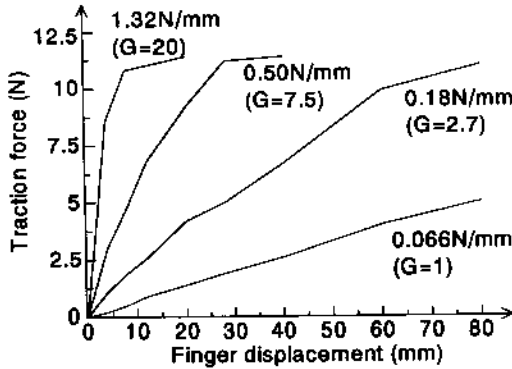


図5 力覚制御装置の特性(図中の値は仮想物体の硬さと可変ゲインアンプの増幅率)

Fig. 5 Property of the reaction force control unit. G represents the amplifier gain. The numbers are the hardness of the displayed object.

人男子の最大努力つまみ時のワイヤけん引力は20 N程度であり、その約50%に相当する。非飽和領域内では、良好な線形性が得られている。

また、図4の電圧電流変換回路を計算機とDA変換器を用いて直接制御し、このときのけん引部のけん引力をロードセルを用いて計測して、非飽和領域内で8 bit以上の分解能が得られることを確認した。ワイヤけん引部単体での非駆動時の静止摩擦は約0.3 Nであった。

3. 実験方法

本研究では物体の把持動作を母指と示指のつまみ動作に限定し、つまみ動作時に母指のCM関節の運動を制限するため、手背部の金属板に加えて、手掌部に円筒形の物体を押し当てベルトで固定した。本装置では、可変ゲイン増幅器を用いて硬さを表現しているため、硬さを連続的に変化させることが可能であるが、人間の知覚量は物理量の対数に比例することが聴覚などで知られていることから、硬さ感覚も同様であるという予想に基づき、硬さの対数が等間隔になるように、図5の4段階の硬さを用いて実験を行った。本実験とは別に、各種物体の押込み量と反力を計測したところ、設定した4段階の硬さは、柔らかいゼラチンから柔らかいシリコンゴム、あるいは軟式テニスボールの完全に空気が抜けた状態から可能な限り空気を入れた状態以上、に相当しており、実在の物体では十分に識別可能と予想された設定である。

硬さ識別実験は、4段階とも、それぞれ大きさ30, 50, 70 mmの各3段階で行った。実験前、被験者には硬さ

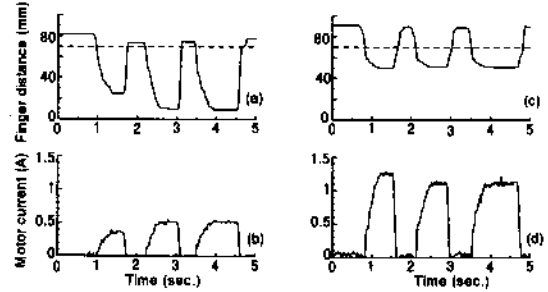


図6 (a,b)硬さ0.066(N/mm)と(c,d)0.50(N/mm)の仮想物体つまみ動作における指先変位とモータ電流

Fig. 6 Displacement of the finger tip (a,c) and the motor driving current (b,d) in the pinch motion of the force virtual object with 0.066(N/mm)(a,b) and 0.50(N/mm)(c,d) hardness.

の4段階、大きさの3段階をあらかじめ呈示した。また実験中には、視覚による指先変位情報が得られないように、被験者に手先が見えないようにした。実験は、最も被験者に回答が容易な一対比較法とし、二つの硬さを順番に呈示して、ⒶⒷ前者が硬い、ⒸⒹ後者が硬い、ⒺⒻ同じ硬さ、の3者から回答を選択させた。1度目の呈示で識別できないときは1度だけ再試行を許した。硬さの組合せが、同じ硬さも含めて10通りなので、大きさ3段階で、総試行数は30である。被験者には、同じ硬さの組合せも含めて呈示されることを、あらかじめ教唆した。被験者は21歳から35歳の男女12名である。

また仮想物体の大きさ識別実験も同じく一対比較法で行った。識別する大きさは30, 50, 70 mmの3段階とし、先の4段階の硬さそれぞれにおいて実験を行った。試行数は24である。

4. 実験結果

4.1 つまみ動作の指先変位とつまみ力

硬さ0.066 N/mmと0.50 N/mmでの、仮想物体の大きさが70 mmのときの動作例を図6に示す。指先への反力を直接計測するのは困難なので、モータの発生トルクが電流に比例することから、モータ電流を記録した。2指の指先間距離が、図中に波線で表示された仮想物体の大きさ以下になると、仮想物体の押込み量に比例して、モータ電流が増加していることが確認できる。このとき、つまみ動作における最大指先変位量は、図6(a)の0.066 N/mmよりも、図6(c)の0.50 N/mmで小さく、逆に、最大モータ電流、すなわち最大つまみ力は、0.50 N/mmで大きい。硬くなるにつれて最大指先変位量が

減少し、最大つまみ力が増加する傾向は、図示した以外の2段階の硬さでも同様であった。

4.2 硬さと大きさの識別率

図7に示すように仮想物体の硬さの識別率は、大きさ30 mmで57%、50 mmで76%、70 mmで87%であった。同じ硬さでも呈示する仮想物体が大きい方が識別率が高く、全体での平均は73%であった。大きさ30 mmでの硬さ識別率は、50 mmの場合よりも危険率3%で有意に低かった。また図中の誤差棒は標準偏差を示しており、大きな標準偏差は、主として個人差が大きかったことに起因する。本装置は、被験者の手の大きさに応じて調節可能な設計としてあるが、男性被験者を想定して設計したため、女性被験者(2名)では識別率が低く、大きさ30 mmでの正解率はともに20%であった。

仮想物体の大きさ識別率は、図8に見られるように、物体の硬さ0.066 N/mmで75%、硬さ0.18 N/mmで85%、硬さ0.50 N/mmで92%、硬さ1.32 N/mmで90%と

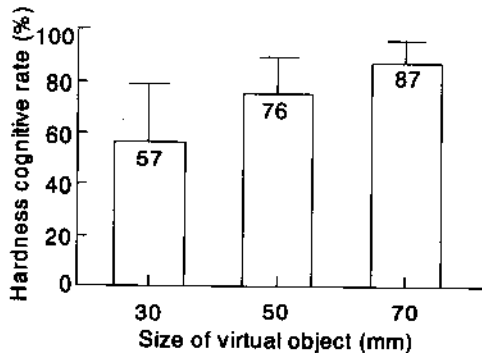


図7 硬さ識別率(物体大きさ別)

Fig. 7 Hardness cognitive rate between four virtual objects with different hardness, at three different size. Error bars represent the standard deviation.

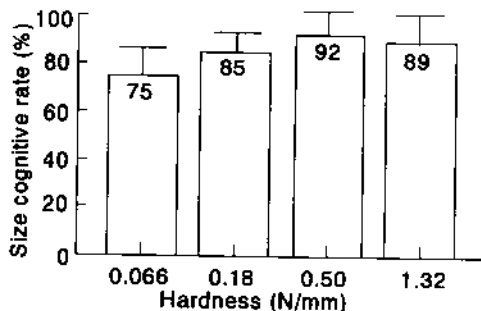


図8 大きさ識別率(物体硬さ別)

Fig. 8 Size cognitive rate between three size of virtual objects, at four different hardness.

なり、全体の平均は85%であった。組合せ数が少ないため統計的有意水準には達しなかったが、柔らかい物体で大きさの識別率が低下する傾向を示した。

5. 検 討

5.1 硬さ感覚の間隔尺度

硬さ識別実験に用いた4段階の硬さ(図5参照)は、底が10の対数をとると-1.18,-0.74,-0.30,0.12となり、対数軸上で等間隔になるように設定してある。実験結果を、硬さの差に基づいて図9のように分類した。先に述べた、仮想物体が小さいほど識別率が低いことに加えて、硬さの違いが大きいほど識別率が高いことが読み取れる。定性的には容易に予想される結果であるが、識別率を用いても、被験者が認識している硬さの違いや程度を直接知ることはできない。そこで、心理物理実験において心理的間隔尺度を求める一方法であるThurstoneの方法に準じて、硬さ感覚の間隔尺度を求めた[9]。これにより、被験者の感覚軸上での距離、すなわち各条件での硬さ感覚の相違の定量化が可能となる。但し、得られるのは比較条件間の感覚軸上での相対的距離なので、図10において、絶対座標は意味をもたない。

呈示した4段階の硬さは対数軸上で等間隔に設定してあるので、人間の硬さ感覚が聴覚などと同様に対数則に従うのであれば図10は等間隔に、比例則に従うのであれば右にいくに従って順に2.7倍に変化する。ここで結果を見ると、ばらつきはあるが、硬さ感覚は対数則に従うことが読み取れる。

また、図9の識別率と同様に仮想物体が小さくなると間隔距離が減少し、大きさ30 mmでは0.50と1.32 N/mmの差はほとんどない。呈示物体が小さいとワイヤ

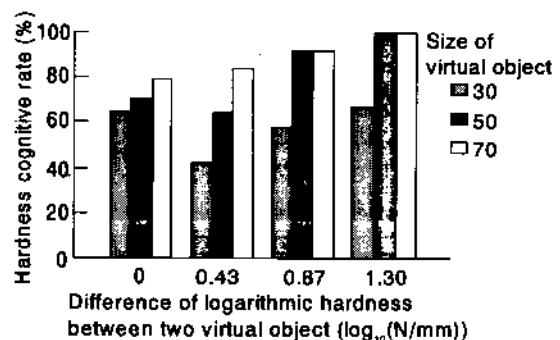


図9 硬さ識別率の詳細

Fig. 9 Detailed result of the hardness cognition experiment.

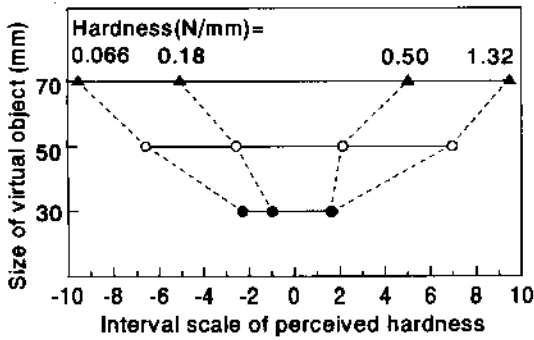


図10 硬さ感覚の間隔距離

Fig. 10 Interval scale of the recognized hardness.

露出部が長くなり、ワイヤ屈曲の増大による硬さの低下が識別率低下の原因と考えられる。0.066 N/mmがやや右寄りになっているのは、摩擦の影響と考えられる。実用化に際しては、剛性の高いワイヤを用いる、あるいはガイド部分をワイヤの引出しと連動させる等のワイヤ屈曲対策と、摩擦の低減に留意する必要がある。

5.2 大きさの認識機構

柔らかい物体を徐々につまんだとき、接触を開始した瞬間での大きさ、つまみ力と反力が平衡した状態での大きさは異なる。一般に物体の大きさと言えば前者を意味するが、動作中の瞬時値であり、定常値である後者も大きさ知覚に影響していることが予想される。ここでは両者を接触位置、停止位置と呼ぶことにする。

実験結果を見ると、柔らかい物体で識別率が低下していた。実際の力覚フィードバック装置には、摩擦が存在し、仮想物体に接触していない状態でも指先には若干の摩擦力が作用している。そのため、柔らかい物体を徐々につまんだとき、接触位置近傍での反力の変化は小さく、接触位置の知覚は困難になる。すなわち柔らかい物体での大きさ識別率の低下は、接触位置が大きさ認識に用いられていることを意味する。しかし、最大硬さに比較して1/20の硬さに変化させても75%の大きさ識別率が得られたことから、停止位置も大きさ認識に用いられていることが示唆される。二つの位置情報の大きさ認識における機能分担の詳細は、今後の検討課題である。

5.3 硬さ認識のためのつまみ動作

工学的に物体の硬さを計測するためには、対象物に強制変位を与え、そのときの反力を計測すれば、硬さを変位と反力の比として求めることが可能である。また、一定の力を加えて、そのときの変位を計測することによっても、硬さは計測可能である。すなわち硬さ

の知覚は、一種のアクティブセンシングであり、制御変数としては、変位と力のどちらもとることができる。本研究の結果では、人間の硬さ認知のためのつまみ動作は、図6に見られるように、変位一定でも、力一定でもなく、両者の混合したハイブリッド制御を行っていることが示唆された。アクティブセンシングにおける生体の制御機構を解明することは、力覚ディスプレイを開発するだけでなく、人間のように対象物を把持するロボットを開発する上でも重要である。

5.4 硬さ認知における他の感覚の影響

本研究では、力覚呈示装置単体での硬さ呈示能力を評価するという観点から、視覚情報を呈示せずに評価実験を行ったが、視覚情報の呈示によって明らかに識別率は向上する。視覚的に呈示する硬さと力覚的に呈示する硬さを矛盾させて実験を行った研究では、視覚が支配的であるとする報告もある[10]。遠隔手術などのような精細な作業を行うためには、可能な限り高精度の力覚ディスプレイの開発が必要であるが、逆にアミューズメント分野などでは、力覚呈示は視覚の補助として位置づけられて、むしろ拘束の小ささや可動域の大きさが重要視されてくると思われる。本研究で試作した装置は、後者の開発に指針を与えることが期待される。

また、物体の硬さ感覚の知覚は、物体を押し込んだときの反力である力覚と、物体との接触面積や圧力分布といった触覚の両方でもたらされる。力覚だけで物体の硬さを表現することの本質的な限界も考慮する必要があり、装置の開発と平行して、力覚のみによる硬さ認識の限界を明らかにすることが重要である。また、物体の硬さ以外の各種性状をより詳細に呈示するためには、摩擦感覚[11]や温度感覚[12]などと組み合わせる。総合的な感覚呈示も重要となる。

6. むすび

人間の身体プロポーションに基づいて設計した、仮想物体の硬さ感覚呈示装置を試作した。本装置を用いたときの4段階の硬さ識別率は73%であった。識別実験の結果から、感覚軸上での間隔距離を求めたところ、硬さの知覚は、その対数に比例することが確認された。人間の硬さ認知機構のより詳細な理解や、触覚や視覚など他の感覚情報呈示との効果的な併用方法が、今後の検討課題である。

文 献

- [1] F.P.Brooks Jr., M.Ouh-Young, J.J.Batter, and P.J.Kilpatrick,

"Project GROPE -Haptic Displays for Scientific Visualization,"
Computer Graphics, vol.24, no.4, pp.177-185, 1990.

- [2] 野間春生, 岩田洋夫, "9自由度フォースディスプレイの開発とその操作性評価," 計測自動制御学会論文集, vol.29, no.4, pp.455-460, 1993.
- [3] 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田弘, "空間インタフェース装置 SPIDAR の提案," 信学論(D-II), vol.J74-D-II, no.7, pp.887-894, July 1991.
- [4] 福井幸男, 下条 誠, "力覚をフィードバックする操作デバイスによる仮想形状のなぞり動作," 信学論(D-II), vol.J74-D-II, no.8, pp.1052-1059, Aug. 1991.
- [5] 竹田 仰, 筒井良夫, "人工現実感による仮想人物モデルの腕相撲の試み," ヒューマンインタフェース N&R, vol.8, pp.183-190, 1993.
- [6] S.Shimizu, S.Ino, T.Izumii, M.Takahashi, and T.Ifukube, "Development of actuator using metal hydride for force display to elbow joint," J.Robotics and Mechatronics, vol.5, no.3, pp.220-225, 1993.
- [7] 岩田洋夫, 中川隆志, 中島高裕, "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," ヒューマンインタフェースシンポジウム, pp.55-58, 1991.
- [8] 金井 理, 高橋秀智, "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, pp.898-902, 1992.
- [9] 増山英太郎, "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 正, 今井省吾, 和気典二編, pp.41-67, 誠信書房, 東京, 1994.
- [10] 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, pp.555-559, 1996.
- [11] 吉川恒夫, 上田 仁, "摩擦表面を有する仮想対象物の3次元動的操作感呈示," ヒューマンインタフェース, vol.4, no.1, pp.49-54, 1995.
- [12] 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触覚ディスプレイ方式の提案," 計測自動制御学会論文誌, vol.30, no.3, pp.345-351, 1994.

(平成 10 年 3 月 13 日受付)



藤田 欣也 (正員)

昭58慶大・工・電気卒。昭63同博士課程了。工博。相模工大, 東北大・医を経て, 平6岩手大・工・情報助教授, 平8アルバート大・神経科学部門訪問研究員。直立姿勢制御系の解析や力覚インタフェース, 機能的電気刺激など, 人間の運動制御機構の解析と応用の研究に従事。日本ME学会(平成5年度奨励賞), バイオメカニズム学会(1995年度奨励賞), 計測自動制御学会, 日本FES研究会, IEEE等各会員。