

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18330158  
 研究課題名（和文） バーチャルリアリティ環境における「かたさ」「弾力性」の基礎的研究  
 研究課題名（英文） Basic research concerning “hardness” and “elasticity”  
 in a virtual reality environment.  
 研究代表者  
 入江 隆（IRIE TAKASHI）  
 岡山大学・大学院教育学研究科・准教授  
 研究者番号：70253325

研究成果の概要：軟物体の粘弾性特性と「かたさ」「弾力性」との関係を明らかにした。「かたさ」と「弾力性」ともに、平衡弾性係数が重要な役割を果たしているが、「かたさ」においては緩和弾性係数が正の関わりを持ち、「弾力性」においては負の関わりを持つことが明らかとなった。また、力覚デバイスを用いて実際には作成困難な軟物体を生成し、かたさ知覚実験を行うことにより、ヒトの「かたさ」知覚に関する新たな知見を得ることができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	9,100,000	2,730,000	11,830,000

研究分野：計測工学

科研費の分科・細目：心理学・実験心理学

キーワード：かたさ、弾力性、知覚、触覚、力覚デバイス、弾性、粘性

## 1. 研究開始当初の背景

Virtual Reality (VR) 空間において体験者に与えられる主要な情報は、視覚、聴覚、そして触覚（力覚）である。視覚情報と聴覚情報に関しては既に満足のいく水準に到達していたが、触覚情報に関しては未だ発展途上であり、力覚グローブ、触覚ディスプレイの開発が多くの研究者たちにより進められていた。しかし、これら研究者のほとんどは工学系であり、認知科学的側面からの検証が十分とはいえなかった。また、触対象となる物体の力学的特性と感性評価（「かたさ」と「弾力性」）との関係についても十分に解明されていなかった。

## 2. 研究の目的

- (1) 物理的解析を発展させる。
- (2) アクティブタッチとパッシブタッチによる「かたさ」知覚の差異を探る。
- (3) 「弾力性」知覚を探る。
- (4) 微小変位における「かたさ」知覚を探る。
- (5) 深部感覚による感性評価を詳しく検証する。

## 3. 研究の方法

- (1) 物理的解析を発展させるための方法として、有限要素法を用いる。従来の研究においては、軟物体の物理定数を算出する際に線形力学モデルを適用していた。このモデルは、例えばスポンジを指で押したとき、スポンジ

全体が同じ割合で（押圧方向に）歪むと考える。しかし、実際には指で押さえられている部分の歪みが最も大きく、そこから離れるに従って歪みが小さくなる。すなわち、軟物体の力学特性に線形力学モデルを適用するには無理があった。本研究では、有限要素法を用いることにより厳密な理論解析を試みる。有限要素法は、解析領域（この場合は、実験材料）を微小領域に分割して数値解析を行うことで前述の問題も解決される。本来は弾性解析で用いられることが多いが、本研究では粘弾性に拡張して適用する。例えば、手指あるいは棒を用いて軟物体の「かたさ」知覚を行うときの接触面における応力分布の算出も可能となる。

(2) 研究の目的の(2)～(4)を達成するために、シリコンを触対象として、荷重制限を行いながらアクティブタッチ条件とパッシブタッチ条件で「かたさ」と「弾力性」を評価する実験を行う。シリコンの粘弾性特性は上記(1)の有限要素法解析により算出し、官能評価値と共分散構造分析を行うことにより、「かたさ」モデルと「弾力性」モデルを求める。アクティブタッチ条件においては、通常の手指を用いた実験に加えて、指先にキャップを装着して指先の機械受容器からの情報を遮断した実験も行う。また、パッシブタッチ条件においては、変位速度を変えて実験を行う。

(3) 深部感覚による感性評価を詳しく検証するために、力覚デバイスを用いた「かたさ」知覚実験を行う。力覚デバイスは一種の3次元ポインタであると同時に、任意の反力を呈示する。コンピュータ制御により様々な仮想軟物体を生成することが可能である。機械受容器への刺激がないために深部感覚による「かたさ」知覚を調べることができる。ヒトが軟物体の「かたさ」知覚を行うときには手指により反復押し込み運動を行うが、その押し込み運動と知覚との関係を明らかにするために、3つの実験を行う。

①押すときと返るときで特性の異なる軟物体の「かたさ」知覚実験

返るときに発生する応力を押すときの応力の0.4, 0.6, 0.8, 1.0 (不変), 1.2倍に変化させたときの「かたさ」知覚を調べる。以後、この比率をrate of returnと呼ぶことにする。力学モデルにはvoigtモデルを使用する。

②負の粘性係数を持つ軟物体の「かたさ」知覚実験

通常の正の粘性係数を持つ軟物体であれば速く押し込むほど「かたく」感じられるが、負の粘性係数を持つ場合には速く押し込むほど「やわらかく」感じられるはずである。このとき、ヒトはどのような「かたさ」として理解するのか調べる。力学モデルにはvoigtモデルを使用し、stiffnessを固定しながら組み合わせるdampingを-10, -5, 0, 5Ns/mに設定した実験試料を用いる。

③変位の指数乗に対応した応力を発生する軟物体の「かたさ」知覚実験

バネ定数が変位とともに変化する軟物体を生成して「かたさ」知覚実験を行うことにより、押し込み運動中のどの過程（押し込み初期、後期、全体の平均）の特性を基にヒトが「かたさ」評価を行っているのか調べる。まず、基本試料としてstiffness200N/mの弾性体を用意した。このとき発生する応力 $F(N)$ は $F=kx$ である。ここで、 $k(N/m)$ はstiffnessであり、 $x(m)$ は変位を表す。次に、変位の指数乗に対応した応力を発生する実験試料を生成した。このとき、発生する応力 $F(N)$ は

$$F = kx^a = kx^{a-1} \cdot x$$

であり、 $kx^{a-1}$ が見かけ上のstiffnessとなる。すなわち、 $a>1$ の場合には変位の増加とともに、見かけ上のstiffnessが減少する特性を持ち、 $a<1$ の場合にはその逆となる。 $a$ の値として、0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.4, 1.6の6種類を用いた。実験試料の厚さを3cmとして、その変位3cmのときに発生する応力が基本試料と一致するように $k$ の値を調整した。これらは、変位が3cm未満においては発生する応力に大きな差がある。そこで、変位0～3cmの平均応力が基本試料と一致するように $k$ の値を調整した別の実験試料6個も用意した。実験試料の特性から考えれば、試料の厚さ3cmまで押し込んで「かたさ」評価を行うことが望ましい。しかし、その場合には変位3cmにおける特性が被験者に強く意識され、通常の「かたさ」知覚と異なる結果が得られることも予想される。そこで、変位が2cmを超えるとブザーが鳴ることで被験者の注意を喚起し、変位3cmまで押し込むことなく「かたさ」知覚を行う条件においても実験を実施した。

#### 4. 研究成果

(1) 実験材料の応力緩和特性データと有限要素法による理論解析との結果を比較することにより、Maxellモデルの3要素（平衡弾性係数、緩和弾性係数、粘性係数）を算出する手法について明らかにした。この成果は、次のアクティブタッチ条件とパッシブタッチ条件における「かたさ」「弾力性」評価実験におい

て「かたさ」モデルと「弾力性」モデルの差異が明確になった事実からその有用性が確認できる。

(2) 手指による「かたさ」評価, 「弾力性」評価とも3要素Maxellモデルの平衡弾性係数と緩和弾性係数により説明することができることが分かった。

まず, アクティブタッチ条件の結果を示す。手指を直接触対象に押し込む条件で, 荷重制限無しの場合には,

$$\text{Hardness} = 129.6 \log(k_0) + 4.9 \log(k_1) + c$$

$$\text{Elasticity} = 145.0 \log(k_0) - 14.6 \log(k_1) + c$$

荷重制限 (90gf, 25gf) を行った場合は,

$$\text{Hardness} = 102.2 \log(k_0) + 4.9 \log(k_1) + c$$

$$\text{Elasticity} = 112.9 \log(k_0) - 14.6 \log(k_1) + c$$

と緩和弾性係数の係数が僅かに異なったが, 「かたさ」評価の場合には緩和弾性係数が正の関与をし, 「弾力性」評価の場合には負の関与をすることが明らかとなった。

また, キャップ条件の場合には, 荷重制限に関わらず,

$$\text{Hardness} = 68.1 \log(k_0) + 10.5 \log(k_1) + c$$

$$\text{Elasticity} = 85.8 \log(k_0) - 11.6 \log(k_1) + c$$

が最適モデルとなった。手指を直接触対象に押し込む場合と同様に, 「かたさ」評価の場合には緩和弾性係数が正の関与をし, 「弾力性」評価の場合には負の関与をしている。すなわち, 「かたさ」と「弾力性」の違いは緩和弾性係数の関与の違いとして処理されている。

パッシブタッチ条件の結果は, 「かたさ」と「弾力性」の差異が失われ, 変位速度が大きい場合 (10mm/s) の場合には平衡弾性係数と緩和弾性係数により説明され (緩和弾性係数は正の関与), 変位速度が小さい場合 (5mm/s) には緩和弾性係数の関与も見られなくなり, 平衡弾性係数のみで説明されることが分かった。すなわち, パッシブタッチ条件では「弾力性」を知覚することができず, 変位速度が小さくなるほど, 「かたさ」知覚に必要な情報が失われていくことが明らかとなった。

(3) ①押すときと返るときで特性の異なる軟物体の「かたさ」知覚実験の結果を以下に示す。図1は押し込むときと返るときで特性が同じ (rate of return: 1.0) で, stiffnessの大きさだけを変えたときの「かたさ」評価値である。stiffnessの増加とともに「かたさ」評価値が単調に増加し, これまでの手指を用いた「かたさ」知覚実験と同様の結果が得られている。すなわち, 被験者は力覚デバイス

を用いた仮想試料に対しても, 正しい「かたさ」知覚が可能であったことを示している。

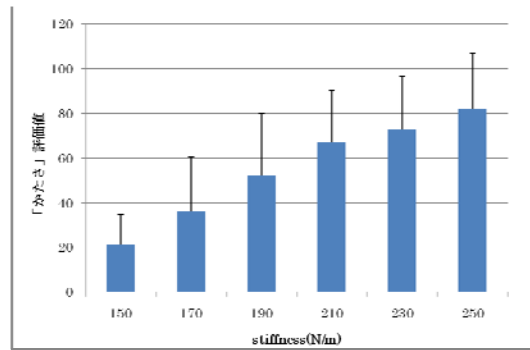


図1 「かたさ」評価値 (rate of return 1.0)

図2と図3は stiffness が 190N/m または 230N/m のときに rate of return を変化させた場合の「かたさ」評価値を示している。ともに, rate of return の増加とともに「かたさ」評価値が単調に増加しており, 有意な正の相関を確認することができた。すなわち, ヒトは軟物体の「かたさ」知覚を行うときに反復押し込み動作を行うが, 押し込み時だけではなく, 返るときの特性も含めて「かたさ」評価を行っていることが, 明らかとなった。

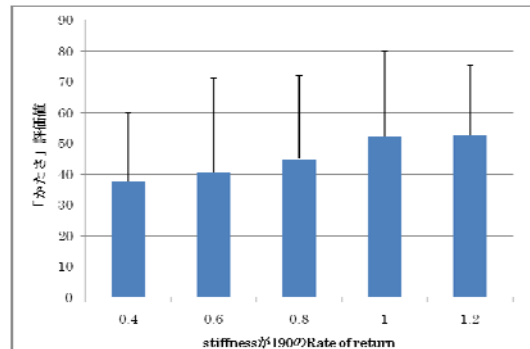


図2 rate of return を変えた場合 (stiffness 190N/m)

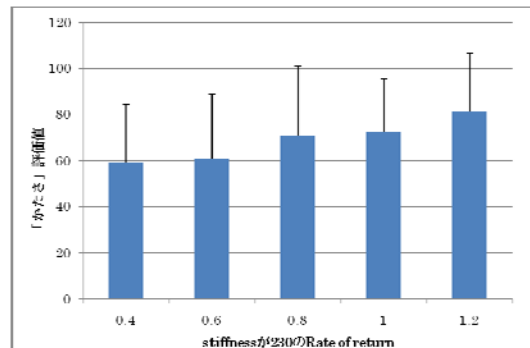


図3 rate of return を変えた場合 (stiffness 230N/m)

次に、押すときの特性と返るとき特性が、「かたさ」評価値にどのように反映されているのかを調べるために、「かたさ」評価値を目的変数、押すときの stiffness の常用対数  $\log(k_p)$  と返るとき stiffness の常用対数  $\log(k_r)$  を説明変数として重回帰分析を行った結果を以下に示す。

$$\text{Hardness} = 240.9 \log(k_p) + 40.5 \log(k_r) + c$$

押すときの特性と返るとき特性の係数比は約 6 : 1 であり、この比率で「かたさ」評価値に影響を及ぼしている。

②負の粘性係数を持つ軟物体の「かたさ」知覚実験の結果を以下に示す。通常の正の damping の場合は「かたさ」評価値が増加する方向に働き、負の damping の場合は減少する方向に働くと予想していたが、実験結果は全く異なった。stiffness が 200N/m と 250N/m のどちらの場合にも、負の damping が加わることにより「かたさ」評価値が増加している。damping が 0Ns/m と -10Ns/m の間の「かたさ」評価値の差は統計的に有意となっている

(0Ns/m と -5Ns/m は有意差無し)。正の damping が加わったときの変化は図 4 と図 5 で異なっているが、damping が 0Ns/m と 5Ns/m の間の「かたさ」評価値には有意差が見られない。このことから、damping が 5Ns/m 程度増減しても有意な変化とはならないが、少なくとも負の damping が加わることにより「かたさ」評価値が増加することは明らかとなった。正の damping の影響については本実験結果から傾向を導くことが困難であり、今後、再実験を行う必要がある。

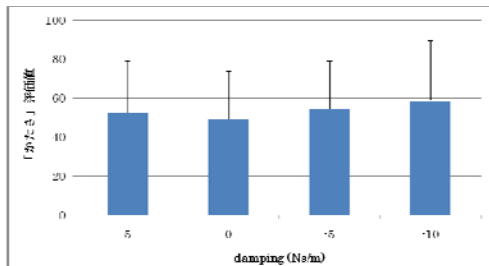


図 4 dampingを変えた場合 (stiffness 200N/m)

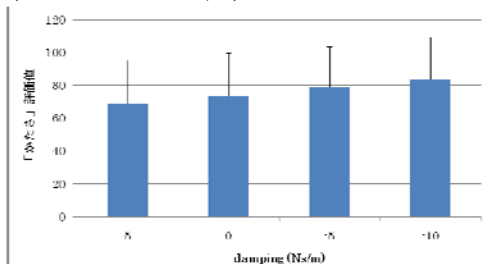


図 5 dampingを変えた場合 (stiffness 250N/m)

③変位の指数乗に対応した応力を発生する軟物体の「かたさ」知覚実験の結果を以下に示す。図 6 は基本試料 ( $k=200$ ) と変位 3cm 時の応力が基本試料と一致するグループの結果である。まず、変位 3cm まで押し込んだ場合と、変位 2cm を超えるとブザーを鳴らした場合の「かたさ」評価値には差が見られない。 $k=24.4$  が  $a=0.4$  の場合であり、 $k$  の増加とともに  $a$  が 0.2 ずつ増えている。 $a$  が 1 よりも小さい場合には変位 3cm 未満における見かけ上の stiffness が基本試料よりも小さくなり、 $a$  の値が小さいほどその傾向が強くなる。そして、 $a$  が 1 よりも大きい場合にはその逆の特性を持つ。すなわち、変位 3cm における応力がすべて等しいにもかかわらず、「かたさ」評価値が異なっている。この結果を最もよく説明するパラメータを探したところ、変位 0~3cm における応力の平均値と見かけ上の stiffness の平均値がほぼ同程度の説明力であった。

図 7 は基本試料 ( $k=200$ ) と変位 0~3cm の平均応力が基本試料と一致するグループの結果である。図 6 と同様に、変位 3cm まで押し込んだ場合と、変位 2cm を超えるとブザーを鳴らした場合の「かたさ」評価値には差が見られない。図 6 の結果を最もよく説明するパラメータの一つが変位 0~3cm の平均応力であったことから、試料間の「かたさ」評価値にはあまり差がないが、係数  $k$  とともに単調に増加しているようにも見える。分散分析の結果は、試料間の差異を否定している。ここでも、変位 0~3cm における応力の説明力が高かった。

押し込み運動中のどの過程(押し込み初期、後期、全体の平均)の特性が「かたさ」評価に重要であるのかという問いに対しては、最も深く押し込んだときの特性ではなく、押し込み運動中の平均的特性が重要であるといえる。

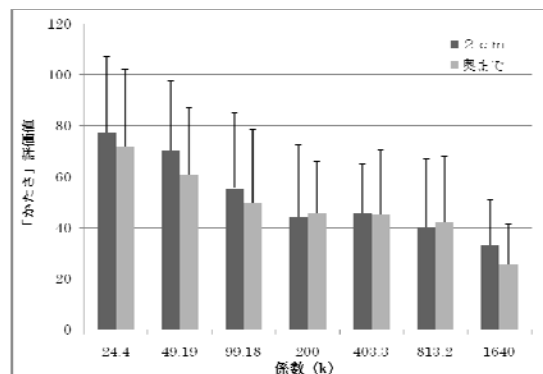


図 6 変位 3cm 時の応力が基本試料と一致するグループの結果

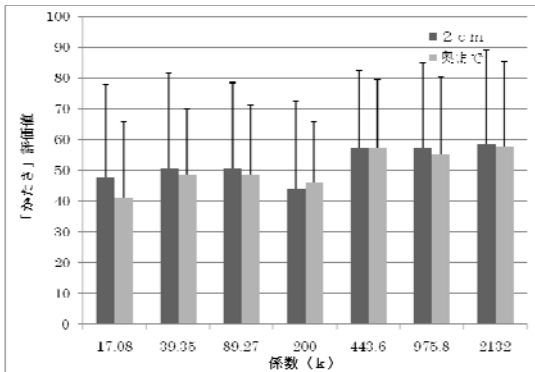


図7 変位0～3cmの平均応力が基本試料と一致するグループの結果

高知大学・教育学部・教授  
研究者番号：10107138

(3) 連携研究者  
なし

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

① 入江 隆, 藤田尚文, 中西秀男, 太田 学, “やわらかさ知覚のメカニズム”, 電子情報通信学会論文誌A, Vol. J91-A, No. 1, pp. 162-171, 2008年, 査読有

② 藤田尚文, 入江 隆, 中西秀男, 大田 学, “パッシブタッチ条件におけるやわらかさに関する感性情報処理”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 107, No. 369, HIP-2007-141, pp. 67-72, 2007年, 査読無

[学会発表] (計 2件)

① 常静彬, 入江 隆, “仮想軟物体の硬さ知覚に関する研究”, 日本産業技術教育学会中国支部第37回大会, 2008年5月30日, 島根大学

② 酒井寿宏, 中西秀男, 裏垣 博, 入江 隆, “ダイナミックタッチによる棒の長さ知覚”, 日本産業技術教育学会第23回四国支部大会, 2007年12月1日, 鳴門教育大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

入江 隆 (IRIE TAKASHI)  
岡山大学・大学院教育学研究科・准教授  
研究者番号：70253325

### (2) 研究分担者

中西 秀男 (NAKANISHI HIDEO)  
高知大学・教育学部・教授  
研究者番号：90294818

藤田 尚文 (FUJITA NAOFUMI)  
高知大学・教育学部・教授  
研究者番号：10165384

裏垣 博 (URAGAKI HIROSHI)