

弾性はいかに知覚されるか？

大西 仁 林 大作 中村 直人 望月 要
メディア教育開発センター 千葉工業大学 千葉工業大学 帝京大学

1 はじめに

弾性は力を加えると変形するが、除荷すれば元に戻る性質で、ばね係数(弾性係数)としてはばねの硬さを表すように、弾性が大きいほど変型に要する力が大きく、すなわち硬くなる。生体組織や食物、クッションなど我々の身の回りには弾性体と見なせるものが多く、弾性はヒトが身近に知覚している物体の性質である。

ヒトにおける弾性専用の受容体は見つかっておらず、受容した他の物理量を構成して弾性として知覚していると考えられる。弾性知覚の素朴な考え方は、変形に要した力を変形量で除す(力の変化を変位を除す)というものである(以下、素朴モデル)。Tan et al. (1995)は親指と人差指でスライダをつまみ、スライダの弾性を弁別する実験を行い、弾性の弁別が素朴モデルに従わないことを示した。従来、弾性の弁別実験は変位を一定にして行われていたため、最大反力(終端力)や力学的仕事を手がかりとして見かけ上弾性を弁別することができた。そこで、Tanらは変位を変化させて、終端力や力学的仕事を手がかりにできないようにして弾性の弁別実験を行った結果、弾性の弁別閾は極端に増加した。また、被験者が終端力や力学的仕事を弁別していたとして、それらの弁別閾を算出すると、弾性の弁別閾より小さくなったことから、終端力 and/or 力学的仕事が弾性弁別の手がかりとして使われていることが示唆された。以下、弾性が終端力および力学的仕事として知覚されるという仮説を各々終端力モデル、仕事モデルと呼ぶ。

2 実験 1

2.1 方法

押し込み距離と弾性係数は、各々(60 mm, 3.20 gf/mm), (80 mm, 2.40 gf/mm), (100 mm, 1.92 gf/mm)で、いずれも終端力は 192 gf で一定とした。力学的仕事は各々 5760 gfmm, 7680 gfmm, 9600 gfmm であった。

被験者が主観的に感じるこれらのばねの弾性の大きさの測定は、これらのばねと弾性の大小判断を行う比較刺激を構成し、恒常法により行った。比較刺激は押し込み距離を 80 mm のばねとして、弾性係数は QUEST

法で適応的に大まかな推定を行い、その値に基づき 5 種類の弾性係数とした。被験者が主観的に感じる弾性の大きさは、大小判断が 50% で釣り合う比較刺激の弾性、すなわち主観的等価点 (PSE) とした。

弾性の大小判断は経時比較により行われた。被験者は着席し、力呈示装置のスタイラス部分をペンを持つように把持し、奥行き方向に向かって水平にスタイラスを押し込み、その際に感じる弾性の大きさを比較した。

2.2 結果

素朴モデルが予測するように、弾性が力と変位の比として知覚されるなら、PSE の大きさの順序は弾性係数の物理量と一致する。終端力モデルが予測するように、弾性が終端力として知覚されるなら、PSE はどの条件でも一定である。仕事モデルが予測するように、弾性が力学的仕事として知覚されるなら、PSE の大きさは弾性係数の大きさと逆の順序になる。

結果を図 1 に示す。被験者が主観的に感じる弾性の大きさは仕事モデルの予測と良く合い、素朴モデルと終端力モデルの予測とは合わなかった。

3 実験 2

3.1 方法

方法は以下を除いて実験 1 と同一とした。ばねの弾性係数は 2.40 gf/mm で自然長は押し込み限界から 100 mm とした。このばねを自然長の位置から 100 mm 押し込む条件、自然長より 20 mm 押し込んだ位置から 8 mm 押し込む条件、自然長より 4 mm 押し込んだ位置から 6 mm 押し込む条件の 3 条件を設けた。力学的仕事は、各々 12000, 7680, 4320 (gfmm) であった。

比較刺激は押し込み距離を 100 mm のばねとして、弾性係数は実験 1 と同様の方法で決定した。

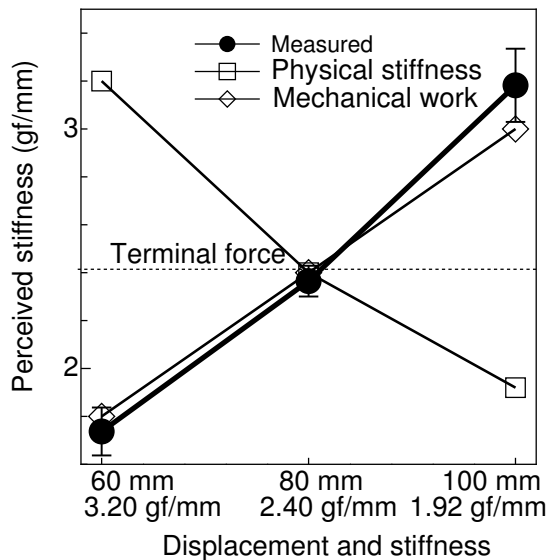


図 1: 実験 1 の結果。被験者が主観的に感じた弾性の大きさ (被験者 4 人の平均値)。“Measured” は測定値、“Physical stiffness”, “Mechanical work”, “Terminal force” は各々、素朴モデル、仕事モデル、終端力モデルの予測値、エラーバーは ± 1 SEM を表す。

3.2 結果

仕事仮説に従えば、PSE の大きさは力学的仕事の大きさと同じ順序になる。結果を図 2 に示す。被験者が主観的に感じる弾性の大きさは仕事モデルの予測とは合わなかった。なお、被験者 4 人のうち 1 人に関しては仕事モデルの予測と良く合っていた。

4 弾性の触運動知覚モデル

大西・望月 (2007) は、弾性が途中で変化するばねを用いて、変化前の弾性が変化後の弾性の知覚に与える影響を検討した。その結果、変化前の弾性が変化後の弾性より大きい (小さい) 時には、被験者は変化後の弾性を実際より大きく (小さく) 感じ、その程度は変化前の弾性の持続時間が長いほど大きくなること明らかになった。この結果から、弾性は積分量として知覚されることが示唆される。実験 1 の結果もこれと整合的なものである。しかし、実験 2 の結果は、弾性が仕事量の増加に従って大きく感じられる訳ではないことを示している。

以上のことから、被験者が主観的に感じる弾性の大きさ k_{subj} を説明するモデルとして、大西・望月 (2007) を拡張した次のようなモデルを考える。

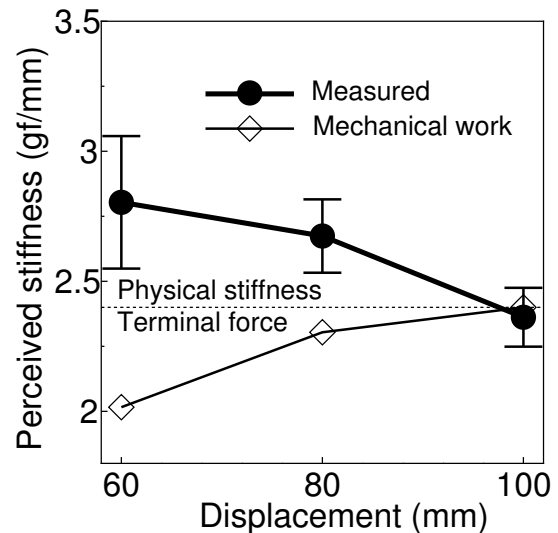


図 2: 実験 2 の結果。被験者が主観的に感じた弾性の大きさ (被験者 4 人の平均値)。“Measured” は測定値、“Physical stiffness”, “Mechanical work”, “Terminal force” は各々、素朴モデル、仕事モデル、終端力モデルの予測値、エラーバーは ± 1 SEM を表す。

$$k_{subj} = \alpha_1 \frac{\int_0^T \lambda_1^{T-\tau} f(\tau) d\tau}{\left(\int_0^T \lambda_1^{T-\tau} d\tau\right)^\gamma} + \alpha_2 \frac{\int_0^T \lambda_2^{T-\tau} \frac{df(\tau)}{d\tau} d\tau}{\left(\int_0^T \lambda_2^{T-\tau} d\tau\right)^\gamma} \quad (1)$$

ここで、 $f(\tau)$ は時刻 τ における反力で、 T はばねを押す時間、 $0 \leq \lambda_1, \lambda_2 \leq 1$, $\alpha_1, \alpha_2, 0 \leq \gamma \leq 1$ はパラメタである。 $\gamma = 1$ とおけば、右辺第 1 項は減衰パラメタ λ_1 で重みづけされた反力の時間平均、第 2 項は λ_2 で重みづけされた反力の時間微分の時間平均である。しかし、 $\gamma = 1$ と固定した場合、実験 2 で仕事モデルの予測と合う被験者 1 人の結果は説明できず、 $0 \leq \gamma \leq 1$ とすることで説明が可能になる。

参考文献

Tan, H. Z., Durlach, N. I., Beauregard, G. L., & Srinivasan, M. A. (1995). Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues. *Perception & Psychophysics*, 57(4), 495-510.

大西 仁・望月 要 (2007). 弾性力の触運動知覚における平滑化プロセス. 日本認知科学会第 24 回大会発表論文集, P5-19.