

力覚メディア通信におけるメディア内同期アルゴリズムの出力品質比較

藤浦 豊徳^{†a)} 孫 樹春[†] 藤本 猛[†] 石橋 豊[†]

An Output Quality Comparison of Intra-Stream Synchronization Algorithms in Haptic Media Communications

Toyonori FUJIURA^{†a)}, Shuchun SUN[†], Takeshi FUJIMOTO[†], and Yutaka ISHIBASHI[†]

あらまし 本論文では、仮想オブジェクトを持ち上げて動かす作業、遠隔描画教示及び遠隔習字に対して、力覚メディア内同期アルゴリズムの出力品質を比較した。仮想オブジェクトを持ち上げて動かす作業に関しては、触覚インタフェース装置として PHANToM DESKTOP, PHANToM Omni, SPIDAR-G AHS または Falcon を用い、遠隔描画教示及び遠隔習字では、PHANToM Omni を使用した。力覚メディア内同期アルゴリズムとしては、VTR (Virtual-Time Rendering), Buffering, Skipping, QM (Queue Monitoring) 及び適応バッファ制御 (Adaptive Buffer Control) の五つを扱い、主観評価によって、触覚インタフェース装置、作業内容及びアルゴリズムの違いによるネットワーク遅延やその揺らぎの影響を明らかにした。その結果、いずれの作業においても、VTR が最も優れていることを示した。

キーワード 力覚メディア, メディア内同期アルゴリズム, 出力品質, 主観評価

1. ま え が き

近年の触覚インタフェース装置の急速な発達により、力覚メディア通信に対する関心が高まっている [1]。力覚メディア通信の例としては、ネットワーク型リアルタイムゲーム [2]、協調作業 [3]、遠隔描画教示 [4]、遠隔習字 [5], [6] 及び遠隔医療 [7], [8] などが挙げられる。ユーザは、CG (Computer Graphics) により構築された三次元仮想空間において、触覚インタフェース装置を用いて、仮想物体 (オブジェクト) に触ることができるため、協調作業の効率が大きく改善され、ネットワーク型リアルタイムゲームの没入感が高まると期待されている。しかし、ネットワークを介してそれらの作業やゲームを行う場合には、ネットワーク遅延の揺らぎにより、力覚メディアの時間関係が損なわれ、その出力品質が大きく劣化するおそれがある。このため、ネットワークを介して力覚メディアを利用する場合に

は、メディアの時間関係を維持するメディア同期制御が必要となる [4], [7] ~ [10]。メディア同期制御には、主にメディア内同期制御とメディア間同期制御の 2 種類がある [11]。メディア内同期制御は単一メディア内の時間関係を維持し、メディア間同期制御は複数メディア間の時間関係を維持する。本論文では、力覚メディアのみを用いるため、メディア内同期制御を扱う。

文献 [4], [5] では、二人の利用者間で力覚を伝え合いながら、指導者が学習者に絵の描き方を指導する遠隔描画教示や遠隔習字に対して、力覚メディア内同期アルゴリズムとして、VTR (Virtual-Time Rendering) と Skipping を採用し、ネットワーク遅延揺らぎが力覚メディアの出力品質に与える影響を調査している。また、文献 [9] では、一人の利用者が触覚インタフェース装置を用いて、ネットワークを介した仮想空間内にある一つのオブジェクトを持ち上げて動かす作業を対象に、力覚メディア内同期アルゴリズムとして、VTR, Buffering 及び Skipping を扱い、ネットワーク負荷が力覚メディアの出力品質に与える影響を調査している。文献 [10] では、二人の利用者が一つのオブジェクトを協力して持ち上げて動かす協調作業を対象とし、

[†] 名古屋工業大学大学院工学研究科, 名古屋市
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

a) E-mail: toyo@mc1.nitech.ac.jp

QM (Queue Monitoring) [12] と呼ばれるメディア内同期アルゴリズムを用い、主観評価により、ネットワーク遅延揺らぎが力覚メディアの出力品質に及ぼす影響を調べている。更に、文献 [7], [8] では、遠隔手術を対象に、力覚メディア内同期制御のために適応バッファ制御アルゴリズム (Adaptive Buffer Control, 以下、ABC と呼ぶ) を提案している。これらのアルゴリズムのネットワーク遅延に対する有効適用領域を明らかにするためには、アルゴリズム間の出力品質の比較が必要である。しかし、上記のアルゴリズム間の定量的な関係は明らかにされていない。

本論文では、力覚メディア内同期アルゴリズムとして、VTR, Buffering, Skipping, QM 及び ABC を扱う。そして、一人の利用者が仮想空間内の一つのオブジェクトを持ち上げて動かす作業 [9] (この作業はネットワーク型リアルタイムゲーム [2] に採用されている) と、遠隔描画教示 [4] 及び遠隔習字 [5] を対象として、ネットワーク遅延とその揺らぎがこれらの三つの作業に与える影響を調査する。また、力覚メディア内同期アルゴリズムの出力品質を比較する。そして、その結果より、力覚メディア通信に適したメディア内同期アルゴリズムを明らかにする。

以下、2. では本論文で扱う作業内容について述べる。3. では実験システムについて概説する。4. では比較対象とする力覚メディア内同期アルゴリズムを説明する。5. では評価方法を述べ、6. では評価結果の考察を行う。

2. 作業内容

本論文では、大きく特徴の異なる三つの作業を扱う。これらの作業のうち、オブジェクトを持ち上げて動かす作業を作業 1、遠隔描画教示を作業 2、遠隔習字を作業 3 と呼ぶ。作業 1 では、クライアント・サーバモデルに基づき、一人の利用者が PHANToM DESKTOP [13], [14], PHANToM Omni [13], [15], SPIDAR-G AHS [16] あるいは Falcon [17] のいずれかを操作して作業を行う。ここで、四つの異なる仕様の触覚インタフェース装置を用いる理由は、装置の仕様の違いが出力品質に及ぼす影響を明らかにするためである。作業 2 及び作業 3 は、P2P (Peer to Peer) モデルに基づいており、作業 2 では、二人の利用者が PHANToM Omni を用いて、遠隔描画教示を行い、作業 3 では、二人の利用者が PHANToM Omni を用いて、遠隔習字を行う。遠隔描画教示では、指導者と学習者が相互

の力覚をインタラクティブに感じながら図形の描き方を遠隔指導する。また、遠隔習字では、学習者は指導者の筆の動きを感じながら文字の書き方の遠隔指導を受ける。三つの異なる作業を扱う理由は、作業の特徴の違いが出力品質に及ぼす影響を調査するためである。なお、作業 1 はネットワーク遅延の大きさに影響を受けやすいという特徴があり、作業 2 は作業 1 と比べて、ネットワーク遅延の大きさの影響を受けにくい、ネットワーク遅延揺らぎの影響を受けやすいという特徴がある。そして、作業 3 は作業 1 や作業 2 とは異なり、インタラクティブ性が強く要求されない作業のため、ネットワーク遅延の大きさによる影響をほとんど受けないが、ネットワーク遅延揺らぎによる影響を受けやすいという特徴がある。

これらの作業におけるメディアユニット (メディア同期制御を行う際の基本単位であり、位置情報などが含まれている。以下、MU と略す) [9] の送信レートは、作業 1 が 1 kHz [14], 作業 2 及び作業 3 が 30 Hz [4], [5] である。以下では、これらの作業について詳しく説明する。

2.1 作業 1

作業 1 では、図 1 に示すように、一つのクライアントと一つのサーバからなるクライアント・サーバモデルに基づくシステムを用いる。利用者は、クライアントに接続された PHANToM DESKTOP, PHANToM Omni, SPIDAR-G AHS あるいは Falcon のいずれかを用いて、図 2 に示すような壁、床、及び天井に囲まれた仮想空間 (表 1 に各触覚インタフェース装置に対する仮想空間の大きさを示す。この大きさは作業空間の大きさに等しい^(注1)) において、オブジェクト (図 2 の立方体) をカーソル (図 2 の小さな球体であり、利用者は触覚インタフェース装置を用いてこの球体を操作し、作業を行う) で下から持ち上げて動かす。カーソルは、ユーザが PHANToM DESKTOP 及び PHANToM Omni のスタイラスまたは SPIDAR-G AHS 及び Falcon のグリップを操作することによって動かされる。オブジェクトは、下から一点で持ち上げても傾かない立方体 (剛体であり、その一辺の長さは仮想空間の高さの 1/4 とする) とし、その数を 1 とする。この作業では、仮想空間内に目標物体 (図 2 の

(注1): PHANToM DESKTOP の仮想空間の大きさ (高さ × 横幅 × 奥行) を 89.7 mm × 129.7 mm × 89.7 mm とする場合についても実験を行った。その結果、仮想空間を表 1 の大きさとした場合とほとんど同じ結果が得られた。

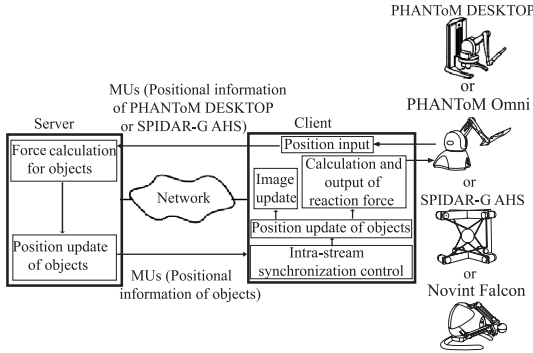


図 1 作業 1 のシステムモデル
Fig. 1 System model of work 1.

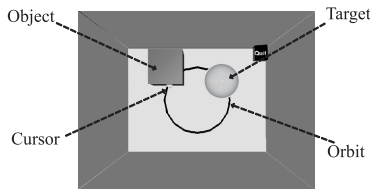


図 2 作業 1 (PHANToM DESKTOP) の仮想空間の表示例
Fig. 2 Displayed image of virtual space in work 1 (PHANToM DESKTOP).

表 1 仮想空間の大きさ
Table 1 Sizes of virtual spaces.

触覚インタフェース装置	高さ	横幅	奥行
PHANToM DESKTOP	120 mm	160 mm	120 mm
PHANToM Omni	120 mm	160 mm	70 mm
SPIDAR-G AHS	120 mm	200 mm	200 mm
Falcon	75 mm	75 mm	75 mm

大きい球体であり、その直径はオブジェクトの一辺の長さに等しい)を表示して、円形の軌道に沿って等速円運動を行わせる。利用者は、目標物体がオブジェクトに内包されるようにカーソルを操作してオブジェクトを動かす。なお、目標物体及び軌道は、オブジェクトと PHANToM DESKTOP, PHANToM Omni, SPIDAR-G AHS あるいは Falcon のカーソルとは衝突しない。

サーバは、仮想空間の情報を管理しており、仮想空間の更新などを行う [9]。クライアントでは、仮想空間内のカーソルの位置入力、サーバから受信した MU に対するメディア内同期制御、PHANToM DESKTOP, PHANToM Omni, SPIDAR-H AHS あるいは Falcon を通じて利用者への反力の呈示などを行う。呈示する反力は、Spring-Damper モデル [14] に基づき、オ

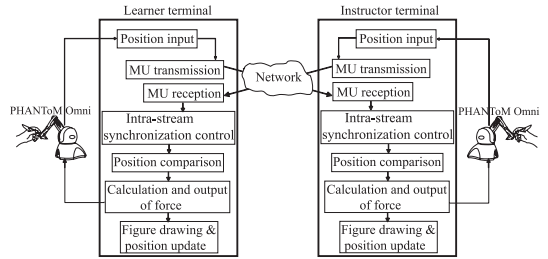


図 3 作業 2 及び作業 3 のシステムモデル
Fig. 3 System model of work 2 and work 3.

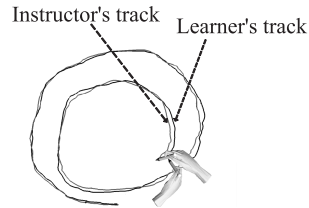


図 4 作業 2 の仮想空間の表示例
Fig. 4 Displayed image of virtual space in work 2.

ブジェクトへのカーソルのめり込みの深さと移動速度より計算される [14]。

2.2 作業 2

作業 2 では、図 3 に示すように、2 台の端末からなる P2P モデルを用いる。指導者と学習者は、各自の端末に接続された PHANToM Omni を画筆とみなして、力覚をインタラクティブに感じることができる。このとき、図 4 に示すように、学習者は仮想画布 (縦 152 mm, 横 214 mm) 上の指導者の軌跡に追随するようにして図形を描画して、筆運びの指導を受ける。画筆は画布からの反力がなく [4]、字の太さが一定のフェルトペンであり、指導者と学習者の字の色はそれぞれ赤と黒である。

指導者端末と学習者端末は、自端末の PHANToM Omni の位置情報を MU として相手端末に UDP によって送信する。各端末はその MU を受信後、メディア内同期制御を行う。各端末は指導者と学習者の PHANToM Omni のカーソル位置情報の差分に比例する力を呈示する [4]。なお、力の計算に用いるばね定数は 0.05 N/mm としている。この力は、カーソル同士が引かれ合う方向に働く。また、各端末は仮想画布上の図形の更新なども行う [4], [18]。

2.3 作業 3

作業 3 においても、作業 2 と同様、2 台の端末からなる P2P モデルを用いる。指導者と学習者の端末には、触



図 5 作業 3 の仮想空間の表示例
Fig. 5 Displayed image of virtual space in work 3.

覚インタフェース装置として, PHANToM Omni [19] が備え付けられている. 指導者は, PHANToM Omni を毛筆とみなして, CG (Computer Graphics) で作成された半紙 (縦 132 mm, 横 92 mm) の上に, 文字を書く. このとき, PHANToM Omni を介して, 半紙からの反力 (ばね定数は 0.05 N/mm) が返される. 学習者も PHANToM Omni を毛筆とみなし, 図 5 に示すように, 指導者の筆の動きを感じながら文字を書く. なお, 文字の色は黒であり, その太さは半紙からの反力に応じて動的に変更される.

OpenHaptics Toolkit (PHANToM のライブラリ) [15] において, 半紙からの反力を取得できるライブラリには, 片方向にしか力覚を伝えることができないという制約があるため, 本システムでは, 力覚は指導者から学習者へ片方向にのみ伝わる.

指導者端末は, 自端末の PHANToM Omni の位置情報を MU として学習者端末に UDP によって送信する. 学習者端末は MU を受信すると, メディア内同期制御を行った後, その MU を出力する. 学習者端末は指導者と学習者の PHANToM Omni のカーソル位置情報の差分に比例する力を呈示する [4]. なお, 力の計算に用いるばね定数は 0.05 N/mm としている. この力は, カーソル同士が引かれ合う方向に働く. また, 各端末は半紙上の文字の更新なども行う [5]. 文字の描画方法と力覚の伝達方式については, 文献 [20] を参照されたい.

3. 実験システム

ここでは, 作業 1 から作業 3 の実験システムを説明する. 本論文では, 多様なネットワーク環境における調査を行うため, ネットワークにネットワークエミュレータ (NIST Net [21]) 及びルータを用いる. NIST

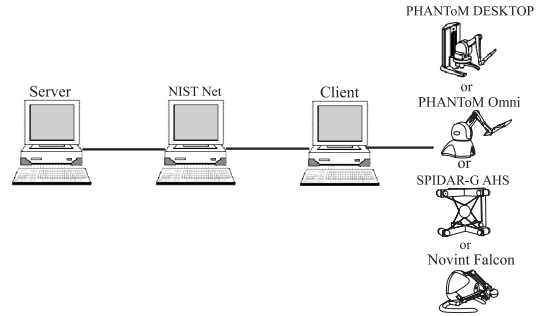


図 6 作業 1 (a) の実験システム
Fig. 6 Experimental system of work 1 (a).

Net を用いることにより, ネットワーク遅延とその揺らぎが評価結果に及ぼす影響を明らかにすることができる. しかし, 実際のネットワークと全く同じように, ネットワーク遅延やその揺らぎをエミュレートすることはできない. また, ルータを用いることにより, 同一ネットワークにおいて, 力覚メディアのトラフィックが他トラフィックと競合する場合に, 他トラフィックの負荷の大きさが評価結果に及ぼす影響を明らかにすることが可能である. しかし, 負荷の大きさを変化させると, ネットワーク遅延とその揺らぎが同時に変化するため, 評価結果が遅延とその揺らぎのどちらの影響を受けているのか判別できない. そのため, 本論文では二つのネットワークを用いて実験を行う.

3.1 作業 1

(a) NIST Net を用いる場合

実験では, 図 6 に示すように, サーバ (CPU: Xeon 3.06 GHz, OS: Windows 2000) とクライアント (CPU: Pentium4 1.5 GHz, OS: Windows 2000) は NIST Net を介して接続される. NIST Net は, サーバからクライアントに転送される各 MU に対して, パレート正規分布 [21] に従う付加遅延を発生させる. なお, パレート正規分布とは正規分布 25% とパレート分布 75% の加重平均 [22] である. ただし, 簡単のため, クライアントからサーバに転送される MU には付加遅延を発生させない.

(b) ルータを用いる場合

このシステムは, 図 7 に示すように, サーバ (CPU: Xeon 3.06 GHz, OS: Windows 2000), クライアント (CPU: Pentium4 1.5 GHz, OS: Windows 2000), 2 台のデータ端末 (データ送信端末とデータ受信端末), 100BASE-T Ethernet スwitchングハブ及び 2 台のルータ (Cisco 2611) で構成されている. 2 台のルータ

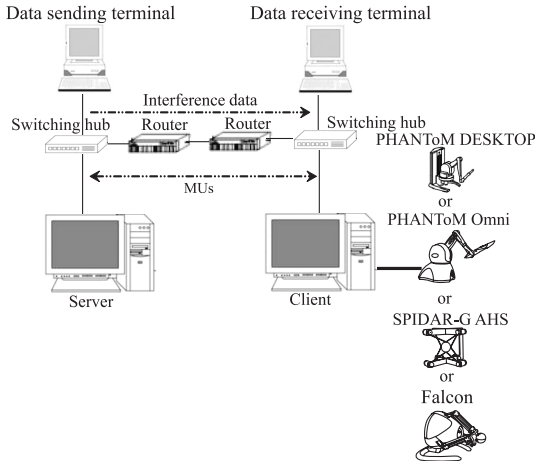


図 7 作業 1 (b) の実験システム
Fig. 7 Experimental system of work 1 (b).



図 8 作業 2 (a) 及び作業 3 (a) の実験システム
Fig. 8 Experimental system of work 2 (a) and work 3 (a).

間は V.35 シリアル回線 (2 Mbit/s の全二重通信) で接続される。また、サーバ側にはデータ送信端末を、クライアント側にはデータ受信端末を接続し、負荷データの転送を行う。

データ送信端末からデータ受信端末へ、1472 Byte の固定長の負荷データが指数分布に従う間隔で UDP によって送信される。これにより、サーバとクライアント間にネットワーク負荷を生じさせる。

3.2 作業 2 及び作業 3

作業 2 と作業 3 で用いられる実験システムの構成は同一である。

(a) NIST Net を用いる場合

図 8 に示すように、指導者端末 (CPU : Pentium4 2.8 GHz, OS : Windows XP) と学習者端末 (CPU : Pentium4 2.8 GHz, OS : Windows XP) は NIST Net を介して接続される。NIST Net は、指導者端末と学習者端末間に転送される各 MU に対して、パレート正規分布に従う付加遅延を発生させる。

(b) ルータを用いる場合

図 9 に示すように、指導者端末 (CPU : Pentium4 2.8 GHz, OS : Windows XP), 学習者端末 (CPU : Pentium4 2.8 GHz, OS : Windows XP), 2 台のデー

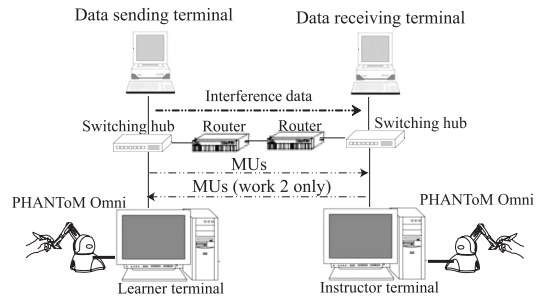


図 9 作業 2 (b) 及び作業 3 (b) の実験システム
Fig. 9 Experimental system of work 2 (b) and work 3 (b).

タ端末, 100BASE-T Ethernet スイッチングハブ及び 2 台のルータ (Cisco 2611) で構成されている。この実験システムのネットワーク構成とネットワーク負荷の発生方法は作業 1 (b) と同じである。

4. 力覚メディア内同期アルゴリズム

本論文では, VTR, Buffering, Skipping, QM 及び ABC の出力品質比較を行う。これらの五つの同期アルゴリズムでは, 順序制御が用いられており, MU のシーケンス番号が, 出力済みの MU のそれよりも小さければ, その MU を出力せずに廃棄するようにしている。

Skipping は, 到着した MU のうち, 発生時刻が最も新しい MU をバッファに格納し出力する [9]。このアルゴリズムの長所は, 受信端末に必要な受信バッファサイズが 1 MU と小さい点である。また, Skipping は, 受信した MU を即座に出力する。そのため, MU の出力時刻は, その MU の到着時刻と同じ値をとる。同様の理由により, MU の発生から出力までの平均時間 (平均 MU 遅延) が小さく保たれるという長所があるが, その代わりに遅延の揺らぎをほとんど吸収できないという短所がある。

Buffering は, メディア内同期に必要な初期バッファリング制御とポーズ制御を行う [9]。初期バッファリング制御は受信した MU に, 一定時間のバッファリング (初期バッファリング時間を X で示す) を行う。ポーズ制御は, 受信した MU を, 出力すべき時間になるまで出力しないようにする。したがって, MU の出力は, その MU の到着時刻に X を加算した時刻に行われる。このアルゴリズムでは, Skipping や QM に比べ, 遅延の揺らぎを吸収できるという長所と, 平均 MU 遅延が大きいという短所がある。

QM は、到着する MU に、初期値を 0 としたカウンタを付加した後、その MU をキューに格納する。そして、出力要求に応じてキューから MU を出力する [12]。各 MU のカウンタは、キューから MU が一つ取り出されるごとに 1 加算される。そして、キュー内にある、いずれかの MU のカウンタ値がしきい値 T_h を超えると、その MU を削除するとともに、すべての MU のカウンタ値を 0 に初期化する。そのため、MU の出力時刻は、その MU の到着時刻に、その MU が到着した時刻におけるキューの長さに応じた時間を加算した時刻となる。なお、キュー内の MU が削除された場合には、削除された MU 以降の MU の出力時刻は、MU が削除された分だけ早くなる。また、キューに MU が一つも格納されていない場合には、受信した MU は即座に出力される。このアルゴリズムでは、平均 MU 遅延が小さいという長所があるが、ネットワーク遅延の揺らぎをあまり吸収できないという短所がある。特に、しきい値が小さい場合には、キューに格納されている MU が頻繁に削除されるため、Skipping のような振舞いをする。

ABC は、Adaptive Buffer Approach により、バッファリング時間を変化させ、Time-Adjustment Mechanism により、MU の出力予定時刻を決定する方式である [7]。Adaptive Buffer Approach は出力した最新の N 個の MU (観測 MU) のネットワーク遅延を観測し、その中で最も大きい遅延を観測ネットワーク遅延とする。そして、MU のバッファリング時間を観測ネットワーク遅延の 2 倍とする。Time-Adjustment Mechanism は MU の発生時刻にバッファリング時間を加えた時刻を MU の出力予定時刻とする方式である。このアルゴリズムには、ネットワーク遅延の大きさに応じてバッファリング時間が変化するため、他のアルゴリズムよりも遅延の揺らぎを吸収できるという長所がある。ただし、平均 MU 遅延が大きいという短所がある。

VTR は、到着した MU を順次バッファに格納し、目標出力時刻 (ネットワーク遅延揺らぎがある場合に MU を出力すべき時刻) に MU を出力する制御である [9]。バッファに格納された最初の MU の理想的な目標出力時刻 (ネットワーク遅延揺らぎがない場合に MU を出力すべき時刻) x_1 は、 A_1 (MU の到着時刻) - T_1 (MU の発生時刻) + J_{\max} (ネットワーク遅延揺らぎの最大推定値) が Δ_{al} (最大許容遅延) 以下のときに、 $A_1 + J_{\max}$ とし、それ以外のときは、 $T_1 + \Delta_{al}$ とする。そして、理想的な目標出力時刻 x_n を $x_1 + (T_n - T_1)$ とし、ネットワーク遅延に応じて総スライド時間 S_n を変化させることで、目標出力時刻を決定する。以降、 n 番目に到着した MU の目標出力時刻 t_n は、 $x_n + S_{n-1}$ ($S_0 = 0$) とする。もし、MU の到着があるしきい値より遅れると、総スライド時間を長くすることにより、目標出力時刻を遅くする。また、MU が何度か連続して目標出力時刻よりも早く到着するとき、総スライド時間を短くすることにより、目標出力時刻を早くする。このアルゴリズムの長所は、ネットワーク遅延に応じて目標出力時刻が変化するため、ネットワーク遅延揺らぎを吸収できる点と、最大許容遅延が設定されていることから、平均 MU 遅延が過度に大きくならない点である。ただし、他のアルゴリズムよりも設定すべきパラメータの数が多いという短所がある。

作業 1(a) では、PHANToM DESKTOP の場合に、各同期アルゴリズムのパラメータの値として表 2 に示す値を採用する。予備実験において、VTR では、最大許容遅延 Δ_{al} が 65 ms 以上のとき、触覚インタフェース装置の操作性が悪くなったため、その最大値を 65 ms としている。また、 Δ_{al} が 35 ms 以下のときには、実験結果に変化がほとんどなかったため、最小値を 35 ms に設定する。ネットワーク遅延揺らぎの最大推定値 J_{\max} が Δ_{al} より大きい ($J_{\max} > \Delta_{al}$) ときには、 $J_{\max} \leq \Delta_{al}$ のときよりも、触覚インタフェー

表 2 作業 1(a) におけるアルゴリズムのパラメータ設定

Table 2 Parameters of each algorithm in work 1(a).

アルゴリズム	パラメータ	パラメータ値			
		PHANToM DESKTOP	PHANToM Omni	SPIDAR-G AHS	Falcon
VTR	最大許容遅延 Δ_{al} [ms]	35, 45, 55, 65	35, 45, 55, 65	30, 45, 60, 75	40, 45, 50, 55
Buffering	初期バッファリング時間 X [ms]	10, 20			
Skipping	なし	なし			
QM	しきい値 T_h	1, 5, 10, 15			
ABC	観測 MU 数 N	7, 100, 150, 200			

表 3 作業 1 (b) におけるアルゴリズムのパラメータ設定
Table 3 Parameters of each algorithm in work 1 (b).

アルゴリズム	パラメータ	パラメータ値			
		PHANToM DESKTOP	PHANToM Omni	SPIDAR-G AHS	Falcon
VTR	最大許容遅延 Δ_{al} [ms]	50, 55, 60, 65			
Buffering	初期バッファリング時間 X [ms]	10, 20			
Skipping	なし	なし			
QM	しきい値 T_h	1, 5, 10, 15			
ABC	観測 MU 数 N	7, 100, 150, 200			

表 4 作業 2 におけるアルゴリズムのパラメータ設定
Table 4 Parameters of each algorithm in work 2.

アルゴリズム	パラメータ	作業 2 (a) におけるパラメータ値	作業 2 (b) におけるパラメータ値
VTR	最大許容遅延 Δ_{al} [ms]	100, 120, 140, 160, 180, 200	20, 40, 60, 80, 100, 120
Buffering	初期バッファリング時間 X [ms]	20, 40, 60, 80, 100	
Skipping	なし	なし	
QM	しきい値 T_h	1, 5, 10, 15	
ABC	観測 MU 数 N	7, 30, 60, 90	

表 5 作業 3 におけるアルゴリズムのパラメータ設定
Table 5 Parameters of each algorithm in work 3.

アルゴリズム	パラメータ	パラメータ値
VTR	最大許容遅延 Δ_{al} [ms]	350, 400, 450
Buffering	初期バッファリング時間 X [ms]	350, 400, 450
Skipping	なし	なし
QM	しきい値 T_h	5, 10, 15
ABC	観測 MU 数 N	7, 10, 30

ス装置の操作性が悪くなった。しかし、 $J_{max} \leq \Delta_{al}$ のときには、 J_{max} の値が実験結果にほとんど影響しなかった。そのため、 J_{max} は 10 ms に固定されている。その他のパラメータ値は文献 [9] と同様に設定されている。

Buffering では、初期バッファリング時間 X が 10 ms 以下の場合、実験結果がほぼ同じであった。また、20 ms 以上の場合では、実験結果が改善されなかった。以上の理由により、 X を 10 ms と 20 ms としている。

Skipping には、パラメータがない。

QM では、しきい値 T_h が 15 以上の場合、作業効率を表す結果がほぼ同じであったため、 T_h の最大値を 15 とする。なお、最小値は 1 である。

ABC では、観測 MU 数 N を 200 以上としても、作業効率を表す結果にほとんど変化がなかったため、 N の最大値を 200 と設定している。また、 N を 7 より小さくすると、作業効率が悪くなったため、最小値を 7 としている。

作業 1 (b) の PHANToM DESKTOP, 作業 1 (a), (b) の PHANToM Omni, 作業 1 (a), (b) の SPIDAR-G AHS, 作業 1 (a), (b) の Falcon, 作業 2 (a), (b) 及

び作業 3 (a), (b) においても、作業 1 (a) の PHANToM DESKTOP の場合と同じ考えに基づき、各アルゴリズムのパラメータ値を決めている。これらの値も表 2, 表 3, 表 4 及び表 5 に示されている。

5. 評価方法

力覚メディア内同期アルゴリズム間で出力品質を比較するため、主観評価試験を行った。PHANToM DESKTOP を用いた作業 1 (a), PHANToM Omni を用いた作業 1 (a), SPIDAR-G AHS を用いた作業 1 (a), Falcon を用いた作業 1 (a), 作業 2 (a) 及び作業 3 (a) の主観評価試験は、各被験者に対して、別々の日程で行われた。また、PHANToM DESKTOP を用いた作業 1 (b), PHANToM Omni を用いた作業 1 (b), SPIDAR-G AHS を用いた作業 1 (b), Falcon を用いた作業 1 (b), 作業 2 (b) 及び作業 3 (b) の主観評価試験も、各被験者に対して、別々の日程で行われた。被験者は 15 名の 20 歳から 24 歳の男性であった。主観試験では、ITU-R BT. 500-11 の単一刺激法 [23] を採用し、評価尺度として MOS (Mean Opinion Score) [23] を用いた。

作業 1 (a) において、付加遅延の標準偏差をいくつかの値に設定して予備実験を行ったところ、実験結果に大きな違いが生じなかった。これは、作業 1 における MU 送信レートが 1 kHz と高いため、ネットワーク遅延揺らぎの影響で、MU の順番が入れ換わり、順序制御によって、ある程度の数の MU が廃棄されたとしても、出力品質の大きな劣化は生じないからである。そのため、標準偏差を 10 ms と固定して実験を行った。

作業 2 及び作業 3 では、予備実験の結果、平均付加遅延を固定して、その標準偏差を変えたときに、作業 2 では指導者側、作業 3 では学習者側において、五つの力覚メディア内同期アルゴリズムの出力品質に差が出たため、平均付加遅延を固定し、標準偏差を変更して、実験を行った。なお、作業 2 の予備実験において、学習者側における五つの力覚メディア内同期アルゴリズム間の評価結果には差がほとんど出なかった。これは、指導者が、学習者の力を感じながら学習者を先導して、描画の指導を行っているため、学習者は指導者より大きな力が必要ではないからである。また、学習者は、ネットワーク遅延やネットワーク負荷による劣化を、指導者からの力であるとみなしてしまうことがあるためでもある。したがって、作業 2 では、指導者に対して評価を行った。また、作業 3 では、力覚は指導者から学習者へ片方向にのみ伝わるため、学習者に対して評価を行った。

被験者には、付加遅延あるいはネットワーク負荷がない状態で、各試験の前に、作業の練習を数回行ってもらった。その直後に、付加遅延またはネットワーク負荷がある状態で、出力品質に対する劣化の度合を、表 6 [23] に示す 5 段階妨害尺度で被験者に評価してもらった。このとき、付加遅延、ネットワーク負荷及び五つのアルゴリズムはランダムに呈示した。

作業 1 では、被験者はクライアント側で主観評価試験を行った。作業 2 では、被験者は指導者として評価を行った。ただし、学習者の端末は常に筆者の一人が担当した。作業 3 では、被験者は学習者として評価を行った。ただし、指導者には学習者からの反力が提示されないシステムであるため、あらかじめ記録しておいた文字を、指導者の文字として用いた。また、予備実験によって、被験者が評点を判断する時間として、作業 1、作業 2 及び作業 3 ともに 25 秒程度で十分であると判断した。そのため、被験者には、1 回の評価試験に対して、作業開始から 5 秒後の 25 秒間を評価してもらった。そのため、すべての作業において、指

導者と学習者は 5 秒の間に作業を開始した。被験者一人当たりの総評価時間は、作業 2 (b) では 50 分、それ以外の作業では 40 分であった。

6. 評価結果と考察

本章では、作業 1 の結果を示した後に、作業 2 及び作業 3 の結果を示す。

6.1 作業 1

6.1.1 PHANToM DESKTOP の場合

NIST Net を用いる場合とルータを用いる場合の、メディア内同期アルゴリズムの違い及びネットワーク遅延が出力品質に及ぼす影響について比較する。

(a) NIST Net を用いる場合

平均付加遅延に対する MOS を図 10 に示す。この図には 95%信頼区間も示されている。図 10 の各アルゴリズムに関する結果は、各平均付加遅延に対して、MOS が最も大きくなるパラメータ値のものを用いている [24]。なお、サーバからクライアントへの付加遅延の標準偏差は 10 ms としている。

図 10 から、VTR、Skipping 及び QM の MOS は、Buffering と ABC のそれに比べて高くなっていることが分かる。これは、Buffering と ABC では、MU のバッファリング時間が長いため、平均 MU 遅延 (MU が発生してから出力されるまでの時間の平均) が VTR、Skipping 及び QM のそれに比べて大きくなるからである。平均 MU 遅延が大きくなると、反力が大きくなり、作業がしにくくなることに注意されたい [9]。

(b) ルータを用いる場合

平均データ負荷 (一秒間にデータ送信端末よりデータ受信端末へ送信された負荷データのビット数の平均) に対する MOS を図 11 に示す。この図には 95%信頼区間も示されている。図 11 の各アルゴリズムに対す

表 6 五段階妨害尺度
Table 6 Five-grade impairment scale.

評点	評価基準
5	劣化が感じられない
4	劣化が感じられるが気にならない
3	劣化が気になるが邪魔にならない
2	劣化が邪魔になる
1	劣化が非常に邪魔になる

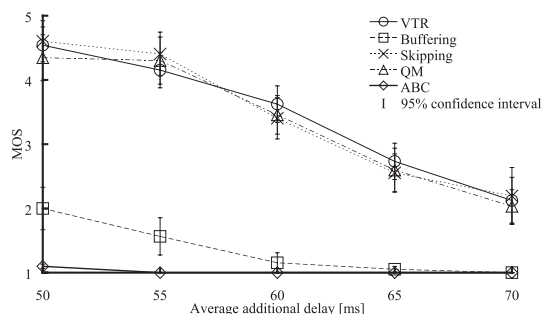


図 10 作業 1 (a) の MOS (PHANToM DESKTOP)
Fig. 10 MOS of work 1 (a) (PHANToM DESKTOP).

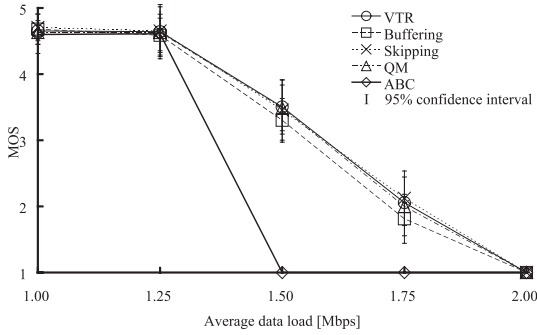


図 11 作業 1 (b) の MOS (PHANToM DESKTOP)
Fig. 11 MOS of work 1 (b) (PHANToM DESKTOP).

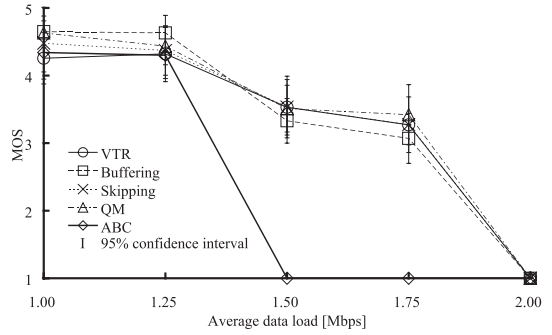


図 13 作業 1 (b) の MOS (SPIDAR-G AHS)
Fig. 13 MOS of work 1 (b) (SPIDAR-G AHS).

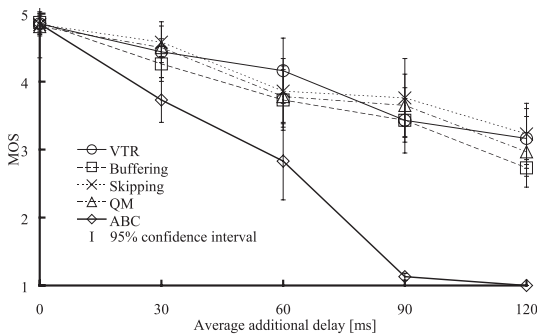


図 12 作業 1 (a) の MOS (SPIDAR-G AHS)
Fig. 12 MOS of work 1 (a) (SPIDAR-G AHS).

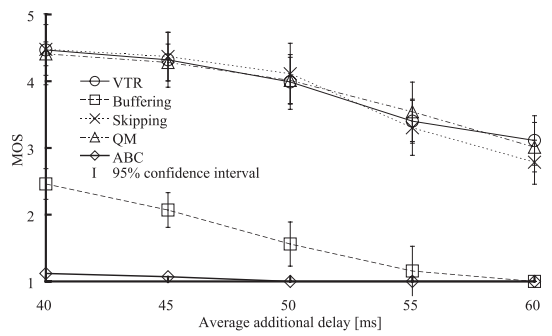


図 14 作業 1 (a) の MOS (Falcon)
Fig. 14 MOS of work 1 (a) (Falcon).

る結果は、各平均データ負荷に対して、MOS が最も大きくなるパラメータ値のものを用いている。

図 11 より、Buffering の MOS は、VTR、Skipping 及び QM とほぼ同じ値であり、平均データ負荷が約 1.25 Mbit/s より大きく、2.00 Mbit/s 程度より小さいときに、ABC のそれより高いことが分かる。これは、VTR、Buffering、Skipping 及び QM 間に平均 MU 遅延の差がほとんど生じなかったためである。なお、観測されたネットワーク遅延の標準偏差は 6.4 ms 以下であった。この値は、NIST Net を用いる場合で、標準偏差を 0 ms としたときを除き、NIST Net を用いる場合のそれよりも小さい。

また、PHANToM Omni を用いる場合の作業 1 (a) と作業 1 (b) についても実験を行った。それらの結果は、PHANToM DESKTOP を用いる場合の実験結果とほぼ同じであった。

6.1.2 SPIDAR-G AHS の場合

(a) NIST Net を用いる場合

平均付加遅延に対する MOS を図 12 に示す。この図の各アルゴリズムに関する結果の求め方は 6.1.1(a)

と同じである。なお、サーバからクライアントへの付加遅延の標準偏差は 10 ms としている。

図 12 から、平均付加遅延が約 0 ms より大きいとき、VTR、Buffering、Skipping 及び QM の MOS は、ABC のそれに比べて高くなっていることが分かる。しかし、VTR、Buffering、Skipping 及び QM の中では、Buffering の MOS が最も小さい傾向にある。

(b) ルータを用いる場合

平均データ負荷に対する MOS を図 13 に示す。この図の各アルゴリズムに対する結果の求め方は 6.1.1(b) と同じである。

図 13 では、SPIDAR-G AHS の場合の五つのアルゴリズムの MOS は PHANToM DESKTOP の場合の MOS (図 11) とほぼ同じ傾向にある。

6.1.3 Falcon の場合

(a) NIST Net を用いる場合

平均付加遅延に対する MOS を図 14 に示す。この図の各アルゴリズムに関する結果の求め方は 6.1.1(a) と同じである。なお、サーバからクライアントへの付加遅延の標準偏差は 10 ms としている。

図 14 から、VTR、Skipping 及び QM の MOS は、Buffering と ABC のそれに比べて高くなっていることが分かる。また、図 14 より、作業 1 (a) の Falcon の場合の MOS は、作業 1 (a) の PHANToM DESKTOP の場合の MOS (図 10) とほぼ同じ傾向にあることが分かる。

以上より、PHANToM DESKTOP、PHANToM Omni、SPIDAR-G AHS 及び Falcon を用いるとき、VTR、Skipping、QM 及び ABC の MOS は触覚インタフェース装置の種類にかかわらずほぼ同じ傾向にあることが分かる。しかし、SPIDAR-G AHS を用いるとき、Buffering の MOS は PHANToM DESKTOP、PHANToM Omni 及び Falcon を用いるときのそれに比べて、高くなっている。ただし、このとき、VTR、Buffering、Skipping 及び QM の四つのアルゴリズム間では、Buffering の MOS が一番小さい傾向にある。したがって、五つのアルゴリズム間の定性的な関係は PHANToM DESKTOP、PHANToM Omni 及び Falcon を用いるときとほとんど同じである。

(b) ルータを用いる場合

平均データ負荷に対する MOS を図 15 に示す。この図の各アルゴリズムに関する結果の求め方は 6.1.1 (b) と同じである。

図 15 では、作業 1 (b) の Falcon の場合の MOS は、作業 1 (b) の PHANToM DESKTOP の場合の MOS (図 11) 及び作業 1 (b) の SPIADR-G AHS の場合の MOS (図 13) とほぼ同じ傾向にあることが分かる。

以上より、ネットワークにルータを用いるとき、PHANToM DESKTOP、PHANToM Omni、SPIDAR-G AHS 及び Falcon のいずれを用いる場合であっても、VTR、Buffering、Skipping、QM 及び ABC の MOS の傾向はほぼ同じであることが分かる。

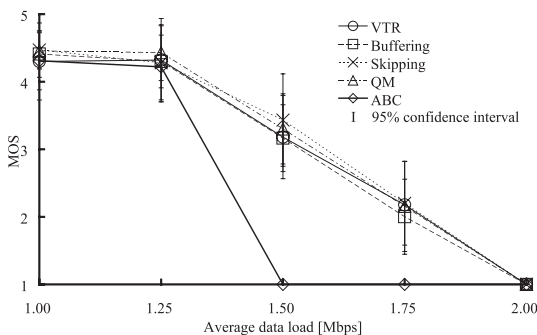


図 15 作業 1 (b) の MOS (Falcon)
Fig. 15 MOS of work 1 (b) (Falcon).

以下では、触覚インタフェース装置の仕様の違いが出力品質に及ぼす影響を明らかにする。作業 1 において得られた結果のうち、図 10、図 12、図 14 から、作業 1 (a) において PHANToM DESKTOP、PHANToM Omni や Falcon を用いるときより大きい遅延を付加しても、SPIDAR-G AHS の MOS の方が PHANToM DESKTOP、PHANToM Omni や Falcon のそれよりも高いことが分かる。また、PHANToM DESKTOP、PHANToM Omni や Falcon を用いるときと異なり、SPIDAR-G AHS を用いたときの Buffering の出力品質は、VTR、Skipping 及び QM と同様に高いことも分かる。このことから、SPIDAR-G AHS は PHANToM DESKTOP、PHANToM Omni や Falcon に比べてネットワーク遅延の影響を受けにくい触覚インタフェース装置であるといえる。なお、文献 [25] では、SPIDAR-G AHS と PHANToM Omni の間において、同様の結果が示されている。

6.2 作業 2

(a) NIST Net を用いる場合

付加遅延の標準偏差に対する MOS を図 16 に示す。この図では、指導者端末と学習者端末間の両方向の平均付加遅延を 100 ms としている。

図 16 から、VTR と Buffering の MOS が最も高く、次いで Skipping と QM の MOS であり、最も低いのが ABC の MOS であることが分かる。これは、ネットワーク遅延揺らぎを吸収することに関して、VTR と Buffering は、Skipping と QM^(注2) より有効であり、

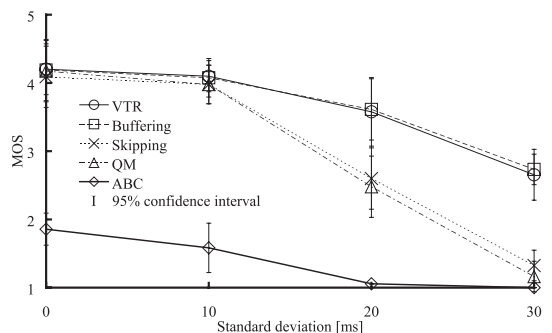


図 16 作業 2 (a) の MOS
Fig. 16 MOS of work 2 (a).

(注2): 作業 2 の QM では、しきい値 T_h が 1 の場合に最も高い MOS となったため、受信した MU を直ちに出力している。作業 2 は送信 MU レートが 30 Hz と低いため、同じ時刻に複数 MU がバッファ内に蓄積されにくく、バッファ内の MU 数はほとんど 1 である。したがって、QM の振舞いは Skipping のそれに似ており、 T_h の値を大きくしても、ほとんど効果がない。

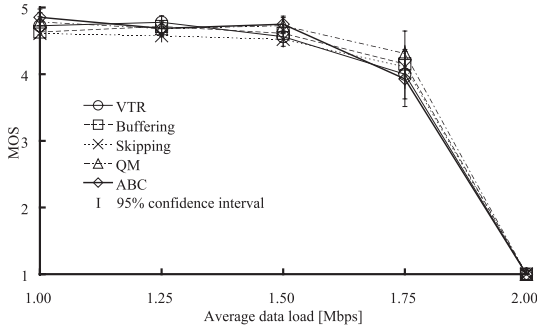


図 17 作業 2 (b) の MOS
Fig. 17 MOS of work 2 (b).

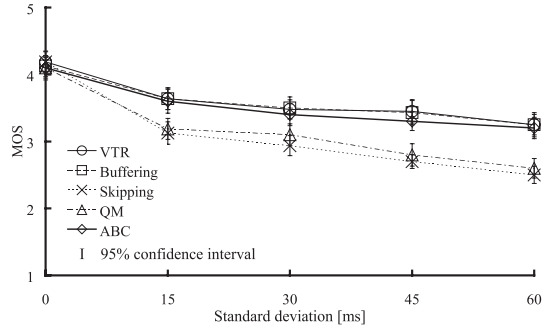


図 18 作業 3 (a) の MOS
Fig. 18 MOS of work 3 (a).

Skipping と QM が ABC より有効だからである。

(b) ルータを用いる場合

平均データ負荷に対する MOS を図 17 に示す。図 17 から、五つのアルゴリズムの MOS はほぼ同じであることが分かる。また、ABC は、その制御方式の特徴から、ネットワーク遅延の揺らぎが大きいときの MU の到着から出力までの時間が、他のメディア同期アルゴリズムよりも長いという特徴がある。そのため、NIST Net を用いる場合の ABC の MOS 値は、ルータを用いる場合のそれと比べて悪くなる傾向にある。このことは、図 16 と図 17 から分かる。なお、観測されたネットワーク遅延の標準偏差は 8 ms 以下であった。この値は、NIST Net を用いる場合で、標準偏差を 0 ms としたときを除き、ルータを用いる場合のネットワーク遅延の揺らぎは、NIST Net を用いる場合のそれよりも小さい。

6.3 作業 3

(a) NIST Net を用いる場合

付加遅延の標準偏差に対する MOS を図 18 に示す。この図では、指導者端末と学習者端末間の両方向の平均付加遅延を 100 ms としている。

図 18 から、付加遅延の標準偏差が約 0 ms より大きいとき、VTR、Buffering と ABC の MOS が最も高く、Skipping と QM の MOS が低くなっていることが分かる。これは、Skipping と QM が、VTR、Buffering と ABC よりもネットワーク遅延揺らぎを吸収できないためである。

(b) ルータを用いる場合

平均データ負荷に対する MOS を図 19 に示す。図 19 から、Skipping を除く四つのアルゴリズムの MOS はほぼ同じであり、Skipping の MOS が最も小さい傾向

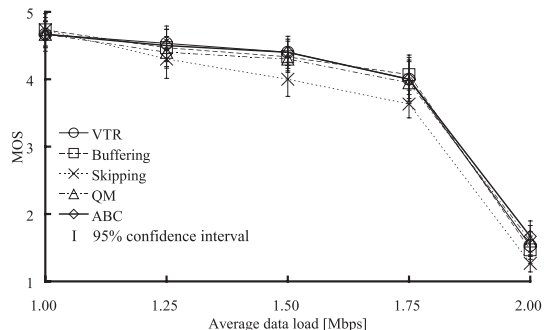


図 19 作業 3 (b) の MOS
Fig. 19 MOS of work 3 (b).

にあることが分かる。五つのメディア同期アルゴリズムのうち ABC は、その制御方式の特徴から、ネットワーク遅延の揺らぎが大きいときの平均 MU 遅延が、他のメディア同期アルゴリズムよりも大きいという特徴がある。そのため、NIST Net を用いるときの ABC の MOS 値は、ルータを用いる場合のそれと比べて低くなる傾向にある。このことは、図 18 と図 19 から分かる。なお、この実験において観測されたネットワーク遅延の標準偏差は 12 ms 以下であった。この値は、標準偏差を 0 ms としたときを除き、NIST Net を用いる場合のそれよりも小さい。

6.4 三つの作業のまとめ

以上より、触覚インタフェース装置として PHANToM DESKTOP または PHANToM Omni を用いる場合において、作業 1 (a) では、VTR、Skipping 及び QM が最も高い出力品質をもち、作業 1 (b) では、VTR、Buffering、Skipping 及び QM の出力品質が最も高い。SPIDAR-G AHS を使用する場合における作業 1 (a) と作業 1 (b) では、VTR、Buffering、Skipping 及び QM の出力品質が最も高い。また、Falcon

を用いる場合における作業 1(a) では、VTR, Skipping 及び QM が最も高い出力品質をもち、また、作業 1(b) では、VTR, Buffering, Skipping 及び QM の出力品質が最も高い。更に、作業 2(a) の場合には、VTR と Buffering が最も高い出力品質をもち、作業 2(b) では、五つの同期アルゴリズムの出力品質の差がほとんど出ない。また、作業 3(a) においては、VTR, Buffering と ABC が最も高い出力品質をもち、そして、作業 3(b) では、Skipping を除く四つのアルゴリズムの出力品質はほぼ同じであり、Skipping の MOS が最も小さい傾向にある。したがって、VTR は、いずれの作業においても最も優れている。

以下では、作業の違いが出力品質に及ぼす影響を明らかにする。2. で述べたように、作業 1 はネットワーク遅延の大きさに影響を受けやすいという特徴があり、作業 2 は作業 1 と比べて、ネットワーク遅延の大きさの影響を受けにくい、ネットワーク遅延揺らぎの影響を受けやすいという特徴がある。そして、作業 3 は作業 1 や作業 2 とは異なり、インタラクティブ性が強く要求されない作業のため、ネットワーク遅延の大きさによる影響をほとんど受けないが、遅延の揺らぎによる影響を受けやすいという特徴がある。したがって、作業 1 では、MU の発生から出力までの時間が短い、VTR, Skipping 及び QM の出力品質が最も良い。また、作業 2 では、MU の発生から出力までの時間が長くなりすぎず、遅延揺らぎを吸収することができる VTR と Buffering の出力品質が最も良くなる。そして、作業 3 では、遅延揺らぎを吸収することができる VTR, Buffering 及び ABC が、最も良い出力品質を示す。

主観評価と同時に客観評価も行われた。客観評価尺度として、作業 1 ではオブジェクトと目標物体との平均距離 [9] を採用し、作業 2 では追従率 [18] を、作業 3 では文字の欠損率 [26] を用いた。オブジェクトと目標物体との平均距離は、両者の中心点間の距離の平均値である。この尺度は、作業効率を表しており、この値が小さいほど、作業効率が良い。追従率は、各端末で、学習者の PHANToM Omni カーソルの位置が指導者のそれから一定の距離 (1.5 cm) [18] 以内に収まった時間の実験時間に対する割合のことである。これは、学習者が指導者の運筆にどれだけうまく追従できたかを表す。文字の欠損率は、指導者の端末が送信した MU と学習者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に文字の太さの差の絶対値を計算し、そ

れを合計した値の、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る。これは、指導者の書いた文字を学習者の端末に忠実に再現できたかを表す。客観評価結果は主観評価結果とほぼ同じ傾向にあったため、客観評価結果と主観評価結果の関係を回帰分析により調査した。その結果、各作業の回帰分析の回帰式における自由度調整済み寄与率はすべて 0.92 以上の値を示した。したがって、MOS は客観評価値より高精度に推定可能であるといえる。

7. む す び

本論文では、力覚メディア内同期アルゴリズムとして、VTR, Buffering, Skipping, QM 及び ABC を取り上げ、これらの出力品質比較を行った。主観評価の結果、作業 1(a) (NIST Net を用いた実験システムにおいて、一人の利用者が一つの仮想オブジェクトを持ち上げて動かす) では、触覚インタフェース装置として PHANToM DESKTOP または PHANToM Omni を用いる場合においては、VTR, Skipping 及び QM が最も高い出力品質をもち、SPIDAR-G AHS を使用する場合には、VTR, Buffering, Skipping 及び QM が最も高い出力品質をもちることが分かった。また、Falcon を用いる場合においては、VTR, Skipping 及び QM が最も高い出力品質をもちことが明らかになった。作業 1(b) (ルータを用いた実験システムにおいて、一人の利用者が一つの仮想オブジェクトを持ち上げて動かす) では、触覚インタフェース装置として PHANToM DESKTOP, PHANToM Omni, SPIDAR-G AHS または Falcon を用いる場合においては、VTR, Buffering, Skipping 及び QM の出力品質が最も高いことが示された。また、作業 2(a) (NIST Net を用いた遠隔描画指示) では、VTR と Buffering の出力品質が、最も高かった。作業 2(b) (ルータを用いた遠隔描画指示) では、五つの同期アルゴリズムの出力品質の差がほとんど出なかった。更に、作業 3(a) (NIST Net を用いた遠隔習字) では、VTR, Buffering と ABC の出力品質が最も高かった。このほか、作業 3(b) (ルータを用いた遠隔習字) では、五つの同期アルゴリズムの出力品質の差がほとんど出なかった。ただし、五つのアルゴリズムの中で、Skipping の MOS が最も小さい傾向にあった。これらの結果から、VTR は、いずれの作業においても最も優れていることが分かった。

今後の課題として、本論文の作業とは異なる作業も

検討対象とし、出力品質の比較を行うことが挙げられる。また、本論文で用いられた触覚インタフェース装置以外の装置に対して比較を行うことも考えられる。

謝辞 御討論頂いた本学菅原真司准教授に感謝する。

文 献

- [1] M.A. Srinivasan and C. Basdogan, "Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges," *Comput. Graph.*, vol.21, no.4, pp.393–404, April 1997.
- [2] Y. Ishibashi and H. Kaneoka, "Group synchronization for haptic media in a networked real-time game," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E89-B, no.2, pp.313–319, Feb. 2006.
- [3] 兼岡弘幸, 石橋 豊, "触覚インタフェース装置を用いた協調作業における端末間同期制御の効果," *信学論 (B)*, vol.J88-B, no.10, pp.2105–2109, Oct. 2005.
- [4] 浅野寿朗, 石橋 豊, "触覚を利用した遠隔教示システムにおけるメディア同期品質評価," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.11, no.4, pp.459–467, Dec. 2006.
- [5] 兼岡弘幸, 石橋 豊, 浅野寿朗, "触覚を利用した遠隔習字システムにおける QoS 制御実験," *信学技報*, CQ2006-2, April 2006.
- [6] K. Hikichi, Y. Yasuda, A. Fukuda, and K. Sezaki, "The effect of network delay on remote calligraphic teaching with haptic interfaces," *Proc. ACM NetGames'06*, Oct. 2006.
- [7] O. Wongwirat and S. Ohara, "Haptic media synchronization for remote surgery through simulation," *IEEE Multimedia*, vol.13, no.3, pp.62–69, July–Sept. 2006.
- [8] O. Wongwirat and S. Ohara, "Moving average based adaptive buffer for haptic media synchronization in telehaptics," *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp.1305–1311, July 2005.
- [9] Y. Ishibashi, S. Tasaka, and T. Hasegawa, "The virtual-time rendering algorithm for haptic media synchronization in networked virtual environments," *Proc. 16th International Workshop on Communications Quality and Reliability (CQR2002)*, pp.213–217, May 2002.
- [10] K. Hikichi, H. Morino, Y. Yasuda, I. Arimoto, and K. Sezaki, "The evaluation of adaptive control for haptics collaboration over the Internet," *Proc. 16th International Workshop on Communications Quality and Reliability (CQR2002)*, pp.218–222, May 2002.
- [11] G. Blakowski and R. Steinmetz, "A media synchronization survey: Reference model specification, and case studies," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.14, no.1, pp.5–35, Jan. 1995.
- [12] D.L. Stone and K. Jeffay, "An empirical study of delay jitter management policies," *ACM Multimedia Systems*, vol.2, no.6, pp.267–279, Jan. 1995.
- [13] J.K. Salisbury and M.A. Srinivasan, "Phantom-based haptic interaction with virtual objects," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol.17, no.5, pp.6–10, Sept./Oct. 1997.
- [14] SensAble Technologies, Inc., "GHOST SDK programmer's guide," Version 3.0, 2004.
- [15] SensAble Technologies, Inc., "3D SDK OpenHaptics Toolkit programmer's guide," Version 1.0, 2004.
- [16] S. Kim, J.J. Berkley, and M. Sato, "A novel seven degree of freedom haptic device for engineering design," *Virtual Reality*, vol.6, no.4, pp.217–228, Aug. 2003.
- [17] Novint Technologies, Inc., "HDAL programmer's guide," Version 1.1.0 Beta, 2007.
- [18] Y. Kurokawa and Y. Ishibashi, "A group synchronization scheme with prediction in a remote haptic drawing system," *Proc. SPIE Optics East, Multimedia Systems and Applications X*, vol.6777, no.24, Sept. 2007.
- [19] T.H. Massie and J.K. Salisbury, "The PHANToM haptic interface: A device for probing virtual objects," *Proc. ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Nov. 1994.
- [20] Y. Ishibashi and T. Asano, "Media synchronization control with prediction in a remote haptic calligraphy system," *Proc. ACM SIGCHI ACE'07*, pp.79–86, June 2007.
- [21] M. Carson and D. Santay, "NIST Net — A Linux-based network emulation tool," *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, vol.33, no.3, pp.111–126, July 2003.
- [22] "Paretonormal distribution table generator," <https://svn.openfabrics.org/svn/openib/gen2/branches/1.1/src/userspace/ipoibtools/iproute2/netem/paretonormal.c>
- [23] ITU-R BT. 500-11, "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures," *International Telecommunication Union*, 2002.
- [24] 孫 樹春, 橋本達也, 石橋 豊, 菅原真司, "触覚メディア内同期アルゴリズムの同期品質比較," *信学技報*, CQ2008-2, April 2008.
- [25] 橋本達也, 大平崇博, 石橋 豊, 菅原真司, "異種触覚インタフェース装置間の相互接続実験: PHANToM と SPIDAR 間の作業," 2008 信学総大, B-11-3, March 2008.
- [26] 藤浦豊徳, 黒川陽一, 石橋 豊, "重要度を考慮した誤り制御を用いた通信方式の力覚を利用した遠隔教育システムへの適用," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, vol.13, no.3, pp.401–408, Sept. 2008.

(平成 20 年 12 月 26 日受付, 21 年 2 月 27 日再受付)



藤浦 豊徳 (正員)

平 6 名工大・工・電気情報卒。平 8 同
大大学院博士前期課程了。同年日本電信電
話(株)入社。現在、名工大大学院・工・
情報博士後期課程に在学中。力覚メディア
のためのトランスポートプロトコルの研究
に従事。



孫 樹春

平 17 大連理工大・電子情報卒。平 21 名
工大大学院博士前期課程了。在学中、力覚
メディア内同期アルゴリズムの研究に従事。



藤本 猛 (正員)

平 19 名工大・工・電気情報卒。平 21 同
大大学院博士前期課程了。在学中、分散仮
想環境における力覚メディア通信の研究に
従事。



石橋 豊 (正員)

昭 56 名工大・工・情報卒。昭 58 同大
大学院修士課程了。同年日本電信電話公社入
社。NTT ヒューマンインタフェース研究
所主任研究員を経て、平 5 より名工大・工・
電気情報助教授。現在、同大大学院教授。
分散マルチメディアの研究に従事。工博。