

遅延環境下における 5 指力覚通信の評価

力覚通信の実現を目指し、今回、硬さ情報を通信により伝える際の遅延が、人間の知覚や力覚ディスプレイおよび制御システムに与える影響の一端を明らかにした。なお、本研究は筑波大学 システム情報工学研究科 岩田・矢野研究室（岩田 洋夫教授、矢野 博明准教授）との共同研究により実施した。

たむら たかゆき はやし こうき
田村 隆幸 林 宏樹
たかはた むのる
高畑 実

1. まえがき

現在、インターネットや移動端末をコミュニケーション手段として用いることにより音声（聴覚情報）や映像（視覚情報）を容易に遠隔地に伝えることができるようになった。さらに臨場感豊かなコミュニケーションの実現に向け、新たな通信メディアの拡充が求められる [1]。

そこで、音声、映像に続く次の通信メディアとして、力や触感などの触覚情報に着目し、研究を行っている。触覚情報を伝えることで、例えばクッションの硬さ、バッグの重さ、洋服生地の手触り心地など、視覚や聴覚だけでは分かりにくい情報が利用者に認識され、あたかも実際の店で買い物をしているかのようにインターネットショッピングを楽しむことができる。このように、触覚情報の通信により新たなコミュニケーションスタイルを提案できると考えられる。

触覚は獲得する情報の種類により、皮膚感覚と力覚（深部感覚）の

2つの感覚に大別される [2]。皮膚感覚とは、物体表面のザラザラ、すべすべなどの触り心地、冷たい、温かいなどの温度や痛みなどの情報を感じる感覚を指す。力覚とは、物体の硬さ、重さ、形状などの情報を感じる感覚を指す。

触覚通信は、遠隔地で計測したこれらの触覚情報を通信し、操作者の手元で再現することで実現できる。触覚通信の実現には、触覚の再現に必要な触覚ディスプレイ、触覚の検出に必要な触覚センサの開発、触覚情報の送受信に関する通信技術などの課題がある。触覚情報の再現性を高めるため、触覚ディスプレイに使用されているアクチュエータ^{*1}の高出力化、小型化、触覚センサに使用されているセンサの高精度化などが課題として挙げられる。また、触覚情報の送受信に関する通信技術の課題として、一般に高い応答性が求められる触覚情報の特性を考慮したネットワークの構築が挙げられる。

触覚情報の送受信に関する従来の取組みには、通信遅延の影響を作業

効率の面から評価している研究がある [3]。しかし、遅延環境下で呈示された触覚情報を人間がどのように知覚しているかについての研究は少ない。遅延環境下の触覚通信で触覚情報を人間がどのように知覚しているかを計測することで、最低限ネットワークで保証すべき遅延時間やパケットロス率^{*2}などネットワーク構築の際の要求条件が明らかになると考えられる。本研究では、通信技術の課題に着目し、触覚通信が可能なネットワークの構築に必要な基礎的な知見獲得を目指し、通信途上で発生する通信遅延が触覚情報の一部である力覚情報の知覚にどのような影響を与えるのかを明らかにした。

また、人間の日常での動作や触る対象物を考慮し、5指に柔らかい物体から硬い物体まで幅広い反力を精度よく呈示可能な力覚ディスプレイを開発する必要があった。新たに開発する力覚ディスプレイを用いて信頼性の高い評価結果を得るため、力覚ディスプレイで多くの実績を持ち、豊富な知見を有する筑波大学 岩

*1 アクチュエータ：入力されたエネルギーを用いて物理的な動力を生み出す機械要素のこと。モータ、油圧シリンダはアクチュエータの例である。

*2 パケットロス率：無線区間の干渉やパケット衝突などの影響により、正常に受信側に到達しないパケット数の全送信パケット数に対する割合。

田・矢野研究室と共同研究を行った。本稿では、力覚通信の実現方法を述べたあと、通信遅延の人間の知覚への影響について解説する。

2. 力覚通信の実現方法

力覚通信は力覚センサ部、力覚ディスプレイ部、通信部の3つの構成要素に分けて考えられる。力覚センサ部は、物体と接触したときの力覚情報を、通信部を介して力覚ディスプレイ部へ送信する。力覚ディスプレイ部は、受信した情報に基づき力覚情報を再現する。操作者は、力覚ディスプレイ部を通してあたかも物体に直接接触しているかのように反力を感じることが可能になる。

日常、我々が手で物体に触れると手と物体の間に、作用反作用の関係が成り立つ。つまり、物体に触れると同時に物体からの反力が感じられる。同様に力覚通信においても、力覚センサによる力覚情報の取得と力覚ディスプレイによる力覚情報の呈示が同時に行われる必要がある。

力覚通信の実現方法には、実際に存在する対象物に触るバイラテラル制御を用いた実現方法と、計算機上で定義されたバーチャル物体に触れるバーチャル環境を用いた実現方法がある。本研究では、硬さ、重さ、形など物体の性質を容易に設定することができ、何度でも同条件で呈示できるバーチャル環境を利用して実験を行った。

バーチャル環境を用いた実現方法の一例を図1に示す。遠隔地にあるバーチャル環境を構築するサーバ用

計算機と、操作者が力覚情報を体験するための力覚ディスプレイおよび力覚ディスプレイ制御用計算機から構成される。サーバ用計算機で構築されるバーチャル環境には、大きさ、硬さ、重さや表面形状などが定義されたバーチャル物体のほか、力覚ディスプレイの位置や姿勢に対応したバーチャルな手が定義されている。バーチャルな手を力覚ディスプレイを通して操作することで、バーチャル物体に触れることができる。バーチャル物体が持つ力覚情報は、あらかじめセンサで実際の物体を計測したもの、もしくは自分で定義したものを利用することができる。操作者は直接、手で力覚ディスプレイを操作することができる。その際、力覚ディスプレイの位置や姿勢をサーバ用計算機へ送信することで、バーチャル環境内に表現されるバーチャルな手の位置や姿勢の値が更新される。サーバ用計算機では、バーチャル環境内の物体とバーチャルな手との接触判定や反力計算を行い、計算結果を力覚ディスプレイ制御用計算機に送信する。サーバ用計算機から送られてきた計算結果に基づき力覚ディスプレイを制御することで、操作者は力覚ディスプレイを通して

バーチャル環境内の物体に触れたときの反力を体験できる。

3. 通信遅延が硬さの知覚に与える影響評価

3.1 実験概要

作用反作用の法則により物体の操作と力覚情報の呈示が同時に行われていることは前述したが、力覚通信を行う場合、力覚情報の通信途上で発生する通信遅延が問題となる。通信遅延が加わることで、力覚情報を得るための動作と力覚情報の呈示にタイムラグが生じ、物体が持つ本来の性質とは異なる力覚情報を操作者が知覚する可能性がある。

遅延環境下で呈示された力覚情報を操作者がどのように知覚するかという研究はすでに行われている [4]。しかし、この研究ではペン型の力覚ディスプレイを用いて実験を行っており、単点でしか力覚情報を呈示していない、さらに、この実験では被験者に腕を動かして力覚ディスプレイを操作させ、ペンを介して腕全体で力覚情報を知覚させている。しかし、我々は日常生活で主に5本の指を用いて物体を操作、知覚している。複数の指を組み合わせて用いることで、つまむ、把持する、回すな

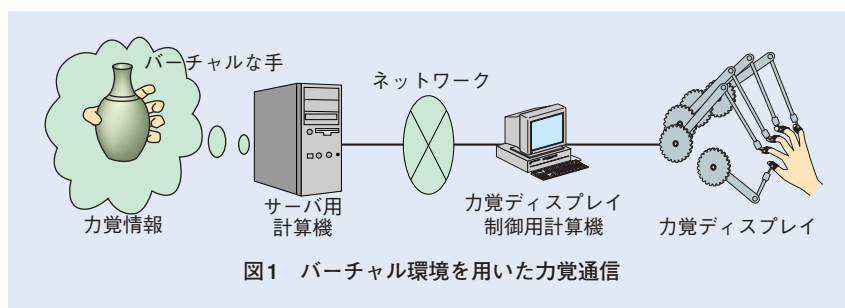


図1 バーチャル環境を用いた力覚通信

どの複雑な作業を行っている。力覚通信においても5本指を用いることで、さまざまな作業を日常生活と同様に行うことが可能になると考えられる。指で物体を把持する場合、指にのみ反力が加わるため、腕を使った場合とは受ける感覚が異なる可能性がある。

そこで本研究では、今回新たに5指力覚ディスプレイを製作し、5本の指すべてに同時に力覚情報を呈示し実験を行った。被験者には遅延環境下で、5指でバーチャル物体を把持させ物体の硬さを知覚させた。これにより通信遅延の有無による人間の知覚や力覚ディスプレイおよび制御システムへの影響を調べた。

実験のためのシステムは、5指力覚ディスプレイと5指力覚ディスプレイ制御用計算機、バーチャル環境を構築するサーバで構成される。5指力覚ディスプレイは制御用計算機に接続されている。サーバと5指力覚ディスプレイ制御用計算機はLANを介して接続される。実験で呈示したバーチャル物体は4cmの厚みを持った無限平面である。反力はスプリング・ダンパモデル^{*3}を用いて計算した。通信遅延はサーバ側で、力覚ディスプレイの位置・姿勢情報を受信してから、力覚ディスプレイへ力覚情報を送信するまでの間に待ち時間を付加することで模擬した。被験者にはバーチャル物体を片手の5指で把持させ、バーチャル物体の硬さを知覚させた。

実験にはシェッフエの対比較法^{*4}を用い、遅延時間が異なる2つ

の物体をそれぞれ標準刺激と比較刺激として呈示した。被験者には標準刺激に比べて、比較刺激の硬さが「硬い、同じ、柔らかい」の三件法で回答させた。十分な比較が行えるよう、標準刺激と比較刺激は被験者が何度でも自由に切替え可能とした。被験者は成人男女計6名で行い、呈示するバーチャル物体は硬さの異なる弾性体を3種類、サーバで模擬する通信遅延は、各バーチャル物体ごとに6種類の遅延時間を用意した。

3.2 5指力覚ディスプレイ

本5指力覚ディスプレイは、5つの力覚呈示ユニットと、ユニットを固定する台座で構成されている（写真1）。各ユニットのリンクを右手の各指に固定し、5本の指それぞれに独立して力覚情報を呈示することができる。

ユニットの配置にあたり、人間が物体を把持する場合の指の動作計測を行い、指の把持動作を妨げずかつユニットどうしの干渉を防ぐ配置を考えた。

3.3 実験結果

遅延環境下における弾性体の硬さ知覚の変化について実験結果の一部を図2に示す。横軸はサーバにおける付加遅延時間、縦軸は知覚した硬さの分布を尺度値で表したものである。尺度値の算出方法は、まず被験者から得られた回答を硬い（1点）、同じ（0点）、柔らかい（-1点）として数値化する。次に各試行における全被験者の回答を合計し、各呈示刺激の得点を求める。この際、各呈示刺激が基準刺激だったのか、比較刺激だったのかを考慮に入れる。各呈示刺激の得点を2SN（S：呈示刺激の種類、N：被験者数）で割った値がそれぞれの呈示刺激に対する尺度値になる。尺度値が正方向に大きいものほど、より硬いと感じている

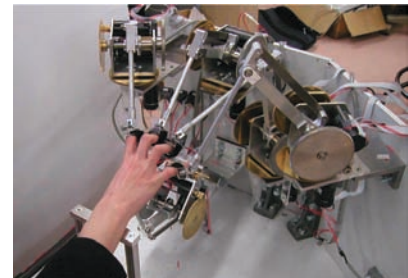


写真1 5指力覚ディスプレイ

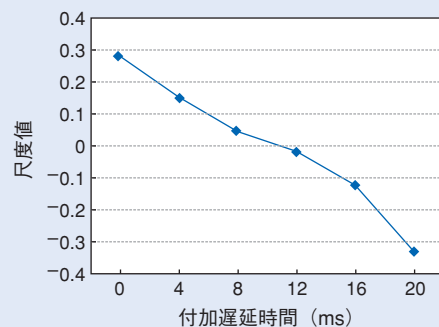


図2 遅延環境下における弾性体の硬さ知覚の変化

*3 スプリング・ダンパモデル：バーチャル物体の硬さを表現するための物理モデルの1つ。物体へのスプリング成分（めり込み量に応じた力）と、ダンパ成分（バーチャル物体と、バーチャル物体に侵入する物体の相対速度に応じた力）の和に

よって表現される。スプリング成分が大きいと弾性体となり、ダンパ成分が大きいと粘性体になる。

*4 シェッフエの対比較法：心理物理学実験で用いられる実験手法の1つ。比較対象となる刺激の中から2つの刺激を選択し、

一方を基準刺激、他方を比較刺激とする。基準刺激に比べ、比較刺激がどのように感じられるかを判断させる手法。通常の対比較法のように刺激が強いかどうか、単純に二者択一で選択させるのではなく、より細かく判断させることが特徴。

ことを示している。グラフから、遅延時間0msのときがもっとも硬く感じ、遅延時間が増加するにつれて柔らかく感じていることが分かる。分散分析の結果、遅延時間が0msのときに比べ、遅延時間が16ms以上で有意差が認められた。本実験で呈示したバーチャル物体の場合、16ms以上の遅延を加えると本来の硬さより明らかに柔らかく知覚することが分かった。有意差の生じる遅延時間は異なるが、他のバーチャル物体においても同様の傾向を示した。

実験結果より、遅延を加えることで物体の硬さは、遅延を加えない場合に比べ柔らかく感じる事が明らかにになり、5指を用いた把持による硬さの知覚においても、ペン型ディスプレイの実験結果と同様の傾向を示すことができた。さらに遅延時間が増加すると、装置の制御が不安定になりバーチャル物体に触れることすらできなくなる現象がみられた。

今回のシステムではスプリング・ダンパモデルを用いて反力を計算している。スプリング・ダンパモデル

ではバーチャル物体内へのバーチャルな手のめり込み量とめり込み速度に応じて反力が決まる。そのため、遅延環境下で単位時間当りのバーチャルな手のめり込み量が大きい場合、操作者が5指力覚ディスプレイを操作してから、遅延時間分経過後に突然大きな反力が呈示され、これを繰り返すことにより制御が不安定になっていると考えられる。

4. あとがき

本研究では、5指で物体を把持する場合に、通信遅延が硬さの知覚に与える影響を検証した。今回の研究により、5指での力覚通信における通信遅延の影響の一端が明らかになった。本研究で得られた知見を、力覚通信を可能とするネットワーク構築の設計指針に活かしていく。

しかし、ネットワークに対する力覚通信の要求条件を明らかにするには、実験条件が限られているため、さらに重さや形状などの力覚情報や他の力覚ディスプレイを対象に実験を行っていく必要がある。

また、今後、通信遅延が増大した場合でもバーチャル物体に触れ力覚情報を知覚可能とするため、制御不安定性を除く手法についても検討を行っていく。

人間の知覚に関する基礎的な知見を蓄積し、特性を明らかにすることで、高臨場感コミュニケーションを可能とし、かつ効率のよいネットワークの構築が可能になると考える。

文献

- [1] 総務省：“五感情報通信技術に関する調査研究会,” http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/policyreports/chousa/gokan/pdf/060922_2.pdf, 2001.
- [2] 岩村 吉晃：“神経心理学コレクション タッチ,” 第1版, 医学書院, 2001年3月.
- [3] D. Wang, K. Tuer, M. Rossi, L. Ni and J. Shu: “The Effect of Time Delays on Tele-haptics,” Haptic, Audio and Visual Environments and their Applications, IEEE, pp.7-12, Sep. 2003.
- [4] 大西 仁, 山崎 聡, 望月 要, 中村 直人, 結城 皖曠：“力覚ディスプレイにおける遅延が弾性知覚に与える影響：心理物理学的測定,” 電子情報通信学会技術報告, Vol.105, No.17, pp.5-10, Apr. 2005.