

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330222

研究課題名(和文)不均一な弾性構造の知覚特性の研究

研究課題名(英文)Study on stiffness perception with non-uniformity

研究代表者

遠藤 博史(Endo, Hiroshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・人間情報研究部門・研究員

研究者番号：20356603

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、人が物の硬さをどのように知覚しているかを調べることである。物体が硬い場合や物体の弾性差が小さい場合には押し力が強くなり、さらに硬い弾性域では、比較する物体を押し力が同じになるように押ししており、物体が軟らかくなるにつれてこの傾向は弱くなった。この押し方の変化に対応し、硬い弾性域では押し込み量の差が、軟らかい弾性域では反力の差がより顕著に知覚される傾向があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：This study investigated how the information of force and displacement is used to perceive the elasticity. Pressing strength was adjusted for object stiffness, where objects were pressed more strongly if objects were harder or the stiffness difference between compared objects was small. Besides, the pressing forces applied to two compared objects approached the same magnitude with increasing object stiffness. Further, the type of perceived kinesthetic information used to discriminate between objects also changed along with stiffness range, corroborating the changes of motor control. Differences in force were most easily perceived at lower stiffness ranges, while displacement differences were perceived more readily at higher stiffness ranges.

研究分野：人間工学

キーワード：弾性知覚 運動感覚 荷重動作

### 1. 研究開始当初の背景

視覚情報がない状態では、人は物の柔らかさを、触覚と運動感覚情報から知覚している。触覚と運動感覚は、その知覚メカニズムから、触覚は対象表面のヤング率、運動感覚は構造全体のバネ定数に近い物理量を知覚していると考えられる。人はこれら異なる感覚から来る2種類の情報を統合し、物の柔らかさを知覚している。ゴムのような表面が変形する物は、触覚(指表面の圧力分布の変化)だけでその柔らかさを知覚することができ、この時の運動感覚情報(指先位置の変位と反力)から得られる弾性は触覚と一致している。一方、板で挟んだバネのような表面が変形しない場合は、運動感覚情報が重要になる。この時、触覚と運動感覚で感じる硬さは同じではないが、我々は何の違和感もなく、対象の弾性を判断することができる。これは対象の構造情報が分かっているため、評価しているのが表面の板ではなく、中のバネであるということを知っているからである。このことは、対象の柔らかさを正確に評価する場合には、構造情報を前提にしていることを意味する。これまでの弾性知覚の研究では、構造情報が重要でない単一な弾性特性を対象として実験が行われてきた。一方、内部の構造が均一でない物や非線形な特性を示す物の弾性知覚メカニズムに焦点を当てた研究はほとんどなく、我々の身の回りに多く存在する不均一な弾性構造に対する知覚特性は不明なままである。

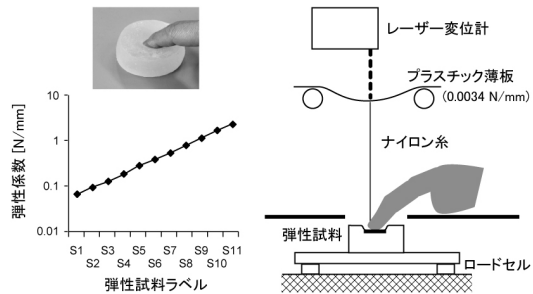
### 2. 研究の目的

不均一な弾性特性の知覚には、力と変形の関係が重要となる。硬さの知覚に必要な感覚に関して、これまでに数多くの先行研究が行われているが、情報の統合メカニズム(力と変形の間をどのように推定し、物体の弾性として知覚しているか)に関しては、明確な解が得られているわけではない。さらに能動的知覚の場合、最適な感覚情報を得るための探索戦略(どのように押して力と変形を得ているか)に関する検討も重要である。

これまでに平衡点仮説を用いて仮想変位が一定に制御されている、また硬い場合や弁別の判断が難しい場合などでは押し力を強くし、変形量を大きくして知覚精度を上げている、と推測されている。しかし荷重動作に関しても明らかになっているとは言いがたい。荷重動作は知覚に強く影響するため、まず弾性知覚において、物体への能動的荷重動作がどのように実行されているかについての検討を行う必要がある。

### 3. 研究の方法

非常に柔らかい場合から硬い場合までの幅広い弾性域においてゴム状の均一な弾性試料を作製し、弾性知覚実験を行った。弾性試料は、熱可塑性エラストマー(セプトン®、クラレ)で作製し、11種類の円柱試料(厚み



(a) 試料の弾性係数 (b) 計測系の概要

図1 弾性試料と実験系の概要

$t = 30 \text{ mm}$ 、直径  $= 60 \text{ mm}$ ) を実験に用いた。試料の弾性係数は、 $0.059 \sim 2.36 \text{ N/mm}$  (測定プローブ径  $= 9.54 \text{ mm}$ ) で、試料間の弾性係数の差が対数軸で均等になるように作製した(図1(a))。

押し力は、試料の台下に配置したロードセル(LMA-50N、共和電業)で計測した。押し込み量(変位)は、指先とプラスチック薄板をナイロン糸で結び、プラスチック薄板の変形をレーザー変位計(LK-080、キーエンス)で計測した(図1(b))。力と変位の解析にはピーク値を使用した。

(1) 被験者8人に対し、硬さの弁別課題と硬さの推定課題を行った。弁別課題(強制2択課題)では、11種類の試料の中から2種類の試料を提示し、19種類の組み合わせに対して弁別課題を行った。推定課題(マグニチュード推定法で、全く変形しない硬さを100、全く抵抗力のない硬さを0とし、数値化)では、11種類の試料に対して行った。

荷重時における運動指令量を推定するため、2種類のモデルを使用した(図2)。1つは筋活動レベルを収縮力要素で表し、もう1つは平衡点仮説の仮想変位である。両モデルとも粘性特性は考慮せず、運動指令  $u$  は試行ごとに異なるが、生体側のバネ定数  $k$  は一定とした。

(2) 実験(1)より、弾性域によって力や変位の差に対する感度が異なる可能性が示された。そこで実験(2)では差の知覚感度の検討を行った。被験者30人に対し、硬さの弁別課題を行った。力と変位の他に、押した回数と1

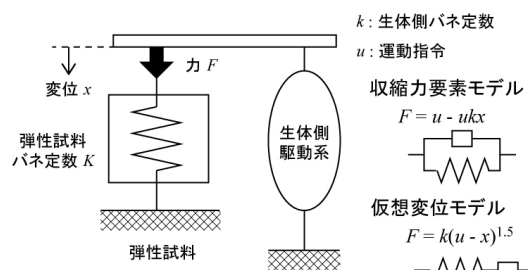


図2 運動系モデル

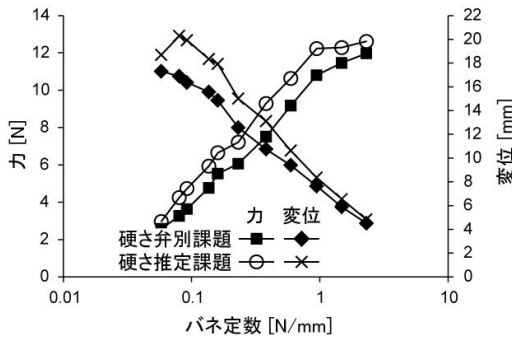


図3 力と変位の計測値

回の押し時間も解析に使用した。

力と変位の計測の他に、硬い/軟らかい試料を選択した判断理由と、押す時の努力感の主観値の測定も行った。判断理由(差を感じた感覚の種類)は自由回答とし、努力感は修正 Borg スケール(自覚的運動強度を 0~10 で評価)で評価した。

#### 4. 研究成果

(1) 硬さ弁別課題では、力や変位は試料のバネ定数(対数)に対して単調に変化した(図3)。硬さ推定課題でも、力も変位は試料のバネ定数(対数)に対して単調に変化した。強度は弁別課題よりも大きく、また両端で頭打ちになる傾向を示した(図3)。

運動指令の推定結果を図4に示す。力や変位の変化と比較して、推定された運動指令の変化は小さく、収縮力要素モデルはやや増加傾向で、軟らかいと弱め、硬いと強めの傾向が見られたが、仮想変位モデルはほぼ一定となった。

これまでに対象が硬い場合には、強く押ししていることが報告されている。さらに試料の全弾性域を同じように押ししていると仮定すると(推定された運動指令  $u$  が一定である仮想変位モデルに対応)、傾きの異なっている個々の試料ペアでは、2つの試料で押し方を変えていることになる(図8(a))。一方、個々のペアでは2つの試料を同じように押ししていると仮定すると、試料の全弾性域では傾きが異なり、弾性領域の違いで押し方が変化していることになる(推定された運動指令  $u$  が増加傾向にある収縮力要素モデルに対応)。前者の場合、個々のペアでは硬い試料を弱め、

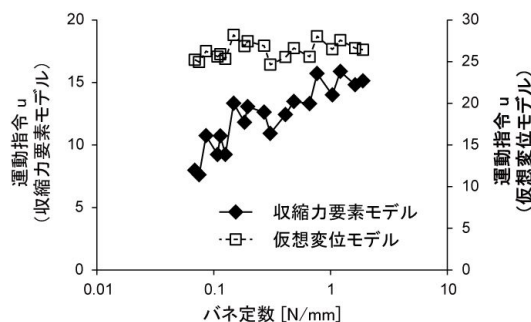


図4 運動指令の推定結果

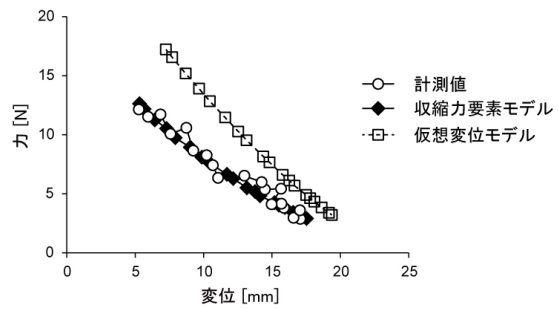
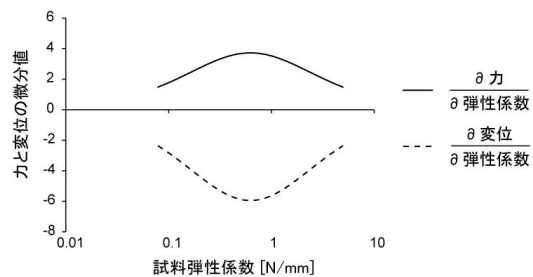


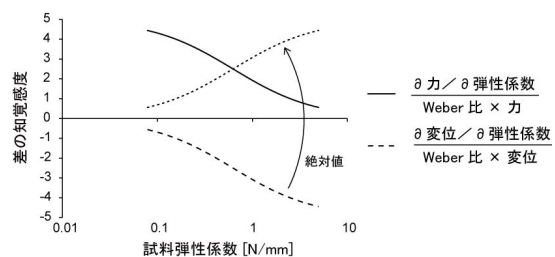
図5 力と変位の計測値と再計算値

柔らかい試料を強めに押ししていることになるが、差の判断を行う2つの試料に対して、積極的に押し方を変えているとは考えにくい。さらに、モデルの有効性を検討するため、推定された運動指令から力と変位の再計算を行った結果、収縮力要素モデルは仮想変位モデルよりも計測値に良く一致した(図5)。以上のことから収縮力要素モデルにより得られた結果の方が、より実際の運動指令に近い値を示している可能性が示された。

収縮力要素モデルを用いて推定された運動指令  $u$  と生体側バネ定数  $k$  を用いて、弾性の差の知覚感度の検討を行った。差の知覚感度は、分解能に対する変化の大きさの割合によって決まると考え、変化率/分解能で評価した。具体的には、数理モデルによって得られる力や変位を弾性で微分し、その微係数が力や変位の分解能(Weber比で決定)に対してどの程度の大きさを計算した。運動指令  $u$  は一定(平均値)、Weber比=0.2で計算を行った。その結果、弾性域によって知覚感度が異なり、硬い弾性域の場合は変位の差、軟らかい弾性域の場合は力の差に対する感度が



(a) 力と変位の変化率



(b) 差の知覚感度

図6 感度分析

高くなる可能性が示された。(図6)

(2) 実験(1)より、弾性域によって力や変位の差に対する感度が異なる可能性が示されたため、それを確認する実験を行った。まず力と変位に関しては、試料弾性の増加とともに力は単調に増加するのに対して変位は単調

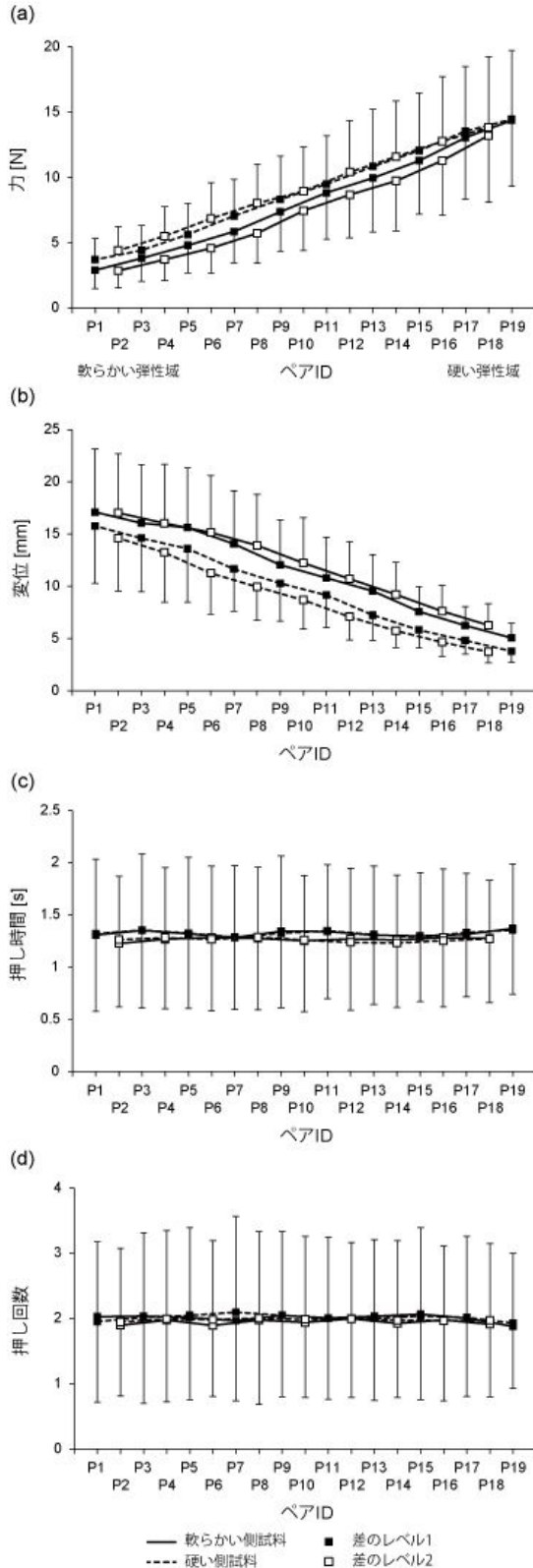
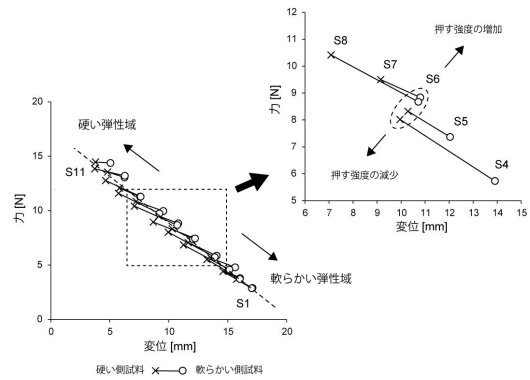


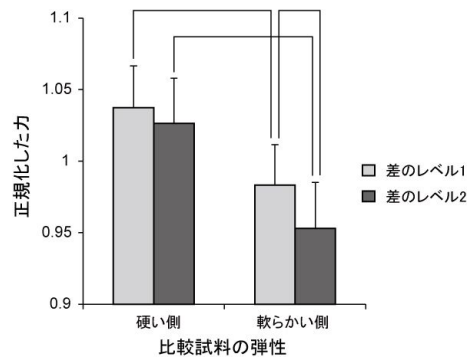
図7 力、変位、押し時間、回数の計測値

に減少する。また比較する試料間でも力や変位が異なり、硬い試料に対して力は強く変位は小さくなる。一方、押し時間や押し回数は、試料弾性に関係なく一定で、比較する試料間でも同じであった(図7)。さらに押し動作のパラメータ(押し強度、押し回数、押し時間)には非常に大きな個人差が見られたが、同じ被験者内では、弾性試料の硬さが大きく変わっても押し回数や押し時間はほとんど変化させず、押し強度のみを知覚する対象の硬さに合わせて変化させ、弾性知覚を行っていることが明らかとなった。以上のことから、押し時間や回数は事前に決められている運動パラメータであり、押し強度を調整パラメータとして対象の弾性に適応させて押ししていると考えられた。

比較する2つの試料ペア間での力と変位の関係を調べた結果、弾性域が硬くなるにしたがい、比較する2つの試料間で押し力に差がなくなる傾向が見られた(図8(a))。さらに硬い試料との比較ではより強く、軟らかい試料との比較ではより弱く押し傾向が見られた。弾性差の大きさと比較する試料の弾性を要因とした2要因分散分析の結果、比較する試料が硬い場合や弾性差が小さい場合には、押し力が有意に強くなること示された(比較する試料の弾性:  $F(1, 29) = 69.8, p < 0.001$ ; 弾性差の大きさ:  $F(1, 29) = 7.86, p = 0.009$ ; 交互作用:  $F(1, 29) = 9.17, p = 0.005$ )(図8(b))。



(a) 変位と力の関係



(b) 比較対象による押し強さの違い

図8 力と変位の関係と試料弾性との関係

図9に主観評価(硬い/軟らかい試料を選択した判断理由)の結果を示す。軟らかい弾性域では力の差が知覚されやすく、硬い弾性域では変位の差が知覚されやすい結果となった。これは実験(1)から推定された結果と同

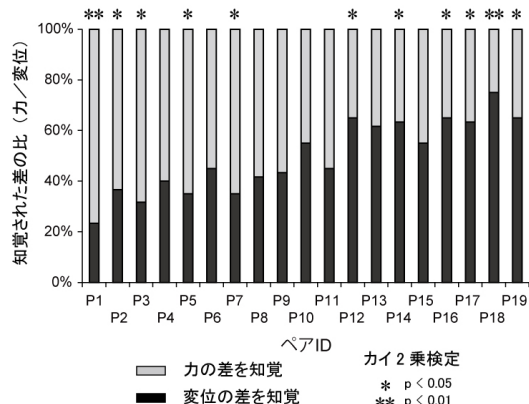


図9 力と変位の差の知覚の傾向

じ傾向の結果であった。一方で、押し方が弾性域によって変化しており、硬い弾性域の場合に、比較する2つの試料間で押す力に差がなくなる傾向が見られている。これは、硬い弾性域の場合に変位の差がより検出されやすいという結果とも一致する。

以上のことから、押す強さを押し方の調整パラメータとして、対象の弾性に合わせた押し方をしている。さらに押し方だけでなく、知覚されやすい力や変位の差も、対象の弾性の影響を受けて変化することが分かった。

不均一性を有する対象は、弾性係数が大きく異なる物体の組合せであると言える。そのため、広い弾性域において均一な弾性体に対して得られた本結果は、不均一性を有する物体の知覚メカニズムを調べるうえで基礎をなす重要な知見となると考えられた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Hiroshi Endo, Pressing movements and perceived force and displacement are influenced by object stiffness, *Physiology & Behavior*, 査読有, Vol.163, 2016, pp.203-210  
DOI: 10.1016/j.physbeh.2016.05.022

〔学会発表〕(計3件)

遠藤 博史、荷重方法の違いが弾性知覚に及ぼす影響についての検討、ヒューマンインターフェースシンポジウム 2015、2015年9月2日、はこだて未来大学(北海道・函館市)

遠藤 博史、弾性の弁別課題における知覚情報処理についての検討、ヒューマンインターフェースシンポジウム 2014、2014年9月12日、京都工芸繊維大学(京都府・京都市)

遠藤 博史、弾性の能動的知覚メカニズムに関する検討、日本人間工学会第55回大会、2014年6月6日、神戸国際会議場(兵庫県・神戸市)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

遠藤 博史 (ENDO, Hiroshi)

産業技術総合研究所・人間情報研究部門・主任研究員

研究者番号：20356603