

## 異種触覚インタフェース装置間の相互接続と QoS 制御に関する研究

代表研究者	石橋 豊	名古屋工業大学大学院工学研究科教授
共同研究者	菅原 真司	名古屋工業大学大学院工学研究科准教授
共同研究者	Kostas Psannis	ギリシャ・マケドニア大学工学部助教

### 1 研究の目的

近年、多様な触覚インタフェース装置が開発されている。これらの装置を用いることによって、コンピュータグラフィックス (CG) によって構築された 3 次元仮想空間内の仮想物体 (オブジェクト) に触ることができるため、協調作業や競合作業の効率を大きく改善できると期待されている。しかし、これらの装置の仕様は大きく異なっており、そのままでは相互接続して作業を行うことは困難である。例えば、作業空間の大きさ、位置精度、最大反力等が異なる。従って、これまでは、主に同一の装置間でのみ、相互接続が実現されている。

本研究では、これらの装置間の仕様の違いを吸収し、相互接続して協調作業及び競合作業を行えるようにすることを目的とする。また、触覚メディアの高品質な通信を実現するためのトラフィック制御、誤り制御、メディア同期制御などの QoS (Quality of Service) 制御も検討対象とする。触覚メディアの他、ビデオや音声なども統合して扱い、実験ネットワークだけでなく、日本-ギリシャ間の国際接続を実現し、評価を行う。さらに、客観評価だけでなく、主観評価 (QoE (Quality of Experience) 評価) も行う。

### 2 研究結果

#### 2-1 異種触覚インタフェース装置間の相互接続

異種触覚インタフェース装置間の相互接続については、触覚インタフェース装置として PHANToM Omni、PHANToM Desktop、SPIDAR-G AHS、Falcon を用いた協調作業 (図 1 参照) と競合作業 (図 2 参照) を対象とし、各装置の作業空間を仮想空間へマッピングすることによって、装置間の作業空間の大きさの違いを吸収した。各装置の作業空間の大きさがそれぞれ異なると、装置によっては仮想空間内に作業を行えない領域が発生する可能性があるため、装置間の作業空間の大きさを吸収する方法としてマッピングが必要となる。そして、マッピング方法が作業効率に及ぼす影響を調査し、比較を行った。図 1 では、二人の利用者がそれぞれ触覚インタフェース装置を用いて各 1 個のカーソルを独立に操作し、一つのオブジェクトを協力して挟んで持ち上げ、目標物体を内包するように移動させる。目標物体は、円形の軌道に沿って等速円運動を行う。図 2 では、四人の利用者が各 1 個のカーソルを操作し、各自のオブジェクトを下から持ち上げ、目標物体を内包するように移動させる。目標物体はいずれかのオブジェクトに内包されると消滅し、仮想空間内のランダムな位置に新たに出現する。四人の利用者は、一定時間内での目標物体の消去回数を競う。これらの作業は、装置間の提示反力の大きさや位置精度などの違いの影響がほとんど出ないように選ばれている。

作業空間を仮想空間にマッピングさせる方法として、次の二通りを扱った。

**方法 a** : 各装置において、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸の 3 軸方向に一律の倍率でマッピングを行う。倍率は、各軸方向のうち最も大きい値とする。

**方法 b** : 各装置において、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸の各軸方向に対して、作業空間を仮想空間の大きさに一致させるように必要なだけの倍率でマッピングを行う。

協調作業では二人、競合作業では四人の利用者がそれぞれ各クライアントを担当する。一回の評価時間は 30 秒とし、それぞれのマッピング方法で 40 回ずつ評価を行った。マッピング方法はランダムに提示された。

評価尺度として、協調作業では、オブジェクトと目標物体との平均距離 (両者の中心点間の距離の平均) であり、この平均距離が小さいほど、利用者はオブジェクトを目標物体に正確に追従できているため、作業効率が高いといえる)、競合作業では、目標物体の平均総消去回数 (四つの装置における目標物体の平均

消去回数の合計値であり、作業全体の効率を示す尺度である。この値が大きいほど作業効率が高いといえる)を用いた。

協調作業では、使用する触覚インタフェース装置の組み合わせとして、Omni-Omni、Desktop-Desktop、Falcon-falcon、Omni-Desktop、Falcon-Omni、Falcon-SPIDAR の6通りを扱った。これらの組み合わせは、以前に行った実験[1]において、作業効率に大きな違いが生じているものが選ばれている。

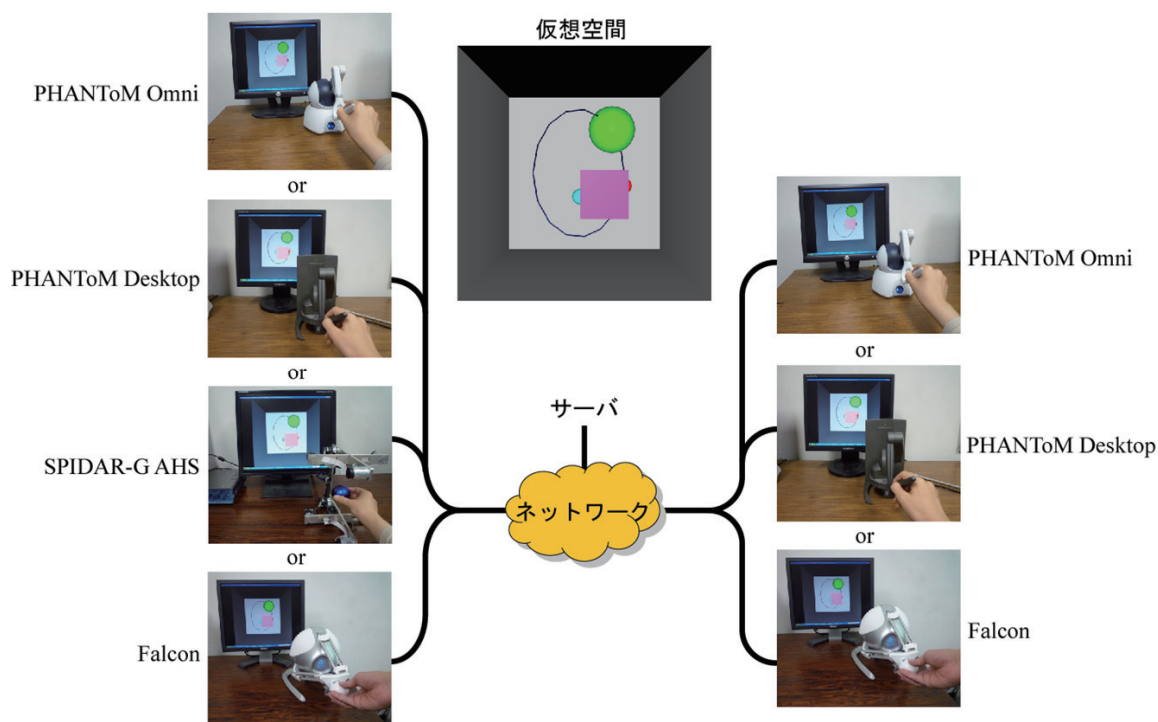


図1 異種触覚インタフェース装置間の相互接続 (協調作業の場合)

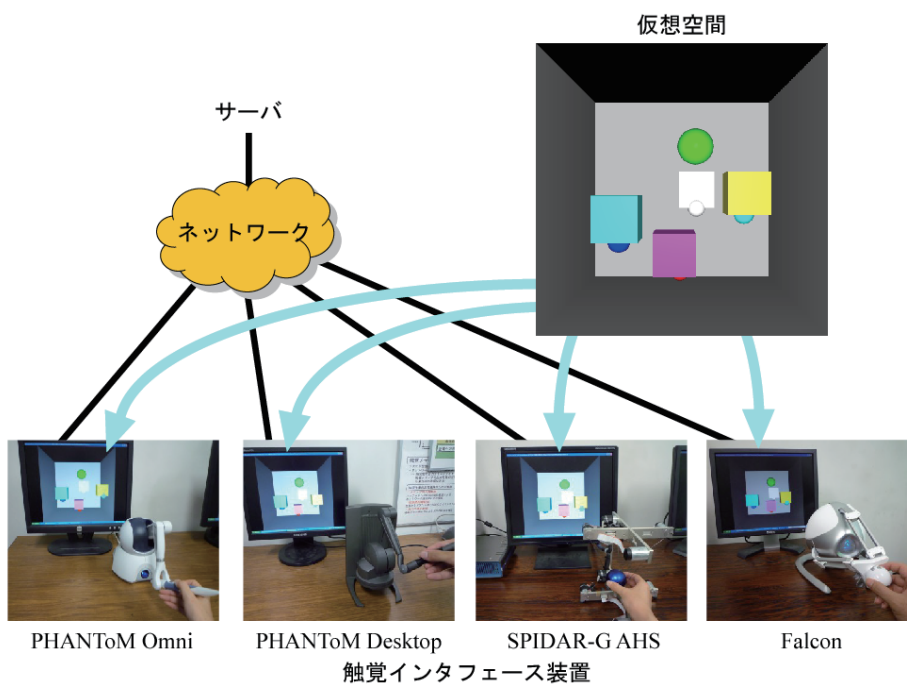


図2 異種触覚インタフェース装置間の相互接続 (競合作業の場合)

### (1) 協調作業

協調作業において、各マッピング方法に対するオブジェクトと目標物体との平均距離を図3に示す。この図には95%信頼区間が示されている。図3より、Falcon-Falconを除くすべての組み合わせにおいて、方法bに比べ、方法aの平均距離の方が小さくなっていることがわかる。これは、3軸方向に一律にマッピングを行う場合(方法a)に対して各軸方向に必要なだけの倍率でマッピングを行う場合(方法b)では、利用者の手の動きに対する仮想空間内のカーソルの移動距離が軸毎に異なり、作業がしにくくなるためである。一方、図3において、Falcon-Falconでは、平均距離が方法aと方法bでほぼ等しくなっている。これは、Falconの作業空間の形が仮想空間の形と類似していたからである。

以上より、本研究の協調作業では、方法bに比べ、方法aの作業効率の方が高くなることがわかる。

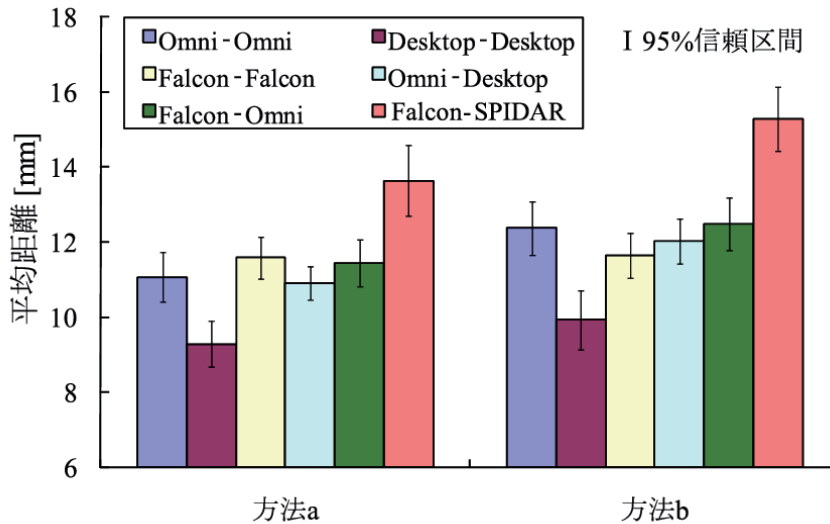


図3 協調作業における平均距離の比較

### (2) 競合作業

競合作業において、各マッピング方法に対する平均総消去回数を図4に示す。図4より、方法aと方法bでは、方法aの平均総消去回数の方が大きくなっている。これは、軸毎にマッピングを行う場合(方法b)では、実際の手の動きと仮想空間内のカーソルの動きが軸毎に異なり、操作がしにくくなるためである。

以上より、本研究で扱った競合作業では、3軸方向に一律にマッピングを行う方法aの作業効率の方が方法bよりも高くなる。

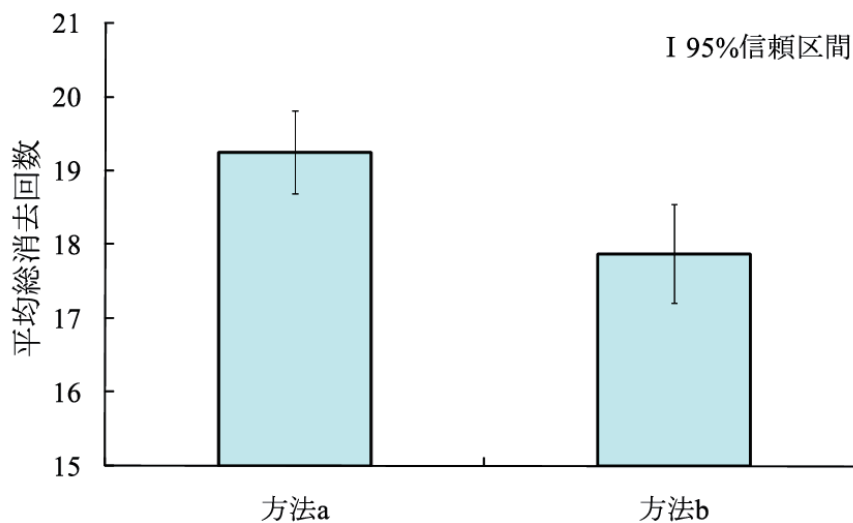


図4 競合作業における目標物体の平均総消去回数

## 2-2 QoS 制御

QoS 制御として、力覚を用いた遠隔制御システム（図5参照）において、ネットワーク遅延に応じて力覚の伝達方向（双方向または片方向）を動的に切り替える制御を提案した。図5の遠隔制御システムでは、マスタ端末とスレーブ端末のそれぞれに触覚インタフェース装置として、PHANToM Omni が備え付けられており、スレーブ端末の PHANToM Omni のスタイラスにはホワイトボードマーカーが取り付けられている。そして、PHANToM Omni の可動部のうち、位置情報に影響しない部分がテープで固定されている。これによって、スタイラスが回転せず、スタイラスを手で保持しなくても文字や図形を書くことが可能になる。スレーブ端末の PHANToM Omni の手前にはホワイトボードシートが置かれており、スレーブ端末にはビデオカメラが接続されている。マスタ端末の利用者は、ビデオを見ながらホワイトボードシートに文字や図形を書くことができる。力覚伝達方向の動的な切り替え制御では、マスタ端末とスレーブ端末の間のネットワーク遅延が 200ms より小さいときには力覚を双方向に伝達し、ネットワーク遅延が 200ms より大きいときには力覚を片方向に伝達する。そして、主観評価により、複数個の文字を書く作業を行う場合には、力覚の伝達方向の切り替えを 10 秒かけて徐々に行うときに最も作業をしやすく感じ、一筆書きで図形を描く作業を行う場合には力覚の伝達方向の切り替えを 1 秒間かけて徐々に行うときに最も作業をしやすく感じることを示した。この結果に基づき、作業内容によって切り替え時間の自動的な選択を行うことを提案した。この提案では、力覚の伝達方向を切り替える際に、作業内容の識別を行い、適切な切替時間を選択する。

### (1) 切り替え時間の自動的な選択方法

ここでは、作業内容による切り替え時間の自動的な選択について説明する。前述のように、複数個の文字を書く場合は切り替え時間が 10 秒のときに、一筆書きの図形を描く場合は 1 秒のときに最も書きやすいことが示されている。そのため、複数個の文字と一筆書きの図形を描く場合の識別を行う必要がある。

複数個の文字を書く場合では、一画書くたびにホワイトボードマーカーのペン先をシート面から離す。また、一筆書きの図形を描く場合では、ペン先とシート面は常に接触している。従って、ペン先とシート面の接触はペン先の高さにより判断することができる。また、複数個の文字を書く場合、ペン先とシート面の接触・非接触は周期的に繰り返される。そして、その周期は、筆運びの速度に依存している。

以上の理由により、ここでは 1ms 毎に PHANToM スタイラス（ペン先）の高さと速度を記録し、過去一定時間分の値を保持し続けるものとする。そして、この一定時間内での高さの最大値と最小値の差（これを高低差と呼ぶ）がある閾値以上の場合には、現在の作業を複数個の文字を書く作業と判断し、切り替え時間を 10 秒とする。高低差がその閾値以下の場合には、一筆書きの図形を描く作業と判断し、切り替え時間を 1 秒とする。また、一定時間と閾値は筆運びの速度によって変更される。

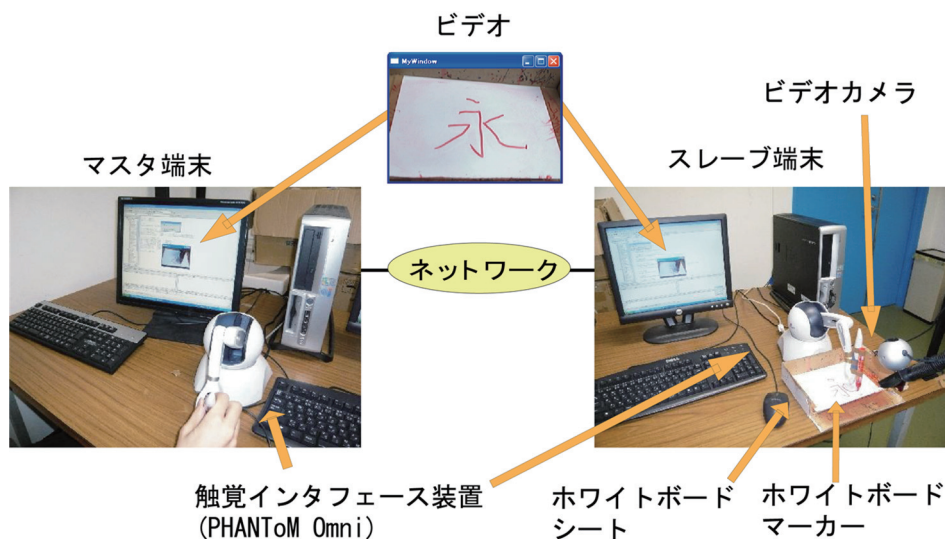


図5 遠隔制御システムの構成

### (2) 実験方法

マスタ端末とスレーブ端末をネットワークエミュレータ (NIST Net) を介して接続し、NIST Net によって、両端末間を通過する各パケットに対してパレート正規分布に従うネットワーク遅延を付加した。実験は、複数個の文字を書く場合と一筆書きで図形を描く場合について行われた。複数個の文字を書く実験では、被験

者は「永」及び「の」という文字を書いた。一筆書きで図形を描く実験では、被験者は「渦」及び「鋸」の形を描いた。

QoE 評価方法には、ITU-R BT. 500-11 の単一刺激法を用いた。各被験者は、評価の前に付加遅延のない状態で数回文字または図形を書き（描き）、操作に慣れた。その後、表 1 に従う遅延を付加し、被験者は 60 秒間にわたり各文字または図形を書き（描き）続けた。実験開始時には、力覚を双方向に伝達するものとする。実験開始 8 秒後から被験者は評価を開始し、口頭で評点（5: 非常に書き（描き）やすい、4: 書き（描き）やすい、3: どちらでもない、2: 書き（描き）にくい、1: 非常に書き（描き）にくい）を記録者に伝えた。その後、評点に変化のある場合に、その時点での評点を口頭で伝えた。但し、評点に変化がない場合は、以前の評点を維持しているものとした。そして、実験開始から 1 秒毎に被験者の評点の平均をとり、MOS (Mean Opinion Score) とした

表 1 付加遅延の変更方法

経過時間[s]	0-20	20-40	40-60
平均付加遅延[ms]	50	250	50
付加遅延の標準偏差[ms]	5	10	5

評価は、作業内容による切り替え時間の自動的な選択の効果を示すために、自動選択の場合、切り替え時間を 1 秒に固定する場合、及び切り替え時間を 10 秒に固定する場合について行われた。そして、被験者には三つの場合をランダムな順序で呈示した。評価人数は 20 名（21 歳から 25 歳の男女）であり、被験者一人当たりの総評価時間は約 20 分となった。

### (3) 実験結果と考察

「永」を書く場合、「渦」を描く場合の経過時間に対する MOS をそれぞれ図 6、図 7 に示す。「の」を書く場合の MOS については図 6 と、「鋸」を描く場合の MOS については図 7 とほとんど同じ傾向を示した。これらの図において、力覚の伝達方向は次のようになる。経過時間が 0 秒から 20 秒のときはネットワーク遅延が小さいため、力覚は双方向に伝達される。20 秒のときにネットワーク遅延が大きくなり、力覚の伝達方向を双方向から片方向に切り替え始める。そして、切り替え時間後から 40 秒までは力覚を片方向に伝達する。40 秒のときにネットワーク遅延が小さくなり、力覚の伝達方向を片方向から双方向へ切り替え始める。

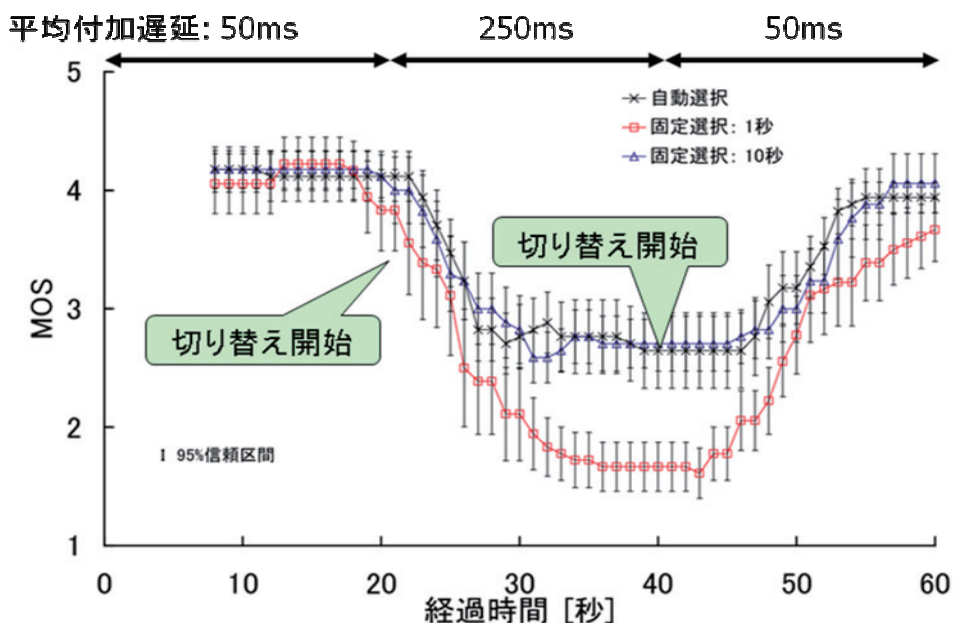


図 6 経過時間に対する MOS（「永」）

図 6 と図 7 において、「永」を書くときの MOS 値は切り替え時間を 10 秒に固定した場合と同程度の MOS 値をとっており、「渦」を描くときの MOS 値は切り替え時間を 1 秒に固定した場合と同程度の MOS 値をとっている。このことは、作業内容から切り替え時間を適切に選択しており、自動選択が有効であることを示している。

る。この他、ホワイトボードマーカーの他に、毛筆を用いて実験を行い、筆先が柔らかくなっても提案方式がうまく機能することを確認した。

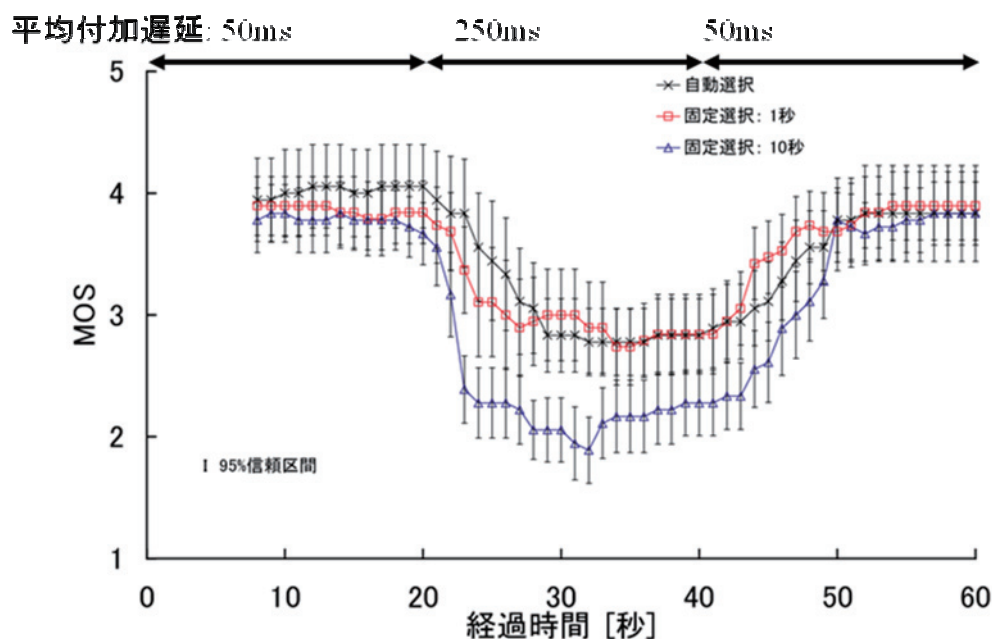


図7 経過時間に対する MOS (「渦」)

### 2-3 国際接続実験

国際接続実験には、仮想空間内のオブジェクトを持ち上げる作業[2]と遠隔習字システム[3]を用いた。前者では、一人の利用者が触覚インタフェース装置 (PHANToM Omni) を用いて、仮想空間内のオブジェクトを動かして作業を行う。後者では、指導者と学習者がそれぞれ触覚インタフェース装置 (PHANToM Omni) を扱い、指導者から学習者へ、文字の教示を行う。

#### (1) 実験システム

オブジェクトを持ち上げる作業では、韓国もしくはギリシャの端末でサーバプログラムを起動し、PHANToM Omni が接続された日本の端末でクライアントプログラムを起動した。遠隔習字システムにおいては、韓国の端末を指導者用、日本の端末を学習者用とし、それぞれに PHANToM Omni を接続した。どちらのシステムにおいても、トランスポートプロトコルとして UDP を用いた。

#### (2) 実験方法

実験においては、メディア同期アルゴリズムとして Skipping[2]を採用した。Skipping は、メディアユニット (メディア同期の処理の単位であり、MU と略す) を受信すると、直ちに出力する。但し、既に出力された MU よりも古い MU を受信したときは、古い MU を廃棄する。

いずれの作業においても、実験は日本時間の 0 時、6 時、11 時、15 時、19 時に行われた。各時刻において、オブジェクトを持ち上げる作業の場合は、日本と韓国及びギリシャ間で、それぞれ 10 回ずつ実験を行い、遠隔習字システムは、日本と韓国の間で 10 回実験した。1 回の実験時間は 30 秒である。

評価尺度としては、オブジェクトを持ち上げる作業では、オブジェクトと目標物体との平均距離[2]を扱い、遠隔習字システムの場合は文字の欠損率[3]を用いる。オブジェクトと目標物体の平均距離は、両者の中心点間の距離の平均値であり、これが小さいほど作業効率が良いとされる。文字の欠損率とは、先生の端末が送信した MU と生徒の端末で実際に出力された MU の、同じシーケンス番号ごとの文字の太さの差の絶対値を合計した値の、劣化のない状態における文字の太さの総和に対する割合のことであり、これが小さいほど、先生の書いた文字を忠実に再現できているといえる。

また、ネットワークの状況を調べるために、各時刻に韓国あるいはギリシャに対して、3000 個の ICMP パケットを送信し、ラウンドトリップ遅延の分布を測定した。

#### (3) 実験結果と考察

実験結果を図 7 から図 9 に示す。図 7 は、日本と韓国及びギリシャ間におけるラウンドトリップ遅延の分

布とパケット欠落率である。ラウンドトリップ遅延の分布については、時刻や日付による違いは見られなかったため、ここでは、オブジェクトを持ち上げる作業を0時に行ったときの結果を示す。このとき、日本と韓国間におけるラウンドトリップ遅延の平均値は27.01ms、そのときの標準偏差は0.19msであり、ICMPパケットの欠落率は0.02%であった。一方、日本とギリシャ間では、ラウンドトリップ遅延の平均値は331.10ms、標準偏差は6.30ms、パケットの欠落率は1.53%という結果が得られた。さらに、それぞれのホップ数を調べたところ、日本と韓国の間では11、日本とギリシャの間では26であった。

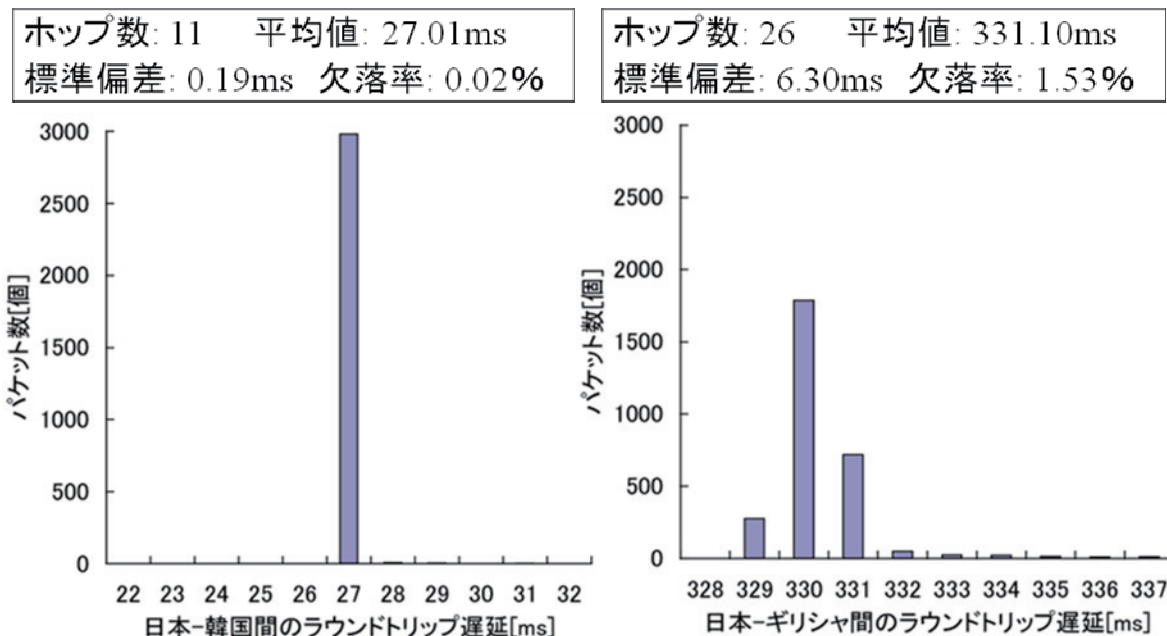


図7 国際接続実験時のラウンドトリップ遅延とパケット欠落率

図8には、オブジェクトを持ち上げる作業における、オブジェクトと目標物体との平均距離を示す。この図には、比較のために、学内LANを用いて測定された、日本のデータも含まれている。なお、学内LANを用いたときのホップ数は1で、ICMPパケットのラウンドトリップ遅延の平均値は1ms未満であった。この図より、日本とギリシャ間でこの作業を行うと、作業に大きな困難が伴うことがわかる。これは、日本とギリシャの間では大きなネットワーク遅延が発生するためである。また、日本と韓国との間で作業を行う場合でも、学内LANを用いたときと比べて、作業が少しやりにくくなるという結果が示されている。

図9は、遠隔習字システムにおける文字の欠損率である。各時刻において、文字の欠損率は0.12%未満という、非常に小さい値をとっている。これは、日本と韓国との間のネットワーク遅延の揺らぎが小さいため、MUの出力の滑らかさがほとんど劣化しないためである。

### 3 今後の予定

今後、さらに多様な触覚インタフェース装置を扱い、それらの間の相互接続を実現するだけでなく、SIP(Session Initiation Protocol)/SDP(Session Description Protocol)を用いて、通信開始時にネゴシエーションするプロトコルを検討する予定である。また、触覚メディアの高効率な符号化方式とパケット化方式を検討する必要もある。さらに、本研究で扱ったアプリケーションとは異なるアプリケーションを用いた国際接続実験も行うことも重要である。

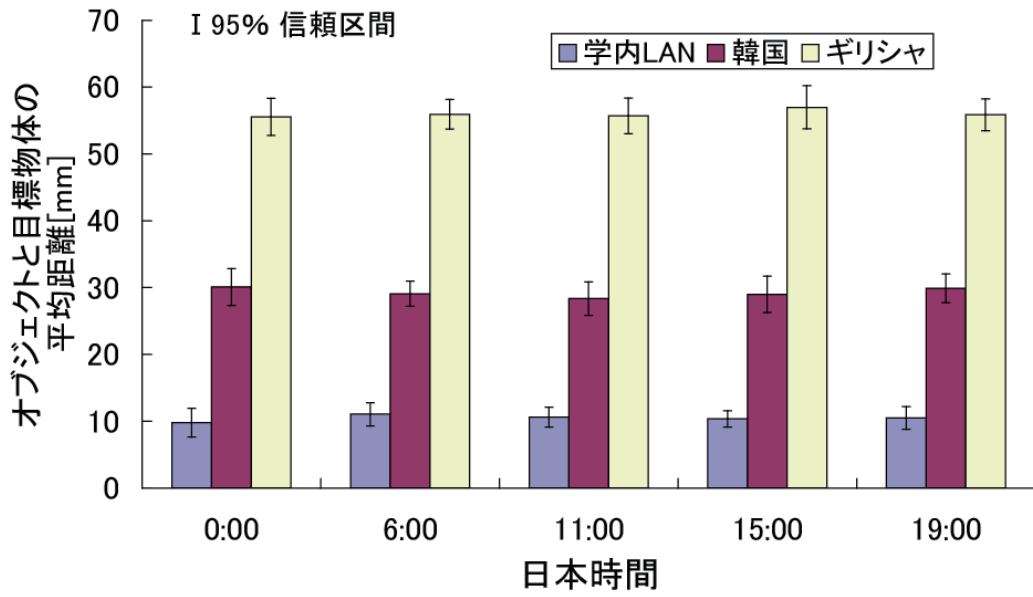


図8 オブジェクトと目標物体との平均距離

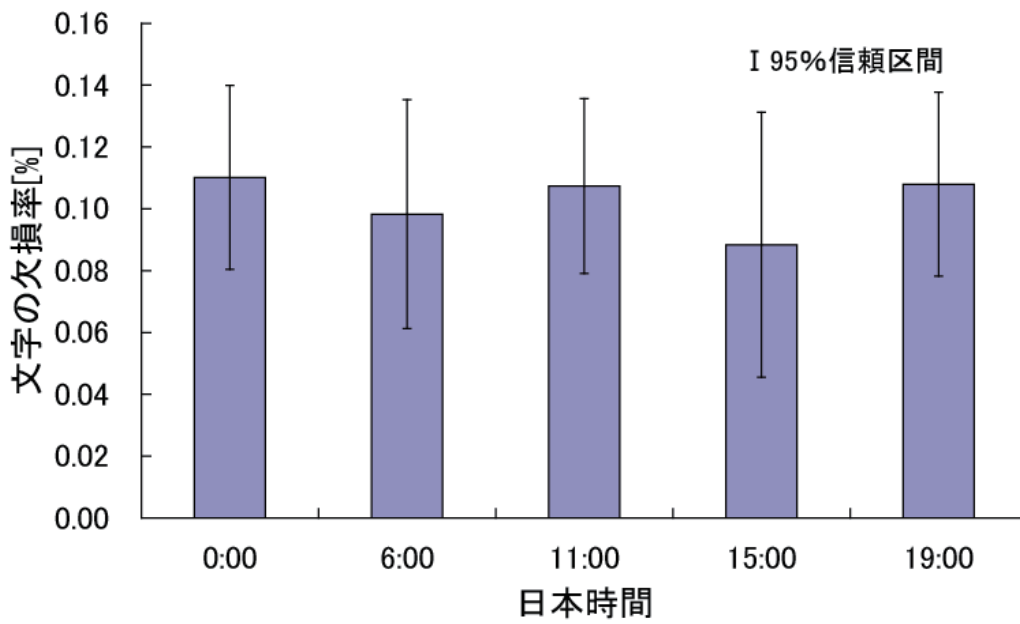


図9 文字の欠損率



## 【参考文献】

- [1] P. Huang, T. Fujimoto, Y. Ishibashi, and S. Sugawara, "Collaborative work between heterogeneous haptic interface devices: Influence of network latency," in Proc. The 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT'08), pp. 293-296, Dec. 2008.
- [2] Y. Ishibashi, S. Tasaka, and T. Hasegawa, "The virtual-time rendering algorithm for haptic media synchronization in networked virtual environments," in Proc. The 16th International Workshop on Communications Quality and Reliability (CQR'02), pp. 213-217, May 2002.
- [3] Y. Ishibashi and T. Asano, "Media synchronization control with prediction in a remote haptic calligraphy system," in Proc. ACM SIGCHI ACE'07, pp. 79-86, June 2007.

## 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Collaborative Work Using Heterogeneous Haptic Interface Devices: Mapping Workspaces to Virtual Space	Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE' 09)	May 2009
A Comparison between Transmission Methods of Sense of Force in a Remote Haptic Instruction System	Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME' 09)	June/July 2009
Experiment on International Connection for Haptic Media Communications	Record of 2009 Tokai-Section Joint Conference of the Eight Institutes of Electrical and Related Engineers	Sep. 2009
遠隔制御システムにおける力覚の伝達方向の動的切り替え制御実験	平 21 電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2009
異種触覚インタフェース装置を用いた作業における作業空間の仮想空間へのマッピング方法の比較	日本バーチャルリアリティ学会論文誌	Sep. 2009
遠隔制御システムにおける力覚伝達方向の切り替え時間の自動選択	電子情報通信学会技術研究報告	Nov. 2009