

基礎論文

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

宮田敏之^{*1*2}, 藤田欣也^{*1}

Passive Sharing of Grasping Sense of Elastic Objects over Network by Reaction Force and Graphic Display

Toshiyuki Miyata^{*1*2}, Kinya Fujita^{*1}

Abstract - Force display devices are frequently utilized for the elasticity display, in order to control the relationship between the user's fingertip position and the contact force. Remote sharing of the elastic sense between two users has a difficulty in realization, because the transmittance of position induces additional force for position control, and this inessential force is perceived by the remote users as additional reaction force. In this study, a passive sharing method of elastic sense between two remote users is proposed by transmitting the computer generated images and fingertip reaction force. A series of psychophysical experiments demonstrated that 1) the users can discriminate the correct elasticity with 60 to 80 percent accuracy among 4 different elasticity in paired comparison experiment; 2) the users can answer the transmitted elasticity in adjustment experiment.

Keywords : force display, shared virtual environment, stiffness, psychophysical experiment

1. はじめに

力触覚ディスプレイを用いた仮想環境の情報提示に関する研究は、指先や道具と物体との干渉の提示に始まり、近年では硬さや摩擦、表面の微小形状といった物体の物理的特性の提示に関する研究が盛んに行なわれている。

さらに、高速ネットワークの普及によって遠隔地間での大容量データ通信が可能となったことから、複数クライアントで仮想空間の共有を実現するための研究が試みられるようになってきた。廣瀬らは東京大学のCABINと岐阜県VRテクノセンターのCOSMOSを専用のATM回線で接続し、2人で弾性板を曲げるという遠隔地間協調作業とその評価をおこなった[1]。木村らは、反力とグラフィクスを提示する5台のクライアントに対して、1台のサーバで仮想物体の管理をおこなうシステムを構築し、物体ポリゴン数と制御パフォーマンスの関係を検討した[2]。松本らは、サーバで仮想空間情報を管理し、クライアントではPHANToMを用いて力覚提示するシステムを実装し、ネットワーク遅延の影響を実験的に検討した[3]。また、Ishiiらは、人間のコミュニケーションにおいて触覚は感情の理解を助けるコミュニケーション手段であるとの立場から、さ

まざまな触覚ディスプレイを提案している[4]。これらの研究は、共有された仮想空間において、自分や他ユーザの作業反力を提示することによって協調作業を支援しようとするもので、協調作業志向型の共有といえることができる。

仮想空間の共有形態には、もう一つ考えることができる。それぞれが別個のユーザとして振る舞うのではなく、あたかも同一の人間になったかのように、感覚を共有するものである。遠隔ユーザが知覚している触覚を、他方に伝送する遠隔触診などを考えることができる。こちらは感覚を伝送し共有することを目的とするもので、いうなれば感覚共有志向型と呼ぶことができる。特に、力覚を伴う作業における感覚共有は、Yokokohjiらや佐野らの上肢動作を中心とした運動能力や技能の教授[5,6]や、遠隔触診のように力覚を伴う把持作業により知覚される対象物体特性の伝送など、さまざまな分野への応用が期待される。特に触診で病変部位を発見・診断するためには、物理特性そのものに加えて、物理特性が異なる部位の位置や大きさを知ることが必要であるため、視覚情報に加えて力覚情報を同期して共有することは重要と考えられる。

手指への反力提示に限定してみると、協調作業志向型の共有仮想空間に関する研究は、先に述べたように散見することができるが、後者の感覚共有志向型に関する研究はほとんど見受けられず、実装した際に得られる提示能力等は不明の部分が多い。また、次章で述べるように、特に弾性物体を把持したときの感覚(以

*1: 東京農工大学 工学部

*2: 現在、東京工業大学大学院

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

*2: Graduate School of Tokyo Institute of Technology

下弾性感覚と表記)の共有の実現に際しては、反力と変位の制御に関して基本的な問題が存在する。そこで本研究では、特に物体の弾性感覚の共有を目的として、先行研究の知見に基づき把持反力と把持動作画像の伝送・提示による受動的弾性感覚共有法を考案し、試作システムにおいて評価実験をおこなったところ、その可能性が確認されたので報告する。

2. 弾性感覚の提示と遠隔共有

2.1 弾性感覚の提示

弾性物体に変位を加えると、フックの法則として良く知られているように、変位置量 x に比例した反力 F が生じる。

$$F = kx \quad (1)$$

力覚提示装置を用いた弾性感覚の提示においては、図1のように、指先変位を検出し、変位と対象物体の弾性係数から反力を算出して指先に提示することで、弾性を表現する方法が一般的である。物体を把持したときの弾性の知覚は、必ずしも指先変位と反力に関係に限らず、指先接触面積の動的変化なども関与してくる[7]。また、指先への反力のうち接触部分の圧覚のみを指先圧迫力によって提示する方法が提案されており[8]、これを応用することで擬似的に指先反力と指先変位を制御する方法も考えられる。しかし、指先接触面積や圧迫力の制御をおこなうためには、装置構造の複雑化が避けられないため、本研究では力覚提示装置を使用して変位と反力のみを制御した際の、弾性感覚の遠隔共有の可能性を実験的に検討した。

2.2 弾性感覚の共有

図2のように、ユーザAが知覚している物体の弾性感覚を、ネットワークを介してユーザBに伝送する場合を考える。

遠隔で触診をおこなうような応用を考えたとき、知

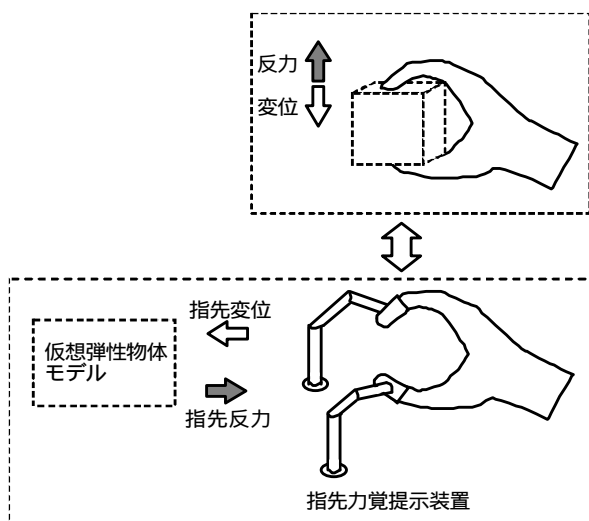


図1 力覚提示装置による弾性感覚の提示

覚対象は実物体の弾性であるが、本研究では、仮想物体の弾性感覚を伝送する場合を想定して議論を進める。なお、弾性感覚を伝送する側の指先の変位と反力を計測することで、以下の議論は実物体を把持する場合にも、基本的に適用可能である。

弾性感覚の知覚は、対象物体に対して能動的に変位を加えたときの反力の知覚によって成立するアクティブセンシングであり、図2においてユーザAが知覚する弾性感覚は、自らが随意的におこなう指先変位と、指先変位に対して力覚提示装置によって提示される反力の関係によって規定される。このとき、ユーザAが知覚したのと同じ弾性感覚をユーザBにも知覚させる方法を、以下に検討する。

実現方法としては、まず図3(a)のように、モデルの弾性値そのものを伝送する方法が考えられる。受信側のユーザは、伝送された弾性値をもとにローカルに仮想物体を把持することができるため、ネットワーク遅延による反力の遅れや振動の問題を生じることがな

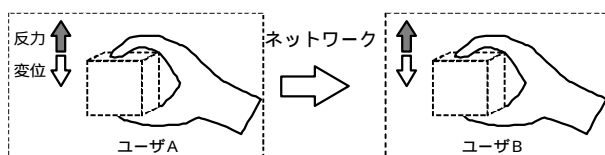


図2 弾性感覚の遠隔共有の概念図

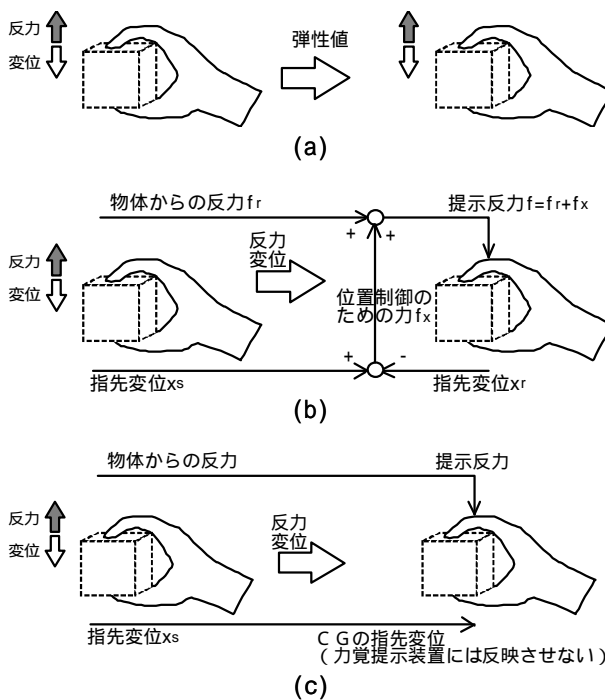


図3 弾性感覚の遠隔共有法

- (a) 弾性値伝送による方法
- (b) 力覚と位置の同時制御による方法
- (c) 提案手法：力覚と画像による変位を伝送

い、という利点を有する。反面、ローカルに把持と反力提示がおこなわれるため、それぞれのユーザの動作は独立であり、あたかも同一人物になったように感覚を共有する、という目的には合致しない。この問題に対し、ユーザAの把持動作画像を伝送しユーザBに提示することで、動作の同期をとる方法も考えられる。しかし、先行研究において、弾性感覚の知覚において、視覚による変位情報が固有感覚による変位情報よりも優位であるという実験結果が得られていることから[7]、反力と固有感覚から得られる変位の同期よりも、反力と視覚から得られる変位の同期を重視する方が、より高い提示能力が得られる可能性が高い。よって、本研究では視覚情報を重視し後述の方法を検討した。

次に、図3(b)のように、弾性感覚を規定する反力と変位の両者を伝送し、受信側のユーザに提示する方法が考えられる。しかし、受信側ユーザの指先位置と反力を同時に任意の値に制御することは不可能である。例えば、受信側ユーザの指先位置を、送信側ユーザの指先位置に一致させるためには、受信側ユーザに指先位置制御のための外力 f_x を加える必要がある。このとき、受信側ユーザに提示される反力 f は、本来の仮想物体からの反力 f_r ではなく、 f_r と f_x の和になる。したがって、提示される弾性感覚は、伝送された弾性感覚と異なる、という問題を生じる。遠隔制御などで用いられるバイラテラル制御を用いた場合にも、同様の問題が生じる。

そこで本研究では、図3(c)のように、力覚提示装置を用いて仮想物体からの反力のみを提示し、変位はコンピュータグラフィックスを用いて視覚を介して提示する方法を提案する。固有感覚を介した変位情報の提示がないため、視覚を介して提示される変位情報との矛盾を生じるが、物体の弾性感覚を知覚する際に、固有感覚よりも視覚情報の寄与が大きかったことから、弾性感覚の提示能力を有することが期待される。

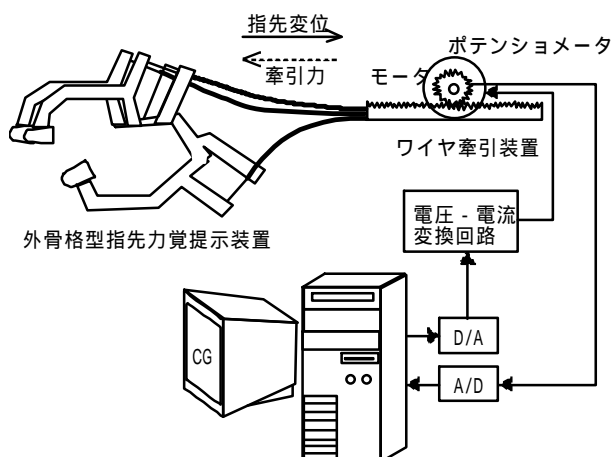


図4 指先力覚提示装置の構成

3. 受動的弾性感覚共有実験システム

3.1 指先力覚提示装置

弾性感覚の提示には、図4に示す外骨格型指先力覚提示装置を使用した。拇指、示指、中指の3指への反力提示が可能であるが、今回は拇指と示指の2指のみを使用した。最大提示反力は各指5Nである。今回使用した力覚提示装置は1自由度であるため、指先接線方向の反力提示能力を持たない。そのため、なぞり動作など把持以外の動作に対する弾性感覚提示は、対象外となる。力覚提示、描画および通信等すべての処理を1台のPCで行った。弾性感覚の共有実験では、このシステムを2組用意し、ネットワークを介して接続し使用した。

3.2 弾性感覚共有ソフトウェア

硬さ感覚共有システムの制御の流れを図5に示す。実線は指の変位情報の流れを示し、破線は反力情報の流れを示す。まず、弾性感覚送信側であるサーバは、10ms 毎に指先位置を力覚提示装置に内蔵したポテンシオメータによって検出し、指先での物体押し込み量と、あらかじめ設定した仮想物体の弾性係数を用いて反力を算出し、力覚提示装置によって反力を提示する。また同時に、指先変位と反力をクライアントに送信する。さらに、これらの処理とは非同期に、手指の動きに応じた手指と手掌のCGを3次元描画ライブラリ (OpenGL) を使用して描画する。

クライアントは、10ms 毎にサーバから指先変位と反力を受信し、力覚提示装置で反力を提示するとともに、非同期に指先変位に応じたCGを描画する。サーバ、クライアント間のネットワークは100BASE-TのLANであり、通信プロトコルは通信速度に優れたUDP/IPを使用した。

この方法によって、サーバ側ユーザは、単独の力覚提示装置を用いた場合と同様に、能動的に仮想物体を把持して反力を知覚することが可能となり、クライアント側ユーザは、サーバ側ユーザの把持動作をCGを介して観察しながら、その把持動作により生じる反力を指先で知覚することになる。すなわち、クライアント側ユーザは、受動的に、反力情報と視覚を介した指先

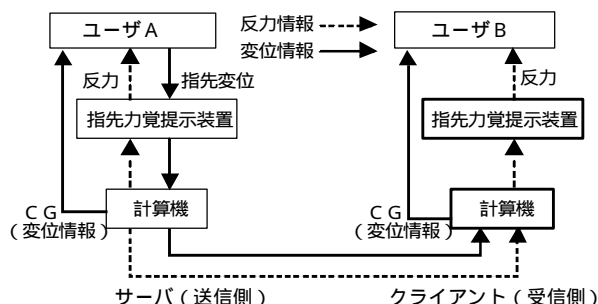


図5 弾性感覚受動的共有における情報の流れ

変位情報をサーバ側ユーザと共有することになる。

4. 弾性感覚共有実験

4.1 弾性感覚相対識別実験

4.1.1 実験方法

指先反力とCGによる指先変位の受動的遠隔共有による弾性感覚の伝送可能性を、一対比較法を用いた心理物理実験によって実験的に検討した。実験は、1) 人間が随意的に把持する場合、2) 計算機が仮想物体の最大押し込み量が一定(10mm)になるように把持する場合、3) 計算機が仮想物体の最大押し込み反力が一定(1N)になるように把持する場合、の3条件で行った。条件2、3)での把持動作は、仮想物体の弾性係数にかかわらず周期3.6sとした。仮想物体の弾性係数は、50, 100, 200, 400 N/mの4通りで、これらの全組合せ6通りの一対比較を、各被験者につき3回おこなわせた。提示順序はランダムとし、手指の姿勢を規定すると2章で議論した姿勢を規定するための外力の問題が生じるため、被験者の手指姿勢は規定せず、描画される画像にあわせて把持動作をおこなうことを許した。被験者は6名で、モニタの前方約450mmに着座させヘッドホンで音楽を聴取させた。画面に提示される仮想物体は一辺40mmの立方体とし、手指および手掌とともに描画した。ただし、画面上の仮想物体を変形させた場合、物体表面での反射の変化などが識別の手



図6 弾性感覚遠隔共有の実験風景。下段はクライアント側ユーザへの提示画面の例。

がかりとなる可能性があるため、心理物理実験において画面上の仮想物体は変形させないものとした。

被験者には力覚提示装置を右手に装着させ、順に提示される2つの仮想物体のうち、硬いと感じたものを回答させた。再試行は1度だけ許可した。なお、実験に使用した弾性係数は、あらかじめ予備実験をおこない、被験者が能動的に把持をおこなった場合には、100%の識別率が得られる条件であることを確認した。

4.1.2 相対識別実験の結果

図7に実験結果を示す。人が随意的に仮想物体を把持する条件1では100%の識別率が得られた。このことから、指先反力と視覚を介した変位情報のみが提示された場合でも、弾性の識別が可能であることがわかる。さらに、計算機が最大押し込み量一定で把持動作を行う条件2においても、ほぼ100%の識別率が得られた。これに対し、計算機が最大反力一定で把持動作を行う条件3では、平均68%の正答率であった。全ての弾性の組み合わせで識別率が確率レベル50%を上回っていることから、力覚情報が対象の弾性を反映せず、視覚を介して得られる変位情報のみから弾性を判別しなければならぬ状況下においても、人間が把持する場合や最大押し込み量一定で把持する場合よりも識別率は低いものの、弾性感覚の識別が可能であったといえる。

また、実験において把持動作の反復周期は一定としたため、弾性を知覚するクライアント側ユーザはサーバからの映像にあわせて把持することにより、提示される外力と随意的筋収縮の同期をとることが容易であった。そのため、実験後の聞き取りにおいても、実物体に比較して識別が困難との回答はあったが、違和感に関する意見は特に認められなかった。

4.2 弾性感覚定量化実験

4.2.1 実験方法

さらに、受動的力覚と視覚を介した変位の共有によって得られた弾性感覚と、能動的に把持動作をおこなった時に得られる弾性感覚との関係を定量化するために、調整法による実験をおこなった。

実験条件は、一対比較と同様の1)人間が随意的に

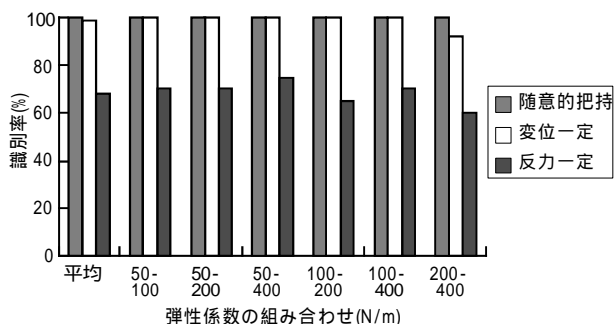


図7 弾性感覚相対識別実験（一対比較法）

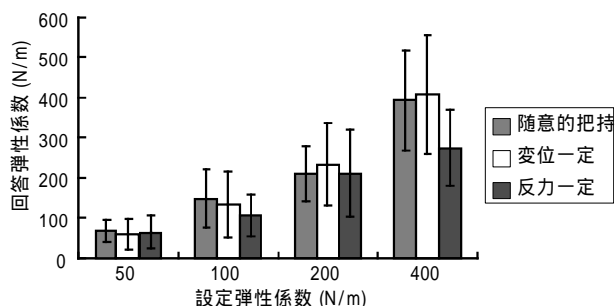


図8 弾性感覚回答実験（調整法）

把持する場合，2）計算機が仮想物体の最大押し込み量が一定(10mm)になるように把持する場合，3）計算機が仮想物体の最大押し込み反力が一定(1N)になるように把持する場合，の3種とし，受動的共有によって弾性感覚を知覚させ，その後ローカルに提示される仮想物体を能動的に把持させた．ローカルに提示される仮想物体の弾性はキーボードによって段階的に調整可能とし，受動的共有によって知覚したものと最も近いものを回答させた．なお，弾性係数の間隔は，過去の研究において，知覚される弾性の間隔尺度が，弾性係数の対数値と良好な相関関係を有していたため[9]，対数値が等間隔になるように各試行間を対数尺度で6段階に分割した．調整可能な弾性係数の範囲は，上限を800[N/m]，下限を25[N/m]とした．

4. 2. 2 弾性感覚定量化実験の結果

図8に実験結果を示す．全条件において，受動的に共有された弾性感覚は，能動的に把持したときに知覚される弾性感覚と線形な相関関係を示した．また，識別実験と同様に，人が仮想物体を把持する条件1と，計算機が仮想物体の最大押し込み量が一定になるように把持を行う条件2の傾向は類似しており，どちらも能動的把持による弾性値と高い相関を示した．このことから，受動的共有によって得られる弾性感覚は，能動的に把持した場合と同程度であることがわかる．

また，計算機が仮想物体からの最大反力が一定になるように把持を行う条件3では，他の条件と同様にほぼ線形な相関を示したものの，弾性係数が大きな物体で，実際よりも小さく知覚される傾向が見られた．

弾性感覚識別実験では，最大反力一定条件において，他の条件と比較して著しく識別率が低下していた．そこで，弾性感覚定量化実験の全結果を散布図にしたものが図9である．回帰直線の傾きを見ると，随意的把持と最大変位一定では0.89,0.97であり，個々の試行でのばらつきはあるが，提示した弾性係数に近い値が知覚されていた．これに対して，最大反力一定条件での傾きは0.59と小さかった．すなわち，提示する弾性係数を変化させた場合，提示範囲よりも小さな範囲の変化として知覚されていた．また，相関係数は他の2条件に比較して小さく，試行ごとの知覚結果のばらつきが大きかったことを意味する．この知覚される弾性感覚範囲の縮小と知覚結果のばらつきが，識別率の低さの原因と考えられる．

また，弾性感覚定量化実験で，特に400N/mにおいて知覚する弾性係数の誤差が増大する傾向が見られた．弾性係数が大きな物体では，押し込み量が小さくなるため，視覚情報から変位を知覚しにくいことが予想されるが，実験結果では，特に弾性係数を実際よりも小さく知覚するという偏った傾向が見られた．最大反力一定条件では反力は弾性係数によらず一定であるため，すなわち，弾性係数が大きな物体において，視覚的に提示されたよりも大きく変位を認知していたといえる．

そこで，弾性係数が小さな物体に比較して，弾性係数が大きな物体で，視覚的に提示された変位よりも大きく認知する傾向を考察するために，ユーザに弾性係数未知の仮想物体を把持させたときの，仮想物体の押し込み量の経時変化を測定した結果の一例を図10に示す．弾性係数が8倍に変化しているのに対し，変位の変化は1.8倍程度である．これに対して，弾性係数と変位によって定まる反力は，弾性係数の変化によって4倍以上変化していたことになる．すなわち，人間が物体の弾性を知覚するために手指で把持する時には，対象の弾性係数によらずほぼ一定量を押し込もうとする傾向があり，弾性係数の大きな物体においても，弾性係数が小さな物体と同程度押し込もうとす

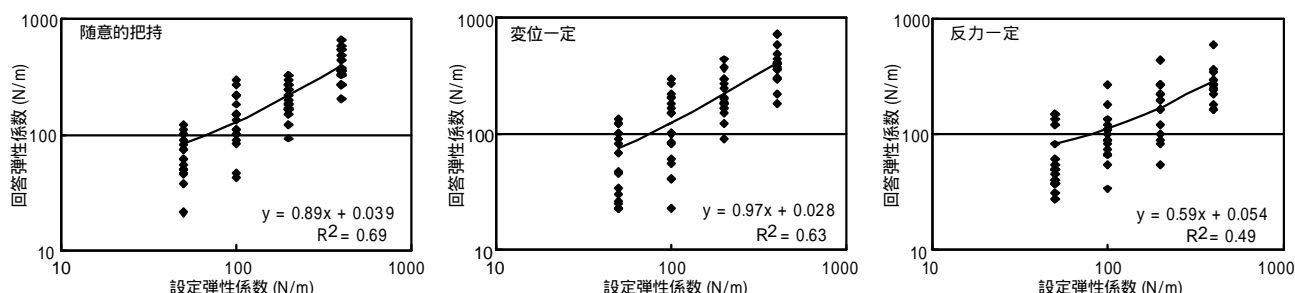


図9 弾性感覚回答実験（調整法）の散布図と回帰直線（対数軸のためグラフ上では曲線）

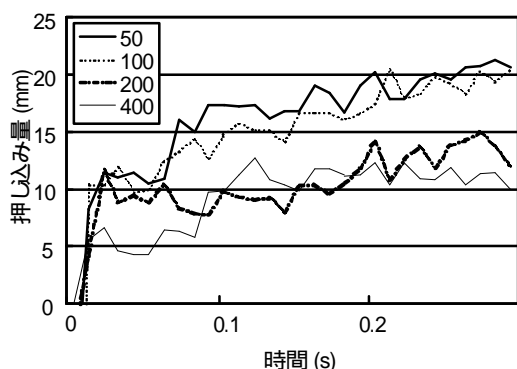


図 10 仮想物体弾性感覚知覚時の物体押し込み量の一例

る。このため、視覚的に提示されるよりも大きな変位を予測した結果、変位を大きく見積もる方向の誤差が生じたと考えられる。同様に、反力一定条件下で受動的に弾性感覚を共有しているときのクライアント側ユーザの指先変位を計測したところ、視覚的に提示されるサーバ側での変位の変化が2.5～20mmと8倍であるのに対し、被験者の指先変位の変化は数倍程度で、特に弾性係数が大きな物体において、視覚的に提示されるよりも実際の指先変位が大きくなる傾向が見られた。

さらに、指先変位が弾性係数によらず一定に近いという傾向は、シリコンゴムなどの実物体を用いた実験において、人間が物体の弾性を知覚するために物体をつまむ場合に、対象物体の変形による変位と、指先の変形による変位の和が、ほぼ一定になるまでつまむ傾向を示した[10]という結果とも一致する。すなわち、人間が把持した場合と最大変位一定で良好な結果が得られたのは、人間のつまみ動作のメカニズムによるものと考えられる。

本研究で取り扱った動作は、弾性感覚を知覚するための把持動作という限られた動作であるが、最大変位一定把持によって、随意的に把持した場合と同程度の弾性感覚が得られたことは、人間が動作を行わなくとも、人工的に生成した動作と反力を伝送することで、物体の弾性感覚を共有できる可能性を示唆するものといえる。

また、心理物理実験によって、提案手法で弾性感覚が提示可能であることは示されたが、図9の分散に見られるように、知覚された弾性感覚は大きくばらついていて、識別実験においても、反力一定条件をのぞきほぼ100%の識別が可能であったものの、実験後のユーザの感想は、実物体に比較して弾性の相違が知覚しにくく識別が困難というものであった。提案手法は固有感覚を介した変位情報を提示しない方法であり、この固有感覚の欠落が、知覚される弾性感覚の分解能低下につながったものと考えられる。解決策としては、吉川らのように、力覚提示装置を用いて指の姿勢を制御し、指先への反力は圧迫等によって表現することで

[8]、体性感覚系への変位と反力の同時提示を擬似的に実現する方法が考えられる。あるいは、接触面積の変化は弾性の知覚において固有感覚よりも大きな寄与率を持っていることから[7]、指先の接触面積を動的に制御するなどの方法が考えられる。より高い分解能や精度が得られることが期待できる反面、装置が複雑化するため、目的に応じて装置を検討することが望ましい。

6. まとめ

視覚を介した変位情報と指先への反力提示によって、受動的に仮想物体の弾性感覚を共有する方法を提案し、心理物理実験によって遠隔共有による提示能力を評価した。識別実験の結果、受動的な遠隔共有による弾性感覚の識別は可能であることが示された。また、定量化実験の結果、得られる弾性感覚は大きな分散を持つものの、その平均値は能動的把持によって得られる感覚と同程度であることが示された。また、送信側での把持動作の種類によって、知覚される弾性値は異なるなど、人間の弾性感覚メカニズムと把持動作の関連が示唆された。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金ならびに総務省戦略的情報通信研究開発推進制度によるものである。ここに記して感謝する。

参考文献

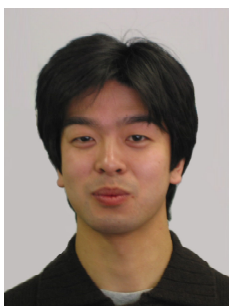
- [1] 廣瀬, 広田, 小木, 齊藤, 中茂, "遠隔協調作業のための触覚サーバの構築", 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, pp. 269-272 (2000)
- [2] 木村, 矢野, 岩田, "サーバーを用いた力覚帰還型協調仮想環境の開発", 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, pp. 295-298 (1999)
- [3] 松本, 福田, 飯島, 瀬崎, 安田, "メディア同期を考慮した触覚通信コラボレーションシステムの検討", 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, pp. 273-276 (2000)
- [4] H.Ishii, C.B.Ullmer, "Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People", CHI'97, pp.22-27 (1997)
- [5] Yokokohji, Hollis, Kanade, "Toward Machine Mediated Training of Motor Skills", Proc. IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, pp.32-37 (1996)
- [6] 佐野, 藤本, 松下, "コーチによる倒立振り安定化のためのスキル伝達", 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.2, pp. 653-654 (1998)
- [7] 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)

- [8] 吉川, 菊植, "人間から人間への技能伝達のための指先圧迫機能を付加した力覚提示装置", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.1, pp.803-809(2000)
- [9] 藤田, "グローブ型仮想物体硬さ感覚呈示装置の試作と評価", 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J81-DII, No.10, pp.2394-2400(1998)
- [10] 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-II), Vol.J85-D-II, No.11, pp.1733-1740(2002)

(2002年10月25日受付)

[著者紹介]

宮田 敏之 (学生会員)



2002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。現在東京工業大学大学院在学中。東京農工大学在学中は、ネットワークを介した把持感覚伝送の研究に従事。

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助教授。力触覚や空間移動インタフェースに関する開発と評価, ならびに医用福祉工学に関する研究に従事(工学博士)。