

弾性物体の硬さ認知のためのつまみ動作における制御則

藤田 欣也†

Control Strategies in Human Pinch Motion to Perceive the Hardness of an Elastic Object

Kinya FUJITA†

あらまし 人間が弾性物体の硬さを認知するためのつまみ動作において、つまみ力、対象物体の変位、接触面積の計測を行い、つまみ動作の制御則を実験的に検討した。硬さが異なる5種類の弾性物体の硬さ識別一対比較課題を10名の被験者に課したところ、弾性係数の相違によって、変位は最大値の91%、力は84%変化したのに対し、接触面積の変化は26%と、弾性との関連が小さいことが判明した。更に平衡点制御仮説に基づき仮想変位を算出したところ、硬さによる差は29%であったことから、硬さを認知するためのつまみ動作では、つまみ力ではなく仮想変位を一定に制御し、その結果として接触面積がほぼ一定に制御されていることが示唆された。

キーワード つまみ動作, 硬さ, 知覚, 動作制御, 仮想変位

1. ま え が き

人間が物体をつまむときの動作の中でも、小物体を持ち上げるときの、主として母指と示指を用いる動作は、precision gripと呼ばれ、多くの研究がなされてきた。Johanssonらは指先での感覚情報との関連を調べ[1]、Kinoshitaらは接線方向トルクの影響を検討している[2]。また、調節機能の発達過程を調べた木下らの研究[3]などがある。しかし、これらの研究で対象となっているのは、すべて「物体を持ち上げる」あるいは「保持する」ためのつまみ動作であり、重力に抗して物体を保持するのに必要十分な摩擦力を生じるつまみ力を、どのようにして人間が適切に発生しているのか、が基本的な興味の対象であった。

他方、つまみ動作は「物体の硬さを認知する」ための触動作として行われる場合もある。人工現実感[4]やテレグジスタンス等においては、指先への反力提示による弾性の表現[5]などが要求される。このような装置を効率的に開発するためには、人間のつまみ動作を介した硬さ認知機構を解明し、その法則性を明らかにすることが有効と考えられる。弾性体のつまみ動作を解析した研究も少数であるが行われており、Mai[6]ら、及びVan Doren[7]は、硬さが異なる2物体を同じ力でつまもうとしたときの力の差を報告し、平衡点制御仮

説を用いて説明を試みている。しかしこれらの研究は、設定された力で対象物体をつまむ、という課題での解析であり、人間が硬さを認知するためのつまみ動作の解析ではなかった。

つまみ動作による物体の硬さ認知は、物体に加えた力に関する情報と、指先位置の変化などによる物体の変形情報、の二つの情報の知覚によって可能になる。すなわち、触れるという動作によって成立するアクティブセンシング課題であるため、対象物体に力を加える際の制御方策、すなわち、つまみ動作の制御則が認知機構の解明に際して重要と考えられる。しかし、これまでの研究は、わずかにSrinivasanらによる、異なる硬さの物体の識別実験[8]や、指先力覚提示装置を用いた硬さ提示の問題点の実験的検討[9]がある程度で、動作そのものの検討はなされていなかった。

そこで本研究では、硬さ認知のためのつまみ動作における動作制御則を明らかにすべく、被験者に弾性物体の硬さ識別課題を課し、つまみ動作中のつまみ力、対象物体変位、指先接触面積の3者を計測した。その結果、指先接触面積の変化率が最も小さく、接触面積がほぼ一定に制御されていることが示された。更に動作の過渡応答を解析したところ、接触面積を一定に制御するための制御方策はフィードバックによらない開ループ制御であること、接触面積一定は平衡点モデルを用いた仮想変位制御仮説で説明可能であること、が実験的に示されたので報告する。

† 東京農工大学工学部情報コミュニケーション工学科, 小金井市
Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology,
Koganei-shi, 184-8588 Japan

2. つまみ動作制御と硬さ認知機構モデル

ゴムなどの弾性物体を指先でつまんで、接触面の法線方向に力を加えたとき、加えた力に対して変形量が大きな物体は柔らかく、変形量が小さい物体は硬く知覚される。すなわち、指先で加える力と対象物体の変形に関連する各種情報から、人間は弾性物体の硬さ感覚を認知しているものと考えられる。弾性物体の硬さ認知課題を、力と変形量の比の認知課題とみなすとき、最も単純な硬さ認知機構のモデルとしては、両者を知覚して比を求める図1のようなモデルを考えることができる。指先圧受容器の発火頻度や運動指令の遠心性コピーといったつまみ力関連情報、及び指先の圧力分布パターンや手指関節角度変化による固有感覚などの変形情報、の2種類の情報に基づいて硬さを認知するモデルである。なお、人間が知覚する弾性物体の硬さ感覚と物理量の対応は必ずしも明確ではないが、力覚提示装置を用いた研究において、硬さの感覚尺度が、変位当りの反力を対数変換した値に良好に比例したことから [5]、本研究では弾性物体の押し込み量当りの反力を

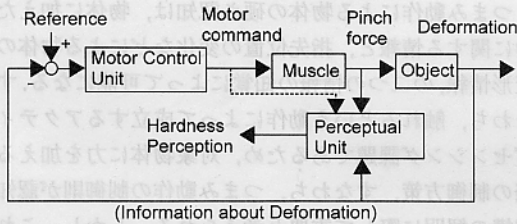


図1 弾性物体のつまみ動作制御と硬さ認知機構の基本モデル
Fig. 1 Primitive model of hardness perception mechanism of elastic objects by pinch motion.

硬さの目安とし、単に弾性物体の硬さと表記する。

更に、人間の知覚には弁別閾が存在するため、物体の硬さを精度良く認知するためには、対象物体に対して十分大きなつまみ力を加えることが望ましい。しかし物体の硬さに応じてつまみ力を調整しなければ、弾性限界が低い柔らかい物体は破壊されてしまう。そのため、図1の認知モデルでは、物体の変形を知覚し、つまみ力を制御するフィードバック制御系を想定した。次章以降では、このように対象物に応じて適切なつまみ力を発生可能な制御方策を実験的に検討する。

3. 実験方法

3.1 実験システム

本研究では、つまみ動作の指標として、つまみ力、変位及び接触面積を測定するために、図2の装置を作成した。装置上に取り付けるつまみ動作の対象物体は、接触面積を画像処理によって計測するため、透明度が高く、多様な硬さが得られる物体である必要がある。そこで、ゼラチン2種・シリコンゴム3種の計5種類の試料を用いた。物体の寸法は直径48 mm×厚さ10 mmの円柱状とし、物体の材質感を統一するため、表面にポリ塩化ビニル製フィルムを貼付した。

つまみ力は、対象物を取り付ける鉄板の基部の表裏に2枚ずつ計4枚（表裏各1枚は温度補償用としてつまみによるひずみと直交方向に貼付）のひずみゲージを貼付し、ブリッジを構成して計測した。接触面積は、親指と物体の接触映像を鏡を介してCCDカメラで撮影してビデオレコーダに記録し、512×512画素の画像ボードと計算機を用いてオフラインで取り込み、2値化した画像から求めた。今回の撮影条件での面積分解能は、約

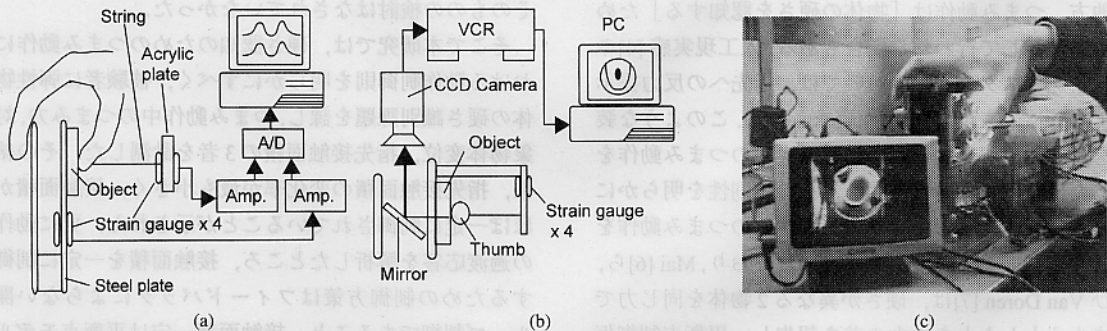


図2 接触力、母指変位、指先接触面積計測システム。(a)側面図、(b)上面図、(c)実験風景
Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system to measure the contact force, thumb displacement and the contact area of the thumb fingertip. (a) side view, (b) top view of the system and (c) experimental set-up.

0.012 mm²であった。

母指の変位は、図2のように母指背部に接着された糸の変位を、アクリル板取付基部のたわみをひずみゲージで計測することで求めた。この方法で測定される変位は、母指の変形と物体の変形、両者による変位を含むため、母指が対象物体を押し込んだ量、すなわち物体のみの変位とは異なる。そこで、あらかじめ計測した物体の弾性特性を、接触面積で補正し、つまみ力から物体変位を算出した。なお、計測された、母指と物体の両者の変形を含む変位は、検討において、平衡点モデルを用いた仮想変位制御仮説の検証に使用した。

物体の変位 x の算出は、以下の手順で行った。表面積 S_0 の剛体でつまみ対象物体を押し力 F を加えたときの、 F と x の関係が式(1)で近似されるとき、

$$F = f(x) \tag{1}$$

実際に物体をつまんだときの接触面積が S_0 から S に変化すると、物体に加わる圧力は S/S_0 倍になるため、つまみ時の物体の変位 x は下記の式(2)で求めた。

$$x = f^{-1}(F)S_0/S \tag{2}$$

実験試料の硬さ特性 $f(x)$ は、マイクロメータを用いてロードセルを物体に押しつけて計測した。ゼラチン2種は、被験者が母指で加えた力の範囲内でも非線形な特性を示したため、2次関数で特性を近似し、シリコンゴム3種は、線形であったため単純に押付力と変位の比を算出した。ロードセルと物体との接触部分の面積が130 mm²のときの実験試料の押付力と変位の関係は、それぞれ約210, 1100, 6900, 21000, 53000 N/mであった。ただしゼラチン2種は2次関数状の特性であるため、上記の値は変位が1 mmのときのものである。

3.2 実験条件

本研究では、物体への接触位置を安定させ、変位やつまみ力、接触面積の測定精度を改善するために、図2(c)のように、あらかじめ母指と反対側の鉄板に示指を接触させ、つまみ力が生じると母指のみが動く状態で実験を行った。被験者には、この状態で対象物をつまんで硬さ比較を行うよう指示し、そのときの母指動作を解析した。したがって、次章以降に示す解析結果は、2指を同時に動かすのではなく、片方の指を固定した状態でのつまみ動作のものである。

被験者には、硬さ認知のためのつまみ動作を行わせるために、実験者が交換することで順に呈示される2種

類の物体をつまんで硬い方を回答する、という一対比較課題を課した。比較の組合せは同じ硬さの比較を除いたすべての組合せ(20通り)で、提示順序はランダムとした。実験中は手先を見ないように指示した。設定した5段階の硬さ識別における回答誤りは、全実験を通じて1回のみであり、比較的容易な識別課題であった。被験者は21~23歳の健常男子10名である。被験者には、一つの物体を2回以上つまむように指示した。

また、順に呈示される二つの物体の硬さが明らかに異なる場合、二つ目の物体は、十分につまみ力を加えない被験者が見受けられたので、本研究では一つ目の物体のつまみ動作についてのみ解析を行った。

3.3 評価指標

つまみ動作時の、接触面積などの経時変化波形の例を図3に示す。この波形から各ピーク値と、立上り区間(ピーク値の10~90%)における増加率の二つの数値を、評価指標として算出した。

更に、1回目及び、2回目のつまみ動作において、つまみ力が最大になった時刻における、物体の変位、力、接触面積を、ピーク値として各物体ごとに集計し、それぞれの最大値で正規化した。

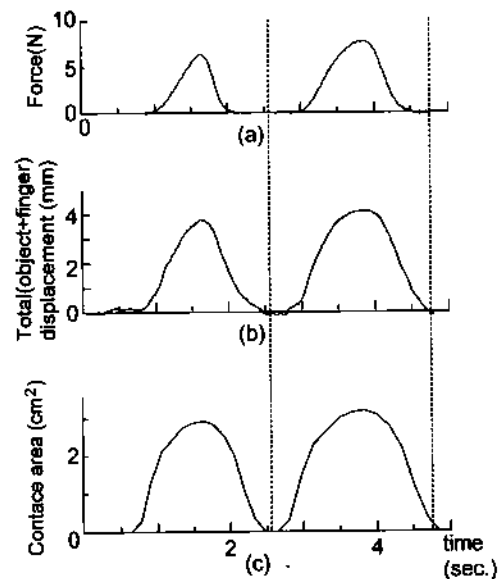


図3 (a)つまみ力、(b)指と物体の両者の変形を含む変位(計測値)、(c)母指接触面積、の計測例

Fig. 3 Example of the measured (a) pinch force, (b) total (object + finger) displacement, and (c) thumb contact area.

4. 実験結果

4.1 ピーク値

個々の試行におけるピーク値を比較したところ、直前の試行で触れた物体の硬さとの関連は見られなかった。履歴はつまみ動作の強度とは関連がないものと考え、各4回つまみ動作の結果を平均した結果を図4に示す。つまみ力の個人差が大きいため標準偏差が大きくなっているが、全体的な傾向としては、つまみ力、物体変位、接触面積ともに、1回目より2回目のつまみ動作の方がピーク値が高く、1回目のつまみ動作は予備的な硬さ認知で、2回目に改めて硬さを認知しているのではないかと推察される。

各指標のピーク値を集計し、それぞれの最大値で正

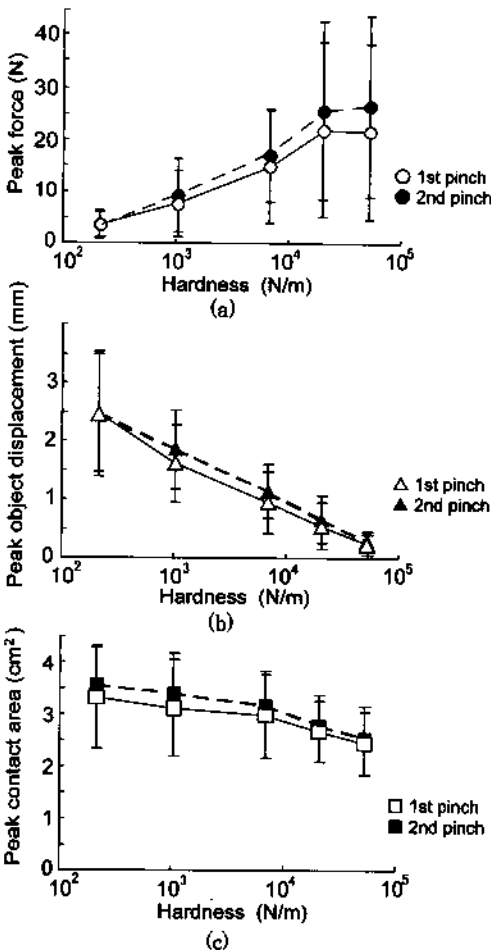


図4 (a)つまみ力 (b)物体変位 (算出値) (c)母指接触面積のピーク値の全被験者平均と標準偏差

Fig. 4 Peak values of (a)pinch force, (b)object deformation (calculated) and (c)contact area. The error bars are the standard deviations.

規化したものを図5に示す。実線が1回目、破線が2回目のつまみ動作である。物体が硬くなるにつれて、より大きなつまみ力が加えられるように制御されている。しかし、対象物体の硬さ特性をもとに算出した物体変位は、より大きな力が加えられているにもかかわらず、硬い物体では減少している。このとき、接触面積のピーク値は若干減少していた。

つまみ動作の1回目と、2回目のピーク値に若干の差はあるが、各指標の最大値で正規化すると、ほぼ同じ傾向を示している。すなわち、恐らくは同じ制御方針がとられていることが読み取れる。それぞれの指標について、1回目のつまみ動作における最大値と最小の差を求めたところ、物体の変位は91%、力は84%、接触面積は26%であり、2回目のつまみ動作での硬さによる差は、物体の変位は89%、力は86%、接触面積は29%であった。

物体変位の硬さによる差が91%、89%、力の差が84%、86%であったのに対し、接触面積の差が26%、29%と小さいことから、人間は、硬さを認知するためのつまみ動作において、物体の硬さにはあまり依存せず、一定の接触面積になるまでつまみ力を加える傾向が観察された。物体変位やつまみ力に比較して接触面積の変化率が小さいという傾向は、ゼラチン、シリコンゴム、それぞれに材料別に見ても同じであった。更に硬さに関する予備知識がない1回目のつまみ動作においてもこの傾向が見られたことから、接触面積一定制御は、フィードバック制御によらない開ループ制御の結果である可能性が予想される。

4.2 立上り区間における様子

更に、接触面積が硬さによらずほぼ一定になるという傾向が、指先の形状に起因する接触面積の飽和によ

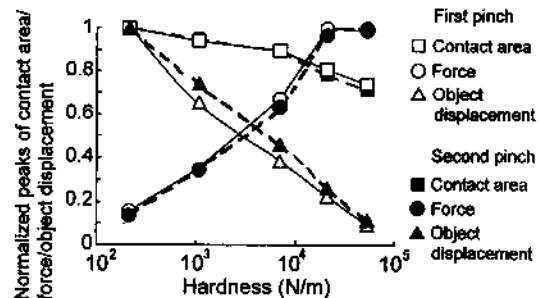


図5 最大値で正規化したつまみ力、物体変位、母指接触面積のピーク値

Fig. 5 Normalized peak values of pinch force, thumb displacement and thumb contact area normalized.

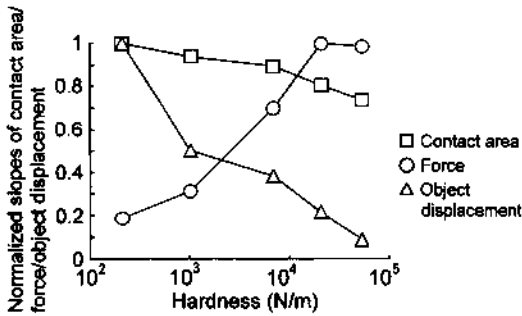


図6 つまみ力立上り区間（ピーク値の10%から90%）における正規化つまみ力，物体変位，母指接触面積の傾き
Fig. 6 Normalized slopes of pinch force, thumb displacement and thumb contact area.

るものか，動作制御方策の結果によるものか，を検討するために，各指標の立上り部分を解析した。つまみ力が同一であるにもかかわらず，単に柔らかい物体では接触面積が飽和したために，硬い物体と接触面積が同程度になったのであれば，柔らかい物体では早期に接触面積が飽和するので，接触面積の経時波形は，硬い物体よりも急激に増加した後ピーク付近で一定になると予想される。そこで，立上り区間（10～90%）における，各指標の傾きと平均立上り時間を算出した。1回目のつまみ動作と2回目のつまみ動作が完全に分離していない被験者がいたため，ここでは1回目のつまみ動作の解析結果を図6に示す。

ピーク値と同様に，接触面積の傾きの硬さによる変化は他の指標に比較して小さく，接触面積の飽和を示唆する傾向は見られなかった。また，物体ごとの平均立上り時間は，柔らかい物体から順に0.83, 0.89, 0.78, 0.85, 0.78秒，全平均0.83秒で，物体の硬さとの相関は見られなかった。更に，ピークつまみ力が硬さに応じて大きく変化していたからも，接触面積が一定になる傾向は，単なる飽和ではなく，物体の硬さに応じて何らかの機構によってつまみ力が変化した，すなわち，つまみ動作制御系の制御方策を反映したものと解釈するのが妥当と考えられる。

5. 検 討

5.1 接触面積一定制御則の意味

対象物体が硬い場合でも，柔らかい場合でも，つまみ動作のピークにおける接触面積が同程度であるという結果は，模式的には図7のように考えることができる。硬い物体に対しては，大きな力を加えることで指先が変形して接触面積が増大し，柔らかい物体に対し

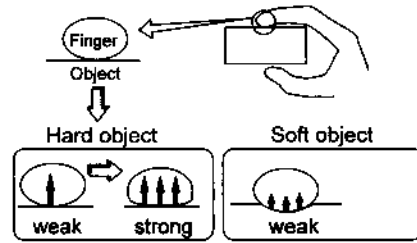


図7 硬さの異なる物体に対する硬さ認知のためのつまみ動作の模式図
Fig. 7 Diagram of hardness detective pinch motion for objects with different hardness.

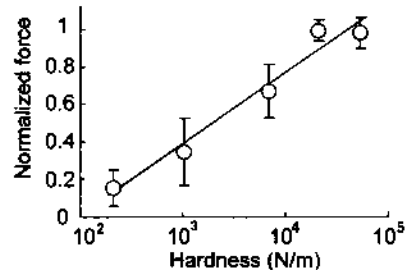


図8 対象物体の硬さとつまみ力ピーク値の回帰直線（各被験者ごとに最大つまみ力で正規化）
Fig. 8 The relationship between the hardness of the object and the applied pinch force (normalized for each subject).

ては，小さな力でも対象物体が変形して接触面積が増大し，その時点でつまみ動作が完了する，というものである。

接触面積が同一であるということは，生理学的には発火する圧受容器数が同一であることを意味する。ただし加えられる力が異なるため，発火頻度は異なる。すなわち，筋紡錘などの自己受容感覚の影響を無視すれば，発火受容器数を知覚しなくても，つまみ動作のピークにおける受容器発火頻度を知覚することが，硬さを認知したのと同等になることを意味する。

そこで，被験者ごとの最大値で正規化したつまみ力と，物体の硬さの関係を図8に示す。図中の直線は回帰直線である。つまみ力是对数換算した硬さにほぼ比例していることから，力と変形の二つの情報の比から硬さを算出せずとも，接触面積が一定になった状態でのつまみ力を知覚すれば，対数変換した硬さを知覚したことに相当することが確認される。このことから，接触面積一定制御は，生理的な合理性という観点からは，中枢系での処理軽減のためではないかと推察される。

また，弾性物体の硬さ知覚のためのつまみ動作において，接触面積が増大してある一定値に到達すれば，そ

れ以上のつまみ力を加えない、ということは、接触面積が一定値に達するまでの接触面積の動的な変化が表現されれば、硬さを知覚可能であるということの意味する。すなわち、つまみ力を検出して指先との接触面積を制御し、その際につまみ力に対する接触面積の増加率を変化させることで、異なる硬さ感覚を提示できる可能性が考えられる。硬さを表現する人工現実感装置としては、指先の変位を検出して指先への反力を制御する力覚提示装置などの使用が試みられているが [9]、受動触での硬さを表現できないなどの問題があった。接触面積制御型の硬さ提示方式は、変位を直接に利用しないため、この問題を擬似的に解決できる可能性を有しており、現在開発中である [10]。

5.2 初期つまみ動作の解析

本研究では、硬さ認知のためのつまみ動作において、硬い対象物体には大きな、柔らかい物体には小さなつまみ力が加えられている、という結果が観察された。このつまみ力の制御が、知覚された硬さに基づいてフィードバック制御されているのであれば、硬さが認知される以前の初期期間における筋収縮力、すなわち指先によって加えられる力は物体の硬さに依存しないと考えられる。そこで、硬さ感覚が知覚されるであろう以前の、つまみ動作初期（ピーク値の10～30%間）の力の変化率を比較することで、力フィードバック制御でつまみ動作が行われているのかどうかを検討した。被験者によるつまみ力のばらつきの影響を排除するために、被験者ごとに最大つまみ力で正規化した後に平均した結果を図9に示す。この初期期間の平均所要時間は0.22秒であり、物体の硬さの違いによる所用時間には、硬さとの関連は見られなかった。対照的に、硬さによる力の変化率は79%であり、硬さによって明らかに変化していた。

一般に、認知を要求する課題においては、P300と呼ばれる潜時300 msの脳波成分が強く観察されることが知られている。硬さを知覚してつまみ力を制御しているのであれば、硬さの知覚結果がつまみ力に反映されるまでには、更に運動神経系の伝搬遅延や筋の応答遅れも加わるため、数百ms以上を要するものと予想される。これに対して、初期つまみ動作の所要時間は平均0.22秒であり、硬さを認知してつまみ力を制御するには不十分と思われる。しかし、そのような短い時間においても、硬さに応じてつまみ力は大きく変化していた。また、つまみ動作の所要時間は、物体の硬さにかかわらず、ほぼ一定であったので、物体の硬さによら

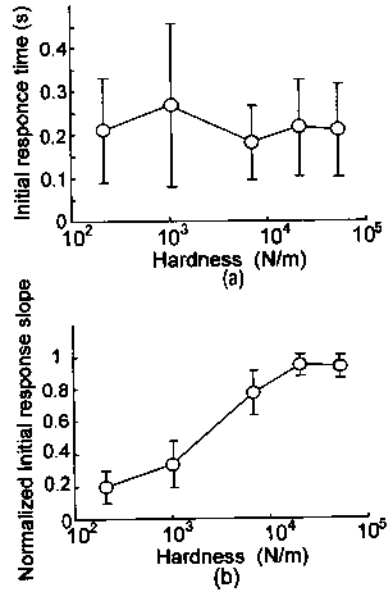


図9 初期つまみ動作(つまみ力ピーク値の10%から30%の区間)における(a)所要時間と(b)正規化つまみ力の傾き
Fig. 9 (a) Response time and (b) normalized slope of force during initial phase of pinch motion (10-30% of peak force).

ず、同じ制御則に従ってつまみ動作を行っていることが推察される。以上のことから、硬さを認知するためのつまみ動作は、対象物の硬さ情報を知覚してつまみ力をフィードバック制御しているのではなく、開ループ制御で行っているものと解釈するのが妥当と考えられる。

5.3 仮想変位一定制御仮説

硬さ情報をフィードバックすることなく、物体の硬さに応じて異なるつまみ力を加える開ループ制御方策として、ここではFeldmanの平衡点モデル [11]に基づき、Van Doren [7]が提唱した、つまみ動作の仮想変位一定制御仮説を導入する。平衡点モデルでは、人間の動作制御指令は力ではなく主動筋の仮想変位として出力される。人間の筋は弾性特性を有し、かつ関節には屈筋と伸筋という拮抗筋群が存在するため、実際の変位すなわち関節角度は、屈筋と伸筋という二つの弾性要素が発生する力の平衡点として決定される、という考え方である。Van Dorenは、これを指と対象物の関係に拡張し、同じ力でつまむように意図しても対象物の硬さが異なると、つまみ力や実際の変位が異なることを、中枢が出力する仮想変位が一定であるためと述べている。図10に模式図を示す。

左上がりの直線が対象物の弾性特性を示し、X切片

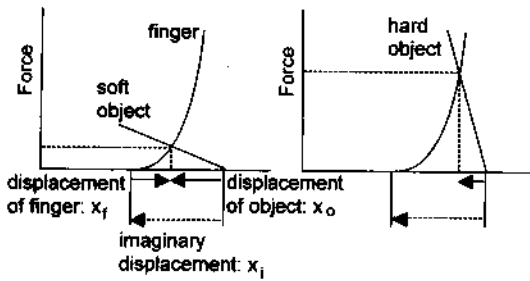


図10 仮想変位一定制御による硬さが異なる物体のつまみ動作
Fig. 10 Pinch motions with constant imaginary displacement control strategy for objects with different hardness.

が物体表面の初期位置を、初期位置から負の方向の変位が物体の押し込み量を示す。物体は押し込まれると、弾性特性に従って反力を発生する。同様に、指数関数状の曲線が指の非線形弾性特性で、 X 切片が中枢によって制御される仮想指先位置、仮想指先位置からの正の変位が指腹の変形による変位を意味する。つまみ動作は、図のように、仮想指先位置を、物体内部に設定することで実現される。指先も、仮想指先位置からの変形量に応じて反力を発生する。仮想変位制御仮説は、この両者の平衡点が、実際の指先位置すなわち物体表面位置となる、というものである。このとき、仮想変位 x_i は、式(3)のように、指の変位 x_f と物体の変位 x_o の和として表現される。

$$x_i = x_f + x_o \quad (3)$$

仮想変位制御仮説に従えば、図10のように物体の弾性特性が異なると、仮想変位は同一であっても、平衡点における反力並びに指や物体の変位が異なるため、フィードバック制御機構を用いずに、物体の硬さに応じて変位が異なるという実験結果の説明が可能である。

ここで、指と物体の硬さ特性が既知であるとき、指と物体が生じる反力が与えられれば、指と物体の変位は、それぞれの硬さ特性から求められる。本研究では、物体の硬さはあらかじめ計測してあるので、実験で用いた装置に、変形しない試料としてアクリルを用い、つまみ動作を解析した被験者10名のつまみ力と指の変位を計測し、Hajianらの報告[12]を参考に図11のように指数関数で近似した。この指の硬さ特性と実験で計測されたつまみ力から指の変位を算出し、各試行における仮想変位を推定した。

また、本研究の実験装置の変位測定部で得られる変位は、指の変位と物体の変位の両者を含むので、計算

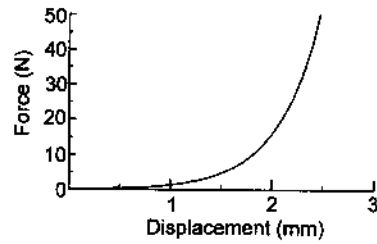


図11 実測値に基づく指先の硬さ特性モデル
Fig. 11 Property of fingertip hardness model based on measured data.

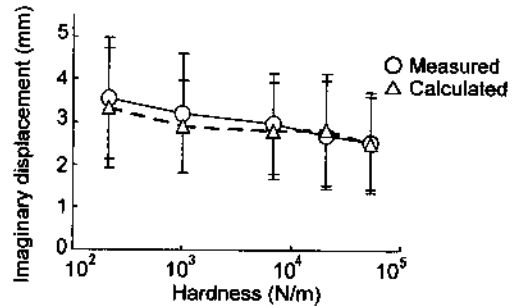


図12 算出された仮想変位及び指と対象物体の変形を含む実測変位
Fig. 12 Calculated imaginary displacement and measured displacement including both object and finger deformation.

で求めた仮想変位と同義と考えられる。計算で得られた仮想変位と、実際に測定された指と対象物体の両者を含む変位をまとめたものが図12である。

計算で求めた仮想変位と、実際に測定された変位はよく一致しており、仮想変位の計算結果の妥当性が確認される。また推定された仮想変位の変化率は接触面積の変化率と同程度の29%であった。すなわち、硬さによらずほぼ一定の指先接触面積は、仮想変位制御モデルにおいて、仮想変位一定と仮定することによって、説明可能であった。

また、物体変位と指の変位、それぞれの弾性特性から算出した変位の和である仮想変位と、実際に計測された物体と指の変位を含む変位が、良好に一致したことから、式(2)で算出した物体の変位が妥当であったことも確認される。

以上の知見をまとめると、人間が物体に触れて硬さを認知する際には、

- 1) 硬さによらず一定の中枢指令(仮想変位一定)でつまみ動作を行う。
- 2) このとき指の非線形な硬さ特性によって、力の平衡点における接触面積が一定になる。

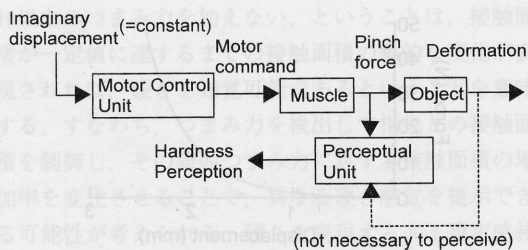


図13 本研究で得られた硬さ認知機構のモデル

Fig. 13 Model of hardness perception mechanism obtained in this study.

3) 接触面積が一定であるため、物体の硬さは、変位に関係なく、力のみから認知できる。

という可能性が示唆された。以上の硬さ認知機構のモデルを図13に示す。指の硬さという非線形な物理特性と仮想変位制御機構によって、中枢系の負担が、制御と知覚の2重の意味で軽減されている、という解釈が可能な興味深い結果となった。

6. むすび

本研究では、人間が硬さ未知の物体に指先で触れて硬さ認知するときのつまみ動作を解析した。その結果、人間は仮想変位一定制御で物体につまみ力を加え、そのとき接触面積はほぼ一定になり、つまみ力のみからの物体の硬さ認識が可能となる、といった一連の可能性が示唆された。

接触部分が平面でない場合など、更に詳細な硬さ認知機構の解明とともに、考察で述べたように、本知見の人工現実感装置への応用可能性の検討が、今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金によるものである。ここに記して感謝する。

文献

[1] R.S. Johansson and G. Westling, "Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery object," *Exp. Brain Res.*, vol.56, no.3, pp.550-564, 1984.

[2] H. Kinoshita, L. Backstrom, J.R. Flanagan, and R.S. Johansson, "Tangential torque effects on the control of grip forces when holding objects with a precision grip," *J. Neurophysiol.*, vol.78, no.3, pp.1619-1630, 1997.

[3] 木下 博, 生田香明, 川合 悟, "小物体の摘み運動中の把握力調節機能の発達," *バイオメカニズム* 12, pp.199-210, 1994.

[4] G. Burdea, D. Gomez, N. Langrana, E. Roskos, and P. Richard, "Virtual reality graphics simulation with force feedback," *Int. J. Comp. Simul.*, vol.5, pp.287-303, 1995.

[5] 藤田欣也, "グローブ型仮想物体硬さ感覚呈示装置の試作

と評価," *信学論(D-II)*, vol.J81-D-II, no.10, pp.2394-2400, Oct. 1998.

[6] N. Mai, P. Schreiber, and J. Hermsdorfer, "Changes in perceived finger force produced by muscular contractions under isometric and anisometric conditions," *Exp. Brain Res.*, vol.84, no.2, pp.453-460, 1991.

[7] C.L. Van Doren, "Pinch force matching errors predicted by an equilibrium-point model," *Exp. Brain Res.*, vol.106, no.3, pp.488-492, 1995.

[8] M.A. Srinivasan and R.H. LaMotte, "Tactile discrimination of softness," *J. Neurophysiol.*, vol.73, no.1, pp.88-101, 1995.

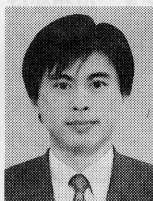
[9] 佐々木 博, 藤田欣也, "力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.5, no.1, 2000.

[10] 藤田欣也, 大森純祐, 片桐 宏, "指先接触面積制御による柔らかさディスプレイの試作," *日本バーチャルリアリティー学会第5回大会論文集*, pp.251-254, 2000.

[11] A.G. Feldman, "Once more on the equilibrium-point hypothesis (i model) for motor control," *J. Mot. Behav.*, vol.18, pp.17-54, 1986.

[12] A.Z. Hajian and R.D. Howe, "Identification of the mechanical impedance at the human finger tip," *J. Biomech. Eng.*, vol.119, no.1, pp.109-114, 1997.

(平成13年12月7日受付, 14年4月24日再受付)



藤田 欣也 (正員)

昭58慶大・工・電気卒。昭63同大大学院博士課程了。工博。相模工大、東北大・医、岩手大・工、アルバート大・神経科学部門訪問研究員を経て平11東京農工大・工・助教授。力覚提示装置の開発と評価、直立姿勢制御系の解析や機能的電気刺激など、人間の運動制御機構の解析と応用システム開発の研究に従事。日本ME学会、バイオメカニズム学会、計測自動制御学会、日本バーチャルリアリティ学会、ヒューマンインタフェース学会、IEEE等各会員。