

Haptic Broadcast : 筋活動電位による把持力推定を用いた 弾性物体の能動的把持感覚伝送システムの試作

西坂 聡*¹, 池田 義明*², 藤田 欣也*²

Haptic Broadcast : Remote Haptic Sharing of Elastic Objects allowing Active Pinch
using Electromyogram for Force Estimation

Satoshi Nishizaka , Yoshiaki Ikeda and Kinya Fujita

Abstract: This paper proposes an estimation method of elastic parameter using electromyogram and a prototype of "Haptic Broadcast" system for remote sharing of haptic sense. The elastic parameter of the object was estimated without disturbing the softness perception of the object by using electromyogram for pinch force estimation. The estimated elasticity was transferred over the computer network and displayed using fingertip softness display device, that consists of fingertip reaction force display units and fingertip contact area control modules. The remote-recognition experiment of eight kinds of elastic objects (0.008 to 0.7 N/mm²) was performed in five volunteers. The experimental results showed that the remote haptic sharing is feasible with the proposed method.

Key Words: softness, haptic sharing, tele-existence, grasp

1. はじめに

インターネットの普及に伴い、テキストチャットやマルチメディアメッセージングなどの新しいコミュニケーションシステムが普及しつつある。従来の遠隔コミュニケーションシステムは、電話などの音声通話やテレビ電話、遠隔会議システムなど、視覚や聴覚情報の伝送を主とするものであった。しかし、視聴覚情報に加えて力触覚や味覚、嗅覚などの情報を伝送し提示することによって、遠隔ユーザの存在感の増強や、遠隔共同作業の効率化などが実現されるものと期待される。特に、力触覚の伝送は、見ただけではわかりにくい対象物の物理特性を伝送する有効な手段であり、その実現が期待される。

力触覚の遠隔伝送や共有に関する研究は、力触覚提示装置の活発な研究を背景に、さまざまなものが試みられている。例えば Shen らは IEEE HLA/RTI にもとづいてデータ通信をおこなう遠隔力触覚提示システムを構築し、予測を用いた遅延補償の有効性を検討している[1]。

Kim らは、遠隔地の2人のユーザがハプティックデバイスを操作して1つの仮想物体を持ち上げる実験を実施し、ダンピングを付加することで遅延の影響を軽減し、力覚を伴う遠隔共同作業は共有感覚の

増強につながることを示した[2]。廣瀬らは2地点の没入仮想環境を専用 ATM 回線で接続し、2人で弾性板を曲げる遠隔地間協調作業を実現した[3]。これらは、遠隔地間で共有した仮想空間内での共同作業における力覚提示の効果を示すことを目的とするものであり、遠隔地に実在する物体の力触覚情報の伝送を目的とするものではなかった。

遠隔地に実在する物体から得られる力触覚の伝送を実現する試みは、遠隔地の情報をロボットなどの装置を介してセンシングして伝送するトレイグジスタンスシステムをはじめに、多くの試みが見られる。例えば、川淵らはマスタスレーブ型のシステム TELESAR によって、操作者が遠隔地のロボットを操作する際のロボット指の力を送信することで、物体の硬さを伝達可能とした[4]。同様に、Pai らは形状と物理特性の両者を計測し伝送する ACME システムを開発した[5]。また山本らは、なぞり動作による振動を検出する触覚センサと静電触覚ディスプレイを用いた遠隔触感提示システムを開発し、遠隔地にある物体の表面を触っているかのような感覚を実現した[6]。これらのシステムは、ユーザに遠隔地の力触覚情報を知覚することを可能にするものであるが、人間-機械系システムであるため、遠隔地のユーザが触れた感触を他地点のユーザに伝える人対人のコミュニケーション機能は有さない。

人と人の力触覚を介したコミュニケーションに関しては、Brave らは遠隔地間でローラの運動を連動させることによる、触覚を介したコミュニケーションシステムを提案している[7]。しかし、伝送可能な

*1: 東京農工大学

*1: Tokyo University of Agriculture and Technology

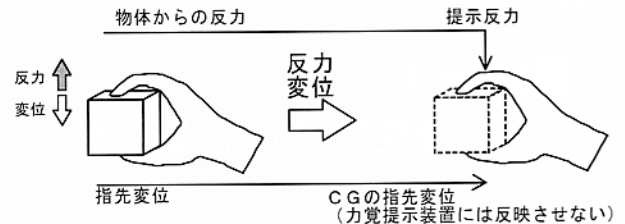
*2: 東京農工大学大学院

*2: Graduate School of Tokyo University of Agriculture and Technology

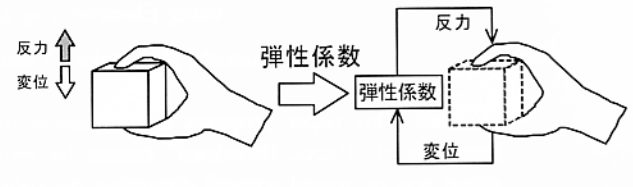
情報は互いのローラ操作に関するもののみであり、これまで遠隔地のユーザが知覚している対象物の触覚を伝達するシステムは実現されていなかった。

これに対し、筆者らは図1 (a) のように視覚情報と反力を伝送し提示する方法による受動的弾性感覚共有システムの開発を行い、遠隔ユーザが弾性感覚を共有し、弾性係数の相違を識別可能であることを確認した[8]。しかし、把持対象物が仮想物体であったことに加えて、送信側と受信側のユーザの動作を同期させる必要があるため、受信側で随意的に把持をおこなうことができないという問題があった。対して、図1 (b) のように柔軟物体を把持した時の物体の弾性係数を実時間で推定・伝送すれば、受信側での能動的把持が実現されるとともに、一对多での触覚の伝送 Haptic Broadcast が可能になる。人が触れている物体の特性を実時間で遠隔地の多数の人に伝える Haptic Broadcast の実現は、映像や音声に加えて触覚情報を伝送する新しい情報伝達メディアにつながるものと期待される。しかし、送信者が把持している物体の特性を実時間で伝達するためには、把持動作中に対象物の弾性係数を推定する必要がある。そこで、筆者らは把持動作中に弾性係数を推定し伝送する弾性感覚伝送システムを試作したが[9]、送信ユーザが指先に力センサを装着する必要があるため触覚が阻害される問題や、受信側でのヤング率への換算などの付随的課題があった。このほか、本研究に比較的近いアプローチを取るものとして、書字時の熟練者の動作と操作力を記録し、両者の関係から機械インピーダンスを求めて学習者に教示する Saga らの Haptic Video[10]があるが、動作や提示情報が異なることに加え、実時間での推定や伝達をおこなうものではなかった。

そこで、本研究では、送信側で指先の触覚を阻害することなく物体の弾性係数を推定する方法として、指の筋活動電位から推定した把持力を用いて対象物の弾性係数を算出し伝送する Haptic Broadcast システムを試作し、弾性物体の把持感覚伝送実験をおこなったので報告する。



(a) 反力と画像による変位を伝送



(b) 弾性係数伝送による方法

図1 弾性物体把持感覚の遠隔伝送の方法

2. Haptic Broadcast システムの全体構成

弾性物体の把持感覚を遠隔伝送する Haptic Broadcast システムの全体構成を図2に示す。送信側では、弾性物体を把持したときの短母指屈筋の筋活動電位を計測し、あらかじめロードセルを用いて校正した換算係数を用いて把持力を推定する。同時に、ポテンシオメータによって、拇指と示指の指先変位を計測する。弾性係数推定部では、指先変位と対象物体の大きさから押し込み量を求め、1回の把持が完了すると、把持動作中の把持力と押し込み量から物体の弾性係数を推定し、物体の大きさと共に受信側に UDP/IP プロトコルを用いて送信する。物体の大きさは、指先が対象物体に接触を開始した時の指先間距離を、手動操作でオンライン記録することによって求めた。

受信側の柔らかさ提示装置[11]では、ポテンシオメータによって受信側ユーザの指先変位を検出し、受信した弾性係数をもとに Hook の法則にもとづいて反力を算出し、指先反力提示装置の直流モータを定電流駆動する。同時に、弾性係数から変換したヤング率をもとに、Hertz 理論を用いて指先接触面積を

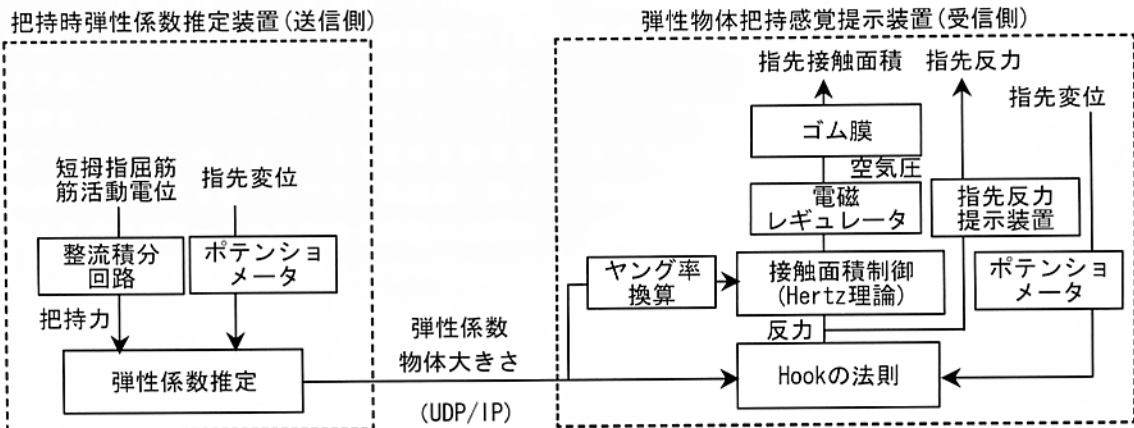


図2 弾性係数を推定し伝送する Haptic Broadcast システム

計算し、エアコンプレッサから指先ゴム膜に送出するゴム膜内部の空気圧を電磁レギュレータで制御することで指先の接触面積を制御する。これにより、送信側で物体の把持動作を行うと、1回の把持動作が完了した直後に弾性係数が伝送され、ほぼリアルタイムに受信側で物体の大きさと柔らかさを能動的に感じる事が可能となる。

3. 筋活動電位を用いた弾性係数の推定

3.1 筋活動電位を用いた把持力の推定

把持対象物の弾性係数を推定するためには、指先の変位と反力を計測する必要がある。ここで、指先反力、すなわち把持力の計測に関しては、力センサを用いて指先反力を直接計測する方法と、間接的に推定する方法が考えられる。しかし、指先に荷重センサを取り付ける直接法では、送信側ユーザの触覚を阻害し、現在送信側ユーザが感じている対象物の柔らかさを即時に受信側ユーザに伝えることを目的とする場合には問題となる。ユーザの触覚を阻害せず間接的に把持力を推定する方法には、例えば、指先の血流の変化を光学的に検出する方法[12]などがあるが、原理的に血流は指先への応力と関節角度変化の両者の影響を受けるため、精度が得にくいという問題がある。あるいは、密度など指先の物理的特性の変化を計測するなどの方法も考えられるが、本研究では間接的な把持力測定法として筋電位に着目した。等尺性収縮条件下では、筋活動電位と筋収縮力に線形関係が成立することが知られている。表面電極法では筋と電極位置の関係が動作によってわずかにずれるなどの問題があるが、等張性収縮においても、筋活動電位は収縮力の指標として広く用いられている。そこで、図3のように短拇指屈筋の筋活動電位を直径25mmの自己粘着型電極（日本光電 P-150）と通過帯域を0.1Hzから3kHzに設定した生体信号増幅器（日本光電 AM-601G）を用いて計測し、その整流積分値を把持力の指標として用いた。積分時定数は把持動作速度を考慮し、実験的に0.1sとした。

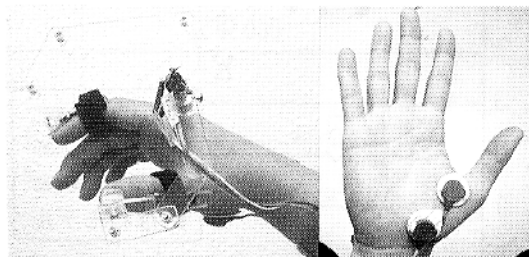


図3 ポテンショメータと筋活動電位計測電極

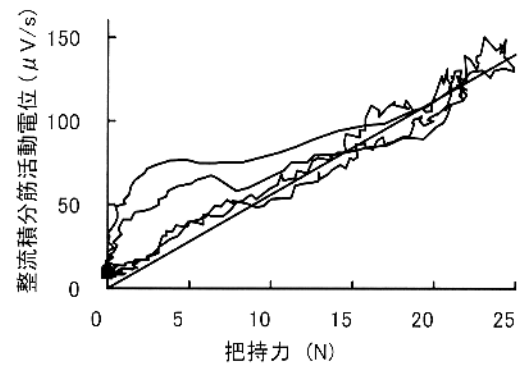


図4 把持力と筋活動電位整流積分値の関係の例

図4に把持動作を2回反復した時の筋活動電位整流積分値と把持力の関係の例を示す。把持時には良好な線形関係が得られているが、対象物体を離すときには把持力の小さい領域での誤差が増大する（図中の5N以下で誤差が大きくなっている2本の軌跡）。そこで、本システムでは弾性係数推定には開放時のデータを除外して使用した。また、短拇指屈筋は拇指の質量のため、手の姿勢を維持だけでも活動する。そこで、把持動作は拇指への重力の影響が最小となる姿勢（手掌が下方を向く姿勢）でおこなうこととした。筋活動電位整流積分値から把持力への換算は、あらかじめロードセルを把持して把持力と筋活動電位整流積分値の関係を計測し、線形近似で得られた回帰直線を用いておこなった。

3.2 弾性係数の算出

弾性係数の推定は、筋電位から推定された把持力と、図3のように拇指と示指の爪に両面接着テープで固定されたポテンショメータを用いて計測される指先変位を用いておこなった。

対象物の把持に際しては、弾性係数の推定を開始する前に、指先接触開始時の拇指と示指の指先間距離を手動操作でオンライン記録し、物体の大きさとみなした。対象物の押し込み量は、各時刻の指先間距離から物体の大きさを減算して求めた。

ここで、指先変位から求めた対象物体の押し込み量は、対象物の変形による成分と、指先の変形の両者を含む。そこで、試作システムでは、事前にロードセルとポテンショメータを用いて、指先変形による見かけの押し込み量と把持力の関係を事前に計測した。指先の変形は反力に対して対数状に変化することから[13]、指先反力 f と見かけの変位 x の関係を(1)式を用いて近似し、実測値から最小二乗法で n および m を決定した。弾性係数推定時には、近似した特性を用いて指先変形による成分を押し込み量から減算し使用した。

$$x = n \log(f) + m \quad (1)$$

筋活動電位からの把持力の推定は前節の要領でおこない、押し込み量が極大値となった時点で1回の把持動作が完了したものとみなし、押し込み量と把持力の回帰直線を求め、その傾きを弾性係数とした。ただし、把持力が極大となる領域付近では筋活動の分散が大きく、押し込み量が小さい領域は把持動作以外の活動が混入するため、推定には、把持動作による押し込み量の両端 1mm の区間を除外して用いた。

以上の把持力推定および弾性係数算出に際して、事前計測が必要な特性は、ポテンシオメータと指先間距離、筋活動電位と把持力、および指先変形による見かけの変位特性、の3者であり、計測には数分から10分程度を要する。

4. 弾性物体把持感覚の提示

受信側での弾性感覚提示は、既報の指先接触面積と反力の同時制御による柔らかさ提示装置[8]を用いておこなった。この装置は、対象物の押し込み量と弾性係数から反力を算出して、図5のようにワイヤによって指先を牽引して反力を提示すると同時に、Hertz理論を用いて指先接触面積を算出し、指先に装着したゴム膜への送出空気圧を介して指先接触面積を制御し、柔軟物への埋没感を提示するものである。以下に装置と制御の概略を示す。

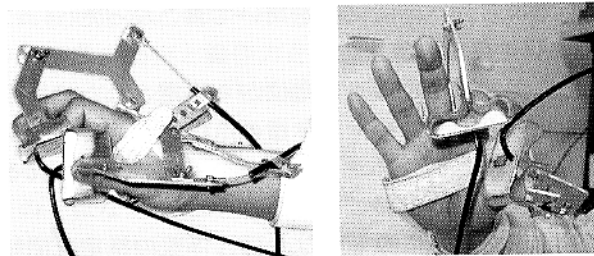


図5 弾性物体把持感覚提示装置の外観

4.1 反力の計算と提示

受信側では、ポテンシオメータにより計測されたユーザの拇指と示指の位置から、両指間の距離を計算する。本研究では、簡単のため、指先間距離が伝送された物体の大きさ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とした。このとき、指先に生じる反力は、Hookの法則によって、送信側から送られてくる弾性係数に押し込み量を乗算することで算出される。試作システムでは、算出された反力に比例した電流で牽引装置の直流コアレスモータ (FAULHABER, 2342S) を定電流駆動することによって、指先への最大 5N の反力提示をおこなった。反力提示部の遅延は、計算機内での処理も含めて 10ms である。剛体と剛体の接触を表現するには不十分と考えられる[14]が、本研究では弾性物

体が提示対象であり反力の立ち上がり時間が大きいいため、特に問題はなかった。

4.2 ヤング率への換算と接触面積の計算・提示

指と物体の接触面積は、Hertz理論を用いて近似的に算出するため、把持対象物のヤング率が必要になる。しかし、指先よりも把持した物体の断面積が大きいときには、指先との接触部分だけでなく、その周囲も圧縮されるため、単純に指先接触面積を用いてヤング率を算出すると、数倍程度の大きな誤差を生じるという問題があった[9]。そこで、本研究では、実験および数値シミュレーションによって、弾性係数からヤング率に変換する際の周辺圧縮による補正係数を求め、これを用いてヤング率への換算をおこなうこととした。

実験では、断面積の異なるゴムスポンジ (78, 400, 900, 1600, 2500 mm²,) を、接触面積が拇指指先と同程度 (78mm²) になるように接触部分を加工した荷重センサを用いて圧縮し、変位と反力から求めた弾性係数を断面積で除算してヤング率に換算した。図6に、それぞれ厚み 20, 30, 40mm の3種類で計測した平均値を示す。3種類の物体 (0.012, 0.035, 0.14 N/mm²) すべてで、接触面積が増加するにつれて、見かけのヤング率は増大し、実際の値の約5倍程度になる傾向を示した。

シミュレーションでは、2次元の連結ばねモデルに対して強制変位を与えて変形と反力を算出し、対象物体が円柱状であることを想定して3次元物体に換算した。モデルは、厚さを 50mm とし、押し込みによって強制変位を与える部分の幅を 10mm、押し込み量を 10mm とし、物体の横幅を 10mm から段階的に変化させた。連結点は 1mm 間隔で格子状に配置した。計算結果を図6に示す。実験結果と同様に、物体の断面積が増加すると約5倍に収束する結果となった。断面積が 500 から 1500mm² 程度の中程度の領域で実測値とシミュレーション結果が異なるのは、おもにシミュレーションにおいて物体と荷重センサの間のすべりを考慮していないことによると思われる。

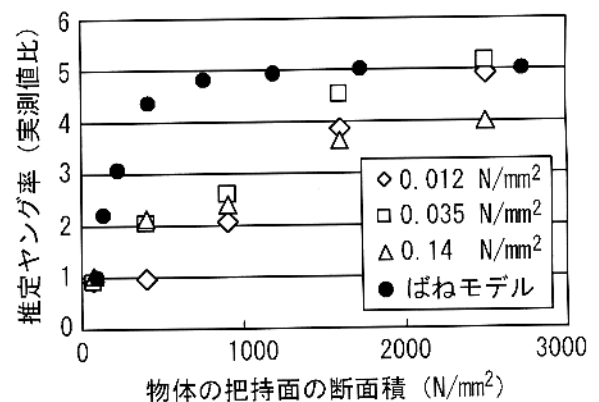


図6 物体の把持面断面積と推定ヤング率

以上の結果から、提案する弾性物体把持感覚伝送システムでは、物体の断面積が指先接触面積の20倍以上で十分大きいものと仮定し、そのときの補正係数5を用いて弾性係数からヤング率への換算をおこなった。

接触面積制御部は、コンプレッサ、各指1台の電磁レギュレータ（CKD，EVS100）および指先接触部で構成される。反力提示装置の末端に装着される指先接触部は、図5のように、厚さ0.1mmの塩化ビニル膜を長さ30mm幅50mmアクリル板上に中心部と周辺部のみを固定したものである。接触面積制御部の動作遅延は、レギュレータから提示部までの距離が300mmの条件下で、計算機内での処理も含めて15msであった。

5. ヤング率推定実験

5.1 実験方法

筋活動電位から推定した把持力を用いて算出したヤング率の精度と妥当性を検証するために、被験者に柔らかさの異なる4物体を順に把持させ、弾性係数の推定を行った。被験者は男子大学生5名である。実験に用いた物体は、1辺の長さ50mmの立方体のゴムスポンジ3種とシリコンゴム1種（ヤング率0.012, 0.035, 0.14, 0.7 N/mm²）で、被験者には、利き手を用いて対象物の柔らかさを認知するように指示し、把持および解放動作はゆっくりと行うように教示した。

5.2 実験結果

図7に、実測値と推定ヤング率の関係を示す。人間の知覚量は、物性値ではなく物性値の対数によく比例することから、対数表示とした。

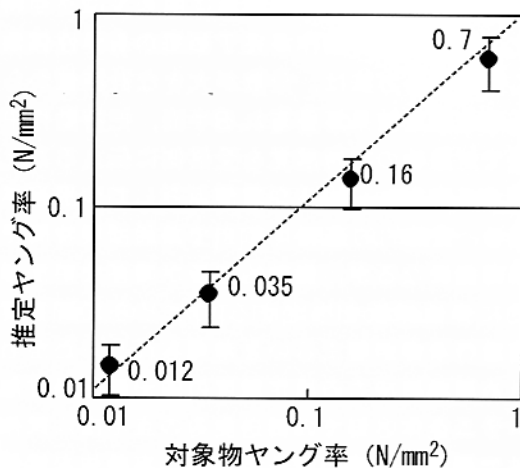


図7 ヤング率の推定値と標準偏差

図から、おおむね正しく推定されている様子が確認される。回帰直線の傾きは0.83であり、柔らかい

物体は硬く、硬い物体は柔らかく推定される傾向があった。これは、柔らかい物体では背景筋活動が、硬い物体では指先の変形が影響した可能性が考えられる。平均推定誤差率は約20%であり、受信側での提示誤差や人間の識別能力の影響を無視すれば、推定実験に用いた4物体の識別は十分に可能であると考えられる。また、得られた推定値には把持動作ごとのばらつきが生じるため、実用のためには複数回の把持動作から推定した値を平均する方法が考えられる。このような処理は、人間が物体の柔らかさを知覚する際に、複数回の把持動作を反復することが多く見られることから妥当な処理と考えられる。

6. 柔らかさ感覚伝送実験

6.1 実験方法

柔らかさ伝達システムを用いた弾性物体把持感覚の遠隔伝送実験を行った。送信側被験者には、ランダムに提示される8種類の弾性物体のいずれかの把持と解放をゆっくりと3回反復し、その柔らかさを認知するように指示した。受信側被験者には、伝送された弾性係数および物体の大きさをもとに提示される仮想弾性物体を柔らかさ提示装置を用いて把持させ、提示された仮想物体の柔らかさを認知した後に、机上に置かれた8種類の弾性物体を把持して、最も近いと思うものを選択回答させた。被験者は5名とし、各条件で3試行をおこなった。実験試料には、1辺の長さ50mmの立方体のゴムスポンジ7種とシリコンゴム1種（ヤング率0.008, 0.012, 0.021, 0.039, 0.075, 0.14, 0.26, 0.7 N/mm²）を用い、物体のテクスチャが認知に影響する可能性を排除する目的で、物体表面を薄い綿布（ガーゼ）で包装した。

また、上記の認知実験の結果は、試作したシステムの遠隔提示能力だけでなく、人間の認知能力も含む。そこで比較対照のため、実物体の柔らかさ認知実験を同一被験者に対して実施した。試行数は各物体3回づつとした。被験者には目隠しをした状態で対象物を把持させ、その後に目隠しをはずして最初に把持したと思う物体を8物体の中から選択回答させた。

6.2 実験結果

遠隔伝送実験の結果を図8に示す。円の大きさは回答数を示す。正答率は50%であるが、ほとんどの回答が、送信側で把持した物体とヤング率が近い物体を回答しており、受信側被験者は、ばらつきはあるものの、ある程度正しく弾性定数を認知していたことが読みとれる。このとき、回帰直線の傾きは0.79であった。ヤング率推定における傾き0.83との差は、柔らかさ提示装置の提示能力に起因するものと見ら

れる。また、回答ヤング率の標準偏差を物体ヤング率で除算することによって正規化した正規化標準偏差の平均値は 0.83 であった。先の実験での推定ヤング率の正規化標準偏差の平均値は 0.30 であり、認知される柔らかさのばらつきは、伝送される柔らかさのばらつきよりも大きくなっていった。これは、弾性感覚提示装置の特性に起因するものと、人間の知覚特性によるものとの二者を含むと考えられる。

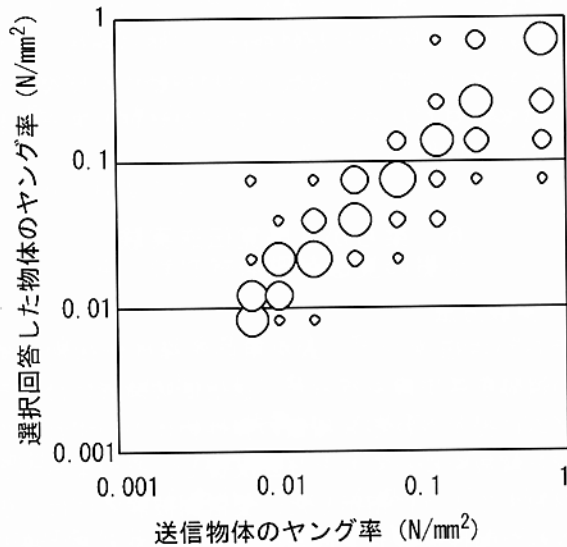


図8 弾性感覚遠隔伝送実験の結果

次に、実物体での実験結果を図9に示す。実物体の方が遠隔伝送条件よりも正答率は高いが、平均正答率は73%であり、実験に用いた8種類の物体の識別は、実物体においても困難な課題であったことがわかる。回帰直線の傾きは0.97であった。正規化標準偏差の平均値は0.42であり、遠隔伝送した場合の0.83の約半分であった。

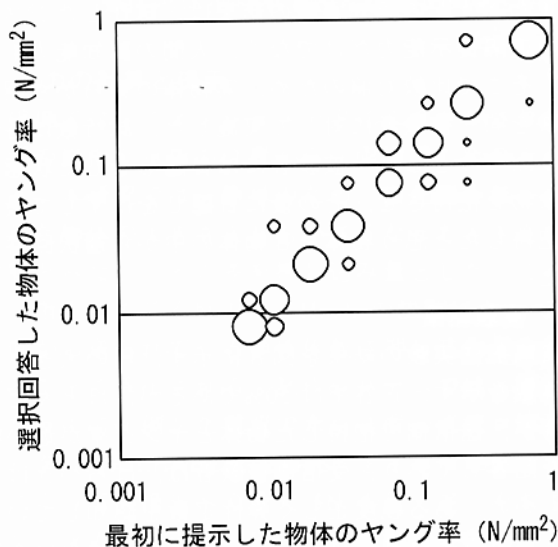


図9 実弾性物体を用いた物体認知実験の結果

実物体での正規化標準偏差が人間の認知特性に基づくばらつきであるとする、両者の差は、ヤング率推定によるばらつきに、柔らかさ提示装置の特性によるばらつきを加えたものに相当する。試料数は異なるが、ヤング率推定の正規化標準偏差が0.30であることから、試作したシステムでは、送信側でのばらつきの影響が大きかったものと推察される。

7. 検討

実験結果から明らかなように、試作したシステムの精度は、送信側での弾性係数の推定精度に大きく依存する。これは、把持力の推定に筋活動電位を利用したことによるものと見られる。筋活動電位の利用によって、ユーザの触覚を阻害せずに筋収縮力を推定可能となるが、筋収縮力は内力であるため、外力である把持力を直接推定するものではない。そのため、拮抗筋の活動や重力の影響により、推定把持力に誤差が生じる可能性があるため、手の姿勢や把持方法に制約が生じる。また、筋活動電位は分散が大きいため、指先と対象物の接触を筋活動電位から検出することができず、物体の大きさの推定を手動でおこなわなくてはならない点も課題となっている。把持力推定精度を改善し実用性を高める方法としては、例えば、小型のアクティブ電極を用いて複数筋の筋活動を計測すると同時に手の姿勢を加速度センサ等で計測し、事前に学習させたニューラルネットワークを用いて把持力を推定するなどの方法が考えられる。

他の把持力推定精度の改善方法としては、指先の物理的特性の変化を利用して把持力を推定する方法や、指先に対象物の特性を計測する小型センサを装着する方法なども考えられ、今後の検討課題である。

物体把持から提示までの遅延に関しては、今回採用した、1回の把持動作が完了してから弾性係数を推定し伝送する方法は、分散が大きな計測値から比較的正確な推定結果が得られる半面、把持動作中に実時間で対象物の把持感覚を受信側に伝えることはできず、Haptic Broadcast システムとしての用途が限定される。受動的遠隔共有[8]であれば実時間での共有が可能になるが、能動的把持ができないため、逐次的に弾性係数を推定する[9]などの方法で実時間推定を行う方が望ましいと考えられる。ただし、そのためには把持力の推定精度の向上が前提となる。

システム全体としての伝送能力の点では、試作システムでの認知結果のばらつきは、実物体を認知した場合の倍程度であった。例えば遠隔触診への応用を想定した場合、どこまで精密な提示能力を求めるとかの検討や、非線形弾性特性や粘性特性の推定・伝送・提示、さらには接線方向の物理特性の推定お

よび提示方法の検討も必要と考えられる。

試作システムでは、柔軟物体への指先の埋没による動的な指先接触面積の変化が、柔らかさの知覚において反力よりも寄与率が高いという実験結果[15]に基づき、反力に加えて指先接触面積の制御をおこなった。接触面積の変化は、厳密には断面積など把持対象物の形状に依存するが、今回は対象物の断面積は十分に大きいものと仮定して補正係数を求め、弾性係数からヤング率への換算をおこない、Hertz理論を用いて接触面積を近似計算した。送信側ユーザが知覚している柔らかさを正しく伝送するためには、送信側ユーザの指先接触面積を計測することが望ましいと考えられるが、現実には困難である。接触面積近似計算に大きな誤差がある場合や、接触面積制御をおこなわなかった場合の認知誤差を分析し、必要とされる提示能力に応じた装置設計が望まれる。

システムの実用化のためには、小型化や使用の簡便さも重要な課題である。特に、放送局のような一対多の伝送応用を考えると、提案手法の受信側で能動的に把持できる点は利点となるが、受信側での装置を小型で使用が簡便なものにすることが重要となる。装着の簡便さの改善方法としては、本研究で用いた指先に装着する非接地型力覚提示装置ではなく、2台の接地型力覚提示装置のエンドエフェクタに接触面積制御部を設置し、対象志向型のHaptic deviceとする方法などが考えられる。また、指先接触面積制御に必要な空気送出流量は比較的少ないため、コンプレッサと電磁レギュレータを用いる代わりに、機械的に空気を送出するなど、より簡易な装置に置換することで小型化が可能になるものと考えられる。

このほか、より正確で豊かな物体物理特性の表現のためには、テクスチャの表現など、柔らかさ以外の物理特性を提示するための装置との統合や整合性の検討も今後の課題である。

8. まとめ

本研究では、筋活動電位を用いて推定した把持力を用いて弾性係数を推定・伝送し、指先への反力と接触面積を制御することで提示する、弾性物体把持感覚遠隔伝送のためのHaptic Broadcastシステムの試作を行った。実験結果から、弾性物体の能動的把持感覚の遠隔伝送が可能であることが確認された。システム使用上の多くの制約を緩和することや線形弾性物体以外への対応などが、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。

参考文献

- [1] Shen X., Zhou J., Saddik El A., and Georganas D. N., Architecture and Evaluation of Tele-Haptic Environments, in Proc. 8th IEEE Int. Symp. on Distributed Simulation and Real Time Applications (2004)
- [2] Kim J., Kim H., Tay B., Muniyandi M. and Srinivasan M.A., Transatlantic Touch: A Study of Haptic Collaboration over Long Distance, Presence, 13(3), pp. 328-337 (2004)
- [3] 廣瀬, 広田, 小木, 齊藤, 中茂, 遠隔協調作業のための触覚サーバの構築, 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, pp.269-272 (2000)
- [4] 川淵, 梶本, 川上, 舘, テレレイグジスタンスの研究(第39報)TELESARII マスタ・スレーブフィンガーシステムの開発, 第4回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.598-599 (2003)
- [5] Pai K. D., Lang J., Lloyd J. and Woodham J. R., ACME, A Telerobotic Active Measurement Facility, in Proc. 6th Int. Symp. on Experimental Robotics(1999)
- [6] 山本, 山本, 樋口, 長澤, 静電触覚ディスプレイを用いた遠隔触感提示システムの開発, 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集, pp.41-44 (2004)
- [7] Brave S., Ishii H. and Dahley A., Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication, in Proc. CSCW '98, pp.169-178 (1998)
- [8] 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, 8(1), pp.3-10(2003)
- [9] 池田, 藤田, 弾性パラメータ伝送による能動的把持が可能な柔らかさ伝達システムの試作, 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集, pp.313-316 (2004)
- [10] Saga S., Vlack K., Kajimoto H. and Tachi S., Haptic Video, in SIGGRAPH2005(2005)
- [11] 池田, 藤田, 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, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 9(2), pp.187-194 (2004)
- [12] 野村, 前田, 爪センサーを用いた指の接触及び屈曲検出の研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 6(3), pp.215-220 (2001)
- [13] Hajian Z. A. and Howe D. R., Identification of the mechanical impedance at the human finger tip, J. Biomech. Eng., 119(1), pp.109-114(1997)
- [14] 赤羽, 長谷川, 小池, 佐藤, 10kHzの更新周波数による高解像度ハプティックレンダリング, 日本

バーチャルリアリティ学会論文誌, 9(3),
pp.217-226(2004)

- [15] 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, 5(1),
pp. 795-802(2000)

(2005年9月26日受付)

[著者紹介]

西坂 聡 (非会員)



2005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。在
学中は、筋活動電位を用いた弾性物
体の柔らかさ推定と遠隔共有の研
究に従事。

池田 義明 (非会員)



2005年東京農工大学大学院博士
前期課程情報コミュニケーション
工学専攻修了。在学中は、物体の柔
らかさを提示する力触覚ディスプ
レイならびに遠隔共有システムの
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
東京農工大学大学院教授。力触覚や
歩行感覚の提示と共有仮想空間コ
ミュニケーション, ならびに医用生
体工学に関する研究に従事(工学博士)。