

指先の接触面積と反力の同時制御による 柔軟弾性物体の提示

池田 義明^{*1}, 藤田 欣也^{*1}

Display of soft elastic object by simultaneous control of fingertip contact area and reaction force

Yoshiaki IKEDA and Kinya FUJITA

Abstract: This paper proposes a new haptic device to display the softness of elastic objects. The fingertip contact area and the reaction force were controlled simultaneously to display the fingertip sinking into soft materials. The contact area was controlled pneumatically by controlling the air pressure between the rubber membrane and the end-effector of a force display. The psychophysical experiment clarified that the contact area spread in addition to the reaction force provides the more accurate softness sensation.

Key Words: *softness, tactile display, haptic display, fingertip contact area*

1. はじめに

人工現実感における力触覚提示技術は、物体に触れたときの反力を提示することに主眼を置く力覚提示装置と、物体表面の微細形状や力学的特性の提示に主眼を置く触覚ディスプレイに大別することができる。力覚提示装置によって提示される情報は、四肢の変位とそれに伴う反力であり、筋紡錘や腱器官といった深部にある受容器から得られる筋長や筋収縮力などの固有感覚が関与している。また、触覚提示装置で提示される情報の知覚には、指先などの表皮に近い浅層に存在する圧や振動の機械刺激受容器が関与していると考えられる。

触覚提示装置には、高密度のピンマトリクスを駆動して物体形状を表現するもの[1]、電気刺激によって皮下の感覚受容器を直接刺激し、刺激電流分布を制御することで刺激される受容器を制御するもの[2]、静電アクチュエータ[3]や高分子ゲルアクチュエータ[4]を用いて「ざらざら」や「つるつる」といった、物体の微小表面構造であるテクスチャや素材感を表現するものなどがある。また、皮膚の微小領域を吸引することで擬似的に物体との接触圧を表現し、刺激密度を高めたものも報告されている[5]。

他方、力覚提示装置は既に実用化が進み、PHANTOM[6]などのマニピュレータ型を中心とした接地型のデバイスで仮想物体からの反力を表現する方法は、今日では3次元物体のデザイン等に多用され始めている。また、CyberGrasp[7]のように、手に装着して指先に反力を提示する非接地型と呼ばれる力覚提示装置も市場において入手可能である。

ここで柔軟弾性物体を把持したときの柔らかさの表現を考えてみると、柔らかさは把持方向に加えられた応力と変形量の比とみなすことができるので、指先変位を検出し、力覚提示装置を用いて変位に応じた反力を指先に提示する方法などが考えられる[8,9]。しかし、力覚提示装置では、素手で物体を把持したときの対象物体の変形による指先の埋没を表現できない、という問題点が指摘されていた[10]。そこで、物体と指が接触したときの接触面積を計算し、反力に応じてその接触面積を提示してやることで、柔らかさを表現する研究が行われてきた。既に、変位を伴わない、接触面積と力の関係だけで柔らかさを提示可能であることが実証されている[11]。

しかし、既報の接触面積制御型柔らかさディスプレイは、接触面積の変化のみを表現するものであり、反力との同時制御は実現されていなかった。また、接触面積計算のためには、対象物に触れたときの接触面積変化特性を事前に計測しておく必要があり、仮想物体の柔らかさを提示するシステムとしては不十分であった。

そこで、本研究では指先接触面積制御を行う触覚ディスプレイとグローブ型の力覚提示装置を統合し、把持動作に対する物体の柔らかさを表現可能な力触覚ディスプレイを開発した。また、接触面積計算にヘルツ理論を用いることで、表現する柔軟弾性物体の接触面積変化特性の事前計測を不要とした。さらに、評価実験をおこない、力覚提示のみよりも正確な柔らかさ感覚を表現可能であることを確認し、従来、力覚提示装置単体では不可能であった、パッシブタッチでの柔らかさ感覚を表現可能であることが示されたので報告する。

*1: 東京農工大学 工学部

*1: Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology

2. 柔らかさ認識機構と柔らかさ提示システム

2.1 柔らかさ認識機構と柔らかさ提示

柔軟物に指先で触れると、図1(a)のように対象物が変形して指先が埋没し、接触面積が増大する。このとき、対象物の変形に関する情報として、筋紡錘などの固有感覚受容器から得られる指先の変位情報と、指先圧受容器の発火受容器数の増加として得られる接触面積増加情報、の2つの変形情報が知覚される。この2つの変形情報の柔らかさ知覚への重要性を実験的に検討した研究では、触覚を介した知覚の方が重要であると述べている[10]。また、人間が未知の物体の柔らかさを認知するために物体をつまむ場合、接触面積がほぼ一定になるまでつまむ、という法則性が実験的に観察されており[12]、この点からも、物体に加えられる指先接触力に対する接触面積の増加率を制御することで、柔らかさの提示が可能になるものと期待される。

これに対し、力覚提示装置による柔らかさ提示は図1(b)の状態に相当し、提示されるのは対象物に力を加えたときの指先位置の変化のみであり、接触面積の増加は表現されない。他方、図1(c)のように、指先の押下力に応じて指先の接触面積を動的に制御すれば、実際に柔軟物に指先が埋没するときと同様の接触面積変化を模擬することが可能となる。指先押下力を検出してゴム膜を貼ったシリンダ内の水量を制御することによって、指先接触面積を動的に制御する装置が報告されている[11]。本研究では、次節のように反力と接触面積変化を同時に提示可能な装置を試作することで、図1(a)と同様の状態を実現し、柔らかさの提示をおこなう。

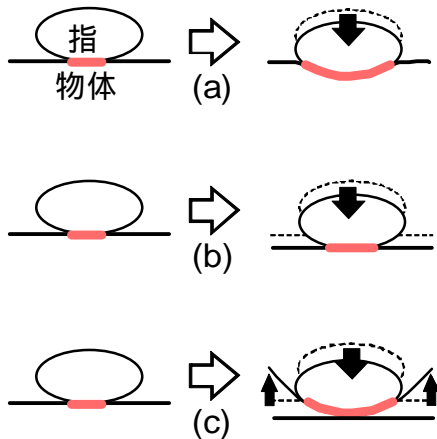


図1 .(a) 柔軟物を指先で押したときの物体変形による指先埋没と接触面積の増大。(b) 従来の力覚提示装置で柔らかさを表現する場合(接触面積の増加は指先の変形による)。(c) 接触面積制御による柔らかさ提示の概念(押下力に応じて動的に接触面積を制御する)。

2.2 試作した柔らかさ提示システムの構成

図2に試作した柔らかさ提示システムの構成を示す。システムは力覚提示機構と接触面積制御機構を有する。指先への力覚提示は、拇指と示指に装着するアタッチメントのーム部を、ワイヤを介してDCモータで牽引することで実現する。牽引装置はモータ部にポテンシオメータを有し、反力提示と同時に指先の位置を計測する。計算機内部では、計測された指先位置をもとに、後述するアルゴリズムにもとづいて、指先への反力および接触面積制御部に送出する圧縮空気圧を計算する。接触面積制御部では、パルス幅制御されたレギュレータによって、圧縮空気圧を制御し、ゴム膜とアクリル板の空隙に送出する。この圧縮空気によりゴム膜が膨張し、指先の接触面積が増大する。

図3に接触面積提示機構の指先接触部分を示す。縦3cm幅5cmのアクリル板にゴム膜を貼付し、周辺と中心部を接着した。アクリル板下部からエアチューブを通してゴム膜内部に圧縮空気を送出するとにより、指周辺のゴム膜が膨張し、指の接触面積が増大する。このゴム膜内部の空気圧を制御することにより、指先接触面積の制御が可能になる。

さらに、接触面積制御部は図2、図3(c)のように、力覚提示装置に取り付けられたアクリル製指先アタッチメント部に装着した。指先アタッチメントは、指先位置の検出にも使用されるため、指先の運動に連動するよう適切に固定する必要がある。しかし、固定のための過度の圧迫は指先圧受容器への刺激となるため、ユーザの指の大きさにあわせてアタッチメント部の締め付けを調整し、さらに必要に応じて爪側に詰め物をおこなって調整した。

提示可能な最大反力は5N(各指)、ゴム膜内部の最大空気圧は10kPa(各指)である。

開発環境に Visual C++6.0 を使用し、CPU に Pentium4 1.5GHz を用いたときの平均処理時間は、描画を含め1サンプルあたり約30msであった。

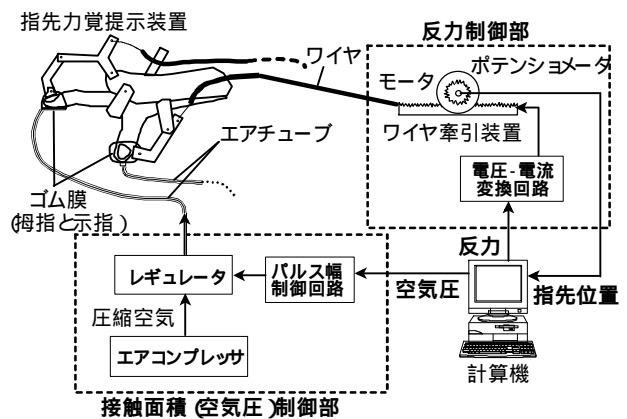


図2 . 柔らかさ提示装置の構成

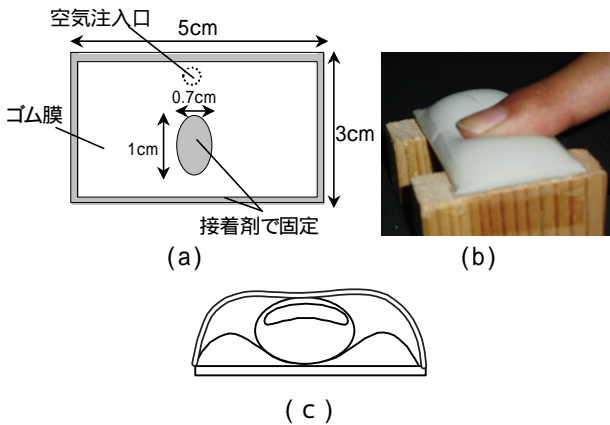


図3．接触面積制御部の (a)構造, (b)外観 (圧縮空気で膨張した状態) (c)力覚提示装置に装着した状態

3．柔らかさ提示の流れ

図4に計算機内部の制御の流れを示す．ポテンシオメータから指先位置を取得して対象物体との接触を判定し，ばねモデルを用いて指先への反力を算出する．接触面積は反力からヘルツ理論を用いて算出し，接触面積と反力からゴム膜と指の逆特性を用いて空気圧を求めた．また，ゴム膜が膨らむ際には，3.4節のように指先への圧迫を生じることから，モータの出力は，算出された反力からゴム膜による圧迫力を引いた力とする．

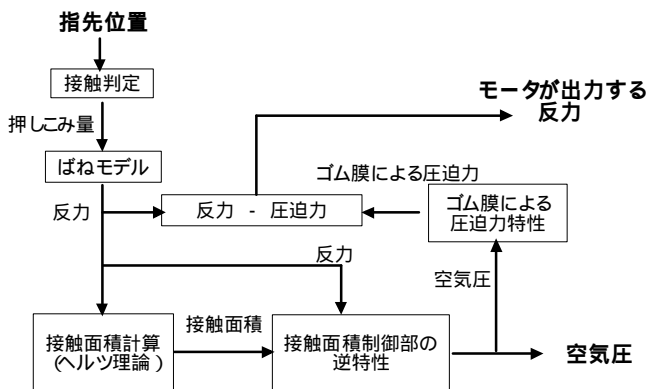


図4．計算機内部の制御の流れ

3.1 反力計算

ポテンシオメータにより計測された拇指と示指の位置から，両指間の距離 d を計算する．本研究では，簡単のため， d が仮想物体の幅よりも小さくなったときを接触状態とみなし，その差を押し込み量 x とした．このとき，指先にはフックの法則により，押し込み量 x に比例した反力 F が生じる．

$$F = k\Delta x \quad (1)$$

ばね定数 k は，以下のように，仮想物体の形状と

ヤング率によって決定される．ヤング率は，(2)式のように，物体を押し込んだときの，単位面積あたりの力を，物体の厚みの変化率で割ったものとして定義される．

$$E = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta x}{x}} \quad (2)$$

したがって，対象物の厚み x と断面積 S が与えられれば，(3)式のように，ばね定数 k が算出可能である．

$$k = E \frac{S}{x} \quad (3)$$

ここで，物体を指で押し込んだときを考えると，物体が変形し指が埋没するのは指先部分だけである．そこで，断面積 S を 150mm^2 とみなして，ばね定数の算出を行った．また，後述の評価実験では，物体の厚みは実物体と同じく 50mm とした．

3.2 接触面積計算

物体と指先の接触面積の計算には，球体と球体が接触したときの接触面積を物体の曲率から求める理論であるヘルツ理論[13]を用いた．

$$a = \left(\frac{3}{4} P \left(\frac{1-\nu_A^2}{E_A} + \frac{1-\nu_B^2}{E_B} \right) \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

a : 接触面の半径 (mm)

P : 押下力 (N)

R_A : 物体 A の曲率半径 (mm)

R_B : 物体 B の曲率半径 (mm)

E_A : 物体 A のヤング率 (N/mm²)

E_B : 物体 B のヤング率 (N/mm²)

ν_A : 物体 A のポアソン比

ν_B : 物体 B のポアソン比

物体と指先の接触面積は，(4)式に，物体と指先皮下組織のヤング率 (E)，ポアソン比 (ν)，曲率半径 (R)，押下力 (P) を代入し，接触円の半径 (a) を算出することにより求まる．本研究では，まず指先を球 (半径 7.5mm ，ヤング率 0.034N/mm^2 ，ポアソン比 0.5) で近似し，仮想物体を平面で近似して接触面積を算出した．その後，指先の形状を考慮して，算出された接触円の半径の2倍を長径とする楕円の面積を算出し，接触面積とした．

このとき，ヘルツ理論に代入する指先皮下組織のヤング率は，先行研究から 0.034N/mm^2 [14] と与えたが，実際の指先の硬さは一定ではなく，指先が大き

く変形すると、みかけ上の弾性係数が大きくなる。これは指先内部には骨があり、その周りを皮下組織で覆っているために発生する現象である。そこで、指先に力を加えたときの、変位と反力の関係が指数関数状[15]であることから、本研究では指先への反力が1Nのときのヤング率を0.034N/mm²とし、(5)式のようにヤング率を力に応じて変化させた。(5)式の傾きと切片は図5の実測データをもとに調整して決定した。

$$\text{指先ヤング率} = 0.01 + 0.024 \times \text{反力} \quad (5)$$

ヤング率が0.034N/mm²一定のとき、ヤング率を(5)式にしたがって変化させたときの反力と指先接触面積の関係、ならびに、実際にアクリル板を示指で押したときの接触面積の実測データを図5に示す。接触面積の計測は、示指の指先に顔料インクをつけてアクリルを押さえ、このときの顔料インク痕をイメージスキャナで取り込み、2値化後に画素数を計数することにより求めた。被験者は指の太さが同程度の4人とし、1人につき3回計測し平均値を算出した。

図5より、変形量が増大するにつれてヤング率が増加するモデルを仮定することで、接触面積が飽和する特性を近似可能であることが確認される。

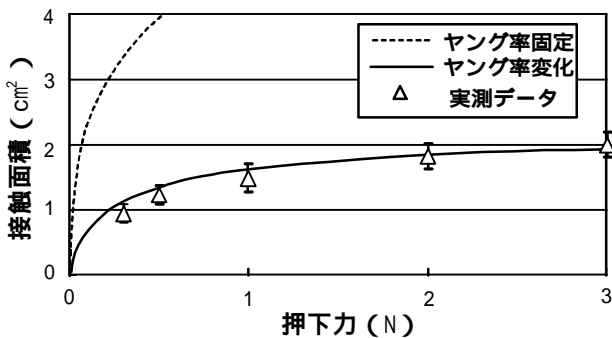


図5. ヘルツ理論による指先接触面積の変化 (示指とアクリル板の接触の場合)

さらに、4章の柔らかさ感覚定量化実験で使用した3種のゴムスポンジとアクリルに指を押し付けたときの、ヘルツ理論により算出された接触面積と、上記実験の被験者中の1名での実測値を図6に示す。ヘルツ理論により算出された接触面積が、実測値に良好に一致している様子が読み取れる。

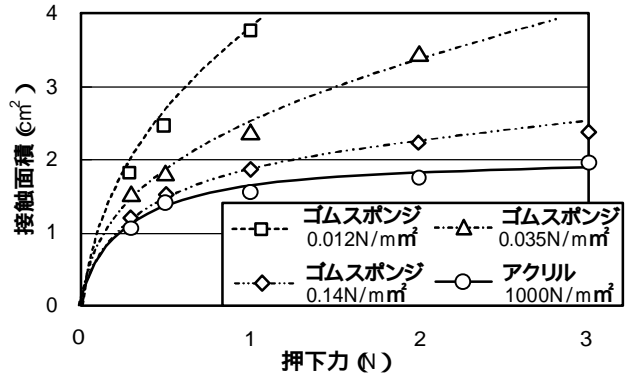


図6. ヘルツ理論による接触面積と実測値

3.3 接触面積制御部の特性

接触面積制御部のゴム膜を圧縮空気で膨張させたときの、指先とゴム膜の接触面積と、空気圧および押下力との関係は、実測データにもとづいてモデル化をおこなった。接触面積の計測は、3.2節と同様の手法で行った。また、3.2節のアクリル実験における標準偏差が10%程度であったため、今回は平均的な被験者1名のデータをもとにモデル化した。

実測により得られた、空気圧0~8kPaのときの、押下力と接触面積の関係を図7に示す。さらに、各空気圧における押下力と接触面積の関係を、(6)式のように対数近似した。

$$S = a \times \log(F) + b \quad (6)$$

(S: 接触面積, F: 押下力, a・b: 係数)

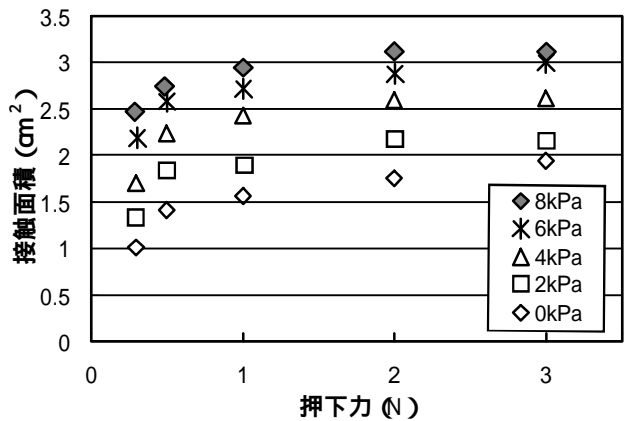


図7. 接触面積制御部の空気圧 - 押下力 - 接触面積特性

ここで、式(6)は、空気圧によって傾きa、切片bが異なる。そこで、さらに空気圧と傾きaおよび切片bの関係を、(7,8)式のように直線近似し、空気圧によって変化する押下力と接触面積の関係をモデル化した。

$$a = x_a \times P + y_a \quad (7)$$

$$b = x_b \times P + y_b \quad (8)$$

(P : 空気圧, a : 傾き, b : 切片, $x \cdot y$: 係数)

($x_a = -1.8965$, $y_a = 0.838$,
 $x_b = 21.091$, $y_b = -0.1099$)

この近似により, 指先接触面積は, 押下力 F と空気圧 P および上記の 4 定数から, (9)式を用いて算出することが可能となる.

$$S = (x_a \times P + y_a) \times \log(F) + (x_b \times P + y_b) \quad (9)$$

実測値と近似モデルの関係を図 8 に示す.

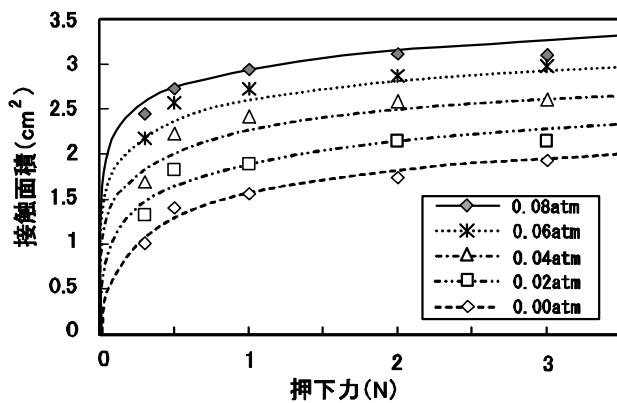


図 8 . 空気圧・押下力・接触面積の実測値と近似モデルの特性

また(9)式より, 接触面積と押下力から空気圧を求める(10)式が導出され, ヘルツ理論により算出された物体と指先の接触面積と, バネモデルから算出された反力を用いて, 空気圧を算出することが可能になる.

$$P = \frac{S - y_a \times \log(F) - y_b}{x_a \times \log(F) + x_b} \quad (10)$$

(10)式を用いて, ヤング率 0.001N/mm^2 , 0.01N/mm^2 , 1000N/mm^2 の物体の柔らかさを表現する際の, 指先の反力に対する空気圧の変化を図 9 に示す. 各ヤング率は, おおむねゼラチンゲル, ゴムスポンジ, プラスチックに相当する. ヤング率 0.001N/mm^2 のように非常に柔らかい物体は, わずかな押下力によって指が埋没し, 接触面積が増加するため, その柔らかさを表現する際には, わずかな反力で空気圧が増加する特性となっている.

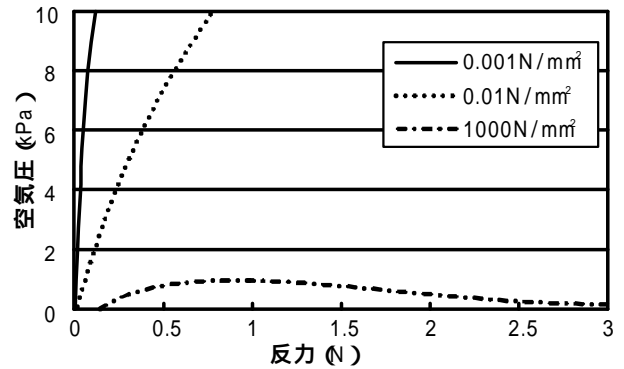


図 9 . 3 種類の柔らかさを表現したときの反力に対する空気圧の変化

3.4 ゴム膜による圧迫力特性

ゴム膜内部の空気圧が高くなると, ゴム膜が膨らみ指先接触面積が増加する. それと同時に, ゴム膜が膨張することによって, 指先がアタッチメントに押しつけられ, 図 10 のように, 指先にはモータによる反力とは別に圧迫力が加わる. そこで, 図 10 のように指の爪側に荷重センサ (FlexiForce : Tekscan 社) を取り付け, 空気圧とゴム膜膨張による圧迫力の関係を計測した.

計測の結果, 力覚に対する圧迫力の比率は, 提示する柔らかさによって異なるが, 4.1, 4.2 節の評価実験に用いた 3 種類の柔らかさの物体の場合には, ヤング率 0.012N/mm^2 で約 60%, ヤング率 0.035N/mm^2 で約 40%, ヤング率 0.14N/mm^2 で約 10%であった. そこで, 指先に反力を正確に提示する目的で, 図 4 のように算出された反力からゴム膜による圧迫力を減算してモータを駆動することで, 圧迫力を相殺した. 図 11 にゴム膜による圧迫力特性を示す.

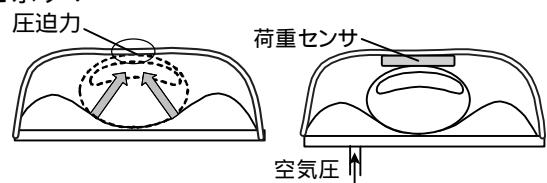


図 10 . ゴム膜による圧迫力の計測

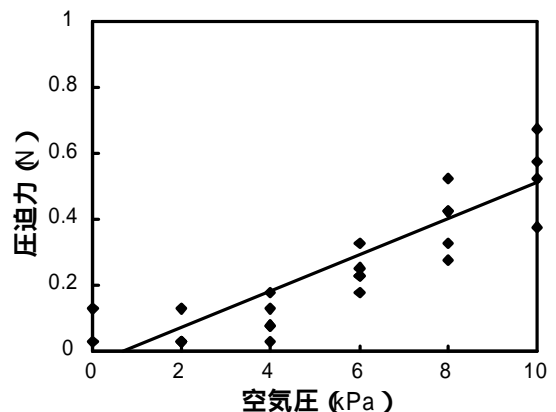


図 11 . ゴム膜による圧迫力特性

4. 柔らかさ感覚定量化実験

4.1 アクティブタッチによる感覚量の定量化法

開発した装置によって表現される柔らかさ感覚の定量化を行うため、調整法を用いた評価実験を行った。まず被験者に1辺50mmの立方体の柔らかいゴムスポンジを30秒間触れさせ(アクティブタッチ)その物体の柔らかさを記憶させる。次に柔らかさ提示装置を装着した状態で、そのゴムスポンジと同じ柔らかさになるようにヤング率を調整する課題を行わせた(図12)。ゴムスポンジの種類は、ヤング率0.012, 0.035, 0.14N/mm²の3種類で行った。また、これと同じ実験を反力提示のみの(接触面積を制御しない)条件下で行い、結果を比較した。被験者は成人男子10名、試行は上昇、下降調整ともに3回ずつ行い、平均を求めた。

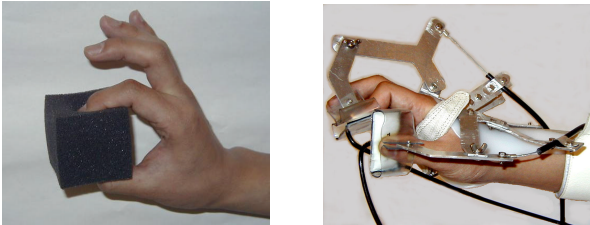


図12. 柔らかさ感覚定量化実験

4.2 パッシブタッチによる感覚量の定量化法

次に、アクティブタッチと同じ3種類のゴムスポンジを用いて、パッシブタッチによる柔らかさ感の定量化をおこなった。まず被験者の指にスポンジを押しつけて柔らかさを記憶させた後、柔らかさ提示装置を装着し、調整法によりゴムスポンジと同じ柔らかさになるようヤング率を調整させた。実験方法は、示指の指腹を上にして固定し、上からゴムスポンジを1秒間に1回の頻度で計30回2Nの力で押しつけた後、柔らかさ提示装置の示指のみを装着し、調整法による定量化を行った。柔らかさ提示装置では、指先への反力を自動的に1秒周期で0から2Nまで正弦波状に反復制御し、接触面積もあわせて制御した。被験者はアクティブタッチと同一の10名とした。

また、パッシブタッチ課題では指の位置に変位を生じないため、力覚提示装置でパッシブタッチ時の柔らかさ感覚を表現することは原理的に不可能である。よって、パッシブタッチ課題は接触面積制御を伴う条件のみで行った。

4.3 アクティブタッチの実験結果

実験結果を図13に、誤差率および標準偏差を表1, 2に示す。人間が知覚する硬さ感覚は、弾性係数の対数によく比例するという実験結果[10]に従い、結果は対数軸で表示した。

3物体ともに、力覚提示のみに頼って調整したヤング率は、実物体よりも小さくなる傾向を示した。実物体よりも小さなヤング率に(柔らかく)調整した仮想物体を、実物体と同等に感じたことは、すなわち力覚提示装置によって提示される物体は、設定したヤング率を持つ実物体よりも硬く感じることを意味する。これは、力覚提示装置による柔らかさ表現の問題として述べられているように[10]、対象物の変形による接触面積の増加の表現を欠くことによるものと考えられる。

また、柔らかさ提示装置において被験者が調整したヤング率は、力覚提示のみの場合よりも大きく、実物体のヤング率との差が小さかった。t検定を行ったところ、ヤング率0.12N/mm²において、危険率3%で力覚提示と柔らかさ提示装置の間に有意差が見られた。すなわち、柔らかさ提示装置を用いることで、柔らかい物体の提示に際しては、力覚提示のみよりも正確な柔らかさの表現が可能であることが、実験的に確認された。また、標準偏差も表2のようにヤング率0.012 N/mm²で約13%、0.035 N/mm²で約22%減少していたことから、接触面積制御により、柔らかさの知覚が容易になったことが伺える。

4.4 パッシブタッチの実験結果

実験結果を図14に、誤差率を表3に示す。アクティブタッチに比較して、調整したヤング率の差が小さく、標準偏差は大きくなっていった。そこで対応付きt検定を行ったところ、0.1%の危険率で調整したヤング率に有意差が認められた。したがって、パッシブタッチ課題においても柔らかさの識別は可能であり、力覚提示装置のみでは不可能なパッシブタッチでの柔らかさ提示が、接触面積制御を併用することで可能となることが示された。

調整したヤング率の差が実際の値よりも小さかった原因の一つとして、指先の非線形な弾性特性が挙げられる。人間が物体の柔らかさを知覚するため物体を把持する際には、柔らかい物体は小さな、硬い物体は大きな力で把持する[12]。しかし、今回のパッシブタッチ課題では、接触面積制御による柔らかさ感覚の提示能力を検証するために、柔らかさ知覚への押下力の影響を排除する目的で、3種類とも同一の押下力(2N)を用いた。そのため、硬い物体を指に押しつけた場合は、アクティブタッチ時と比較して、対象物体の変形は押下力に比例して小さくなる。他方、指の変形は非線形弾性特性のため、接触面積はそれほど減少しない。このため、アクティブタッチ時よりも硬く知覚され、ヤング率を小さく調整した可能性が考えられる。

したがって、仮想環境においてパッシブタッチでの柔らかさ提示をおこなう際には、対象物の柔らか

さに応じて押下力の大きさを変化させることにより、接触面積の変化率も大きくなり、アクティブタッチ時に近い柔らかさ感覚の表現が可能になるものと考えられる。このことは、変位情報と反力情報を伝送し、視覚ディスプレイと力覚提示装置を介して提示する弾性感覚の受動的共有において、反力一定把持時の変位と反力を伝送提示した時と比較して、随意的把持および変位一定把持で識別率が高かった[16]ことから予想される。

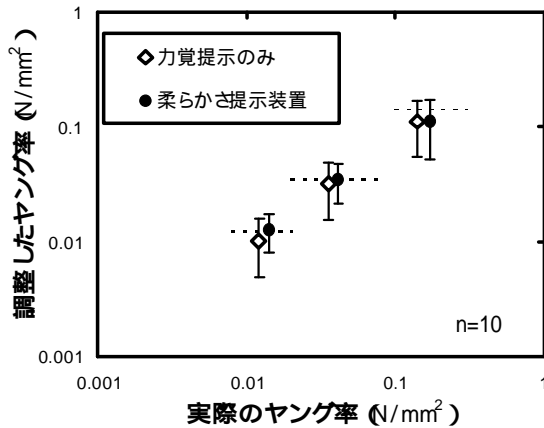


図 1 3 . アクティブタッチの実験結果

表 1 . アクティブタッチでの実物体との誤差率

試料ヤング率 (N/mm ²)	力覚提示のみ (%)	柔らかさ提示装置 (%)
0.012	15.0	4.2
0.035	9.4	1.7
0.14	20.6	20.4

表 2 . アクティブタッチでの標準偏差

試料ヤング率 (N/mm ²)	力覚提示のみ	柔らかさ提示装置
0.012	0.0053	0.0046
0.035	0.0164	0.0128
0.14	0.0562	0.0588

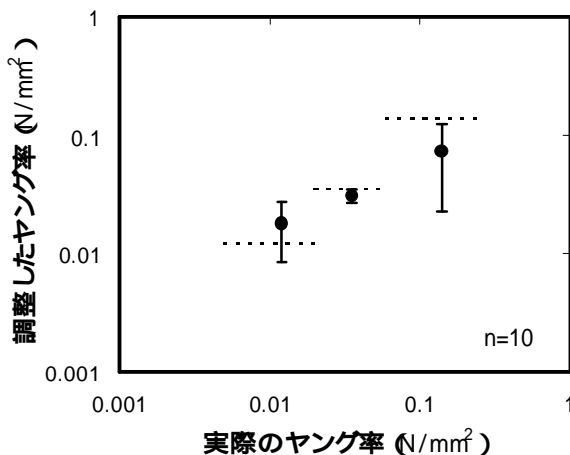


図 1 4 . パッシブタッチの実験結果

表 3 . パッシブタッチでの実物体との誤差率

試料ヤング率 (N/mm ²)	誤差率 (%)
0.012	51.7
0.035	10.9
0.14	47.5

4.5 検討

今回実験に使用した指のモデルは、代表的な被験者 1 名の特性にもとづくものである。試作した装置では指先の太さにあわせて締め付けを調整しており、また図 5 のように指の大きさが同程度であれば特性も類似しているため、ある程度の範囲に適用可能と考えられるが、極端に指の太さが異なる場合には、ユーザにあわせた指先モデルを作成する必要がある。

評価実験では心理物理実験をおこない、指先のヤング率の約 1/3 から 4 倍の範囲において、柔らかい物体を対象とするアクティブタッチにおける実物体に近い柔らかさ感の提示能力、およびパッシブタッチでの柔らかさ感の提示能力を確認した。アクティブタッチ実験において、比較的硬いヤング率 0.035、0.14 N/mm² の物体で、力覚提示装置との有意差が見られなかった原因としては、指先アタッチメント部の構造上の問題が考えられる。今回試作したシステムでは、仮想物体が指先に接触していない状態でも、指先アタッチメントが指先に接触している。そのため、提示される接触面積変化はヘルツ理論で算出された変化量よりも減少する。接触面積変化が小さな比較的硬いヤング率の物体の把持で有意な効果が見られなかったのは、この影響によるものと考えられる。より正確な柔らかさ感覚の提示のためには、指の爪側にアタッチメント部を固定する、あるいは遭遇型力覚提示装置の使用などにより、初期状態での指腹との接触を回避する方法が考えられる。

さらに、今回の実験対象よりも柔らかい物体を表現する場合には、3.4 節で述べた、ゴム膜の膨張に伴う指先への圧迫力を低減するために、より柔軟な素材の使用が有効と考えられるが、耐久性が課題となる。他方、指先よりも硬い物体は、反力制御のサンプル間隔を小さくするなど、接触時の撃力の表現能力を高めることが重要と考えられる。

また、今回試作したシステムは、仮想物体のエッジなど指先への形状提示能力を有さず、形状表現のためはピンアレイなどの触覚提示装置を用いる必要がある。この場合、指先皮下の受容器を高い空間分解能で刺激することが可能となれば、接触面積の動的変化を表現することも考えられる。したがって、高密度での指先触覚提示が実現されれば、本研究でおこなったように刺激する指先の圧受容器数を動的に制御することにより、形状表現に加えて柔らかさ

の表現も可能になるものと期待される。

5. まとめ

本研究では、指先力覚提示装置と指先接触面積制御装置を統合した柔らかさディスプレイを試作し、接触面積計算にヘルツ理論を用いて、柔軟弾性物の提示を試みた。その結果、力覚提示に加えて接触面積制御を行うことにより、柔らかい弾性物体ではより実物体に近い柔らかさ感覚を表現できる可能性が示された。また、従来の力覚提示装置で不可能であった、パッシブタッチでの柔らかさ提示も可能であることが、実験的に示された。

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。

参考文献

- [1] 中茂, 広田, 廣瀬: 高密度点刺激型触覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集, pp.253-254(2003)
- [2] 梶本, 稲見, 川上, 館: 電気触覚を用いた皮膚感覚のオーグメンティドリアリティ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.339-348 (2003)
- [3] 山本, 高崎, 樋口: 超薄型静電アクチュエータを用いた触覚インタフェース, SICE SI2000 講演論文集, pp.59-60(2000)
- [4] 赤澤, 昆陽, 田所, 高森: 高分子ゲルアクチュエータを用いた触覚ディスプレイによる手触りの柔らかさの提示, 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集, pp.221-224(2003)
- [5] 牧野, 浅村, 篠田: 吸引圧を用いるマルチプリミティブ触覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集, pp.243-246(2003)
- [6] <http://www.sensable.com/>
- [7] <http://www.virtex.com>
- [8] 岩田, 中川, 中島: 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)
- [9] 藤田: グローブ型仮想物体硬さ提示装置の試作と評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II, No.10, pp.2394-2400(1997)
- [10] 佐々木, 藤田: 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, pp.795-802(2000)
- [11] 大森, 藤田: 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学会第5回大会論文集, pp.251-254(2000)
- [12] 藤田: 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, 電子情報通信学会論文誌(D-), Vol.J85-D , No.11, pp.1733-1740(2002)
- [13] HEF / CETIM: 摩擦と磨耗のマニュアル, 泰山堂 (1999)

- [14] 前野, 小林, 山崎: ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係, 日本機械学会論文集(c編), Vol.63, No.607, pp.881-888(1997)
- [15] 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)
- [16] 宮田, 藤田: 反力と画像の伝送による弾性物体把持感覚の受動的遠隔共有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.8, No.1, pp.3-10(2003)

(2003年11月10日受付)

[著者紹介]

池田 義明 (学生会員)



2003年東京農工大学工学部情報コミュニケーション工学科卒業。現在同大学院博士前期課程在学中。物体の柔らかさを提示する力触覚ディスプレイの開発と遠隔共有の研究に従事。

藤田 欣也 (正会員)



1988年慶應義塾大学大学院理工学研究科修了。相模工業大学、東北大学医学部、岩手大学を経て、現在東京農工大学工学部教授。力触覚や歩行感覚の提示および遠隔共有仮想空間、ならびに医用福祉工学に関する研究に従事(工学博士)。