

IP ネットワークにおける視覚・力覚メディアの QoS 制御に関する研究

藤浦 豊徳

目次

第 1 章	序論	1
1.1	視覚・力覚メディア	2
1.1.1	視覚メディアの特徴	2
1.1.2	力覚メディアの特徴	3
1.1.3	触覚インタフェース装置	3
1.2	IP ネットワーク	4
1.2.1	インターネット	4
1.2.2	シンクライアント	5
1.2.3	iSCSI	5
1.3	QoS 制御	6
1.3.1	トラヒック制御	6
1.3.2	誤り制御	6
1.3.3	メディア同期制御	8
1.4	本論文の目的と構成	8
第 2 章	ネットワーク遅延及びパケット欠落が iSCSI を用いたビデオ再生品質に 及ぼす影響	10
2.1	まえがき	10
2.2	iSCSI の概要	11
2.3	iSCSI におけるビデオ再生	12
2.4	実験環境	13
2.4.1	実験方法	13
2.4.2	ビデオ再生プログラムの実装	14
2.4.3	実験システム	14
2.4.4	評価尺度	15

2.5	実験結果と考察	16
2.5.1	ネットワーク遅延の影響	16
2.5.2	パケット欠落の影響	20
2.6	むすび	22
第 3 章	iSCSI を用いたビデオ再生のための動的レート制御	25
3.1	まえがき	25
3.2	動的レート制御	26
3.3	iSCSI における動的レート制御	27
3.3.1	制御ファイルを用いる方式	28
3.3.2	MPEG ビデオファイルを変更するときの課題と解決方法	28
3.3.3	動的レート制御に必要なその他の機能	29
3.4	実験	30
3.4.1	評価方法と比較対象	30
3.4.2	実験環境	32
3.5	実験結果	34
3.5.1	UDP 負荷による実験	35
3.5.2	Web 負荷による実験	38
3.6	むすび	38
第 4 章	力覚を利用した遠隔教育システムにおける重要度を考慮した誤り制御	41
4.1	まえがき	41
4.2	力覚を利用した遠隔教育システムの概要	42
4.2.1	遠隔習字システム	43
4.2.2	遠隔描画教示システム	43
4.3	重要度を考慮した誤り制御方式	44
4.4	実験方法	46
4.4.1	実験システム	46
4.4.2	比較対象方式	46
4.4.3	主観評価	49
4.4.4	客観評価	50
4.5	評価結果と考察	51
4.5.1	遠隔習字システム	51

4.5.2	遠隔描画教示システム	54
4.6	むすび	56
第 5 章	力覚メディア内同期アルゴリズムの出力品質比較	57
5.1	まえがき	57
5.2	作業内容	58
5.2.1	作業 1	59
5.2.2	作業 2	61
5.2.3	作業 3	61
5.3	実験システム	63
5.3.1	作業 1	63
5.3.2	作業 2 及び作業 3	65
5.4	力覚メディア内同期アルゴリズム	67
5.5	評価方法	70
5.6	評価結果と考察	72
5.6.1	作業 1	72
5.6.2	作業 2	78
5.6.3	作業 3	80
5.6.4	三つの作業のまとめ	80
5.7	むすび	83
第 6 章	結論	84
	謝辞	87
	参考文献	88

第 1 章

序論

ネットワークの高速化，コンピュータの処理能力向上，メディア圧縮技術の進展，及び触覚インタフェース装置の開発により，ネットワーク上で視覚・力覚メディアの転送ができるようになってきている．そのため，インターネットなどの IP(Internet Protocol) ネットワークを介して，離れた地点に視覚・力覚メディアを伝えることにより協調作業などを実現するアプリケーションが注目されつつある．

視覚を用いたアプリケーションの一例として，パソコンによるビデオ再生が挙げられる．これは，通信回線の高速化により，遠隔地にある大容量のファイルを手元にあるパソコンに短時間で転送できるようになり，パソコン内に多くのビデオが保存されるようになったことと，コンピュータの処理能力の向上やメディア圧縮技術の進展により高画質なビデオのファイルサイズがより小さくなり，保存が容易になったことによる．一方，近年，シンククライアント [1]–[3] が，情報漏洩防止の観点から普及しつつある．シンククライアントは，ユーザが使うクライアントに必要最低限の処理をさせ，ほとんどの処理をサーバに集中させる構成を取る．通常のクライアントでは，各クライアント内にデータを保持するが，シンククライアントでは，データはサーバに保持される．そのため，クライアントが持ち出されたとき，通常のクライアントでは中に入っている個人情報などの重要情報も一緒に持ち出されるが，シンククライアントでは，データは持ち出されない．シンククライアントにおいては，ビデオも他のデータと同様にサーバに保持されるため，シンククライアントにおけるビデオ再生について検討を行う必要があるといえる．たとえば，ビデオのビットレートは高いため，シンククライアントにおける他のデータと同様に，ビデオファイルをサーバに配置してビデオ再生を行うとき，サーバとクライアント間に広帯域のネットワークを用意する必要がある．また，このネットワークでパケット欠落が発生すると，ビデオ再生品質が大きく劣化する恐れがある．

力覚メディアを用いたアプリケーション例として、遠隔教育 [4] 及び遠隔医療 [5], [6] などが挙げられる。力覚を用いることで、オブジェクトの形状、硬さ、重さ、動きなどを伝えることができるようになるため、作業効率が改善 [7] されると期待できる。しかし、力覚メディアは、視覚メディアと比べてネットワーク遅延やその揺らぎの影響を受けやすい [8]–[10]。また、力覚メディアにおいても、パケット欠落が発生すると、力覚メディアの出力品質は劣化する。

これらのことから、視覚・力覚メディアを用いたアプリケーションでは、メディアの種類やアプリケーションによって、要求されるサービス品質 (QoS: Quality of Service) [11]–[14] が大きく異なるといえる。また、インターネットのような QoS が保証されていないネットワークを介して視覚・力覚メディアを転送すると、スループットの低下、ネットワーク遅延やその揺らぎ、及びパケット欠落などにより、QoS が大きく劣化する可能性がある。従って、メディアの QoS を高く保つためには、送るメディアの種類やアプリケーションごとに、ネットワーク遅延揺らぎやパケット欠落率を小さくするトラフィック制御 [15]–[19] や、パケット欠落からの回復を行う誤り制御 [20], [21]、メディアの時間構造を回復・保持するメディア同期制御 [5], [6], [23]–[25] などの QoS 制御を検討する必要がある。

以下では、まず、1.1 節で視覚・力覚メディアについて概説する。次に、1.2 節で IP ネットワークについて述べる。そして、1.3 節では QoS 制御を説明する。最後に、1.4 節で本論文の目的と構成を示す。

1.1 視覚・力覚メディア

本節では、視覚メディア、力覚メディアそれぞれの特徴と、力覚に対する情報提示を行う触覚インタフェース装置 [26]–[30] について述べる。

1.1.1 視覚メディアの特徴

これまで、用件を遠方にリアルタイムに伝えるとき、古くは文字 (電報)、近年では音声 (電話) が用いられている。これは、遠方の相手に用件を伝える場合において、文字による方法がもっとも送るべき情報量を少なくすることができ、ついで、音声による方法の情報量が少ないためである。しかし、文字による通信では、細かいニュアンスを伝えることができないため、コミュニケーションの手段としては必ずしも十分ではない。また、音声による通信では、話し方を伝えることはできるものの、表情を伝えることはできない。

一方、視覚メディア通信では、表情を伝えることができるため、より高度なコミュニケーションが可能である。視覚メディア通信は、音声や力覚メディアによる通信の場合と比べて、高ビットレートであるという特徴がある。

1.1.2 力覚メディアの特徴

用件のみではなく、遠隔教育や遠隔医療など、音声やビデオでは伝えにくい、三次元仮想空間での物体の運動に関連する情報を伝えたいとき、力覚メディアが用いられる。力覚メディアを用いることにより、遠隔地に点在する複数の利用者が、作業空間内にあるオブジェクトの形状、硬さ、重さなどを共有することができるようになる。その結果、複雑な作業を正確に行うことができるようになり、協調作業の効率を大きく改善したり、ネットワークゲームへの没入感が高まることが期待される。

力覚メディアが、音声やビデオなどの視覚・聴覚メディアと大きく異なる点は、入力と出力が同一の装置で行われる点である。また、ネットワーク遅延の影響を受けやすい [31], [32] と言われており、視覚メディアの一つであるビデオでは、ネットワーク利用者がアプリケーションへの影響を了解しているという条件の下での音声やビデオの最大許容遅延は約 400ms [8] であるのに対して、触覚メディアの許容遅延時間は 30ms から 60ms [9], [10] であることが明らかにされている。また、文献 [33], [34] では、ネットワーク遅延によって力覚メディアの出力が遅れると、利用者に提示される反力が大きくなり、不自然になると報告されている。

1.1.3 触覚インタフェース装置

触覚インタフェース装置は、利用者の指し示す三次元仮想空間の位置情報をコンピュータに伝えるときに、コンピュータにより計算された触覚を利用者に返すためのインタフェース装置である。

触覚インタフェース装置は、もともと手術のシミュレーションや遠隔操作などを行うために開発されたもので、多くの研究が行われているとともに、アプリケーションに応じて多種多様な触覚インタフェース装置が開発されている [26], [27], [32], [35]–[38]。また、最近では、簡易な力覚提示機能を備えた装置も市販されている。触覚インタフェース装置は、今後、今までのマウスに変わる新しいユーザインタフェース装置として用いられることが予想される。触覚インタフェース装置は、提示する触覚によって大きく、点型 [26], [27], [35], [36]、面型 [37]、テクスチャ型 [38] の三種類に分類 [32] できる。点型は

コンピュータ内のオブジェクトに対し指で突いたときの硬さや反力などを得ることができる。また、面型は点平面全体にモノの凹凸感や硬度を再現でき、テクスチャ型は指先に物体の表面の微細な様子を再現できる。触覚と呼ばれている感覚は、主として運動に関連する力覚と、手触りに関連する触圧覚の二つに分類され、本論文では力覚を扱う。

1.2 IP ネットワーク

IP ネットワークは、ネットワーク層プロトコルとして IP(Internet Protocol) [39] を採用したネットワークを指す。現在、IP はインターネットの世界を飛び出して、さまざまな場面で利用されるつつある。

IP ネットワークでは、パケットごとに通過するネットワークノードや得られる通信品質が異なりうる。また、IP はあらかじめコネクション開設を行わないコネクションレス型プロトコルであるため、通信品質を保証する機能は用意されていない。このようなことから、IP ネットワークはベストエフォート型のネットワークと呼ばれる。IP ネットワークでは転送時の QoS は保証されていないため、上位層において、必要に応じて QoS 制御を行う必要がある。

本節では、まず、IP 誕生の起源となったインターネットの概要を述べる。そして、IP ネットワーク上のメディアを用いたアプリケーションとして、近年注目を集めているシンクライアントと、シンクライアントで用いられているプロトコルである iSCSI について説明する。

1.2.1 インターネット

インターネットは、地球規模で相互接続された IP ネットワークのことである [40]。インターネットでは、IP アドレスがわかれば、世界中のインターネットに接続されたどの端末とでも通信が可能である。

インターネットの歴史は、1969 年、米国防総省の研究部門である ARPA(Advanced Research Projects Agency) が軍事目的に開始したネットワーク (ARPANET) に始まる。ARPANET は、情報基地を分散して複数の伝達経路を持たせた分散コンピュータネットワークであり、情報基地が破壊されても情報通信網が麻痺しないことを目的に作られた。ARPANET では、パケット交換を用いることで、一本の通信回線を同時に複数ユーザが利用できる。また、一つの経路がダウンしたときにも、別の経路を用いることで通信が可能である。ARPANET 開設当初は、米国西海岸にある四大学のコンピュータ間を 50kbps

で結んだ小規模なものであった。

1972 年 , 米国は国防戦略の転換に伴い ARPA を DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) に再編した。このとき , ARPANET は大学や研究機関に解放され , 非軍事目的での利用が開始された。また , 異機種のコンピュータ間で通信するためのプロトコルの研究が進み , インターネットの標準プロトコルとなっている TCP (Transmission Control Protocol) [41]/IP が登場した。こうして , 現在のインターネットの基となるネットワークが形成された。

このような経緯から , インターネットでは , 接続している組織がそれぞれの IP ネットワークを管理しており , 組織に応じて , さまざまな速度のネットワークで接続されている。近年 , ネットワーク技術の進歩に伴い , 高速 , 低遅延なネットワークで接続することが可能となってきている。そのため , これまで速度の低さや , 遅延の大きさにより転送が難しかった視覚・力覚メディアの転送が一般化しつつある。

1.2.2 シンククライアント

近年 , 情報漏洩を防ぐアプリケーションの一つとしてシンククライアントが注目されている。シンククライアントでは , ユーザが使うクライアント端末に必要最小限の処理をさせ , ほとんどの処理をサーバ側に集中させる構成を取る。通常のパソコンでは , データは各クライアント内で保持するが , シンククライアントでは , クライアント端末にデータを持たないため , データはサーバに保持される。そのため , クライアントが持ち出されたとき , 通常のパソコンでは中に入っている個人情報などの重要情報も一緒に持ち出されるが , シンククライアントでは , データが持ち出されない。そのため , シンククライアントは情報漏洩対策に有効である。ここで , 通常のパソコンでは , 蓄積されたマルチメディアデータを再生するときには , メディアを内蔵ディスクから読み出し再生するが , シンククライアントでは , マルチメディアデータをサーバにあるディスクから読み出して再生するため , メディアの読み出しに十分な帯域のネットワークを準備する必要があるといえる。

1.2.3 iSCSI

iSCSI [42] は , 計算機や周辺機器の相互通信に用いられる SCSI (Small Computer System Interface) [43] コマンドを IP ネットワーク上で送受信するためのプロトコルであり , RFC3720 [42] として標準化されている。iSCSI は , シンククライアントにおいて , サーバに保持されたデータを読み出すときに用いられる。iSCSI では , ネットワークのス

ループットに応じて読み書きの速度が変化する。

1.3 QoS 制御

IP ネットワークでは、視覚・力覚メディアの品質劣化の原因であるパケット遅延揺らぎやパケット欠落が発生する。そのため、視覚・力覚メディアを用いたアプリケーションを実現するとき、パケット遅延揺らぎやパケット欠落が発生しても、視覚・力覚メディアができるだけ高品質に出力されるように制御することと、作業に支障が無い範囲で、パケット遅延揺らぎやパケット欠落ができるだけ発生しないように QoS 制御することが必要である。これらの制御のうち、本節では、ネットワーク遅延揺らぎやパケット欠落率を小さくするトラフィック制御、パケット欠落からの回復を行う誤り制御、及びメディアの時間構造を回復・保持するメディア同期制御を説明する。

1.3.1 トラフィック制御

パケット欠落は、パケット中継ノード内のキューがあふれたときに発生する。また、パケット遅延も、パケット中継ノード内のキューの長さが長いほど大きくなる。そのため、パケット欠落率やパケット遅延を小さくするためには、パケット中継ノード内のキューの長さが長くないようにする必要がある。キューの長さが長くないようにするためには、受信するデータのビットレートを、キューからの送信速度以下とする必要がある。このようにキューが長くないように制御することをトラフィック制御という。

視覚メディアのトラフィック制御として、動的レート制御 [15]–[19] がある。動的レート制御を行うと、データ転送速度が低下したときのビデオ品質の劣化が小さくなることが知られている。この制御は、サーバが送信するビデオのビットレートを、ネットワーク負荷に応じて切り替える制御である。動的レート制御では、ビデオを送信している途中でビデオが途切れないようにそのビットレートを切替えることが必要である。

1.3.2 誤り制御

ネットワークを伝送中のパケットは、様々な原因で誤ったり、失われたり、重複したり、受信される順番が狂ったりする。高品質な通信を行うためには、受信端末でこれらの伝送誤りを検出し、回復しなければならない。誤り制御は一般的に CPU 時間を消費するため、伝送路の品質や誤りの頻度、下位層での誤り制御方式（下位層で十分な誤り制御を行っているときは、上位層では神経質に誤り制御を行う必要が無い）などを考慮して効率

のよい制御方式を考える必要がある。

パケットの誤りや欠落から回復する制御の基本的なものとして ARQ(Automatic Repeat reQuest) と FEC(Forward Error Correction) [20] がある。これらの性質を以下に述べる。

ARQ(自動再送要求)

ARQ では、欠落したパケットを再送により回復する。ARQ に基づく誤り回復は次の三つの部分から構成される [21]。

送達確認方式

受信端末はパケットを正しく受け取ったとき、肯定応答 (ACK: ACKnowledgment) を送信端末に送り返す。また、正しく受け取れなかったとき、再送を要求する情報 (NACK: Negative ACK) を送信端末に送り返す。

欠落したパケットの検出

送信端末のパケットが欠落したとき、受信端末はその次のパケットを受信したときに発生する順序乱れによりパケット欠落を検知し、NACK を送信する。また送信端末は、送信パケットに対応する ACK を送信から一定時間内に受信できずタイムアウトしたときや NACK を受信したとき、パケット欠落が発生したとしてパケットを再送する。

再送パケットの送信方法

再送パケットの送信方法としては、Go-Back-N 方式と、Selective-Repeat 方式がよく知られている。Go-Back-N 方式では、欠落したパケットから順に以降のパケットを送信する。Selective-Repeat 方式では、欠落したパケットのみを再送する。これらは、受信端末での実装の容易さと転送効率の面でトレードオフの関係にある。

FEC(前方向誤り訂正)

FEC では、通常のパケットに加えて、欠落したパケットの回復に必要な、パリティと呼ばれる冗長パケットも転送することにより、受信側で回復を行う。パリティは、複数の通常のパケットから符号化アルゴリズムにより導かれる。転送されたパケットに誤りが発生した場合には、パリティを用いることで、元のデータを回復することができる。

ARQ には、FEC に比べて実装が容易であることとパケット欠落が発生しないときに送信するデータ量が少ないという長所がある。そのため、ARQ を用いることが多い。一方、ARQ による誤り回復はネットワーク遅延揺らぎを増大させる。これは、再送判断に必要

な欠落したデータの検出にタイムアウトを用いているため、再送パケットの送信までに時間がかかることと、再送トラヒックによりネットワークへ流入するトラヒックが増加するためである。一方、FEC は、ARQ と異なり、データの再送を待つことなく誤りを回復できるため、ネットワーク遅延揺らぎは ARQ ほど増大しない。そのため、力覚メディアの誤り制御として FEC を用いることが検討されている [22]。

1.3.3 メディア同期制御

IP ネットワークを介して音声、ビデオ及び力覚メディアを転送するとき、ネットワーク遅延揺らぎにより、メディアの時間関係が乱れる恐れがある。そのため、メディアの時間関係をメディアの出力先において修復する制御として、メディア同期制御 [44] がある。メディア同期制御には、メディア内同期制御、メディア間同期制御 [45], [46] 及び端末間同期制御 [47]–[49] の三種類がある。

本論文では、このうちメディア内同期制御を検討対象とする。メディア内同期制御は、一つの出力先において、単一メディアのメディアユニット (メディア同期制御における処理の単位、以下 MU と略す) [50] の出力間隔を維持する制御である。ネットワーク遅延に揺らぎが発生すると、メディア出力先における MU の到着間隔が、メディア発生源における MU の発生間隔と異なり、出力品質が大きく劣化する恐れがある。そこで、メディア内同期制御により MU の出力間隔を発生間隔と等しくする。それにより、出力品質を高く保つことができる。

1.4 本論文の目的と構成

これまで述べてきたように、IP ネットワークでは、QoS の保証がないため、ネットワークスループットやネットワーク遅延が変化する。また、視覚・力覚メディアを用いたアプリケーションにおいては、メディアやアプリケーションによって、要求される QoS が異なる。このため、本論文は、IP ネットワークにおける視覚・力覚メディアを用いたアプリケーションを対象に、QoS 制御としてメディア同期制御、トラヒック制御、及び誤り制御を検討し、高品質なメディア通信を実現することを目的としている。

本論文では、視覚メディアを用いたアプリケーションとして、iSCSI を用いたシンクライアントにおけるビデオ再生を取り上げる。また、力覚メディアを用いたアプリケーションとして、要求される QoS の異なる、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 [24], [51]、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遠隔描画教示 [23], [52]–[54], 及び学習者が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遠隔習字 [55], [56] を扱う．特に, 遠隔描画教示と遠隔習字は, 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と異なり, 位置情報によって重要度に差があることがわかっている [57] ．

本論文は以下の各章から構成される．

第 2 章では, iSCSI を用いたシンクライアントにおけるビデオ再生において, ネットワーク遅延及びパケット欠落がビデオ再生品質に及ぼす影響を調査する．また, 伝送速度, ビデオの平均ビットレート, ファイル読み出しのブロックサイズ, TCP のパラメータである受信ウィンドウサイズ, 受信側の動画再生プログラムのパラメータであるバッファサイズの影響も調べる [58] ．

第 3 章では, iSCSI を用いたシンクライアントにおけるビデオ再生において, トラヒック制御として, 推定したスループットで転送可能な最も高ビットレートのビデオファイルを選択して転送する動的レート制御を提案する．そして, 動的レート制御を用いると, ネットワーク負荷が増加してもビデオの再生が途切れないことを実験により示す [59] ．

第 4 章では, 指導者が遠隔地にいる学習者に力覚を伝えながら文字や図形の描き方を教示する, 力覚を利用した遠隔描画教示と遠隔習字を対象とし, 重要度を考慮した誤り制御方式を提案する．その方式は, 運筆が速い場合の位置情報を含むメディアユニット (メディア同期の処理の単位．以下, MU と略す) を重要な MU とみなし, その MU に対してのみ, 誤り制御を行う．誤り制御には, 各 MU を 2 度送信する Replication, XOR 演算やリードソロモン符号を用いた FEC などを採用する．そして, 主観評価により, 提案方式の有効性を示す．さらに, 主観評価と同時に客観評価を行い, 客観評価結果から主観評価結果が高精度に推定可能であることを示す [60] ．

第 5 章では, 五つの力覚メディア内同期アルゴリズムを扱う．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 [24], [51] と, 遠隔描画教示 [23] 及び遠隔習字 [55], [56] 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 [61] ．

第 6 章では, 本論文で得られた結論及び今後の課題・展望を述べる．

第 2 章

ネットワーク遅延及びパケット欠落が iSCSI を用いたビデオ再生品質に及ぼす影響

2.1 まえがき

第 1 章で述べたように，シンククライアントは，クライアントにハードディスクを持たずサーバでデータを集中管理する構成を取るため，情報漏洩防止に有効である．シンククライアントは，クライアントで画面情報を受け取りキーボードやマウスの情報をサーバに送るサーバベースドコンピューティング (SBC) と，サーバにディスクを配置しアプリケーションはクライアントで実行するストレージセントリックコンピューティング (SCC) の二つに分類される [62]．2 方式の最も大きな違いは，ユーザが利用するアプリケーションの CPU 処理を，SBC はサーバで行い，SCC はクライアントで行う点にある．そのため，CPU 処理が多いビデオ再生や CAD などのソフトウェアを利用する環境では，SBC よりも SCC が用いられており，これらのソフトウェアが SCC で利用できることは重要である．SCC においてクライアントがサーバにアクセスするためのプロトコルとしては，RFC3720 [42] として標準化されている iSCSI が広く用いられており [63]–[65]，このとき，サーバには iSCSI ディスクが用いられる．iSCSI は，計算機や周辺機器の相互通信に用いられる SCSI (Small Computer System Interface) コマンドを TCP/IP 上で送受信するためのプロトコルである．そのため，本章と第 3 章では，iSCSI システムにおけるビデオ再生を検討対象とする．

ネットワーク環境においては，ビデオの実時間性を高く保つ必要があることから，ネッ

ネットワークの伝送速度、遅延やパケット欠落のみではなく、遅延の揺らぎも、ビデオ再生品質を左右する要因となる。よって、iSCSI システムにおけるビデオ再生を検討する際には、これらのパラメータがビデオ再生品質にどのような影響を与えるのか調べる必要がある。

はじめに、本研究と従来の iSCSI に関する研究 [66], [67] との違いとして、大量のデータに対してアクセスを行うサーバと画面を見ながら GUI を操作する通常のパソコン (PC) としての利用形態の違いと、転送されるデータのの違いに着目する。iSCSI の起源となっているプロトコルである Fibre Channel は、主にサーバ用途で用いられている。そのため、Fibre Channel の主用途であるサーバに対して iSCSI を適用した場合について多くの研究が行われている [66], [67]。しかし、SCC などのディスクレス PC で用いた場合の研究は、ほとんど行われていない。一方、iSCSI プロトコルによるスループットの評価及び他のプロトコルとの性能比較 [68] は行われている。さらに、輻輳ウィンドウの制御手法 [69] についてのデータ転送速度の評価も行われている。しかし、本章で検討対象としているビデオ再生の品質評価は行われていない。また、本章では、輻輳ウィンドウではなく、カーネルを改良する必要のない受信ウィンドウサイズ (RWIN) がビデオ再生品質に及ぼす影響も調べる。RWIN は、Windows においてはレジストリ変更で制御が可能であるため、変更が容易である。

次に、転送されるデータのの違いについて述べる。iSCSI は Fibre Channel ストレージデータの広域バックアップ用途で利用されることが多い。そのため、これまでの研究では、ビデオ再生が扱われていない。ビデオ再生では、コンピュータデータよりも高い実時間性が必要である。これまで、ネットワークの実時間性に影響を与える伝送速度、遅延、遅延の揺らぎ、パケット欠落などがビデオ再生品質に与える影響については、多くの研究が行われている [70]。しかし、これらは、iSCSI を利用したものではない。

本章では、iSCSI システムにおいて、ネットワーク遅延及びパケット欠落がビデオ再生品質に及ぼす影響を調査する。また、伝送速度、ビデオの平均ビットレート、ファイル読み出しのブロックサイズ、TCP のパラメータである受信ウィンドウサイズ (RWIN)、受信側の動画再生プログラムのパラメータであるバッファサイズの影響も調べる。

以下、2.2 節では iSCSI の概要を示し、2.3 節で iSCSI におけるビデオ再生の特徴を述べる。2.4 節で実験方法と実験システムの構成等を示し、2.5 節で実験結果について考察する。

2.2 iSCSI の概要

iSCSI プロトコルは、ブロック転送型のディスクアクセスプロトコルである SCSI を TCP/IP で転送するためのプロトコルである。Fibre Channel は、信頼性が極めて高いた

め、高度の耐障害性が要求される金融などの重要な情報を扱う場面で用いられている。また、専用のインタフェースボードは、通常のイーサネットボードに比べて高価である。さらに、プロトコルが独自であるため、TCP/IP と比べてネットワークコストが高い。そこで、Fibre Channel で長距離転送を行うために、TCP/IP 上でディスク情報の転送ができる iSCSI が考え出された。特に 2001 年 9 月 11 日の米国でのテロ以降、信頼性を求められる環境において、長距離でのバックアップに対する需要が高まっており、iSCSI の利用が増えている。

ディスクアクセスプロトコルには、大きく分けてセクタ指定型とファイル指定型の二つがある。前述のように、セクタ指定型には iSCSI などがあり、ディスク内の場所を指定してアクセスするものである。ファイル指定型には NFS、CIFS(Common Internet File System) [71], [72] などがあり、ファイル名を指定してアクセスするものである。セクタ指定型は、ファイル指定型に比べて、サーバ側でファイルシステムの解釈を行う必要がないため、サーバの負荷が軽く、より多くのクライアントからの要求を処理することができる。しかし、ファイルシステムを解釈しないため、データアクセスの排他処理が困難である。そのため、同一のディスク領域にアクセスするクライアントが複数存在する場合には、同時アクセスが発生し、領域を破壊してしまう可能性がある。そこで、基本的には、一つのディスク領域に 1 クライアントしか接続できないようにして利用する。

iSCSI のサーバへの適用においては、サーバの負荷が軽いことからアクセス頻度が高い用途での利用が適している。また、複数のクライアントから同じ領域に同時アクセスされることもない。さらに、PC への適用では、サーバの負荷が軽いことにより多数の PC を収容できることから、費用対効果の点から有効である。同時アクセスについては、同じディスク領域を複数の PC で共有できないため、読み出しはディスクから行うが、書き込みは別のディスクやメモリに行うなどの共有する方法の検討が必要となる。

2.3 iSCSI におけるビデオ再生

ビデオには、入力後に蓄積せずに、転送しながら再生するライブビデオと、ディスク等にデータを蓄積しておき、それを後で再生する蓄積ビデオがある。本章では、iSCSI はディスクへのアクセスプロトコルであるため、蓄積ビデオを対象とする。また、ネットワーク状況に応じてビデオ再生品質を高く維持する制御を行う方式として、受信側が回線のスループット、ネットワーク遅延やその揺らぎなどを送信側に通知し、送信側が送信データを選択する送信側主導の方式と、受信側が回線のスループット、ネットワーク遅延やその揺らぎになどについて判断し、読み出すデータを選択する受信側主導の方式がある。iSCSI にお

表 2.1 ビデオの仕様

項目	サンプルビデオ 1	サンプルビデオ 2
表示サイズ [ピクセル]	1008 × 704	
平均ビットレート [Mbps]	6.4	3.2
平均 MU 入力レート [MU/s]	24	
記録時間 [秒]	91	

いては、送信側はストレージであり、そのデータがコンピュータデータであるかビデオであるか識別することができないため、本章では、受信側主導の方式を扱うことになる。

2.4 実験環境

本節では、ネットワーク遅延及びパケット欠落等がビデオ再生品質に及ぼす影響を調査するための実験方法やシステム等を示す。

2.4.1 実験方法

実験では、イニシエータ端末（以降、クライアントと呼ぶ）のビデオ再生アプリケーションから、ターゲット端末（以降、サーバ）に蓄積されているビデオデータを要求し、ビデオの再生を行う。このとき使用するビデオの仕様を表 1 に示す。ビデオは、MPEG-1 で符号化が行われ、その GOP(Group of Pictures) 構造は、IBBPBBPBBPBBPBBP [73] である。なお、本実験では、簡単のため、サウンドや音声を扱わない。また、平均ビットレートの異なる 2 種類のビデオ（サンプルビデオ 1, 2）を使用する。低ビットレートのビデオ（サンプルビデオ 2）は、高ビットレートのビデオ（サンプルビデオ 1）の SNR 解像度を变化させて作成されたものである。本実験では、TCP の受信ウィンドウサイズやバッファサイズを変更するため、独自に作成したビデオ再生プログラムを用いる（ビデオ再生プログラム実装の詳細は、次節参照）。また、ビデオ再生プログラムの性能が市中のものと比べて大きく異なることを確認するために、一部の項目について Windows Media Player [74] を用いた実験も行う。

2.4.2 ビデオ再生プログラムの実装

本実験で使用するビデオ再生プログラムは、クライアント側にてサンプルビデオ 1 において、再生時間にして約 1 秒分の MPEG ビデオデータ分のバッファ (800kByte) を確保し、そのサイズ分の読み出し要求をサーバに行い、一時的にビデオデータを蓄える。蓄えられたビデオデータの MPEG ヘッダ情報を解析して、デコード処理を行い、ビデオの再生を開始する。バッファが初めて一杯になったときに再生を開始し、以降一定間隔でビデオ画像を出力するように制御する。その後、バッファに蓄積されたビデオデータがバッファサイズの 3 分の 1 以下になるとき、サーバに対してビデオデータの読み出し要求を行う。また、出力が間に合わなかった場合と、MPEG ビデオでは、P ピクチャ [73] の場合には直前の I ピクチャ [73] がスキップされた場合、また、B ピクチャ [73] の場合には直前の P ピクチャがスキップされた場合に、その MU はスキップされる。そのため、一つの MU の欠落またはスキップが、その後の複数の MU の再生に影響するため、MU 欠落後のビデオの再生品質が低下する。

TCP/IP においては、相手にデータが到達したことを確認した後に到達したデータについて送信ウィンドウから削除するため、スループット (単位時間あたりに送信されるデータのビット数の平均) は、ウィンドウサイズをネットワーク遅延で割ったものよりも大きくなならない。そのため、ネットワーク遅延が大きくなると、ビデオ転送に必要なスループットが確保できなくなり、ビデオデータの転送が遅れ、本来再生すべきタイミングで再生できないメディアユニット (MU と略す。ここではビデオピクチャのこと) はスキップされる。

2.4.3 実験システム

図 2.1 の実験システムに示すように、iSCSI イニシエータ端末 (クライアント) と iSCSI ターゲット端末 (サーバ) は、ネットワークエミュレータ NIST Net [75] を介して接続される。NIST Net は、サーバとクライアント間で両方向に送信されるパケットに対して、一定の遅延を付加するために用いられる。また、パケット欠落の影響を調査するときには、サーバとクライアント間で送信されるパケットに対して、パケットの欠落をランダムに発生させる。iSCSI イニシエータの実装では、Windows 端末 (クライアント) に、Microsoft iSCSI Software Initiator Version 2.02 [76] を用いる。iSCSI ターゲットの実装には、Linux 端末 (サーバ) に、iSCSI Enterprise Target 0.4.13 [77] を使用する。各実験

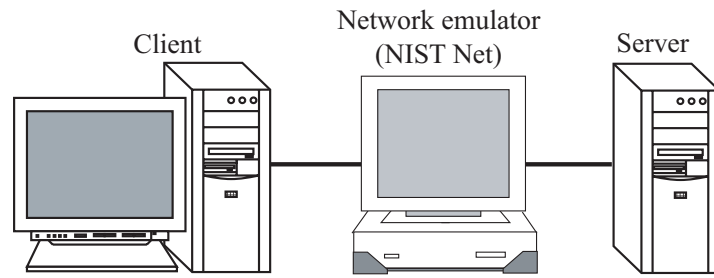


図 2.1 実験システム

表 2.2 実験機器

CPU	イニシエータ, ターゲット: PentiumD 2.80GHz NIST Net: Celeron 1.80GHz
RAM	イニシエータ, ターゲット: 0.99GBytes NIST Net: 256MBytes
OS	イニシエータ, NetBIOS: WindowsXP ターゲット, Samba 3.0.14: Linux FC4(kernel-2.6.14) NIST Net: Vine Linux3.2
Network	イニシエータ, ターゲット: Gigabit NIC × 1 Broadcom NetXtreme 57xxGigabit Controller NIST Net: Gigabit NIC × 2

機器と実験環境をそれぞれ表 2.2, 表 2.3 に示す.

本章では, 比較対象として, ネットワークストレージシステムの一つであるファイル共有を用いた実験も行う. そのため, ファイル共有システムの構築には, 図 2.1 の実験システムにおいて, クライアントの Windows 端末で NetBIOS [71] を有効にし, サーバの Linux 端末には Samba 3.0.14a [78] を用いる. ファイル共有システムでは, CIFS プロトコルを使用し, ネットワークを介したビデオデータの読み出しを行う.

2.4.4 評価尺度

本章では, 評価尺度として, 平均 MU レート [70] を採用する. 平均 MU レートは, クライアントで単位時間 (秒) 当たり出力される MU 数の平均のことである. 本実験におけるビデオファイルの平均 MU 入力レートは, 一秒当たり 24MU である (表 2.1). 従って,

表 2.3 実験環境

設定パラメータ	設定値
iSCSI MaxRecvDataSegmentLength [Byte]	824400
iSCSI MaxTransferLength [Byte]	65536
TCP 受信ウィンドウサイズ (RWIN) [kByte]	128
CIFS 読み出しサイズ [Byte]	65535

ネットワーク機器のバッファあふれなどによるパケット欠落により, MU が欠落すると, ビデオの再生品質は劣化し, 平均 MU レートは 24MU/s より小さくなる.

2.5 実験結果と考察

本章では, ネットワーク遅延及びパケット欠落がクライアントにおけるビデオの再生品質に及ぼす影響について, 実験結果を示し, 考察する.

2.5.1 ネットワーク遅延の影響

ここでは, まずサーバとクライアント間のいくつかの伝送速度に対して, 付加遅延を変化させる. 次に, 平均ビットレートが異なる二つのビデオを用いて, 平均 MU レートの違いの影響を調べる. また, 受信バッファサイズや受信ウィンドウサイズを変化させて, ビデオ再生品質を評価する. なお, パケット欠落は発生させない.

(1) 伝送速度

サーバとクライアント間の伝送速度を 1Gbps, 100Mbps, 10Mbps と変化させたときの, 付加遅延に対する平均 MU レートをそれぞれ図 2.2, 図 2.3, 図 2.4 に示す. 本実験のビデオとして表 2.1 のサンプルビデオ 1 を用いており, 平均ビットレートは 6.4Mbps である.

図 2.2, 図 2.3 において, ビデオ再生時の平均 MU レートは, 付加遅延が約 16ms まで劣化しておらず, それ以上では, iSCSI とビデオ再生プログラムの組み合わせに限って, 1Gbps で約 32ms まで, 100Mbps では約 24ms まで劣化していない. また, 図 2.4 では, 付加遅延が 4ms 程度以下のとき, 平均 MU レートは劣化しておらず, ビデオ再生プログラム (iSCSI) の平均 MU レートは約 8ms まで劣化していない. これは, クライアント側の OS 処理の違いのため, サーバに対して一度に要求するビデオデータの読み出しサイズがビデオ再生プログラム (iSCSI) の方がその他よりも大きいためである. なお, Windows

Media Player の読み出しサイズは、アプリケーションにより決定されているため、そのサイズを変更することが困難である。このとき、サーバ・クライアント間に転送されるパケットをモニタしたところ、Windows Media Player では、32kByte 毎の読み出し要求であったのに対し、ビデオ再生プログラムでは、64kByte 毎の読み出し要求を行っていた。従って、iSCSI 上で要求するブロックサイズが大きいと、付加遅延による影響を受けにくくなる。一方、CIFS プロトコルを用いた実験システムでは、Windows Media Player 及びビデオ再生プログラムの両方とも、32kByte 毎に読み出し要求を行っていた。このため、iSCSI、CIFS の両実験システムで、同じサイズ分の読み出し要求を行う Windows Media Player は、iSCSI か CIFS かに関わらず、同程度にビデオの再生品質が劣化していることから、iSCSI と CIFS とでは、ビデオの再生に関して、同程度の性能を持つことがわかる。

また、図 2.2、図 2.3 において約 20ms、図 2.4 において約 8ms を越えると、急激に平均 MU レートが低下している。この理由は次の通りである。TCP の実装から、クライアントが要求したデータをサーバから受け取るまで、次の読み出し要求を行うことができないため、付加遅延が増加すると、データの転送速度が低下する。そのため、ビデオの平均ビットレート以下の転送速度しか得られない高遅延時には、多くの MU のスキップが発生するため、平均 MU レートが低下している。

さらに、図 2.2 の実験結果は、図 2.3 のそれとほとんど同じである。これは、ビデオ伝送に必要な帯域に対して、実験システムの伝送速度が十分に使い切れていないためである。一方、図 2.4 では、図 2.2、図 2.3 と比較して、小さな付加遅延で、平均 MU レートが劣化している。これは、ビデオの平均ビットレートに対して転送速度が十分に大きくない場合には、転送速度が十分に大きい場合に比べて、付加遅延の影響を受けやすいためである。

以上より、ビデオの平均ビットレートに対して転送速度が十分に大きい場合には、クライアントからの読み出し要求サイズを大きくすると、一度の読み出し要求で、多くのビデオデータを得ることができ、ネットワーク遅延に対して、再生の品質劣化を小さく抑えることができる。また、ビデオの平均ビットレートに対して転送速度が十分大きくない場合には、ネットワーク上のボトルネックとなる部分で、サーバから送信される各パケットに大きな遅延が生じるため、ビデオの再生品質を高く保つことが困難になる。

(2) ビデオの平均ビットレート

表 2.1 のサンプルビデオ 1, 2 をビデオ再生プログラムで再生したときの、付加遅延に対する平均 MU レートを図 2.5 に示す。ただし、サーバ・クライアント間の伝送速度を 1Gbps とし、ビデオ再生プログラムのバッファサイズを 800kByte としている。

図 2.5 より、ビデオの平均ビットレートが小さいと、付加遅延に対する耐性は高くなることがわかる。また、実験では、ビデオの平均ビットレートが 1/2 になると、平均 MU レー

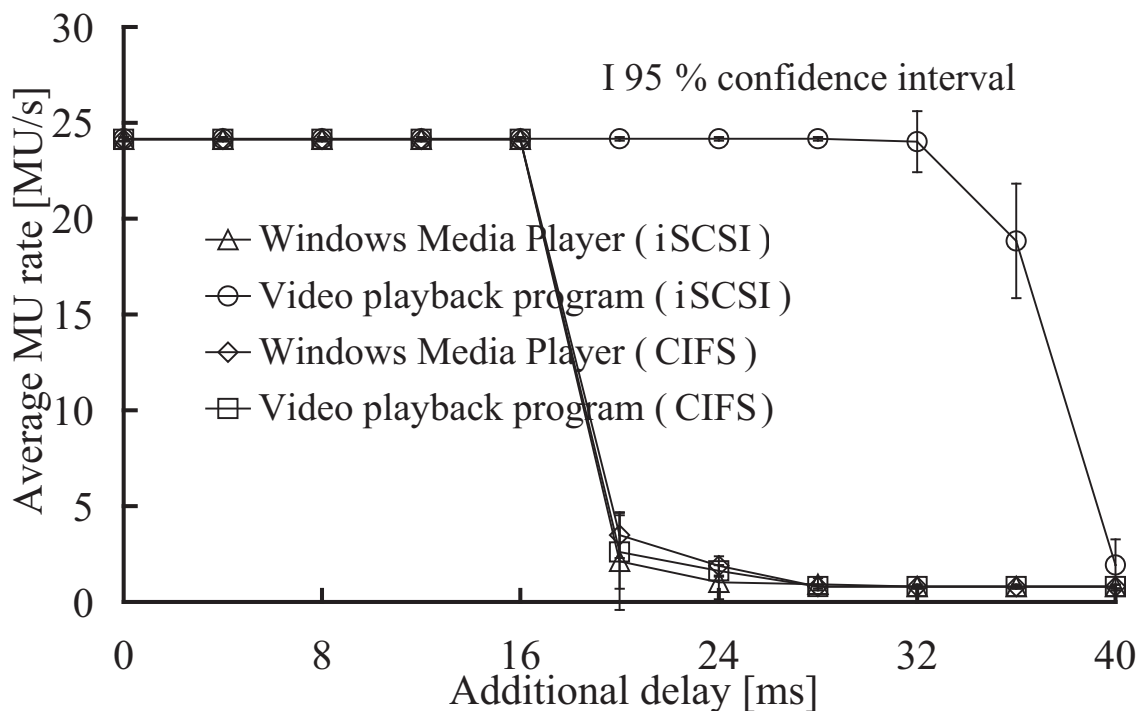


図 2.2 付加遅延に対する平均 MU レート (伝送速度: 1Gbps)

トが大きく低下する付加遅延が約 40ms から 80ms と、2 倍程度変化している。これは、一度の読み出しで読み出される 64kBytes の中に、サンプルビデオ 2 の場合、サンプルビデオ 1 の場合より約 2 倍の数の MU が含まれているためである。

以上の結果から、平均ビットレートを調整することにより (例えば、ネットワーク負荷に応じて、平均ビットレートが異なる、複数の同じビデオファイルを動的に切替えて、ビデオの再生を行うことによって) ビデオ再生品質を高く維持できる可能性がある。この実装と評価は第 3 章で述べられる。

(3) バッファサイズ

ビデオ再生プログラム (iSCSI) のバッファサイズを 200kByte, 400kByte, 800kByte, 1600kByte として、付加遅延に対する平均 MU レートを図 2.6 に示す。なお、ビデオにはサンプルビデオ 1 を利用し、伝送速度は 1Gbps である。

図 2.6 において、付加遅延が約 28ms から 36ms のとき、バッファサイズが大きいほど、平均 MU レートが高いことがわかる。この理由は、バッファサイズが大きいほど、大きなネットワーク遅延の揺らぎを吸収できるためである。しかし、付加遅延が 40ms になると、バッファサイズに依らず、平均 MU レートが大きく低下している。

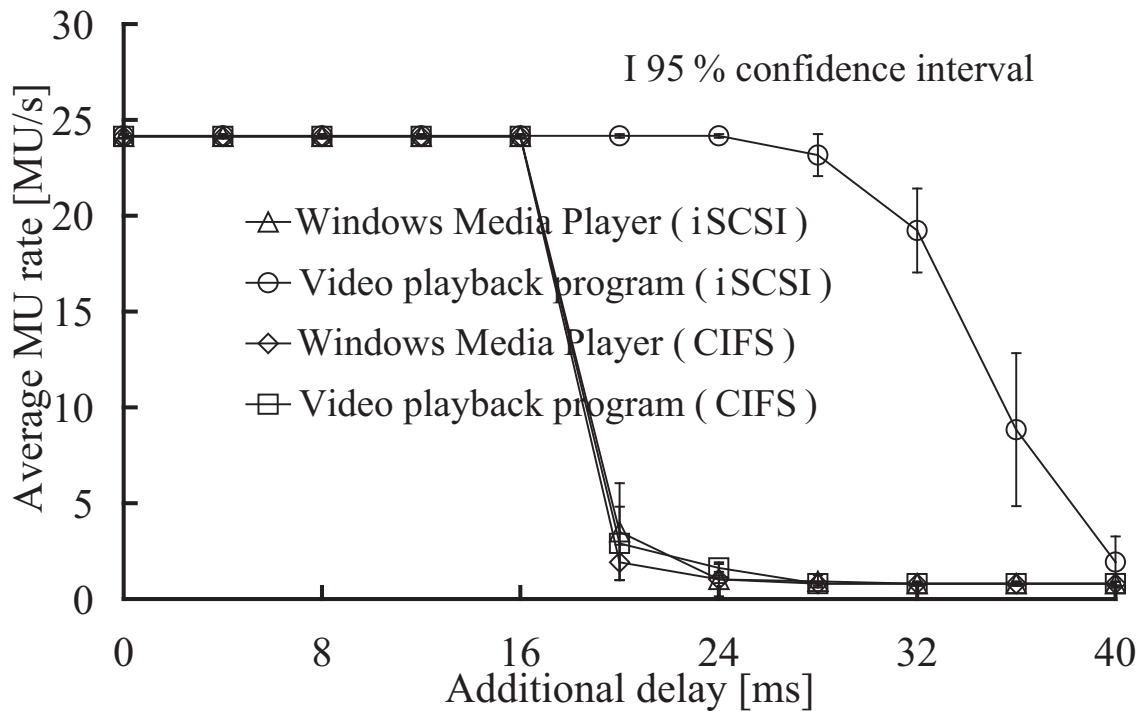


図 2.3 付加遅延に対する平均 MU レート (伝送速度: 100Mbps)

この他、ビデオの最初の MU をバッファリングしてから再生し始めるまでの時間を変更する実験を行った。その結果、バッファサイズが大きいほど、再生開始後数秒間のビデオ再生品質が高いことを確認した。しかし、付加遅延が 40ms を越えると、バッファサイズに関わらず、再生開始から数秒後には、平均 MU レートが大きく低下した。

(4) 受信ウィンドウサイズ

ビデオ再生プログラム (iSCSI) において、クライアント側の受信ウィンドウサイズ (RWIN) を 32kByte, 64kByte, 96kByte, 128kByte と変化させたときの、付加遅延に対する平均 MU レートを図 2.7 に示す。なお、ビデオにはサンプルビデオ 1 を利用し、伝送速度は 1Gbps である。

図 2.7 より、クライアントが要求するブロックサイズ (64kByte) より受信ウィンドウサイズが小さいときには、受信ウィンドウサイズが大きい場合と比べて、より小さな付加遅延で平均 MU レートが低下していることがわかる。これは、受信ウィンドウサイズが小さいために、クライアントが読み出し要求を行ったサイズ分のビデオデータを一度に受信できないからである。サーバは、クライアントが受信した分のパケットの確認応答の到着を待って、残りのデータを送信する必要があるため、受信ウィンドウサイズが小さい場合に

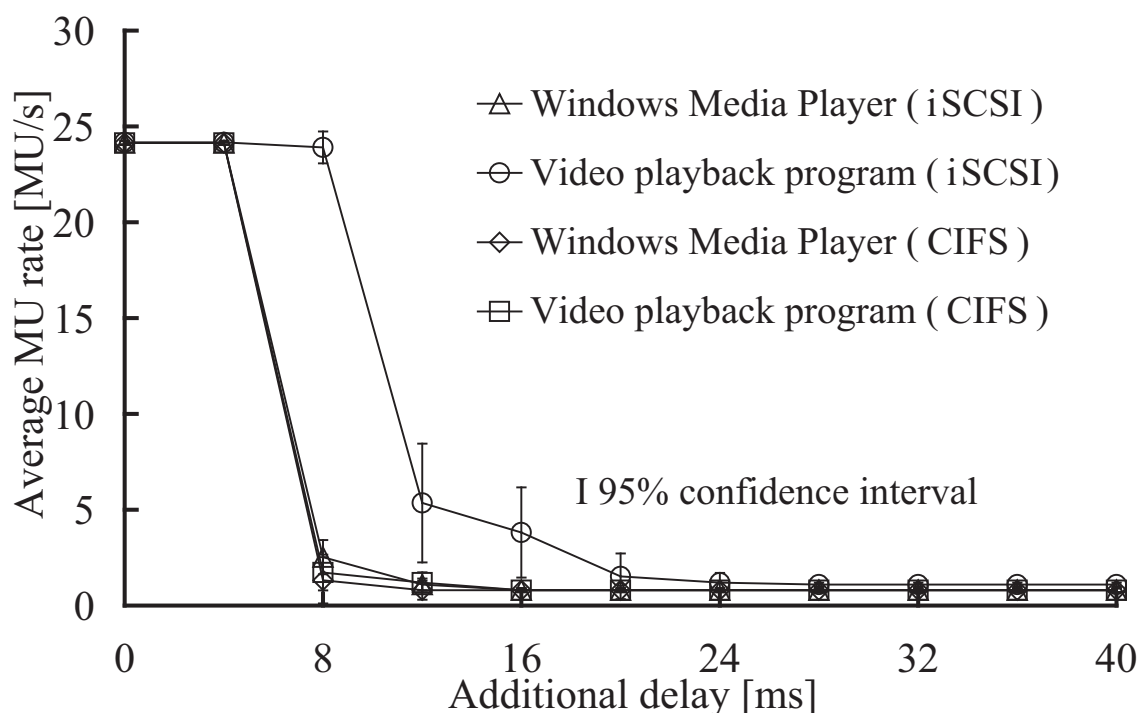


図 2.4 付加遅延に対する平均 MU レート (伝送速度: 10Mbps)

は付加遅延による影響を受けやすくなり、低付加遅延時からビデオ再生品質の劣化が生じる。受信ウィンドウサイズが 64kByte のときも、付加遅延に対する耐性は 32kByte の場合よりも高いものの、iSCSI のレスポンスヘッダがあることからデータが 64kByte よりも少し大きくなってしまい、二つのパケットに分割されるため、小さい付加遅延で平均 MU レートが低下している。

一方、図 2.7 において、受信ウィンドウサイズが 96kByte, 128kByte のとき、受信ウィンドウサイズが 64kBytes より小さい場合と比べて、付加遅延に対する影響が小さいことがわかる。これは、読み出しブロックのみでなく、iSCSI のレスポンスデータも一度に受信可能なためである。ただし、受信ウィンドウサイズが 96kByte と 128kByte に差がほとんど無いのは、読み出すブロックサイズが 64kByte 以下であるためである。

2.5.2 パケット欠落の影響

パケット欠落率に対する平均 MU レートを図 2.8 に示す。ただし、サーバ・クライアント間の伝送速度を 1Gbps とし、ビデオ再生プログラムのバッファサイズを 800kByte と

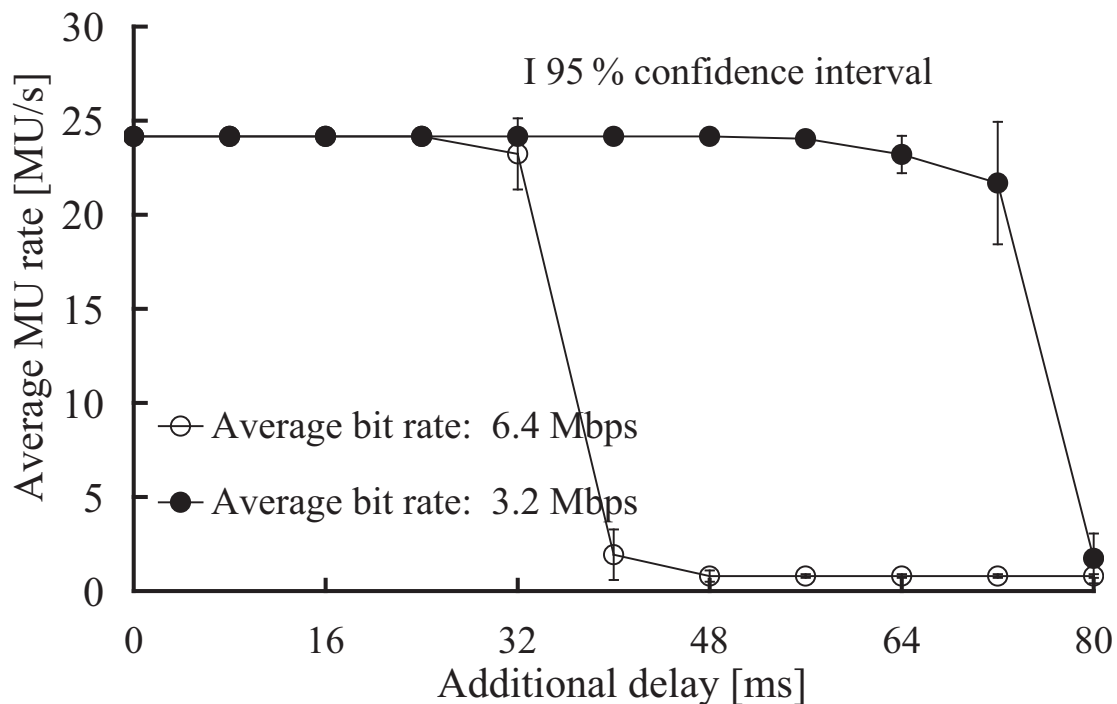


図 2.5 MPEG ビデオの平均ビットレートの影響

する。また、NIST Net の付加遅延を 0ms としている。ビデオにはサンプルビデオ 1 を用いている。

図 2.8 より、約 0.5% 未満のパケット欠落率であれば、平均 MU レートがほとんど低下していないことがわかる。また、パケット欠落率がそれ以上るとき、ビデオ再生プログラム (iSCSI) の平均 MU レートが最も高くなっている。これは、ビデオ再生プログラム (iSCSI) の読み出しブロックサイズ (64kByte) が他のもの (32kByte) と比べて大きいためである。すなわち、iSCSI、CIFS の両実験システムでは、パケットの欠落に対して、TCP の再送において、再送タイムアウトと高速再送制御 [79] のタイムアウトの 2 種類のタイムアウトの影響を受ける。高速再送制御では、重複 ACK によって、直ちに再送が行われるために、再送するデータの到着が著しく遅れることがない。再送タイムアウトによるデータ再送では、タイムアウトの時間が長いため、一回の読み出し要求に対して測定したところ、200ms 以上の遅れが生じていた。このため、パケット欠落が起きた場合、高速再送制御が行われるとビデオ再生品質の劣化は小さいが、再送タイムアウトによるデータ再送時はビデオ再生品質の劣化が大きい。実験では、再送タイムアウトは、転送パケットの最後とその直前のパケットのどちらかが欠落することで生じる。高速再送制御は、それ以外のパケッ

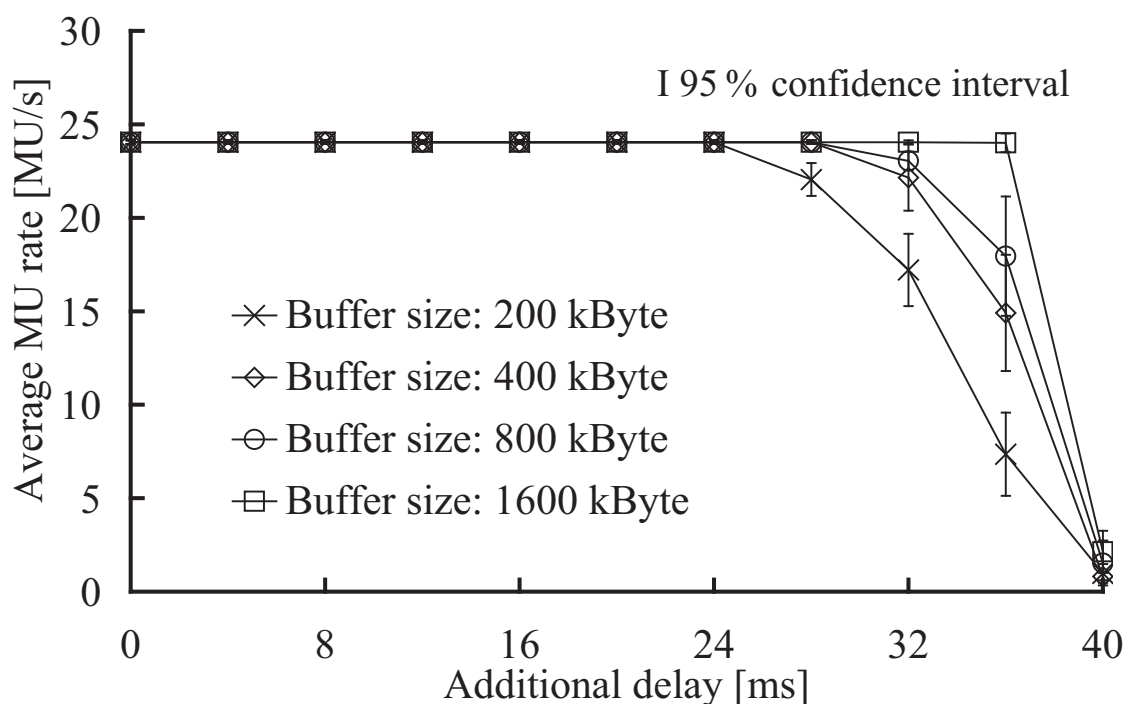


図 2.6 バッファサイズの影響

トの欠落が生じると行われる。このため、同じパケット欠落率で比較する場合、ビデオ再生プログラムの要求するブロックサイズが大きいほど、再送する多くのデータが高速再送制御を用いて再送が行われる可能性が高いため、ブロックサイズの大きい iSCSI での転送において、図 2.8 のように、ビデオの再生品質が高く維持されたのである。

2.6 むすび

本章では、iSCSI を用いたビデオ再生を扱い、ネットワーク遅延及びパケット欠落がビデオ再生品質に及ぼす影響を調べた。その結果、付加遅延の影響などにより、ビデオの平均ビットレート以上の転送速度が得られない場合には、ビデオ再生品質が大きく低下することがわかった。付加遅延によりビデオ再生品質が悪化した状態では、受信ウィンドウサイズを読み出しブロックサイズよりも大きくすることにより、付加遅延の影響を受けにくくなることを確認した。また、パケット欠落率が約 1.0% を超えると、ビデオ再生品質が大きく悪化した。パケット欠落によりビデオ再生品質が悪化した場合において、読み出しブロックサイズが大きくなることにより、ビデオ再生品質の悪化を小さくできることが明ら

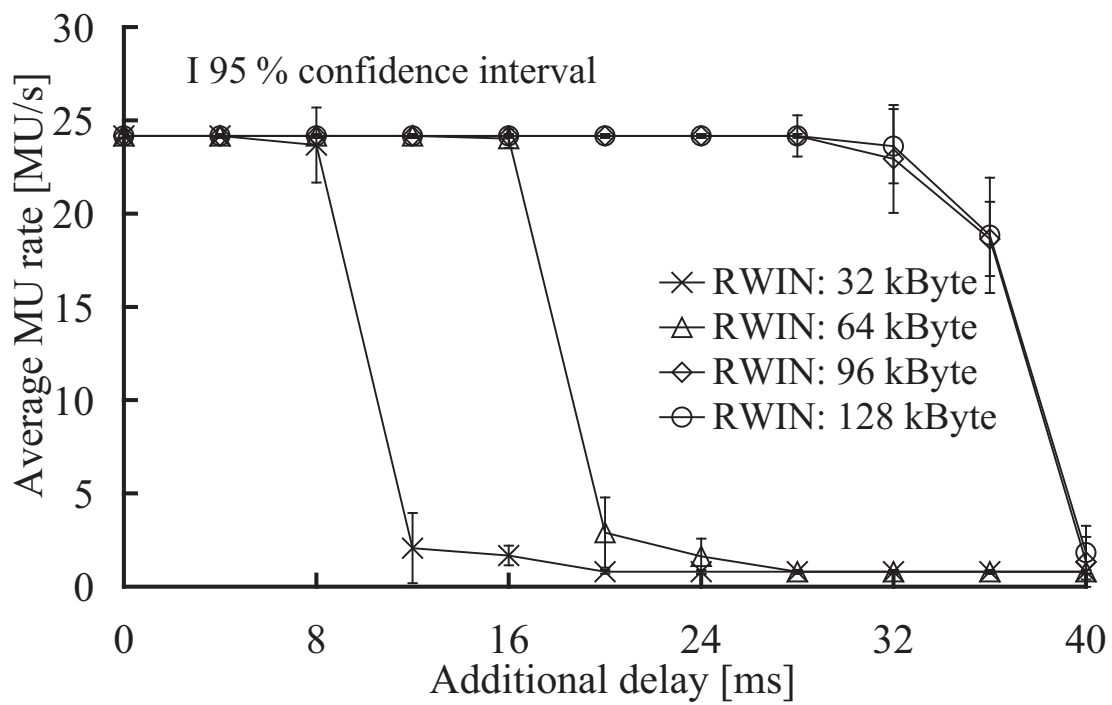


図 2.7 受信ウィンドウサイズの影響

かとなった。さらに、ビデオの平均ビットレートを調整することにより、ビデオ再生品質を高く維持できる可能性があることがわかった。

今後の課題として、多様な iSCSI 実験環境にて、ビデオ再生に関する問題点を明らかにすることが挙げられる。

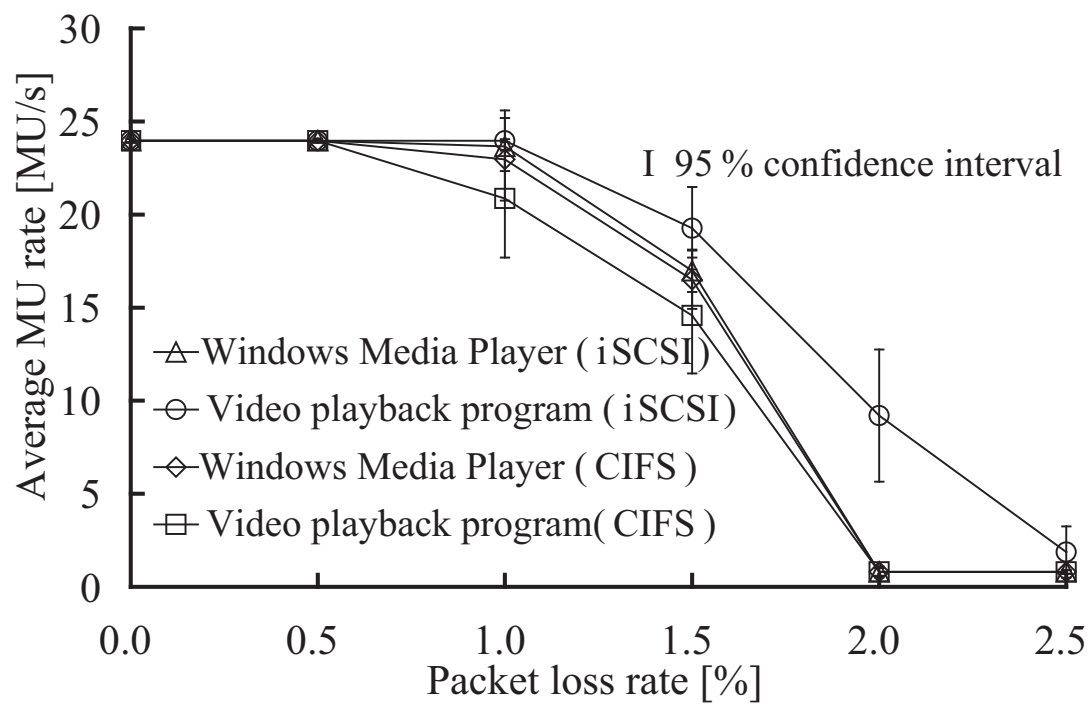


図 2.8 パケット欠落率に対する平均 MU レート

第 3 章

iSCSI を用いたビデオ再生のための動的レート制御

3.1 まえがき

第 2 章より，iSCSI を用いた SCC において，直接接続されたローカルディスクを用いる場合と異なり，付加遅延の影響などにより，ビデオの平均ビットレート以上の転送速度が得られない場合には，ビデオ再生品質が大きく低下することが分かった．これは，iSCSI ディスクはネットワークを介して接続されているため，ローカルディスクよりもディスクアクセスの速度（以下，データ転送速度と呼ぶ）が遅いためである．データ転送速度の低下は，クライアントと iSCSI ディスク間のネットワークの遅延が大きい場合 [80] や低速である場合 [81] においてネットワークが他のデータ転送量の多いトラフィックを転送するためにも用いられているときと，クライアントからのディスク処理要求が一時的に増大したときに発生する．本章では，これらのうち，前者のときに発生するデータ転送速度の低下が引き起こす課題を解決する方法を検討する．この問題を解決する方法として拠点間の回線を高速にすることが考えられるが，設備の更改などが必要であるため容易に行えない．また，ルータや OS がデータを圧縮 [82]–[84] する方法も考えられるが，すでに圧縮されたデータには効果がなく，圧縮処理により遅延が増大するという問題がある．そのため，アプリケーションごとにデータ転送速度が遅いときの対応方法を検討する必要があるといえる．

SCC で用いられるアプリケーションのうち，特にビデオ再生はデータ転送速度低下の影響を受けやすい．理由は，単位時間あたりに読み出すデータ量が他のアプリケーションに比べて多いことと，途切れのないビデオ再生のためには，そのデータ取得に実時間性を

必要とするためである．筆者らは第 2 章で，iSCSI ディスクに蓄積されたビデオを再生するとき，ネットワーク遅延やパケット欠落などがビデオ再生品質に与える影響を調査している．そして，データ転送速度が低下するときにビデオの途切れが発生することを確認している．

途切れなくビデオを再生する方法として，ストリーム配信サーバを用いることが考えられる．しかし，この方法を用いるためには，新たなサーバの設置が必要であり，SCC が目指す運用管理負荷の軽減と相いれないため，SCC ではほとんど用いられない．また，iSCSI ディスクは要求されたファイルの送信のみを行うため，ストリーム配信サーバにおけるビデオの途切れを防ぐ機能を iSCSI ディスクに追加することはできない．そのため，ビデオの途切れを防ぐ技術をクライアントに適用する方法を検討する必要がある．

そこで，本章では，SCC におけるビデオ再生において，データ転送速度が低下したときに発生するビデオの途切れを解決する方法を示す．そして，iSCSI を用いたビデオ再生実験によりその有効性を検証する．

以下，3.2 節では途切れなくビデオ再生を行うための制御である動的レート制御の特徴を述べ，動的レート制御をクライアントに適用するときの課題を明らかにする．3.3 節においてその課題を解決する手法を提案する．3.4 節では実験環境を説明し，3.5 節において実験結果について考察する．

3.2 動的レート制御

ストリーム配信システムにおいて，データ転送速度が低いときにビデオが途切れない範囲でより高品質なビデオ再生を行う方式として，動的レート制御が広く提案されている [15]–[19]．この制御は，同一内容でビットレートが異なるビデオファイルをストリーム配信サーバに配置した上で，スループットに応じてサーバが送信するビデオのビットレートを切り替えるために，サーバが送信するビデオファイルを変更することで実現している．

iSCSI を用いたビデオ再生では，運用管理負荷を低減するために，ビデオは iSCSI ディスクのみに配置される．しかし iSCSI ディスクは，ストリーム配信サーバと異なり，クライアントが要求したビデオファイルの送信しか行えないため，動的レート制御をサーバで行うことができない．そのためクライアントでそれを行う必要がある．

動的レート制御では，ビデオを再生している途中でビデオファイルを切替える必要がある．いつ切替が発生するか予測することは困難であることから，クライアントがビデオファイルを途切れなく切替えるためには，再生前に切替前ビデオファイルの読み出し位置

に対応する切替後ビデオファイルの読み出し位置を知っている必要がある。また、ビデオファイルの読み出し位置の情報は、そのビデオファイルを読み出さないとわからないため、切替後ビデオファイルの読み出し位置を知るためには、すべてのビットレートのビデオファイルを読み出す必要がある。ところが、ビデオファイルは情報量が多いため、すべてのビットレートのビデオファイルを読み出すには時間がかかり、再生開始が遅くなるという問題がある。しかし、変更先候補であるビデオファイルに関する情報を少ないディスク読み出しで取得する方法は検討されていない。変更先候補であるビデオファイルとは、ビットレート変更後に選択されうるビットレートの異なる同一内容のビデオファイルを指す。

そこで本章では、iSCSI を用いたビデオ再生に動的レート制御をビデオ再生品質の低下なしに適用するために、サーバから取得する変更先候補であるビデオファイルに関する情報を少ないディスク読み出しで取得する方法を新たに提案する。

3.3 iSCSI における動的レート制御

動的レート制御でビデオファイルを切り替えるために用いる各ビデオファイルの情報は、ビデオファイルの平均ビットレート及び先頭バイトからの読み出し位置の情報（先頭バイトからのバイト数）である。ビデオファイルのビットレートは、再生するビデオを変更する際の判断材料として用いられる。また、ビデオファイルの先頭バイトからの読み出し位置の情報は、ビデオファイル変更時に、再生中ビデオファイルの読み出し位置と同じ時間的位置となる変更先ビデオファイルの読み出し位置を知るために必要である。これにより、ビデオファイルの変更前後で連続的なビデオ再生が可能となる。

本章では、クライアントが取得する情報の量をできるだけ増やさずに動的レート制御を行うために、ビデオファイルに代わり、サーバに事前に配置された、動的レート制御に必要な情報のみを格納したビデオファイルから作成されたファイル（以下、制御ファイルと呼ぶ）をクライアントが読み込む方式を新たに提案する。

なお、本章では説明の簡単のため、情報量の多い高ビットレートなビデオと、情報量の少ない低ビットレートなビデオの 2 種類のビデオファイルを用いる方式で説明するが、3 種類以上のビットレートのビデオを使用する場合においても本方式は適用可能である。なお、3 種類以上のときの有効性を示すことは今後の課題である。

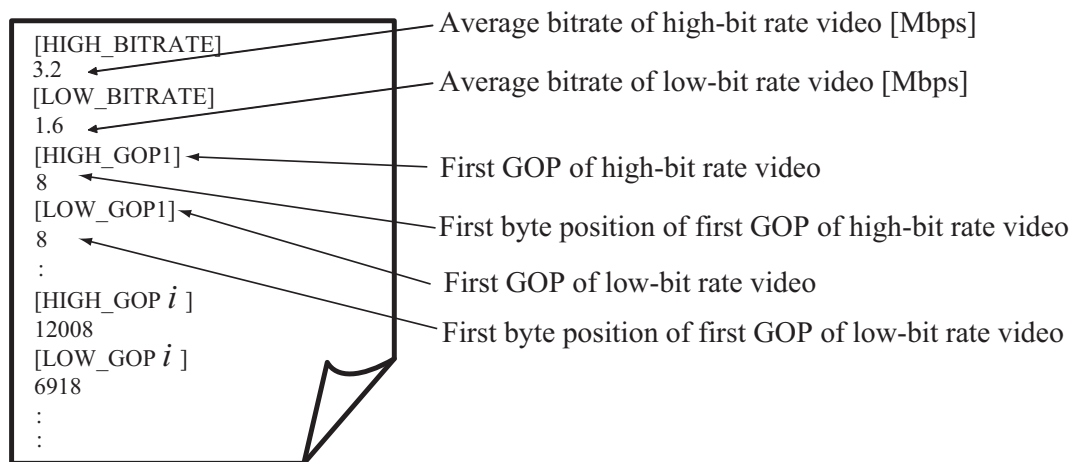


図 3.1 制御ファイルの情報

3.3.1 制御ファイルを用いる方式

制御ファイルの構造を図 3.1 に示す．図中の GOP は，Group of Pictures [73] の略である．制御ファイルには，最初にビデオのビットレートを変更する際の判断材料の一つである，各ビデオファイルの平均ビットレートの情報が記録されている．続いてビデオの変更位置を把握するために必要な，各ビデオファイルの先頭バイトからの読み出し位置の情報が記録されている．なお制御ファイルは画像の情報を含まないため，そのサイズはビデオファイルと比べてきわめて小さい．

制御ファイルはビデオとともに iSCSI ディスクへ配置される．そして動的レート制御を行うアプリケーションは，読み取るビデオが指定されたとき，ビデオファイルを読み出す前にそのビデオファイルに関する情報が記述されている制御ファイルを読み出す．

なお，ここで提案した制御ファイルを用いる方式は，ネットワークを介したディスクアクセスを行うシステムにおいて，クライアントのアプリケーションがサーバに配置されたビデオのビットレートを変更するときのネットワーク負荷を低減する方法として有効である．

3.3.2 MPEG ビデオファイルを変更するときの課題と解決方法

ここでは，ビデオの圧縮方式として広く普及している MPEG 符号化されたビデオにおいて，ビットレートの変更を行うときの課題と解決方法を検討する．

ビデオファイルは一般にサイズが大きいことが多いため、そのサイズをより小さくするために、ビデオデータとして他フレームとの差分情報が用いられることがある。例えば MPEG における B ピクチャや P ピクチャ [73] がこれにあたる。ビデオにこのような差分情報が含まれるとき、その依存関係を無視して再生するビデオを変更すると、ビデオ再生が大きく乱れる恐れがあるという課題がある。この課題を解決するために、MPEG においては、相互に依存関係のない GOP 単位でビデオの変更を行う必要がある^{*1}。なお、ビデオの変更位置を GOP 単位とすると、ピクチャ単位で変更するときと比べて、変更間隔が長くなる。そのため、データ転送速度が不足するときに、ビットレート変更によりビデオ再生が途切れないようにするためには、より多くのバッファを用意する必要がある。

3.3.3 動的レート制御に必要なその他の機能

動的レート制御では、データ転送速度に応じて、サーバが送信するビデオのビットレートも決定する必要がある。この制御のために、本章では以下の方式を用いる。

iSCSI を用いたビデオ再生では、ディスクのデータ転送速度として、クライアントが一度に要求するビデオデータのサイズをその読み出しにかかった応答時間 (ビデオ再生を行うアプリケーションがビデオデータをディスクに要求してから、そのアプリケーションがそのビデオデータを得るまでの時間) で割った値の T_{interval} 秒毎 (実験では、1 秒毎) の平均を用いる。この方式を用いる理由は、ビデオの読み出し以外のディスクアクセスを必要としないためである。なお、 T_{interval} を 1 秒とした理由は、予備実験から、 T_{interval} を短くすると、低負荷であってもビットレートが低くなることがある一方で、1 秒を超えるとバッファが枯渇し本制御によるファイルの切替が間に合わないことが明らかとなったためである。 T_{interval} を変化させたときに動的レート制御がどのような影響を受けるかを調査し、 T_{interval} の最適値の決定方法を明らかにすることは今後の課題である。

ビデオのビットレートを決定する方法として、以下の方式を用いる。高ビットレートなビデオファイルを要求しているとき、データ転送速度が高ビットレートなビデオファイルの平均ビットレートを下回るとき、要求するビデオファイルを低ビットレートなビデオファイルにする。これは、ビデオの途切れが発生する恐れがあるためである。また、低

^{*1} なお、すべてのビデオの GOP 構造が一致していないとき、各 GOP の出力時刻が一致せず、ビデオを変更位置を設定することができない。従って、ビデオのビットレートを変更するときには、変更前と変更後のビデオの GOP 構造を統一する必要がある。そのため、本章で行った実験では、すべてのビデオの GOP 構造を同一としている。

ビットレートなビデオファイルを要求しているとき、データ転送速度が高ビットレートなビデオファイルの平均ビットレートを上回るとき、要求するビデオを高ビットレートなビデオファイルとする。これは、より高ビットレートなビデオファイルの方がビデオの品質が高いためである。ただし、高ビットレートなビデオファイルへの変更に限り、ネットワークの揺らぎにより短時間だけディスクの読み出し速度が変化する場合があることと、変更が遅れても再生が途切れることはないため、 T_{period} 秒間 (実験では 5 秒間) 連続して条件を満たした場合にのみ変更することとする。ここで、 T_{period} を 5 秒とした理由は、予備実験において、低負荷となってからバッファが一杯になるまでの所要時間が 5 秒程度であったためである。 T_{period} を変化させたときに動的レート制御がどのような影響を受けるかを調査し、 T_{period} の最適値の決定方法を明らかにすることは今後の課題である。なお、本章では、最初に高ビットレートなビデオファイルを要求する。

3.4 実験

本節では iSCSI を用いたビデオ再生実験について示す。

3.4.1 評価方法と比較対象

動的レート制御を行うことにより劣化する可能性のある画像の細かさや出力の滑らかさを総合的に評価するために主観評価を行う。なお、ビデオ再生の最終的な受け手は人間であることから、ユーザ体感品質 (QoE: Quality of Experience) [11] の観点から、主観評価を行うことは重要である。主観評価における評価尺度として、5 段階品質評価尺度 [85] (表 3.1 参照) を用いる。実験では、15 名の被験者 (21 歳から 24 歳の男性^{*2}) に、後述する 5 方式を用いてビデオを 60 秒間提示する。また、評価の時間的変化を確認するために、各被験者は提示されるビデオを見ながら、再生開始時と主観評価値に変化のあるときに主観評価値をキーボードより入力する。そして、実験開始から 1 秒毎に被験者が入力した主観評価値の平均をとり、MOS (Mean Opinion Score) [85] とする。また、途切れなくビデオが再生されていることを確認するため、主観評価と同時に受信側の単位時間当たりのメディアユニット (以降 MU と略記する。ここではビデオピクチャが相当する) 数である平均 MU レートを取得する。さらに、負荷によるディスクの読み出し速度の変化を確認するため、計測したディスクの読み出し速度も記録する。

本実験では、表 2.1 に示すように、高ビットレートな「サンプルビデオ 1」、サンプル

^{*2} 被験者の年齢と性別の多様化は、今後の課題である。

ビデオ 1 の SNR 解像度を低くした「サンプルビデオ 2」, サンプルビデオ 1 の時間的解像度を半分にした「サンプルビデオ 3」の三種類の MPEG-1 で符号化されたビデオファイルと, 動的レート制御で用いる制御ファイルを, サーバに事前に配置する. なお表 2.1 において, 平均 MU 入力レートはエンコード時に単位時間 (秒) あたりに入力された MU 数の平均である. これらのビデオファイルを用いて, 動的レート制御を行わない三つの固定レート方式 (これらはビデオファイルの違いによるものである) と, 動的レート制御を行う二つの動的レート方式 (これらはビデオファイルの組み合わせの違いによるものである) の, 計 5 方式により実験を行う. 本実験では実装の簡単のため, ビデオファイルが二種類以下の場合について実験を行っている. なお, GOP は I ピクチャ, P ピクチャ, B ピクチャ [73] から成り, 表 1 の GOP における I, P はそれぞれ I ピクチャ, P ピクチャを示す.

以下に今回比較する 5 方式を示す.

- 高ビットレートなビデオファイルと SNR 解像度を变化させた低ビットレートなビデオファイルを, 動的レート制御により変更する方式 (以降, 「動的レート方式 (SNR)」と呼ぶ)
- 高ビットレートなビデオファイルと時間的解像度を变化させた低ビットレートなビデオファイルを, 動的レート制御により変更する方式 (以下, 「動的レート方式 (時間的)」と略す)
- 高ビットレートなビデオファイルのみを使用し, 動的レート制御を行わない方式 (以降, 「固定レート方式 (高解像度)」と呼ぶ)
- SNR 解像度を变化させた低ビットレートなビデオファイルのみを使用し, 動的レート制御を行わない方式 (以下, 「固定レート方式 (低 SNR)」と略記する)
- 時間的解像度を变化させた低ビットレートなビデオファイルのみを使用し, 動的レート制御を行わない方式 (以降, 「固定レート方式 (低時間的)」と呼ぶ)

なお MPEG ビデオにおいて, 解像度の高い高ビットレートなビデオファイルから解像度の低い低ビットレートなビデオをファイル作成する方法として, ここで用いる情報の圧縮率である SNR 解像度や単位時間 (秒) あたりに出力されるフレーム数である時間的解像度の他, 画面表示の大きさである空間的解像度を低くする方法がある [86] が, ここでは用いない.

表 3.1 5 段階品質評価尺度

評点	品質
5	非常に良い
4	良い
3	普通
2	悪い
1	非常に悪い

表 3.2 ビデオの仕様

項目	サンプルビデオ 1	サンプルビデオ 2	サンプルビデオ 3
表示サイズ [ピクセル]	980 × 680		
平均ビットレート [Mbps]	3.2	1.6	
平均 MU 入力レート [MU/s]	24		12
記録時間 [秒]	115		
ファイルサイズ [Mbyte]	44.0	22.0	21.5
GOP	IPPPPPPPPPPP		

3.4.2 実験環境

図 3.2 の実験システムに示すように，Ethernet スイッチングハブ，レイヤ 3 スイッチ (Extreme 社製 Summit 200-48)，及びネットワークエミュレータ (NIST Net [75]) を介して，クライアントとサーバを 100BASE-T ケーブル (100Mbps) で接続する．iSCSI の実装として，クライアントに Microsoft iSCSI Software Initiator [76] を用いる．また，サーバに iSCSI Enterprise Target [77] を使用する．これらのソフトウェアの構成を図 3.3 に示す．図中の iSCSI ドライバは，クライアントにおいては，アプリケーションから受け取ったディスク読み書き要求を，ネットワークを介して接続された iSCSI ディスクへの読み書き要求とみなす機能を有し，サーバにおいては，ネットワークを介して受け取った iSCSI ディスクへの読み書き要求を，ローカルに接続されたハードディスクへのディスク読み書き要求とみなす機能を有するさらに，本実験における iSCSI 環境を表 3.3 に示

す．表 3.3 の値は，今回用いるシステムのデフォルト値である*³．

なお，iSCSI ディスクが他拠点にあるときを想定し，Ethernet スイッチングハブとレイヤ 3 スイッチ間の伝送速度を 10Mbps とし，NIST Net を利用して両方向に転送されるパケットに対し 10ms の固定のネットワーク遅延を付加する．また，他のトラヒックを模擬するための負荷トラヒックを発生させるため，負荷端末 1(図 3.2 の WS1) を Ethernet スイッチングハブに，負荷端末 2(WS2) をレイヤ 3 スイッチに接続する．さらに，負荷トラヒックとして UDP 負荷と Web 負荷の 2 種類を用いる．UDP 負荷は，テレビ電話などに用いられる UDP トラヒックの影響を明らかにするために用いられ，TCP 負荷は，Web などに用いられる TCP トラヒックの影響を明らかにするために用いられる．

UDP 負荷による実験において，負荷端末 2 は指数分布に従う間隔で発生される負荷データ (1472byte) を，UDP によって負荷端末 1 に送信する．そして，単位時間当たりを送信される負荷データの平均ビット数 (以降，平均負荷と呼ぶ) を実験開始からの経過時間 (秒) によって，表 3.4 のように変化させる．

また，Web 負荷による実験では，Web サーバの性能評価ツールである WebStone [87] を用いて，負荷端末 1(Web クライアント) は負荷端末 2(Web サーバ) に，ファイル (実験では，0.5, 5, 50, 500kbyte の HTML ファイル) をランダムに要求し，Web トラヒックを発生させる．そして，表 3.5 のように，実験開始からの経過時間 (秒) によって WebStone の Web クライアント数を変化させる．

実験では，動的レート制御を実装したクライアントがサーバに蓄積されているビデオを要求してビデオ再生を行うために，ビデオ再生アプリケーションに，動的レート方式を実装したものをを用いる．ビデオ再生アプリケーションは，Windows Media Player と再生に関してほぼ同等の性能が得られるようにするため，MPEG ビデオの再生に 2.4.2 節のメディア同期方式を採用している．このメディア同期方式では，大きなネットワーク遅延によってビデオデータの到着が遅れた場合，本来再生すべきタイミングで再生できない MU はスキップされる．また，その MU の情報からの差分情報で構成される MU もスキップする．なお，サウンドや音声は扱わない．

提案方式を実装したビデオ再生アプリケーションは，ビデオファイルの切り替え時に，ビットレート変更決定からビデオの変更までの間に，現在再生中ビデオが，枯渇しない程度の大きさのバッファにビデオデータを蓄積しながら，ビデオ再生を行う必要がある．今回の実験では，このバッファの大きさとしてビデオ約 2 秒分を確保する．そして動的レー

*³ これらのパラメータのうち，iSCSI MaxTransferLength がデータ転送速度に与える影響を第 2 章で調査している．それによると，この値がデータ転送速度に影響を与える場合があることがわかっている．今回用いる値は，データ転送速度が最も大きい場合の一つである．

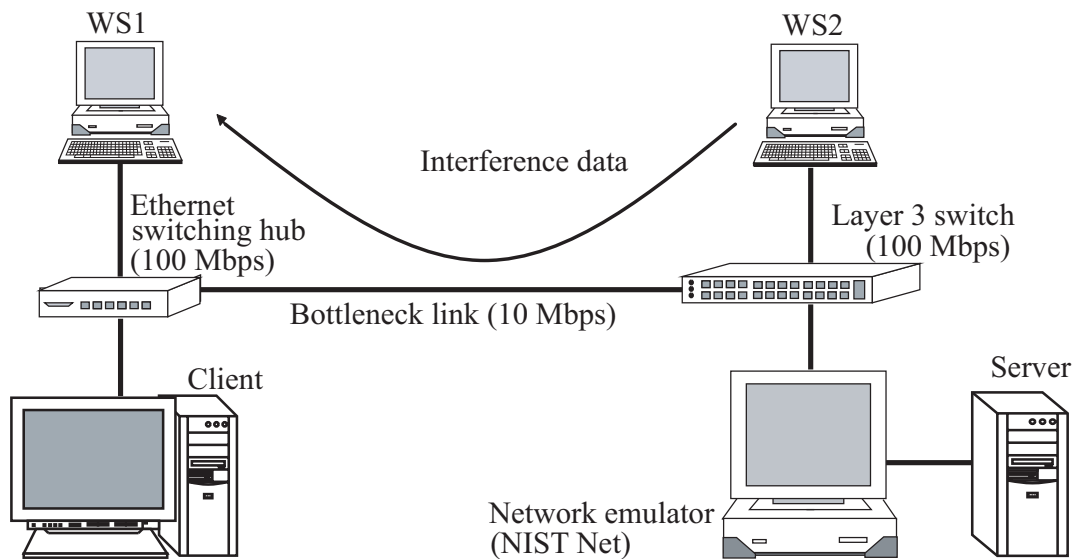


図 3.2 実験システムの構成

	Server	Client
Application		Video Playback Application
iSCSI Driver	iSCSI Enterprise Target (Ver. 0.4.13)	MS iSCSI Software Initiator (Ver. 2.02)
Operating System	Linux Fedora Core 4	Windows XP

図 3.3 実験システムのソフトウェア構成

ト制御を用いた予備実験により，変更時にバッファが枯渇しないことを確認している．

3.5 実験結果

はじめに，UDP 負荷を用いるとき，動的レート制御の有無がビデオ品質にどのような影響を与えるか確認するため，固定レート方式（高解像度）と動的レート方式を比較する．また，動的レート方式を用いるときは，低解像度のビデオを再生したときよりも高品質である必要があるため，固定レート方式（低 SNR，低時間的）と，動的レート方式を比較する．次に，Web 負荷を用いるときの結果についても同様に示す．

なお，動的レート制御を行う二つの方式において，制御ファイルのサイズはどちらも

表 3.3 iSCSI パラメータ

設定パラメータ	設定値
iSCSI MaxRecvDataSegmentLength [Byte]	824400
iSCSI MaxTransferLength [Byte]	65536
TCP ウィンドウサイズ (RWIN) [kByte]	65535

表 3.4 平均負荷 (UDP 負荷)

経過時間 [秒]	0-20	20-40	40-60
平均負荷 [Mbps]	2	6	2

表 3.5 Web クライアント数 (WebStone).

経過時間 [秒]	0-20	20-40	40-60
Web クライアント数	5	15	5

約 11kByte となった．これは，ビデオのサイズの約 2000 分の 1 以下である．このことから，制御ファイルのサイズは小さいといえる．

3.5.1 UDP 負荷による実験

3.4.1 節に示す 5 方式を用いるときの，経過時間に対する 1 秒毎の MOS を図 3.4 に，平均 MU レートを図 3.5 に示す．ただし，図の簡単化のため，各 MOS 値の 95% 信頼区間は，UDP 負荷及び Web 負荷のいずれの場合もプロットしていない^{*4}．また，動的レート制御によりビデオファイルが適切に変更されていることを確認するため，図 3.6 に動的レート制御を用いる 2 方式 (動的レート方式 (SNR) 及び動的レート方式 (時間的)) の経過時間に対するデータ転送速度と要求されたビデオファイルの平均ビットレートを示す．なお，図 3.6 は，主観評価の際にクライアントにて取得したものである．

図 3.4 より，経過時間が 24 秒から 42 秒程度の間，動的レート方式 (図中の Adaptive

^{*4} MOS 値の 95% 信頼区間の大きさは，いずれの負荷のときも 0.1 から 0.3 である．ただし，固定レート方式 (高解像度) の場合において，MOS 値が大きく低下する経過時間が 23 秒付近と，MOS 値が大きく上昇する経過時間が 41 秒では，0.7 程度の大きさの信頼区間となる．これらの値は，動的レート制御の有効性を示すには十分小さい．

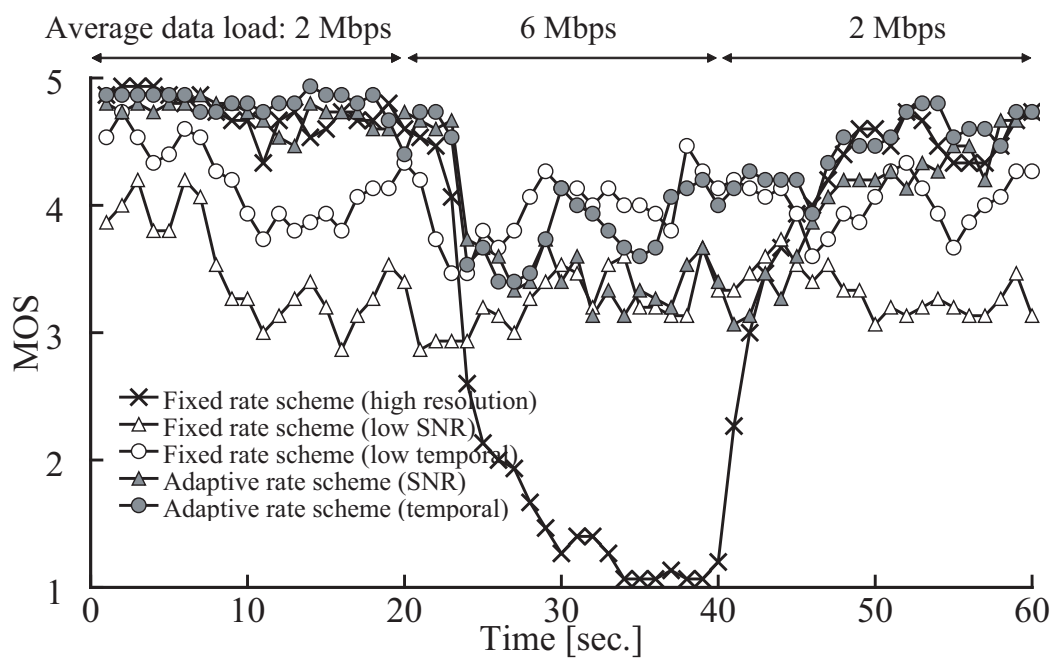


図 3.4 経過時間に対する MOS (UDP 負荷).

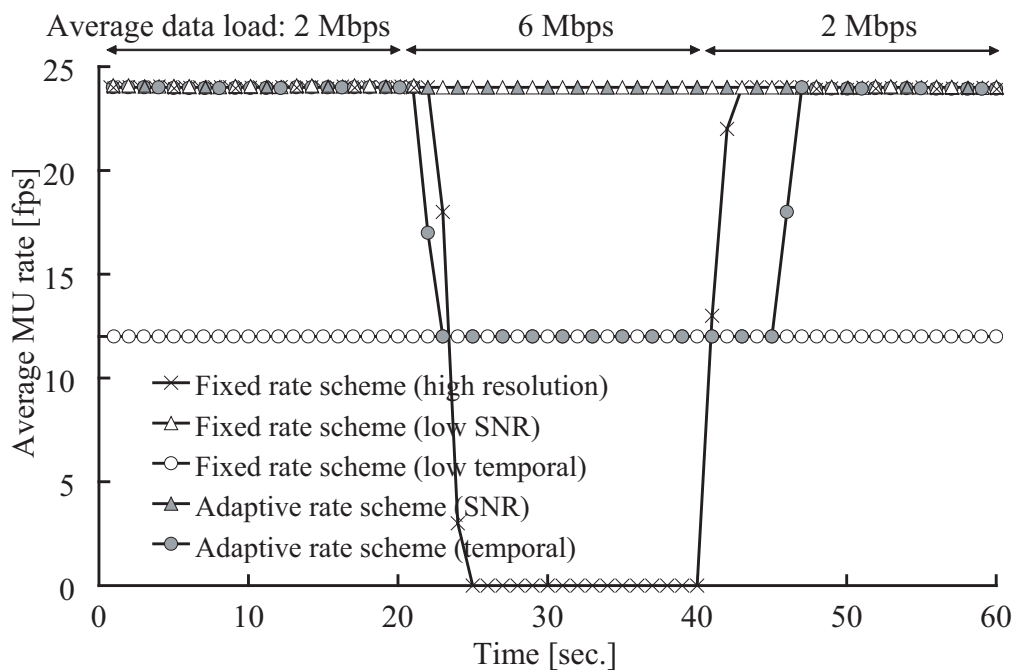


図 3.5 経過時間に対する平均 MU レート (UDP 負荷).

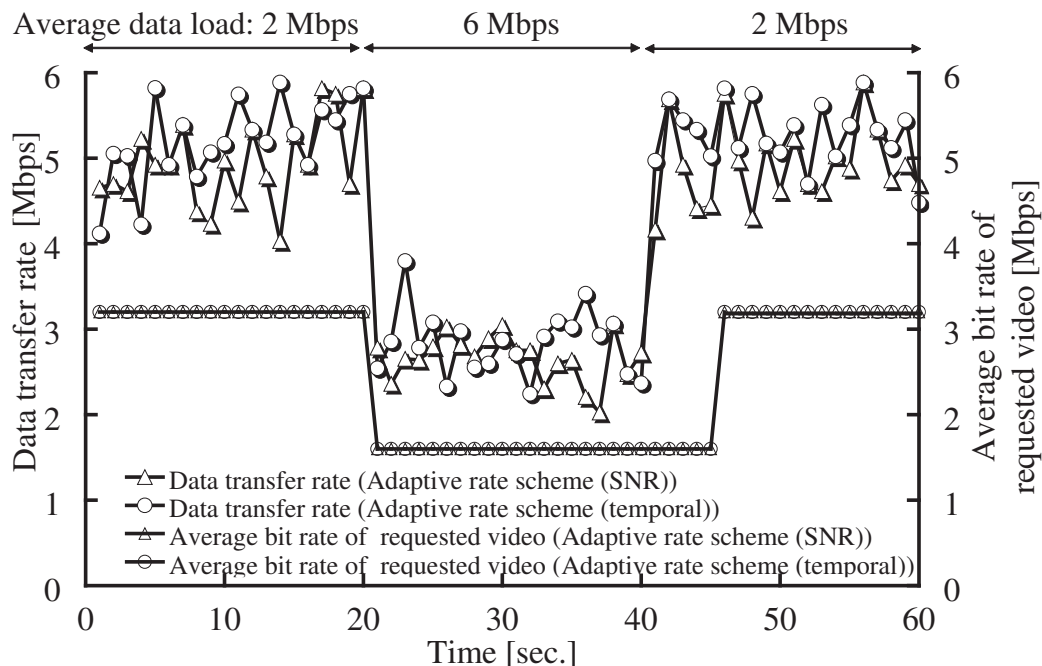


図 3.6 経過時間に対するデータ転送速度と要求されたビデオファイルの平均ビットレート (UDP 負荷).

rate scheme (SNR), Adaptive rate scheme (temporal)) の MOS 値は，固定レート方式 (高解像度) (図中の Fixed rate scheme (high resolution)) のそれよりも大きいことがわかる．また，図 3.4 より，それ以外のほとんどの経過時間において，動的レート方式の MOS 値は，固定レート方式 (高解像度) のそれとほぼ同じである．このことから，動的レート方式の品質は，負荷の変化によらず，固定レート方式 (高解像度) 以上であるといえる．

また，図 3.4 より，経過時間が 24 秒から 46 秒程度のほとんどの区間において，動的レート方式の MOS 値は，対応する固定レート方式 (低 SNR，低時間的) (図中の Fixed rate scheme (low SNR), Fixed rate scheme (low temporal)) のそれとほぼ同じであり，それ以外の経過時間において，動的レート方式の MOS 値は固定レート方式 (低 SNR，低時間的) の場合よりも高いことがわかる．このことから，固定レート方式 (SNR 低解像度，時間的低解像度) よりも，動的レート方式の再生品質が高いといえる．

また，図 3.5 より，負荷が大きい，経過時間が 24 秒から 41 秒程度の間，固定レート方式 (高解像度) のときは平均 MU レートが大きく低下するが，動的レート方式 (SNR) のときは平均 MU レートが低下しないことがわかる．図 3.6 から，このときのデータ転送速

度は、大きく低下しているといえる。また、動的レート方式が要求するビデオの平均ビットレート (図中の Average bit rate of requested video) も低くなっている。これらのことから、動的レート制御が有効に機能しているため、平均 MU レートの低下を防いでいることがわかる。

なお、本実験では、ビデオの内容として、人が海でサーフィンをしている動きの激しいシーンを用いている。筆者らはこのビデオの他に、動きの少ない飛行機からゆっくり撮影された風景シーンのビデオを用いる場合にも、SNR 解像度及び時間的解像度を低くしたときの MOS 値に同様の傾向を確認している。また、そのとき、動的レート制御の有効性も同様に確認している。さらに、GOP 構造を変えた場合 (IBBPBBPBBPBBP) の実験も行い、本実験で用いる GOP 構造の場合と同様の効果を確認している。なお、B は B ピクチャを示す。

3.5.2 Web 負荷による実験

負荷トラヒックを UDP 負荷から WebStone を用いた Web 負荷に変更した場合の、経過時間に対する五つの方式の MOS と平均 MU レートを図 3.7 と図 3.8 に示す。また、図 3.9 に Web 負荷の場合の動的レート方式における経過時間に対するデータ転送速度と、要求されたビデオの平均ビットレートを示す。これらの図は、UDP 負荷の実験結果である図 3.4、図 3.5 及び図 3.6 と同じ傾向を示している。

なお、図 3.7 から図 3.4 と同様に、固定レート方式よりも、動的レート方式の再生品質が高いことがわかる。このことから、負荷の種類によらず動的レート制御が有効に機能しているといえる。

3.6 むすび

本章では、事前にビットレートの異なる同じ内容のビデオファイルを複数用意し、ネットワーク状況に応じてクライアントがこれらビデオファイルを切り替える、動的レート制御を iSCSI を用いたビデオ再生に適用することを提案した。また、新たに考案した、制御ファイルを用いた方式により、動的レート制御において読み出す必要のあるファイルを、より小さいファイルで済むようにした。そして、iSCSI を用いたビデオ再生実験により、動的レート制御を用いることにより、動的レート制御を用いないときと比べて、負荷の種類によらず再生品質を高く維持できることを主観評価により示した。

今後は、他のビデオコンテンツを用いるときの動的レート制御の有効性と、3 種類以上

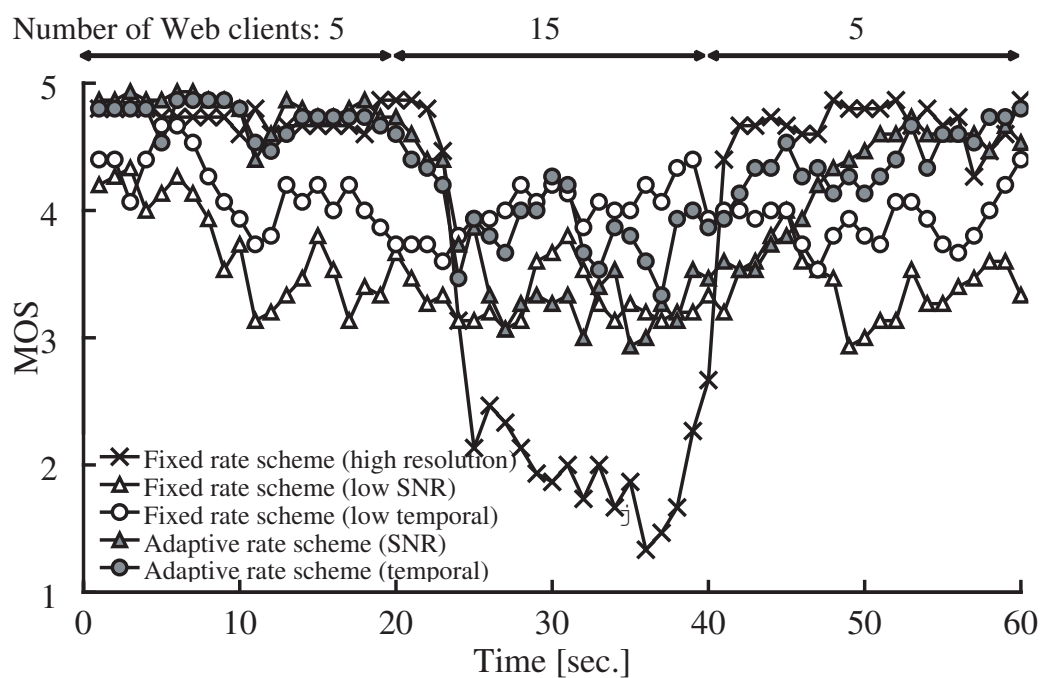


図 3.7 経過時間に対する MOS (WebStone).

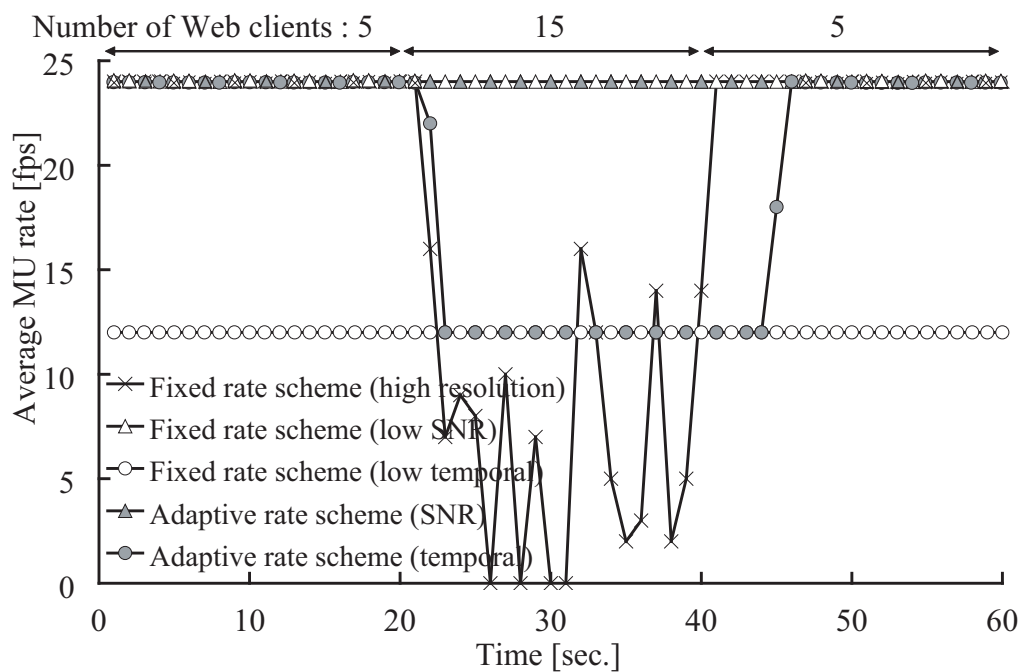


図 3.8 経過時間に対する平均 MU レート (WebStone).

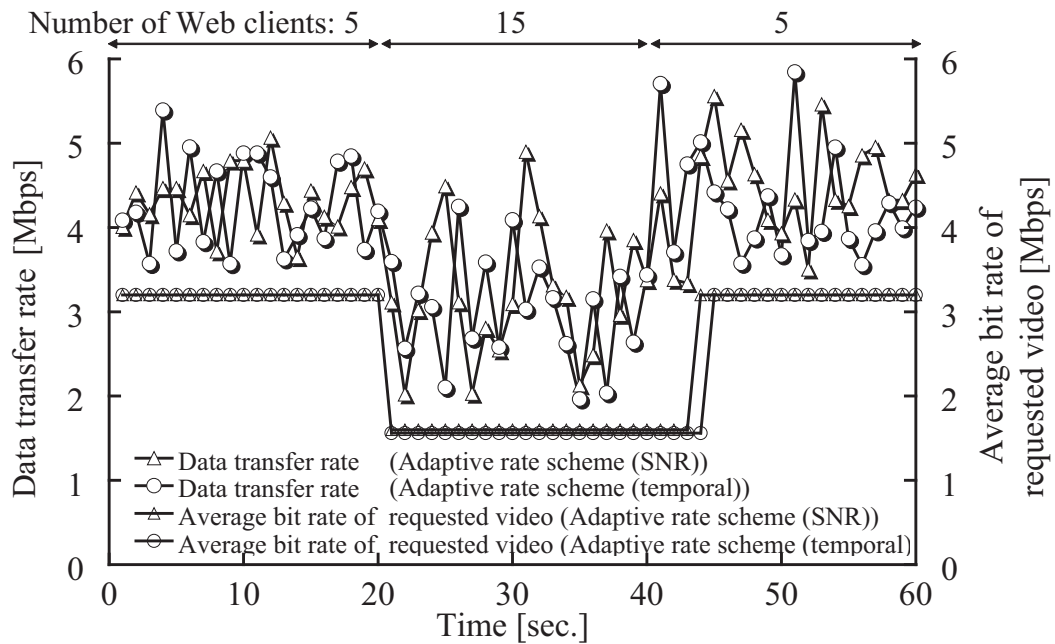


図 3.9 経過時間に対するデータ転送速度と要求されたビデオファイルの平均ビットレート (WebStrone).

のビデオを用いるときの動的レート制御の有効性の確認を行うことが必要である．また，他の符号化方式を用いたビデオファイルの切り替え方法についても，今後検討する必要がある．さらに， T_{interval} , T_{period} を変化させたときに動的レート制御がどのような影響を受けるかを調査し， T_{interval} , T_{period} の最適値の決定方法を明らかにすることと，被験者の年齢と性別の多様化は，今後の課題である．

第 4 章

力覚を利用した遠隔教育システムにおける重要度を考慮した誤り制御

4.1 まえがき

力覚メディアを用いたアプリケーションの例として、遠隔教育 [4]、遠隔医療 [5], [6]、ネットワーク型リアルタイムゲーム [51] 及び協調作業 [89] などが挙げられる。このうち、力覚を利用した遠隔教育システムは、指導者と学習者がそれぞれ体験する力覚を双方向に伝えることによって、教育効果を大幅に改善できると期待されている。本章では、遠隔教育システムとして、図形の教示を行う遠隔描画教示システム [23], [52]–[54] と、文字の教示を行う遠隔習字システム [55]–[57] を扱う。これらのシステムでは、力覚メディアにより、文字や図形の形状と、文字や図形を描くときの筆記具の動かし方を、指導者から学習者に正しく伝えることが必要である。これは、描き方の指導を行う遠隔教育では、学習者が指導者と同じ形状の文字や図形を、指導者と同じ筆記具の動かし方で描くことを目標としているためである。

IP ネットワークのような QoS 保証のないネットワークを用いて、力覚メディアを転送すると、パケット欠落などにより、描き方を教示するための重要な要素である、描画される文字や図形の形状や、筆記具の動かし方を正しく伝えることができなくなる恐れがある。これを防ぐためには、誤り制御 [90] などを行う必要がある。

誤り制御を行う力覚メディアのトランスポートプロトコルとして、SCTP [91]、STRON [22]、及び Smoothed SCTP (SCTP プロトコルに受信側のネットワーク遅延揺らぎを吸収する機能を付与したプロトコル) [92] が提案されている。SCTP と Smoothed SCTP は、誤り制御に ARQ を用いており、STRON は、リードソロモン符号を用いた FEC を

用いている．文献 [22]，[93] において，FEC を用いる STRON における力覚メディア情報の転送に要する時間は，シミュレーションや実験により，ARQ を用いる SCTP や Smoothed SCTP におけるそれよりも小さくなることが示されている．力覚メディアでは，情報転送に要する時間を小さくすることは重要であるため [93]，トランスポートプロトコルの誤り制御には ARQ よりも FEC が適していると考えられる．

一方，文献 [57] では，力覚を利用した遠隔教育システムの一つである遠隔習字システムにおいて，パケット欠落がメディア出力品質に及ぼす影響について調査している．そして，文字の形状の劣化が描画速度の速い「はね」や「払い」の部分に現れ，そのときの位置情報は重要であるということが報告されている．この情報が失われると文字の形が大きく損なわれるため，重要な情報をパケット欠落から守る必要がある．同様に，力覚を利用した遠隔描画教示システムにおいても，運筆速度が速いときの位置情報は重要であると考えられる．従って，この場合にも，重要な位置情報をパケット欠落から守る必要がある．

そこで，本章では，指導者が遠隔地にいる学習者に力覚を伝えながら文字や図形の描き方を教示する，力覚を利用した遠隔教育システムを対象とし，重要度を考慮した誤り制御方式を提案する．その方式は，運筆が速い場合の位置情報を含むメディアユニット（メディア同期の処理の単位．以下，MU と略す）[50] を重要な MU とみなし，その MU に対してのみ，誤り制御を行う．誤り制御には，各 MU を 2 度送信する Replication，XOR(eXclusive OR) 演算やリードソロモン符号を用いた FEC などを採用する．そして，主観評価により，提案方式の有効性を示す．さらに，主観評価と同時に客観評価を行い，客観評価結果から主観評価結果が高精度に推定可能であることを示す．これは，主観評価に必要な多くの人手と時間を削減できるので，重要である．

以下では，まず，4.2 節で力覚を利用した遠隔教育システムの概要について説明し，次に，4.3 節において重要度を考慮した誤り制御方式を提案する．そして，4.4 節では実験方法を示し，4.5 節で評価結果の考察を行う．

4.2 力覚を利用した遠隔教育システムの概要

力覚を利用した遠隔教育システムは，ネットワークを介して，触覚インタフェース装置を制御することにより，指導者が遠隔地にいる学習者に力覚を伝えながら文字や図形の描き方を教示することができる．なお，力覚での指導が実現すると，口頭での指導に対する要望が発生することが想定される．そこで，本システムでは，ライブ音声やビデオを付加して転送することを考慮し，力覚をリアルタイムに伝えている．

本章では，このシステムとして 遠隔習字システム [57] と遠隔描画教示システム [53]，[54]

を扱う．これらのシステムは，文字や図形の形状と筆記具の動かし方をリアルタイムに指導者から学習者に伝えることができる．その結果，力覚を用いない従来の方式と比べて，学習効果が高くなる可能性がある．なお，今回用いたシステムでは，触覚インタフェース装置の制約により，筆記具のペン先の位置の動きを伝えることはできるが，筆記具の傾きを伝えることはできない．

4.2.1 遠隔習字システム

遠隔習字システムでは，指導者が学習者に文字の書き方の遠隔指導を行う（図 4.1 参照）．指導者と学習者の端末には，触覚インタフェース装置として，PHANToM Omni（以下，PHANToM と略す）[94] が備え付けられている．指導者は，PHANToM を毛筆とみなして，CG(Computer Graphics) で作成された半紙（縦 132mm，横 92mm）の上に，文字を書く．なお，各ピクセルの縦の長さは 0.258mm，横の長さは 0.180mm とする．このとき，PHANToM を介して，半紙からの反力（バネ定数は 0.05N/mm）が返される．学習者も PHANToM を毛筆とみなし，指導者の筆の動きを感じながら文字を書く．なお，文字の太さは，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) [95] 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^{*1}．

PHANToM カーソルの位置情報の入出力のためのサーボループ [95] は，指導者の端末では 30Hz，学習者の端末では 1kHz である．また，各端末の位置情報 (MU) の送信レートと描画レートは，共に 30Hz とする．文字の描画方法と力の伝達方式については，文献 [57] を参照されたい．

4.2.2 遠隔描画教示システム

遠隔描画教示システムでは，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（図 4.2 参照）．指導者と学習者は，PHANToM を画筆とみなし，CG で作成された画布（縦 152mm，幅 214mm）の上に図形を描くことができる．本章では，指導者が先行して図形を描き，学習者が追従するようにする．OpenHaptics Toolkit において，指導者から学習者のみでなく，学習者から指導者に対しても力覚を伝えることのできるライブラリには，画布からの反力が取得できないという制約がある．本

^{*1} 今後，力覚を両方向に伝える方法を検討する予定である．

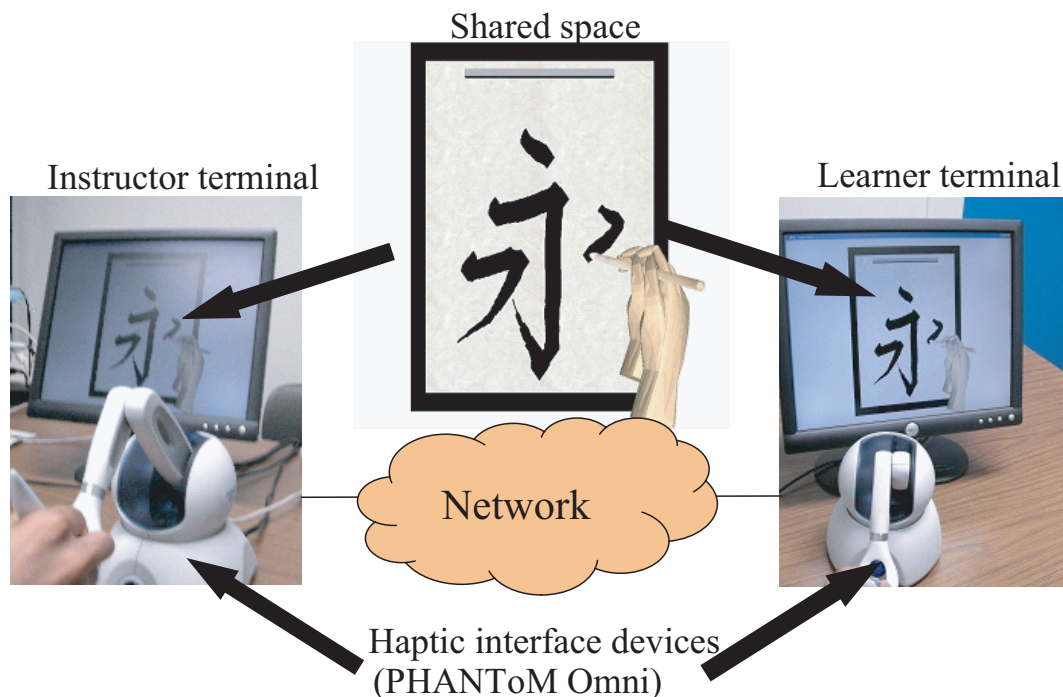


図 4.1 力覚を利用した遠隔習字システム

システムでは，力覚を双方向に伝えるために，画筆には画布からの反力はなく，描画する線の太さは一定としている．

各端末の PHANToM カーソルの位置情報の入出力のためのサーボループは 1kHz である．また，各端末の位置情報 (MU) の送信レートと描画レートは，共に 30Hz とする．図形の描画方法と力の伝達方式については，文献 [54] を参照されたい．

4.3 重要度を考慮した誤り制御方式

重要度を考慮した誤り制御方式では，指導者の運筆が速い場合の位置情報を含む MU を重要な MU とみなし，その MU に対してのみ，誤り制御を行う．遠隔描画教示システムでは，学習者の端末も MU を送信するため，その MU に対しても，指導者の運筆と同様に誤り制御を行う．この方式では，指導者の運筆速度を $V_{\text{instructor}}$ とし，閾値 $V_{\text{th}} (\geq 0)$ を設ける．そして， $V_{\text{instructor}} \geq V_{\text{th}}$ の条件を満たすとき，そのときの MU を重要な MU であると判断する．なお， $V_{\text{th}} = 0$ のとき，すべての位置情報を重要な MU とみなすことになる (以下，重要度を考慮しない誤り制御方式と呼ぶ)．このとき，誤り制御を行わない場合に比べて，欠落した MU を回復できるが，トラフィック量は増加する．逆に， V_{th} の値を

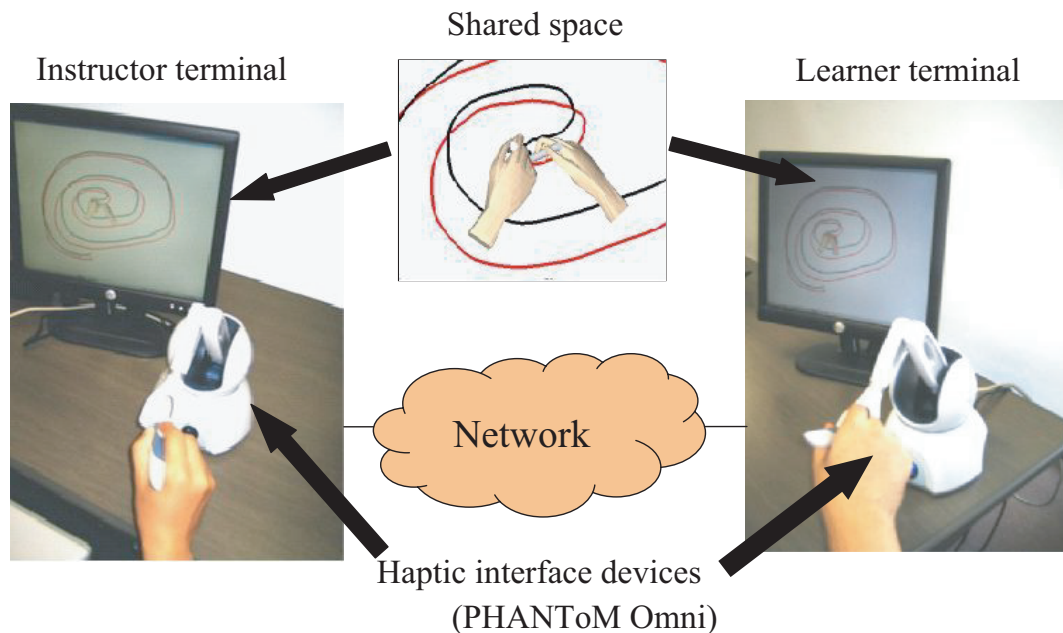


図 4.2 力覚を利用した遠隔描画教示システム

高く設定すれば、トラフィック量の増加は抑えられるが、欠落した MU をほとんど回復させることができない。

また、誤り制御として、次の三つを用いる。一つは、指導者の端末が送信する MU に加えて、直前の MU も同一の packets で送信する制御 (Replication) である。二つ目は、指導者の端末から送信される複数の連続する MU から、XOR 演算によりパリティを計算して、それらの MU に加えて送信し、学習者の端末では、そのパリティによって欠落した MU を回復する制御 (XOR を用いた FEC と呼ぶ) である。最後は、パリティにリードソロモン符号を用いる制御 (リードソロモンを用いた FEC) である。リードソロモンを用いた FEC は、パリティの生成以外は XOR を用いた FEC と同等の制御を行う。また、比較のために、MU の発生時間間隔を半分にし、送信される MU の数を 2 倍にする制御 (MU 間隔半減と呼ぶ) も扱う。MU の発生時間間隔を半分とする理由は、送信するデータ量を Replication のときと同じにするためである。なお、遠隔習字システムにおいて、画面への描画時間間隔を半分とすることは、今回用いた端末では処理能力の点から不可能であったため、MU 間隔半減を扱わない。これは、遠隔習字システムが用いるライブラリでは、MU の発生時間間隔が画面の描画時間間隔 (30Hz) と同じとなるからである。

4.4 実験方法

4.4.1 実験システム

複数のネットワーク環境において、重要度を考慮した誤り制御方式の有効性を調査するため、ルータを用いるときとネットワークエミュレータ (NIST Net [75]) を用いるときの二つのネットワーク環境で実験を行う。

(1) ルータを用いる実験

ルータを用いるときの実験システムを図 4.3 に示す。実験システムは、指導者の端末、学習者の端末、負荷端末 1、負荷端末 2、2 台の Ethernet スイッチングハブ (100BASE-T) 及び 2 台のルータ (Cisco 2611) から構成されている。指導者の端末と学習者の端末は、2 台のルータと 2 台のスイッチングハブを介して接続されている。また、2 台のルータ間を V.35 シリアル回線 (2Mbps の全二重通信) で接続している。そして、指導者の端末と学習者の端末が接続されているスイッチングハブには、それぞれ負荷端末 1、負荷端末 2 を接続する。指導者の端末からは、シーケンス番号と位置情報等を含む MU を、学習者の端末に送信する。MU の転送には UDP が用いられ、一つの MU は 1 パケットとして転送される。また、負荷端末 1 は、干渉トラヒックとして、固定長 (1472 バイト) の負荷データを指数分布に従う時間間隔で発生し、UDP により負荷端末 2 へ送信する。実験では、負荷端末 1 の平均負荷 (1 秒あたりに送信される負荷データのビット数の平均) を 1.5Mbps から 2.0Mbps まで 0.1Mbps 刻みで変化させる。

(2) NIST Net を用いる実験

図 4.4 に示すように、NIST Net を用いるときの実験システムは、ネットワークエミュレータ (NIST Net) を介して、指導者と学習者の端末を Ethernet ケーブル (100BASE-T) によって接続する。指導者の端末は、各 MU を 1 パケットとし、UDP で転送する。また、NIST Net は、通過するパケットに対して、一定の確率でパケット欠落を発生させる。実験では、パケット欠落率を 0%、10%、20% 及び 30% に設定する。このとき、付加遅延は、パレート正規分布 [75] に従うものとし、その平均を 100ms、標準偏差を 10ms とする。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 [96] である。

4.4.2 比較対象方式

重要度を考慮した誤り制御方式として、重要度を考慮した Replication、XOR を用いた FEC (単に XOR と呼ぶ)、リードソロモンを用いた FEC (RS と呼ぶ) を扱う。参考のた

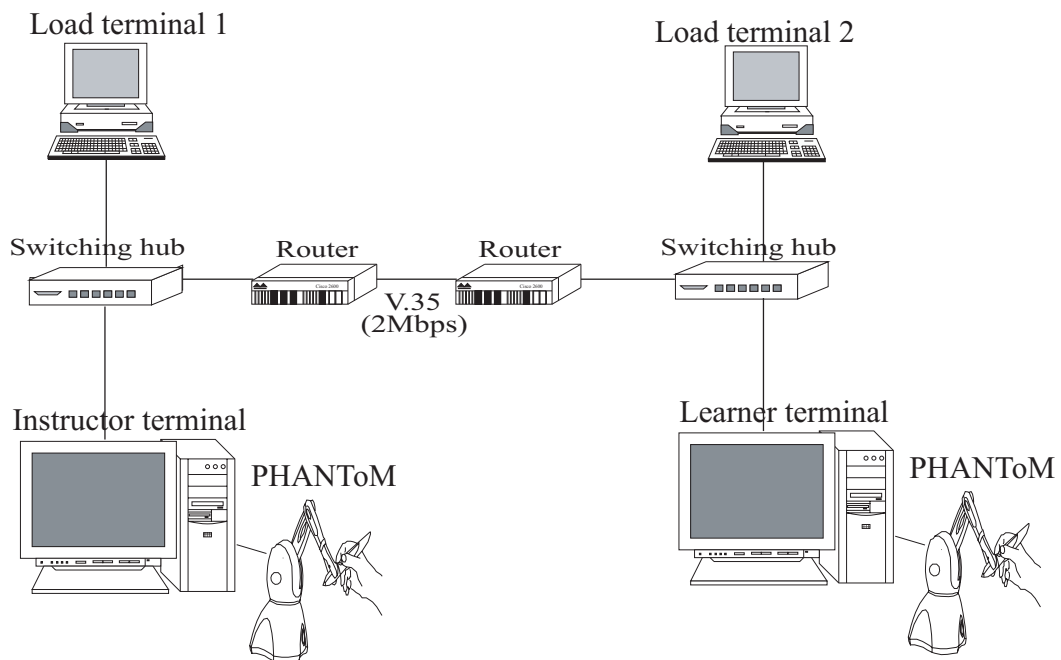


図 4.3 実験システムの構成 (ルータを用いる場合)

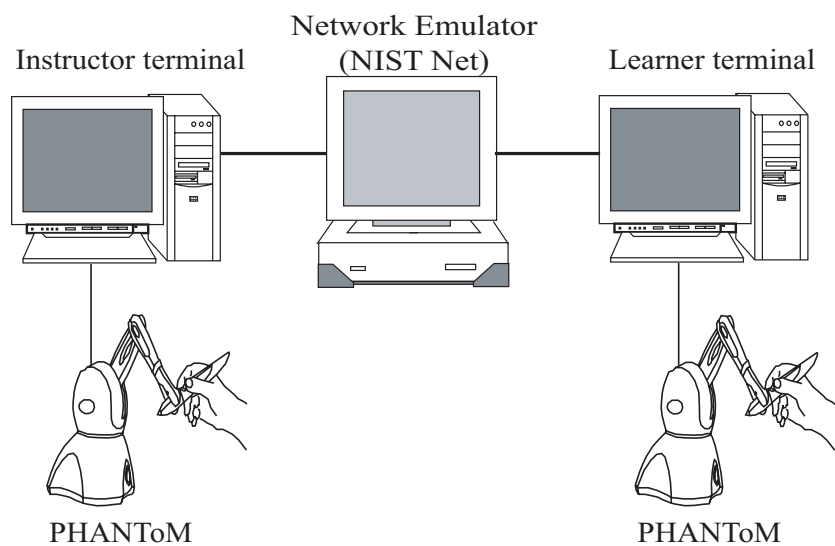


図 4.4 実験システムの構成 (NIST Net を用いる場合)

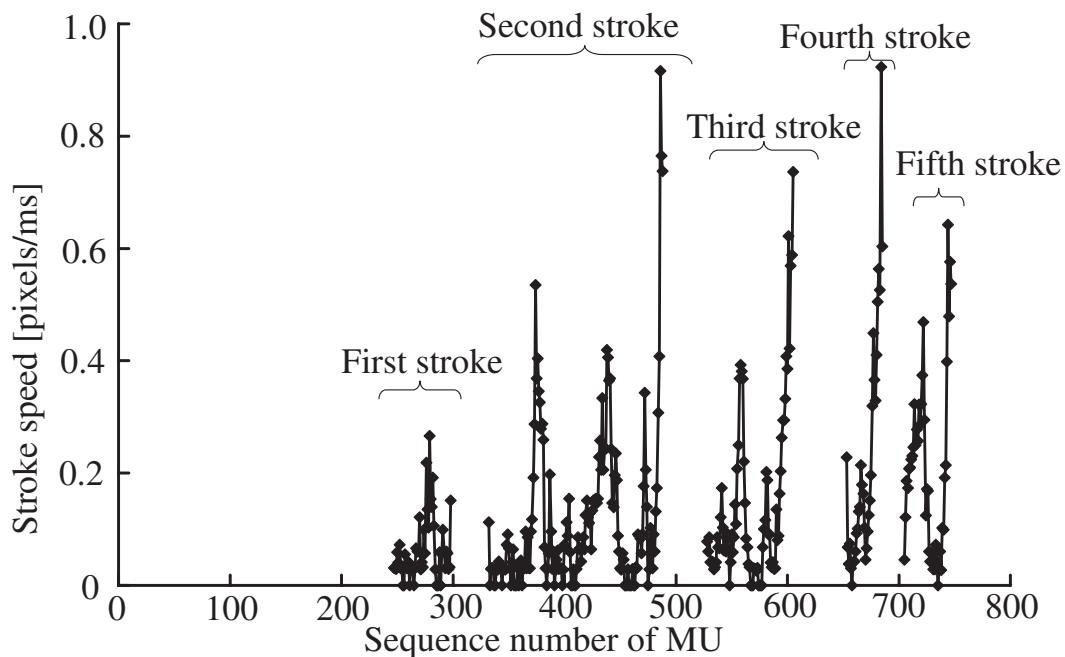


図 4.5 遠隔習字システムにおける MU のシーケンス番号に対する指導者の運筆速度

め、前述のように、遠隔描画教示システムでは、重要度を考慮した MU 間隔半減も用いる。また、比較のために、すべての MU に対して誤り制御を行う、重要度を考慮しない制御方式（重要度を考慮しない Replication, XOR, RS, 及び MU 間隔半減と呼ぶ）と、誤り制御を用いない方式（誤り制御なしと呼ぶ）も扱う。

本章では、XOR 及び RS において、五つの MU 毎に生成されるパリティの数をそれぞれ一つ、二つとし、それらをそれぞれ XOR(5), RS(5) で表す^{*2}。なお、FEC による誤り制御において、一つの MU に対して生成されるパリティを一つとすると、Replication と同等となる。一つのパリティは、1 パケットとして、UDP で転送される。

実験では、遠隔習字システムにおいて「永」^{*3}の文字（図 4.1 参照）を教示する。この文字を採用した理由は、「永」には、「はね」や「払い」などの学習すべき基礎的な要素が多く含まれるためである [97], [98]。ここで、「永」の文字を教示するときの、MU のシーケンス番号に対する運筆速度を図 4.5 に示す。この図から、二画目から五画目の終わりにかけて、運筆速度が速くなっているときがあることがわかる。これは、「永」の文字の払い

^{*2} FEC において、MU とパリティの数の組み合わせを何通りか変化させて予備実験を行った。その結果、組み合わせに依らず、誤り制御に Replication を用いる方が、メディアの出力品質を高く維持できることがわかった。このため、本章では、XOR(5), RS(5) のみを扱う。

^{*3} この他、ひらがなの「い」、「の」についても同様の実験を行い、「永」と同様の結果を得ている。

やはねの部分に相当しており，このときの指導者の運筆速度はいずれも 0.4pixel/ms 以上になっている．従って，本章では， $V_{th} = 0.4\text{pixel/ms}$ と設定する．また，遠隔描画教示システムでは「渦」^{*4} [54] の図形 (図 4.2 参照) を教示する．遠隔描画教示システムでは， V_{th} の値を， 0.03m/s から 0.06m/s まで， 0.01m/s 刻みに変化させて予備実験を行った．その結果， 0.03m/s と 0.04m/s のとき，メディア出力品質は最も高くなり，重要度を考慮しない制御方式を用いるときとほぼ同等になった． V_{th} の値を高く設定するほど，トラフィック量の増加が抑えられるため， $V_{th} = 0.04\text{m/s}$ とする．なお，本実験において，遠隔習字システム利用時の平均運筆速度は 0.187pixel/ms ，遠隔描画教示システムにおけるそれは 0.024m/s であった．

本章では，遠隔習字システムに対して，VTR (Virtual-Time Rendering) アルゴリズム [50] によるメディア内同期制御と，MU が欠落した場合などに，以前に受信した最新の二つの MU から位置を予測する予測制御 (線形一次予測 [99]) を組み合わせて用いる [57]．また，遠隔描画教示システムに対しては，これらの制御に加えて，同じ表示画面を見ながら指導するため，端末間でメディアの出力タイミングを揃える端末間同期制御 [53] も行う．遠隔習字システムでは，片方向にしか MU を送信していないため，端末間同期制御を行う必要はないことに注意されたい．

ルータを用いる実験のとき，遠隔習字システムにおいて，ネットワーク遅延揺らぎの最大値の見積り値 J_{max} [24] を 100ms とし，最大許容遅延 Δ_{al} [24] を 400ms とする．その他のパラメータ値は，文献 [57] と同じにする．一方，NIST Net を用いる実験のとき，遠隔描画教示システムにおける目標遅延時間 δ [100] の初期値を 50ms ， Δ_{al} を 200ms とする．その他のパラメータ値は，文献 [53] と同じにする．今回の実験システムにおいては，NIST Net を用いる実験の場合，ネットワーク遅延の平均が 100ms ，標準偏差が 10ms であるのに対して，ルータを用いる実験では，平均負荷が 1.7Mbps を超えると，ネットワーク遅延の平均は約 260ms 以上，標準偏差は最大で約 40ms となった．そのため，ルータを用いる実験における δ の初期値， J_{max} ，及び Δ_{al} の値を大きく設定している．

4.4.3 主観評価

実験は，15 名の被験者 (21 歳から 25 歳の男性) に対して一人ずつ行われる．評価方法には，テレビの画質を主観評価するための ITU-R 勧告である BT.500-11 [85] の単一刺激法を，力覚メディアへ適用するために，次のように拡張したものをを用いる．被験者は，評

^{*4} この他，複数の直線から成り，急激に方向転換を伴う「鋸」[54] についても，「渦」と同様に実験を行った．その結果，「渦」とほとんど同様の結果が得られた．

表 4.1 5 段階妨害尺度

評点	評価基準
5	劣化がわからない
4	劣化がわかるが気にならない
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

価の前に、劣化のない状態で 2, 3 回、遠隔習字システムにおいては半紙の 8 割程度の大きさで「永」の文字を書き、遠隔描画教示システムにおいては画布の 8 割程度の大きさで「渦」の図形を描く。その後、ルータを用いるときの干渉トラヒックや、NIST Net によるパケット欠落や遅延を付加する。被験者は、それが付加された状態で、劣化のないときと同じ文字や図形を描き、力覚と描画の劣化の度合に対して、5 段階妨害尺度 (表 4.1) を用いて評価する。すべての被験者の評価結果の平均を MOS (Mean Opinion Score) 値 [85] とする。

遠隔習字システムでは、被験者は学習者として評価する。遠隔描画教示システムにおいては、被験者はまず学習者として評価し、続いて指導者として評価を行う。なお、被験者の相手役は、筆者の一人が担当する。

4.4.4 客観評価

客観評価は、主観評価と同時に行われる。評価尺度として、MU 欠落率と平均ビットレートをを用いる。また、遠隔習字システムでは文字の欠損率、遠隔描画教示システムでは追従率 [54] を採用する。MU 欠落率は、発生した MU の総数に対する、出力されなかった MU の数の割合である。ただし、この出力されなかった MU の数には、誤り制御により、同一の MU を二つ受信したことによって破棄されたものは含まない。平均ビットレートは、単位時間当りに指導者の端末が送信する力覚メディアのビット数と誤り制御によって付加されるデータのビット数の和の平均である。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。この値が小さいほど、指導者の書いた文字を学習者の端末に忠実に再現できているといえる。また、追従率は、学習者の端末の PHANToM カーソ

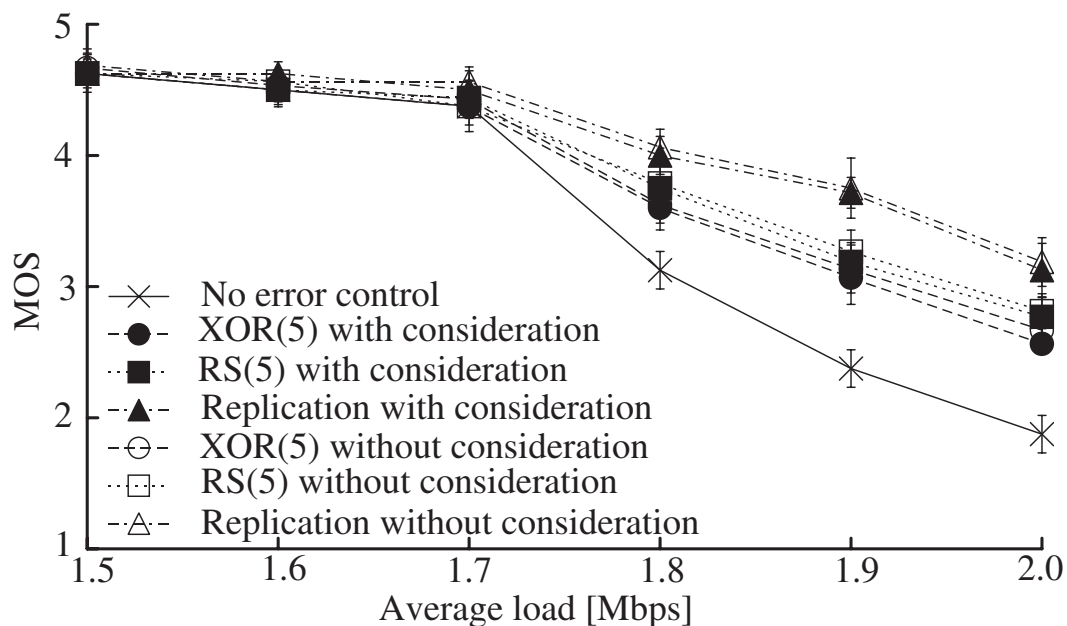


図 4.6 遠隔習字システムにおける MOS (ルータを用いる場合)

ルの位置が指導者のそれから一定の距離 (1.5cm) 以内に納まった時間の実験時間に対する割合のことである [53]。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。

4.5 評価結果と考察

ここでは、遠隔習字システムの結果を示した後に、遠隔描画教示システムの結果を示す。

4.5.1 遠隔習字システム

遠隔習字システムにおいて、ルータを用いる場合の平均負荷に対する MOS 値を図 4.6 に示す。図には、95% 信頼区間も示されている。なお、図中では、重要度を考慮することを with consideration、重要度を考慮しないことを without consideration と表現する。例えば、図中の XOR(5) with consideration は、重要度を考慮した XOR(5) を示す。また、誤り制御を用いない方式を No error control と表現している。

図 4.6 において、平均負荷が約 1.7Mbps より大きいとき、誤り制御を行うときの MOS 値は、誤り制御を行わないときのそれよりも大きくなっている。また、重要度の考慮の有

表 4.2 遠隔習字システムにおける平均ビットレート

重要度	誤り制御	平均ビットレート
—	誤り制御なし	77.4kbps
考慮する	XOR(5)	79.2kbps
	RS(5)	81.0kbps
	Replication	82.6kbps
考慮しない	XOR(5)	93.1kbps
	RS(5)	108.8kbps
	Replication	154.0kbps

無にかかわらず，Replication の MOS 値は最も大きくなっている．従って，誤り制御に Replication を用いるとき，指導者の描いた文字の欠損が少なく，学習者の端末に文字が最も忠実に出力されるといえる．さらに，図 4.6 より，すべての誤り制御に対して，重要度の考慮の有無が MOS 値にほとんど影響を与えないこともわかる．

重要度を考慮することの有効性を確認するため，各方式の平均ビットレートを表 4.2 に示す．表 4.2 において，誤り制御なしのときの平均ビットレートと比べて，重要度を考慮しない方式のそれは，2 割から 2 倍程度高くなっており，重要度を考慮した方式のそれは，わずかに増加（約 7% 以下）しているに過ぎない．以上より，MOS 値がほぼ同一で，平均ビットレートの増加率が小さいことから，重要度を考慮しない方式と比べて，重要度を考慮した方式は有効であるといえる．

また，誤り制御により MU の誤り訂正が行われていることを確かめるため，MU 欠落率を図 4.7 に示す．図 4.7 から，重要度を考慮しない Replication の MU 欠落率は，最も小さくなっていることがわかる．これは，今回用いている誤り制御の中では，Replication の誤り訂正能力が最も高いためである．また，前述のように，図 4.6 において，誤り制御に Replication を用いるとき，MOS 値が最も大きくなっている．これらのことから，MU 欠落率が小さいほど，MOS 値は大きくなるといえる．さらに，図 4.7 から，重要度を考慮した方式の MU 欠落率は，誤り制御なしのときと比べて，わずかに小さくなっていることがわかる．これより，MU 欠落率がほぼ同じであっても，重要度を考慮した方式では重要な MU がパケット欠落から回復されるため，図 4.6 において MOS 値が大きくなっているといえる．

図 4.8 に文字の表示例を示す．図 4.8(a) は，指導者の端末に表示された文字の例であ

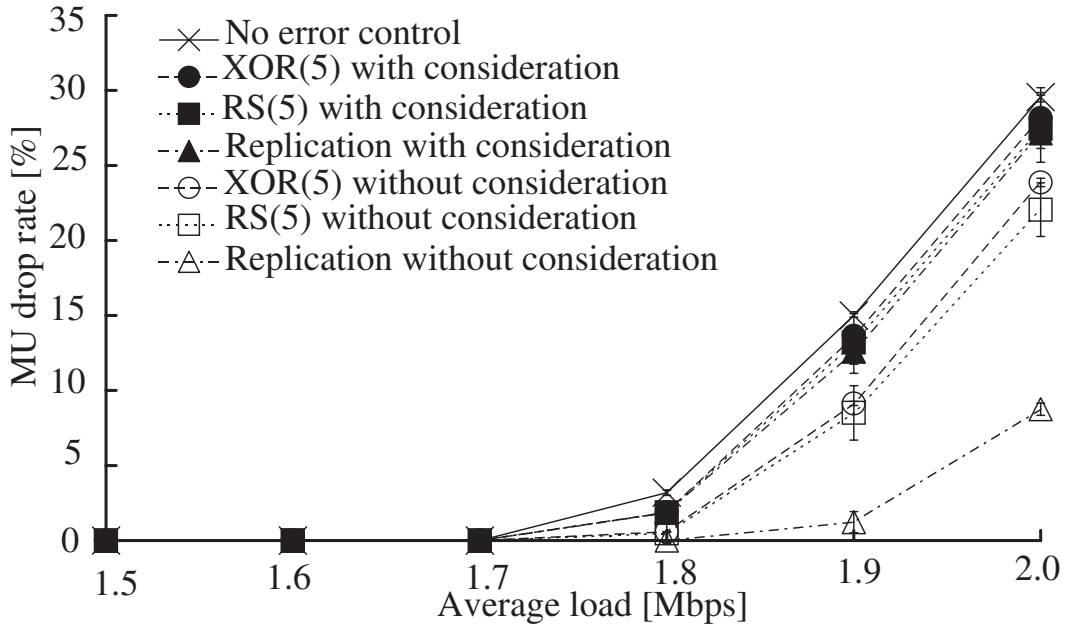


図 4.7 遠隔習字システムにおける MU 欠落率 (ルータを用いる場合)

り，図 4.8(b), 図 4.8(c) は，平均負荷が 2.0Mbps のときに学習者の端末で表示された文字の例である．なお，図 4.8(b) は誤り制御なしの場合，図 4.8(c) は重要度を考慮した Replication を採用した場合である．図 4.8(b) から，はねや払いの部分において，図 4.8(a) と比べて文字の出力品質が劣化しているのがわかる．これらは，習字を学習する上で重要な要素である [97], [98]．一方，図 4.8(c) は，図 4.8(a) と文字の出力品質がほとんど変わらない．従って，重要度を考慮した Replication は，文字の出力品質の劣化を抑えることができる．

なお，今回の実験において，客観評価結果の一つである文字の欠損率が，図 4.6 における MOS 値と同様の傾向を示したため，回帰分析によって，MOS 値と文字の欠損率の関係を調査した．回帰分析における MOS の推定値を $V_{\text{mos}}^{(1)}$ と表記して，文字の欠損率を R_{loss} と表記する．独立変数を R_{loss} とし，従属変数を $V_{\text{mos}}^{(1)}$ として回帰分析を行った結果，以下の回帰式が得られた．

$$V_{\text{mos}}^{(1)} = 4.416 - 1.448R_{\text{loss}} \quad (4.1)$$

上式の自由度調整済み寄与率は 0.887 であった．従って，遠隔習字システムにおいて，文字の欠損率から高い精度で MOS 値を推定できる．なお，筆者らは，これまでの研究において，客観評価を行った結果，ルータを用いる場合と NIST Net を用いる場合のいずれの

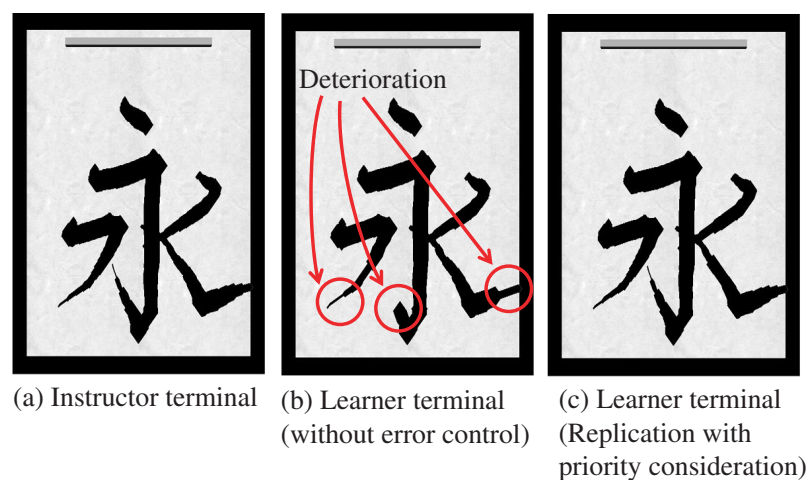


図 4.8 遠隔習字システムにおける文字の表示例

場合でも，提案方式が有効であることを確認している．

以上より，遠隔習字システムにおいて，今回用いている誤り制御のいずれの場合においても，提案方式が有効であるといえる．また，重要度を考慮した Replication が，わずかなトラヒック量の増加で，メディアの出力品質を高く維持できることもわかる．

4.5.2 遠隔描画教示システム

遠隔描画教示システムにおいて，NIST Net を用いる場合のパケット欠落率に対する MOS 値を図 4.9 に示す．ただし，本章では，指導者の MOS 値のみを示す．これは，学習者の MOS 値は指導者のそれと同様の傾向を示したためである．

図 4.9 において，誤り制御を行うときの MOS 値は，誤り制御を行わないときのそれよりも大きくなっている．特に，Replication の MOS 値が最も大きくなっている．このことから，誤り制御を行うと，MOS 値が大きくなることがわかる．また，重要度を考慮した方式の MOS 値は，重要度を考慮しない方式のそれよりもわずかに小さくなっている．

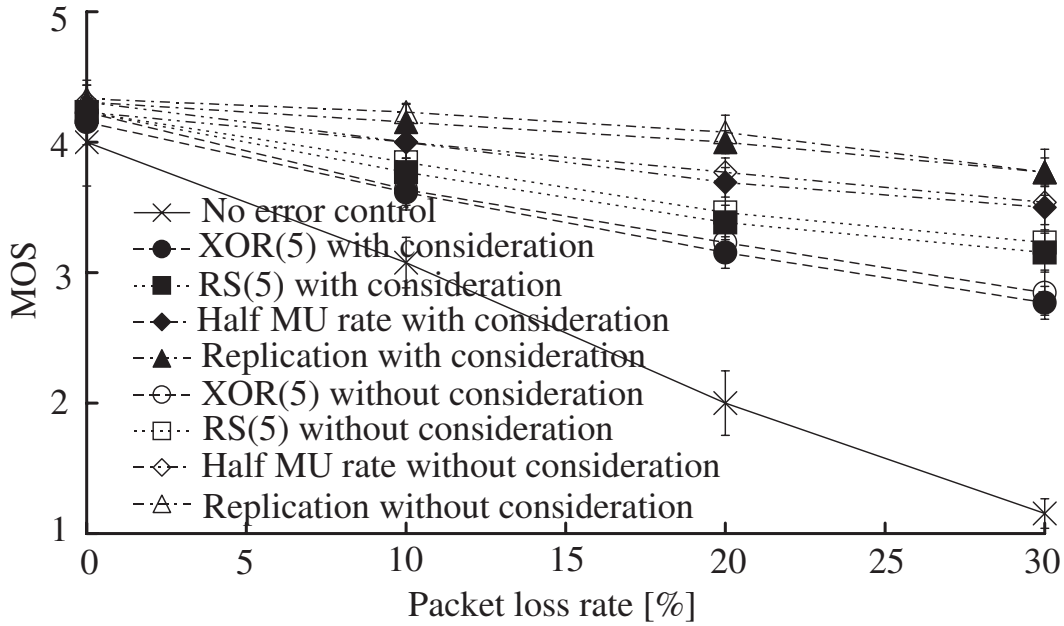


図 4.9 遠隔描画教示システムにおける MOS (NIST Net を用いる場合)

次に，提案方式の有効性を示すために，各方式の平均ビットレートを表 4.3 に示す．表 4.3 から，誤り制御なしの平均ビットレートと比べて，重要度を考慮しない方式のそれは，2 割から 2 倍程度高くなっている．さらに，重要度を考慮した方式の平均ビットレートは，わずかに増加している（約 12% 以下）ことがわかる．これらのことから，遠隔描画教示システムにおいても，遠隔習字システムの時と同様，提案方式が有効であるといえる．

なお，今回の実験において，追従率が図 4.9 の MOS 値と同様の傾向を示したため，回帰分析によって，MOS 値と追従率の関係を調査した．回帰分析における MOS の推定値を $V_{\text{mos}}^{(2)}$ と表記して，追従率を $R_{\text{following}}$ と表記する．独立変数と従属変数をそれぞれ $R_{\text{following}}$ ， $V_{\text{mos}}^{(2)}$ として回帰分析を行い，以下の回帰式を得た．

$$V_{\text{mos}}^{(2)} = -24.178 + 28.557R_{\text{following}} \quad (4.2)$$

上式における自由度調整済み寄与率は 0.954 であった．以上より，遠隔描画教示システムにおいて，MOS 値は追従率から高精度に推定可能であるといえる．なお，筆者らは，これまでの研究において，客観評価により，ルータを用いるときと NIST Net を用いるときのいずれの場合も，提案方式の有効性を確認している．

表 4.3 遠隔描画教示システムにおける平均ビットレート

重要度	誤り制御	平均ビットレート
—	誤り制御なし	80.1kbps
考慮する	XOR(5)	84.7kbps
	RS(5)	89.3kbps
	MU 間隔半減	88.6kbps
	Replication	
考慮しない	XOR(5)	95.7kbps
	RS(5)	111.6kbps
	MU 間隔半減	159.5kbps
	Replication	

4.6 むすび

本章では，指導者が遠隔地にいる学習者に力覚を伝えながら文字や図形の描き方を教示する，力覚を利用した遠隔教育システムを対象とし，重要度を考慮した誤り制御方式を提案した．この方式は，運筆が速い場合の位置情報を含む MU を重要な MU とみなし，その MU に対してのみ，誤り制御を行う．誤り制御には，各 MU を 2 度送信する Replication，XOR 演算やリードソロモン符号を用いた FEC などを採用した．そして，主観評価により，誤り制御を行うことにより，誤り制御を行わないときよりもメディア出力品質を高く維持できることと，重要度を考慮した誤り制御を用いることで，重要度を考慮しない誤り制御を用いたときに近いメディア出力品質をわずかなトラフィック量の増加で，達成できることを示した．さらに，同時に行われた客観評価の結果から，主観評価結果が高精度に推定可能であることも示された．

今後の課題として，今回扱った作業とは異なる作業における重要度を考慮した誤り制御の有効性の確認と，遠隔教育システム以外の，力覚を用いたシステムへの本方式の適用が挙げられる．また，QoS が保証された IP ネットワークであるマネージド IP ネットワークを用いるときの，優先度を考慮した誤り制御の有効性の検討と評価も挙げられる．

第 5 章

力覚メディア内同期アルゴリズムの出力品質比較

5.1 まえがき

本章では、パケット遅延揺らぎやパケット欠落が発生したときに単一メディアの時間構造を回復・保持するメディア内同期制御 [5], [6], [23]–[25], [55] を扱う。文献 [23], [55] 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 [24] 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 [25] 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、QM (Queue Monitoring) [101] 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。さらに、文献 [5], [6] 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。

本章では、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 [24] (この作業はネットワーク型リアルタイムゲーム [51] に採用されている) と、遠隔描画教示 [23] 及び遠隔習字 [55] 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、5.2 節では本章で扱う作業内容について述べる。5.3 節では実験システムについて概説する。5.4 節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。5.5 節では評価方法を述べ、5.6 節では評価結果の考察を行う。

5.2 作業内容

本章では、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 [26], [27], PHANToM Omni [26], [28], SPIDAR-G AHS [29] あるいは Falcon [30] 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) [24] の送信レートは、作業 1 が 1kHz [27]、作業 2 及び作業 3 が 30Hz [23], [55] である。以下では、これらの作業について

詳しく説明する.

5.2.1 作業 1

作業 1 では, 図 5.1 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 5.2 に示すような壁, 床, 及び天井に囲まれた仮想空間 (表 5.1 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^{*1}) において, オブジェクト (図 5.2 の立方体) をカーソル (図 5.2 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 5.2 の大きい球体であり, 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 [24]. 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 [27] に基づき, オ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 [27].

^{*1} PHANToM DESKTOP の仮想空間の大きさ (高さ × 横幅 × 奥行き) を $89.7 \text{ mm} \times 129.7 \text{ mm} \times 89.7 \text{ mm}$ 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 5.1 の大きさとしたの場合とほとんど同じ結果が得られた.

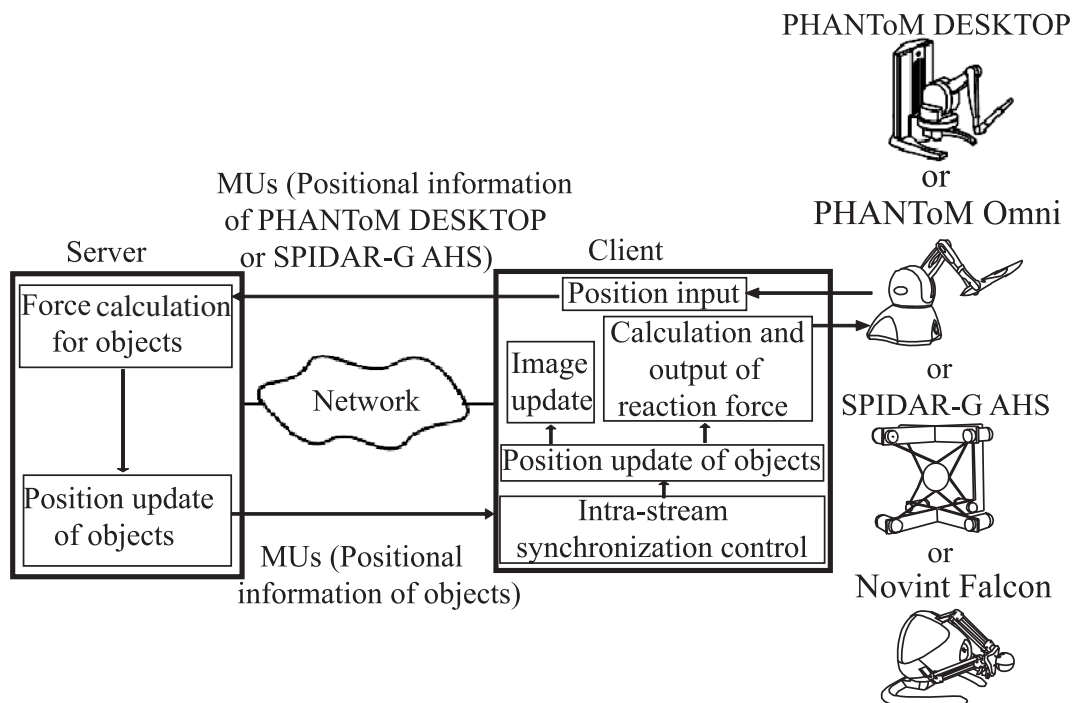


図 5.1 作業 1 のシステムモデル

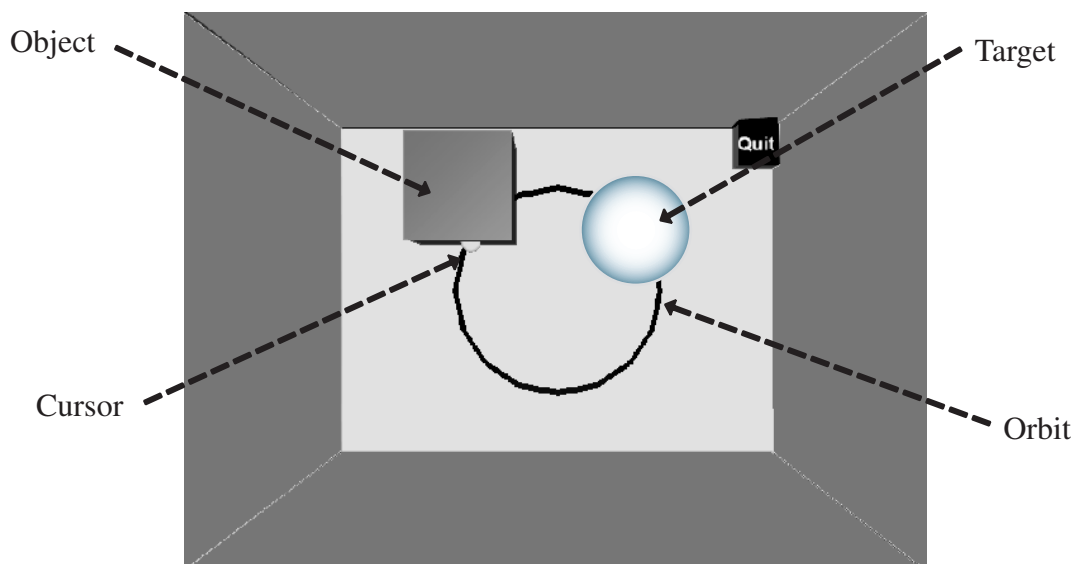


図 5.2 作業 1 (PHANToM DESKTOP) の仮想空間の表示例

表 5.1 仮想空間の大きさ

触覚インタフェース装置	高さ	横幅	奥行き
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

5.2.2 作業 2

作業 2 では、図 5.3 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 を画筆と見なして、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 5.4 に示すように、学習者は仮想画布（縦 152mm、横 214mm）上の指導者の軌跡に追従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 [23]、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 [23]。なお、力の計算に用いるばね定数は 0.05N/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 [23]、[53]。

5.2.3 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、触覚インタフェース装置として、PHANToM Omni [94] 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 132mm、横 92mm）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 0.05N/mm ）が返される。学習者も PHANToM Omni を毛筆とみなし、図 5.5 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。

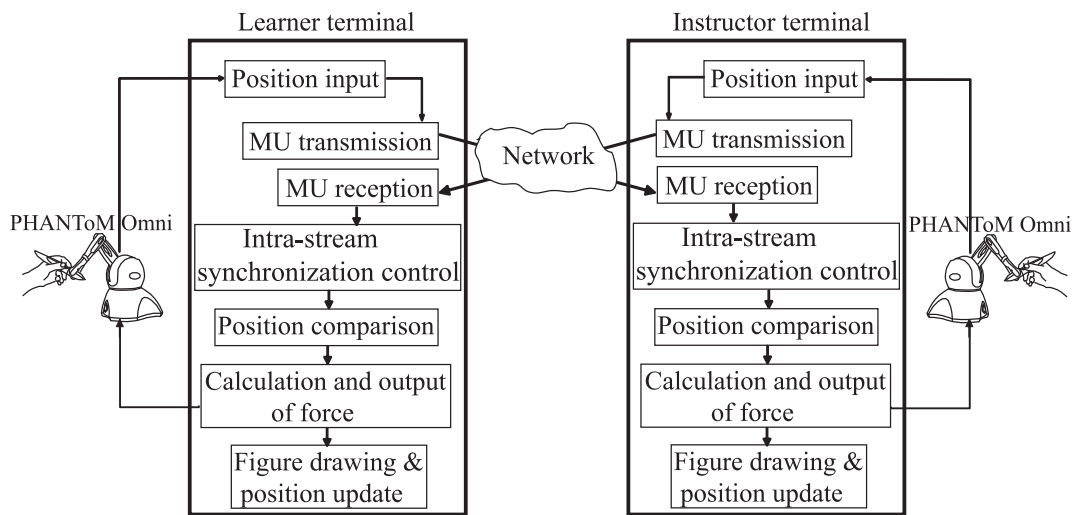


図 5.3 作業 2 及び作業 3 のシステムモデル

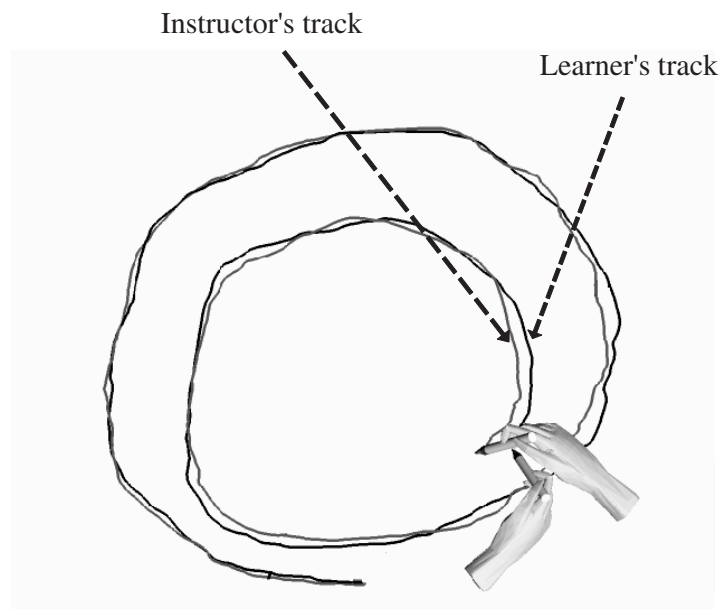


図 5.4 作業 2 の仮想空間の表示例

OpenHaptics Toolkit (PHANToM のライブラリ) [28] 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 [23]。なお、力の計算に用いるばね定数は 0.05N/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 [55]。文字の描画方法と力覚の伝達方式については、文献 [57] を参照されたい。

5.3 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。本章では、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 [75]) 及びルータを用いる。NIST 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ヒックが他トラヒックと競合する場合に、他トラヒ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、本章では二つのネットワークを用いて実験を行う。

5.3.1 作業 1

(a) NIST Net を用いる場合

実験では、図 5.6 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 [75] に従う付加遅延を発生させる。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。



図 5.5 作業 3 の仮想空間の表示例

(b) ルータを用いる場合

このシステムは, 図 5.7 に示すように, サーバ (CPU : Xeon 3.06GHz, OS : Windows 2000), クライアント (CPU : Pentium4 1.5GHz, 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 台のルータ間は V.35 シリアル回線 (2 Mbps 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

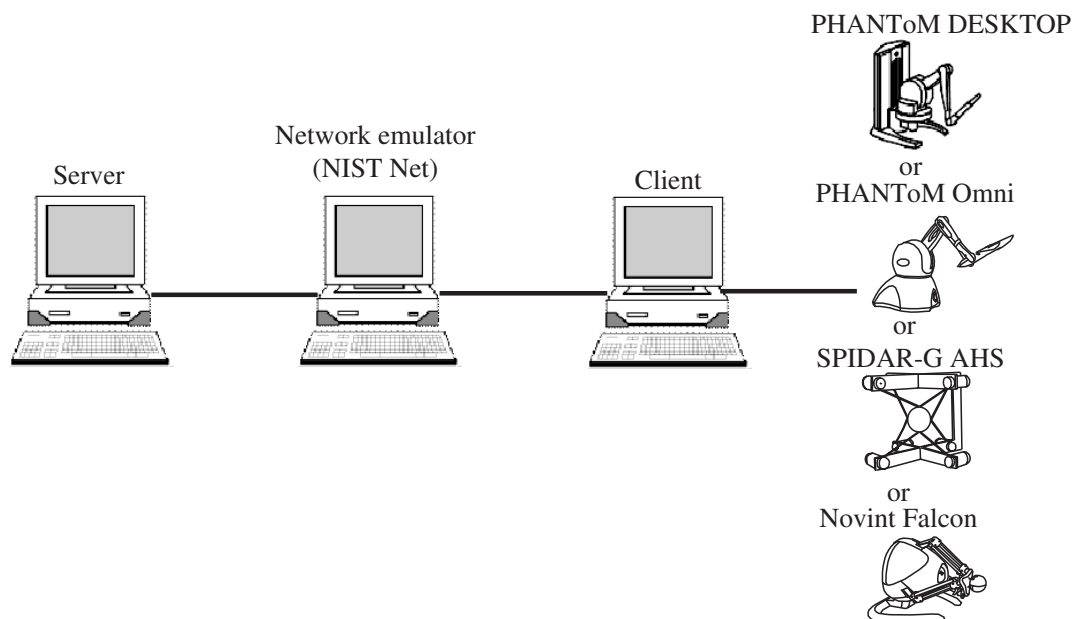


図 5.6 作業 1(a) の実験システム

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。

5.3.2 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 5.8 に示すように、指導者端末 (CPU : Pentium4 2.8GHz, OS : Windows XP) と学習者端末 (CPU : Pentium4 2.8GHz, 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。

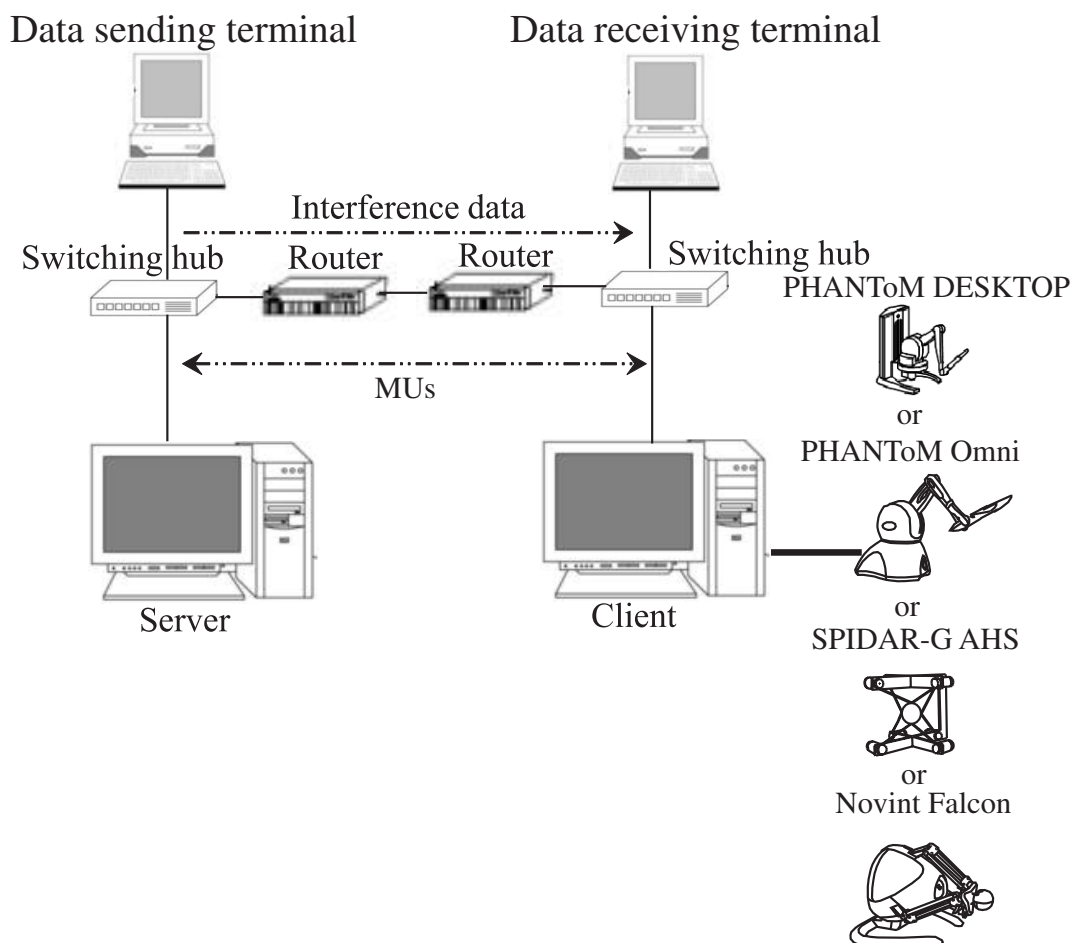


図 5.7 作業 1(b) の実験システム

(b) ルータを用いる場合

図 5.9 に示すように、指導者端末 (CPU : Pentium4 2.8GHz, OS : Windows XP), 学習者端末 (CPU : Pentium4 2.8GHz, OS : Windows XP), 2 台のデータ端末, 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。

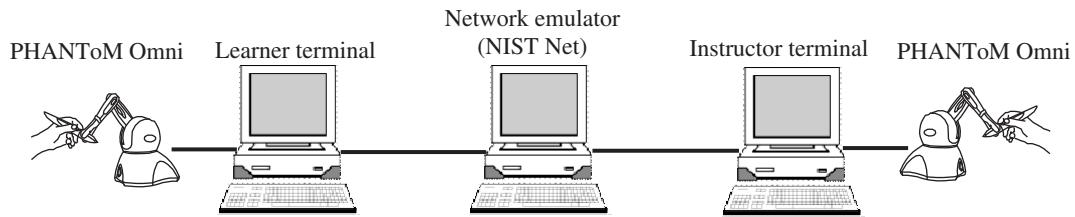


図 5.8 作業 2(a) 及び作業 3(a) の実験システム

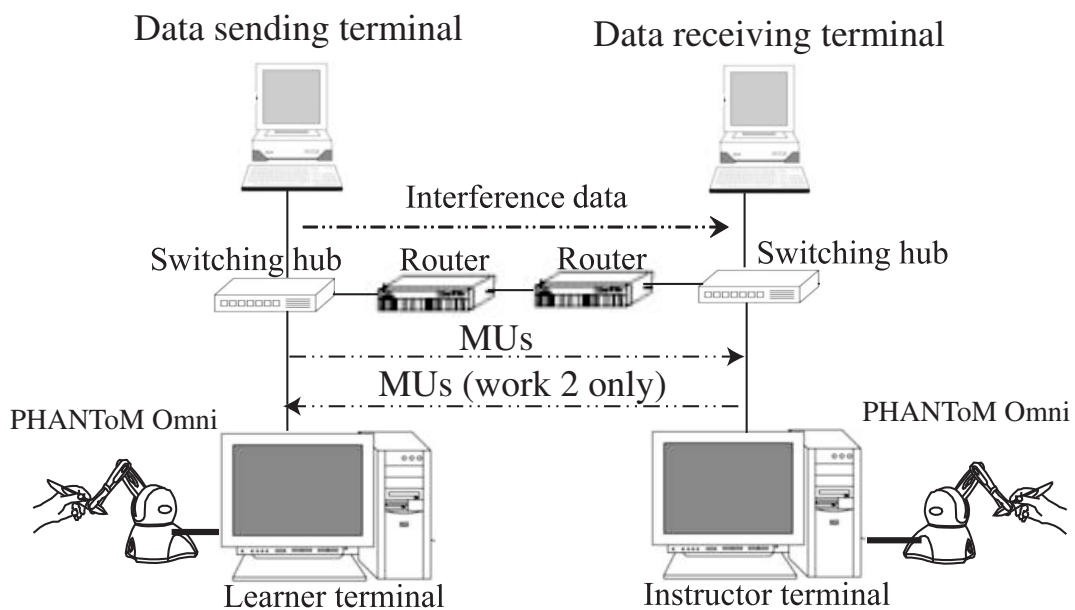


図 5.9 作業 2(b) 及び作業 3(b) の実験システム

5.4 力覚メディア内同期アルゴリズム

本章では, 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 [24]. 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 1MU 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 [24]。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 [101]。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 のカウンタ値が閾値 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、閾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 のような振る舞いをする。

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 [5]。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、そのなかでもっと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。このアルゴリズムの長所は、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 [24]。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、 $A_1(\text{MU の到着時刻}) - T_1(\text{MU の発生時刻}) + J_{\max}$ (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 の到着がある閾値より遅れると, 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 5.2 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 [24] 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, 閾値 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 5.2, 表 5.3, 表 5.4 及び表 5.5 に示さ

表 5.2 作業 1(a) におけるアルゴリズムのパラメータ設定

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_{a1} [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	閾値 T_h	1, 5, 10, 15			
ABC	観測 MU 数 N	7, 100, 150, 200			

表 5.3 作業 1(b) におけるアルゴリズムのパラメータ設定

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_{a1} [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	閾値 T_h	1, 5, 10, 15			
ABC	観測 MU 数 N	7, 100, 150, 200			

表 5.4 作業 2 におけるアルゴリズムのパラメータ設定

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_{a1} [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	閾値 T_h	1, 5, 10, 15	
ABC	観測 MU 数 N	7, 30, 60, 90	

表 5.5 作業 3 におけるアルゴリズムのパラメータ設定

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_{a1} [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	閾値 T_h	5, 10, 15
ABC	観測 MU 数 N	7, 10, 30

れている。

5.5 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

表 5.6 五段階妨害尺度

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

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 [85] を採用し、評価尺度として MOS (Mean Opinion Score) [85] 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 1kHz と高いため、ネットワーク遅延揺らぎの影響で、MU の順番が入れ替わり、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 10ms 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 5.6 [85] 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、一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 1 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。

5.6 評価結果と考察

本節では、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。

5.6.1 作業 1

5.6.1.1 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 5.10 に示す。この図には 95% 信頼区間も示されている。図 5.10 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。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 5.10 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わかる。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 [24]。

(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 5.11 に示す。この図には 95% 信頼区間も示されている。図 5.11 の各アルゴリズムに対する結果は、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 5.11 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 Mbps より大きく、2.00 Mbps 程度より小さいときに、ABC のそれより高いことがわかる。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 6.4ms 以下であった。この値は、NIST Net を用いる場合で、標準偏差を 0ms 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。

5. 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 5.12 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 5. 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 5.12 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わかる。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 5.13 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 5. 6. 1. 1(b) と同じである。

図 5.13 では、SPIADR-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 5.11) とほぼ同じ傾向にある。

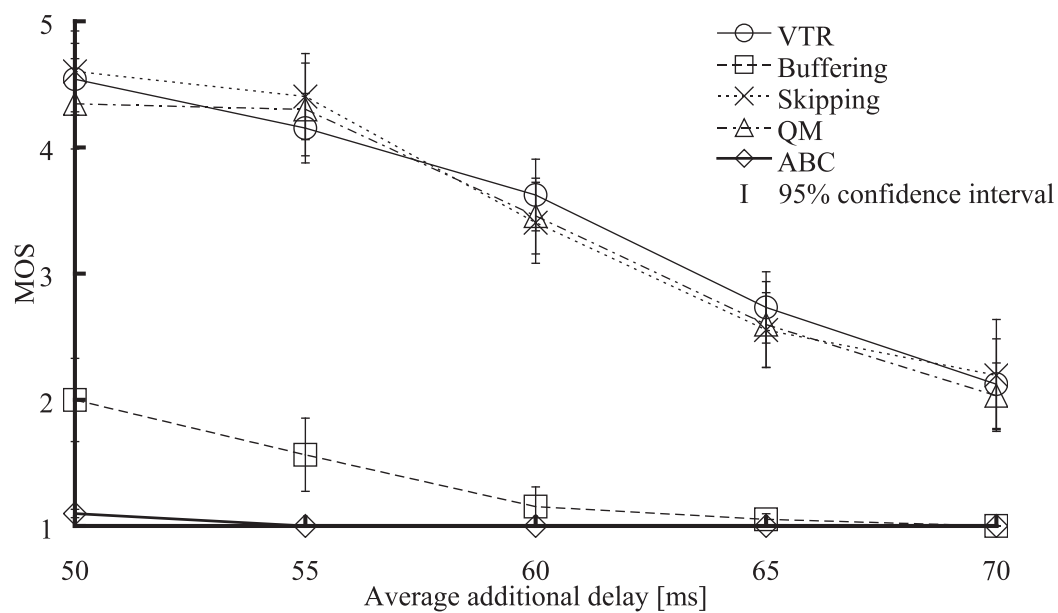


図 5.10 作業 1(a) の MOS (PHANToM DESKTOP)

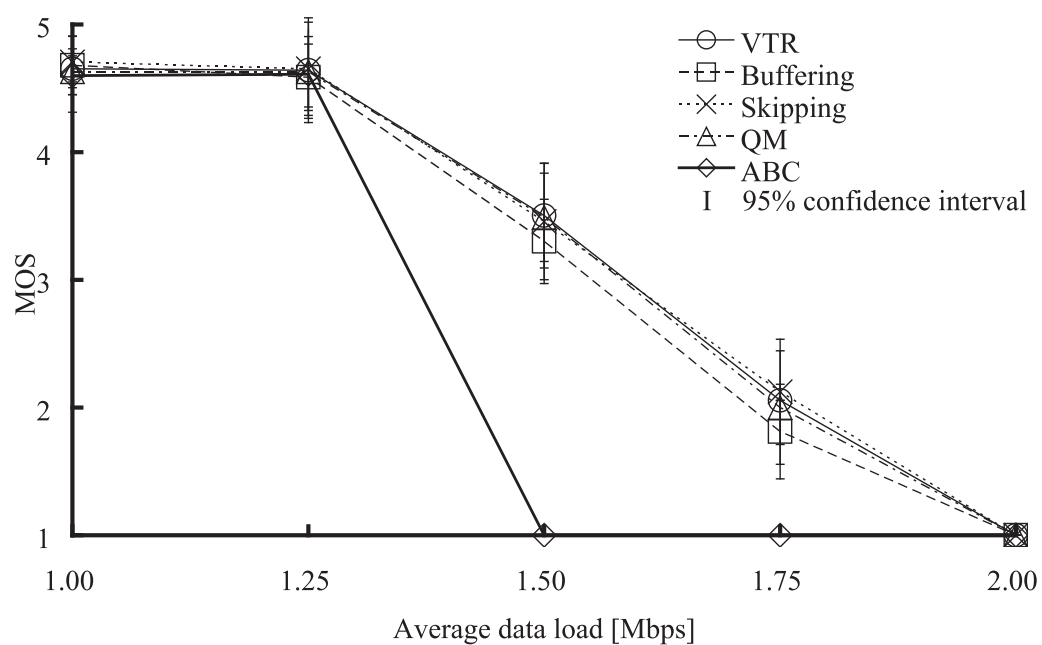


図 5.11 作業 1(b) の MOS (PHANToM DESKTOP)

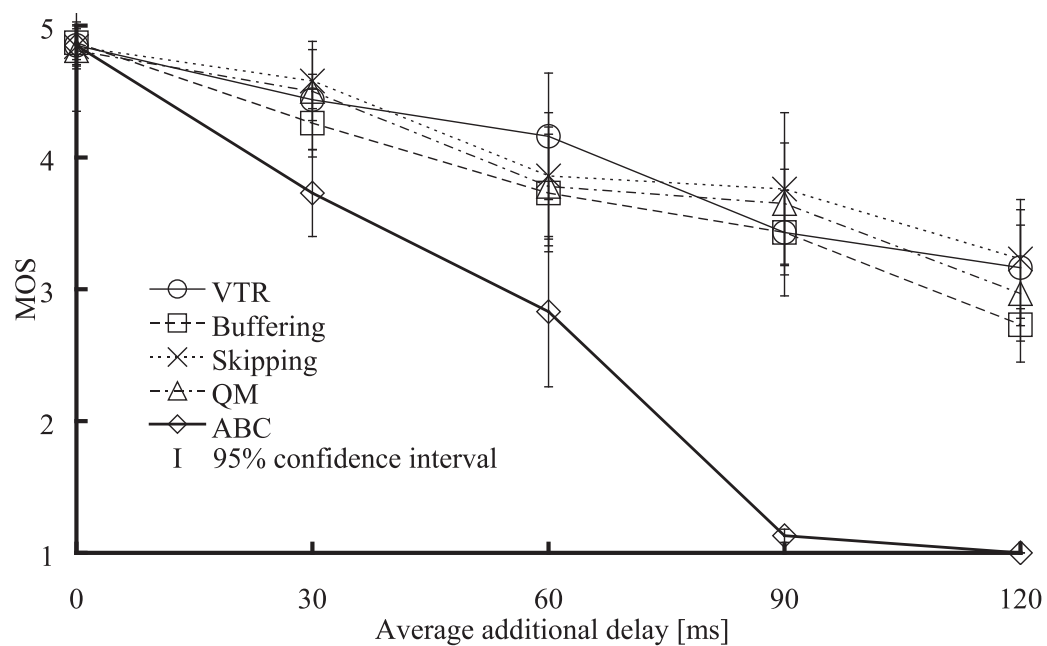


図 5.12 作業 1(a) の MOS (SPIDAR-G AHS)

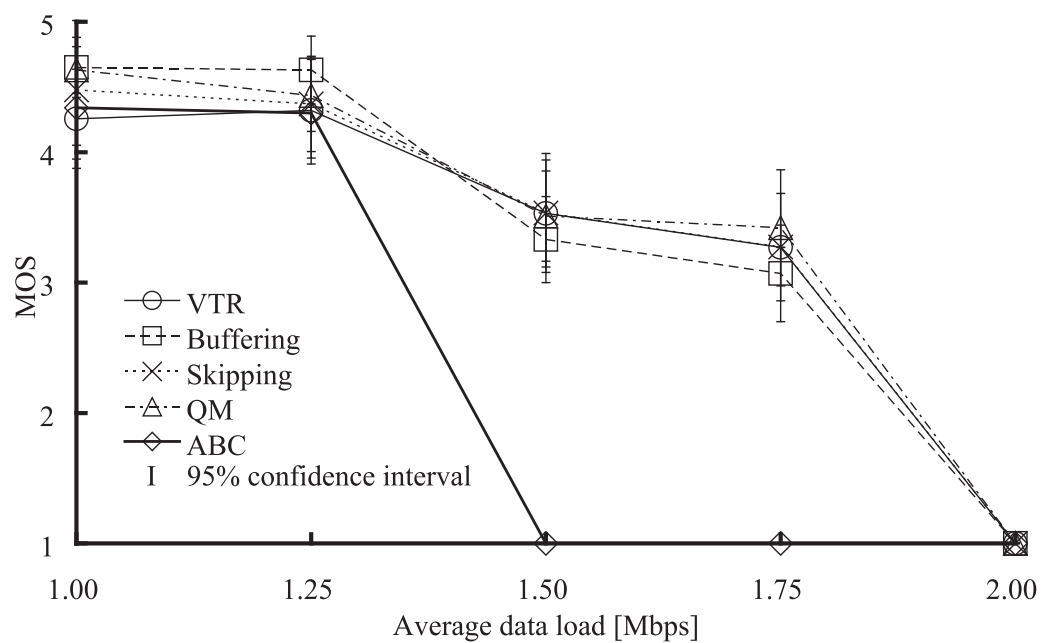


図 5.13 作業 1(b) の MOS (SPIDAR-G AHS)

5. 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 5.14 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 5. 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 5.14 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わかる．また，図 5.14 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 5.10) とほぼ同じ傾向にあることがわかる．

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関らずほぼ同じ傾向にあることがわかる．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．従って，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 5.15 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 5. 6. 1. 1(b) と同じである．

図 5.15 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 5.11) 及び作業 1(b) の SPIADR-G AHS の場合の MOS (図 5.13) とほぼ同じ傾向にあることがわかる．

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わかる．

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 5.10, 5.12, 5.14 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

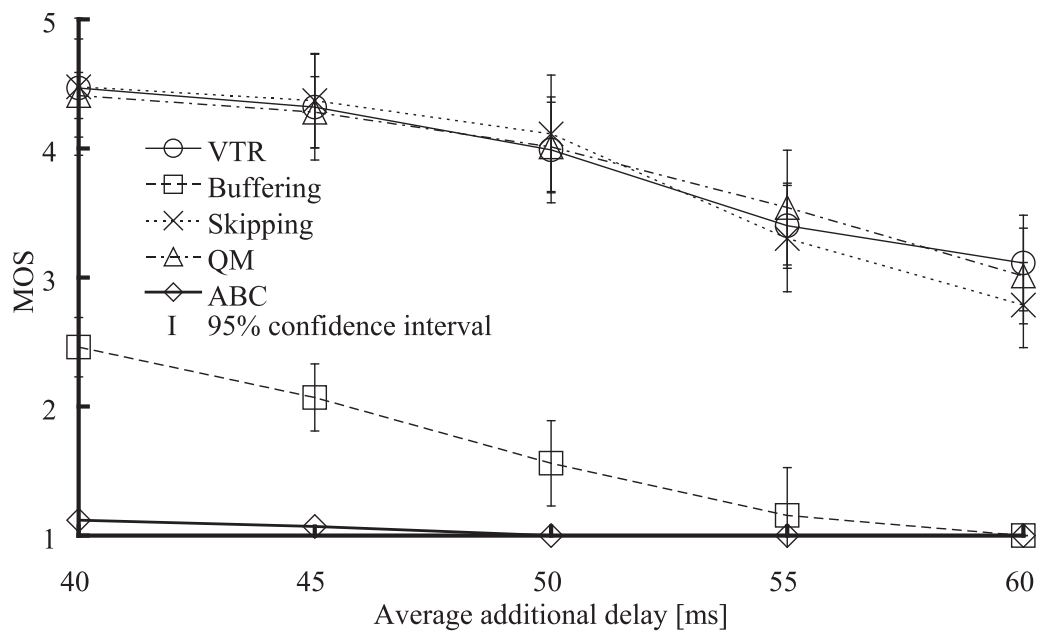


図 5.14 作業 1(a) の MOS (Falcon)

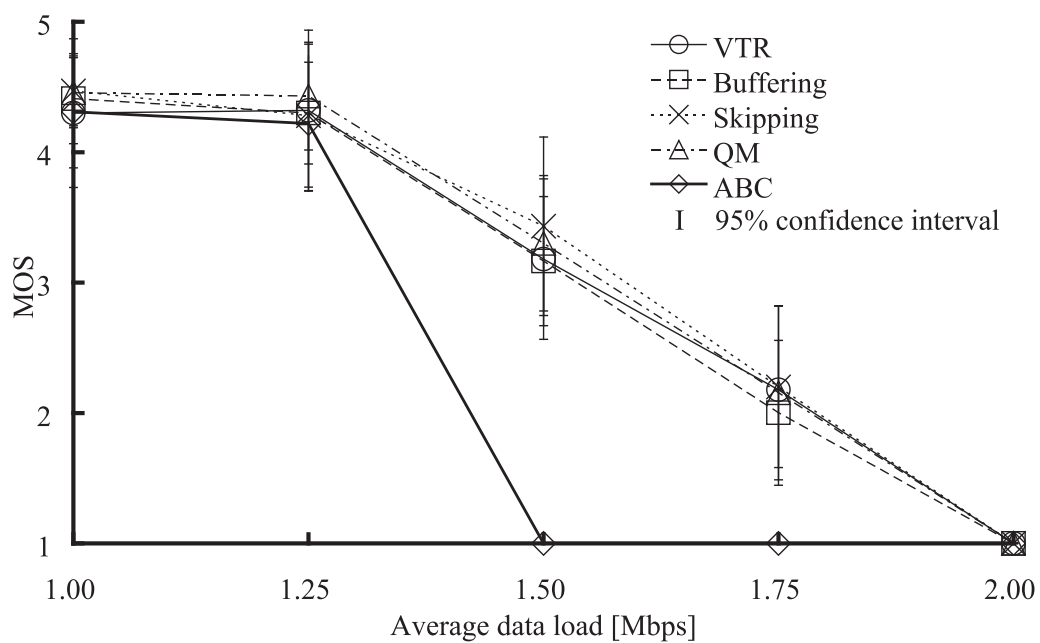


図 5.15 作業 1(b) の MOS (Falcon)

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わかる. 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わかる. 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 [102] 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.

5.6.2 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 5.16 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 5.16 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 であることがわかる. 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^{*2} より有効であり, 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 5.17 に示す. 図 5.17 から, 五つのアルゴリズムの MOS はほぼ同じであることがわかる. 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 5.16 と図 5.17 からわかる. なお, 観測されたネットワーク遅延の標準偏差は 8ms 以下であった. この値は, NIST Net を用いる場合で, 標準偏差を 0ms 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.

^{*2} 作業 2 の QM では, 閾値 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. 従って, QM の振舞は 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.

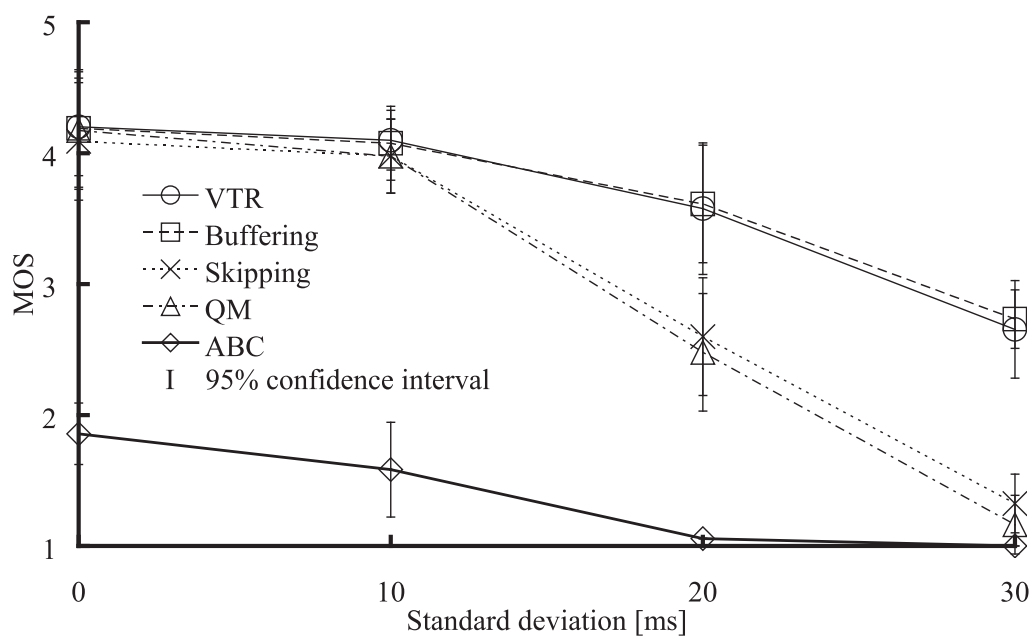


図 5.16 作業 2(a) の MOS

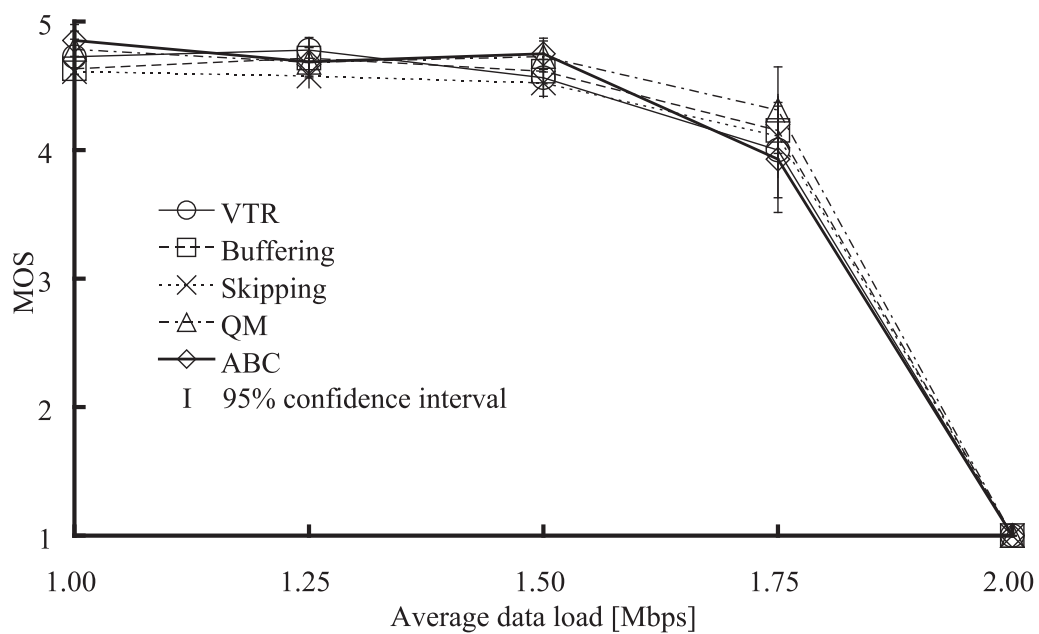


図 5.17 作業 2(b) の MOS

5.6.3 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 5.18 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 5.18 から, 付加遅延の標準偏差が約 0ms 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わかる. 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 5.19 に示す. 図 5.19 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 が最も小さい傾向にあることがわかる. 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 5.18 と図 5.19 からわかる. 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 12ms 以下であった. この値は, 標準偏差を 0ms 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.

5.6.4 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持ち, 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持ち, また, 作業 1(b) では, VTR, Buffering, Skipping 及び QM の出力品質が最も高い. さらに, 作業 2(a) の場合には, VTR と Buffering が最も高い出力品質を持ち, 作業 2(b) では, 五つの同期アルゴリズム

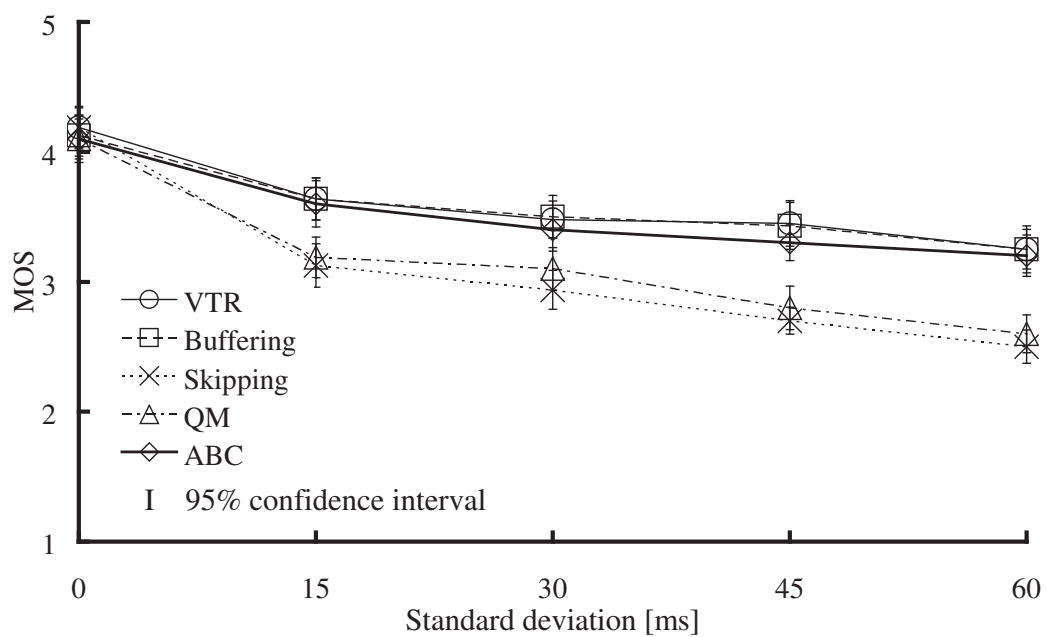


図 5.18 作業 3(a) の MOS

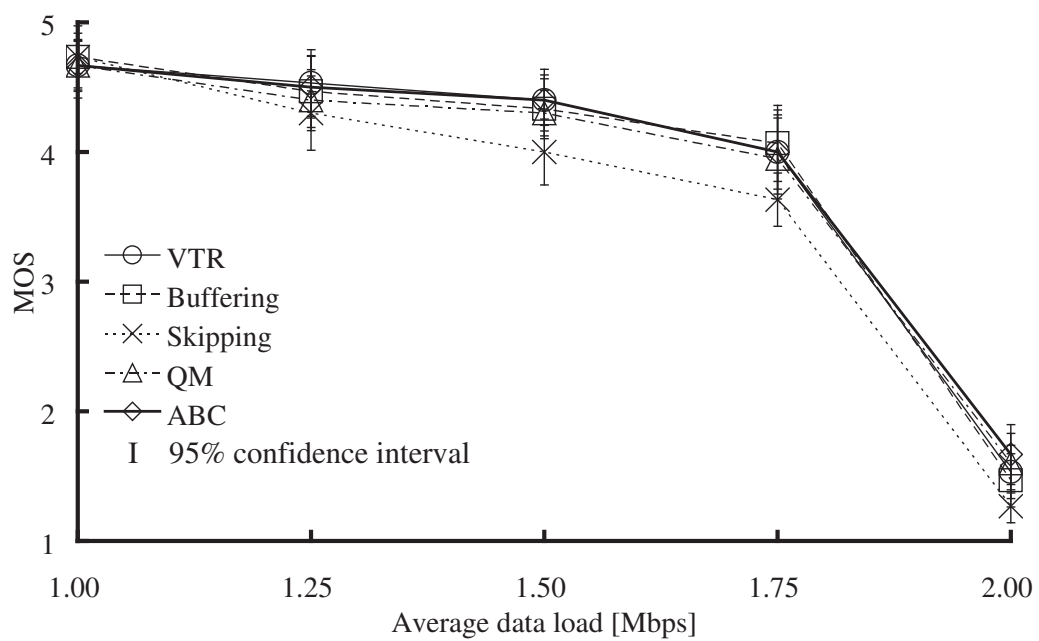


図 5.19 作業 3(b) の MOS

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持つ。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。従って、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。5.2 節で述べたように、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 [24] を採用し、作業 2 では追従率 [53] を、作業 3 では文字の欠損率 [60] 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、この値が小さい程、作業効率がよい。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) [53] 以内に納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。

5.7 むすび

本章では、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持ち、SPIDAR-G AHS を使用する場合においては、VTR, Buffering, Skipping 及び QM が最も高い出力品質を持つことがわかった。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持つ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 を用いた遠隔描画教示) 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教示) 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。さらに、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。この他、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なかで、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わかった。

今後の課題として、本章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、本章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。

第 6 章

結論

本論文では、IP ネットワークにおける視覚・力覚メディアを用いたアプリケーションの QoS 制御を扱い、QoS 制御としてメディア同期制御、トラヒック制御、及び誤り制御を検討した。

第 2 章では、iSCSI を用いたシンクライアントにおけるビデオ再生において、ネットワーク遅延及びパケット欠落がビデオ再生品質に及ぼす影響を調査した。また、伝送速度、ビデオの平均ビットレート、ファイル読み出しのブロックサイズ、TCP のパラメータである受信ウィンドウサイズ、受信側の動画再生プログラムのパラメータであるバッファサイズの影響も調べた。その結果、次の結論が得られた。

- 付加遅延の影響などにより、ビデオの平均ビットレート以上の転送速度が得られない場合には、ビデオ再生品質が大きく低下する。
- 付加遅延によりビデオ再生品質が悪化した状態では、受信ウィンドウサイズを読み出しブロックサイズよりも大きくすることにより、付加遅延の影響を受けにくくなる。
- パケット欠落率が約 1.0% を超えると、ビデオ再生品質が大きく悪化する。
- パケット欠落によりビデオ再生品質が悪化した場合において、読み出しブロックサイズが大きくすることにより、ビデオ再生品質の悪化を小さくできる。
- スループットに応じて動的にビデオの平均ビットレートを調整 (動的レート制御) することにより、ビデオ再生品質を高く維持できる可能性がある。

第 3 章では、iSCSI を用いたシンクライアントにおけるビデオ再生において、推定したスループットを利用して転送するビデオのビットレートを変更する動的レート制御を提案した。そして、動的レート制御を用いると、データ転送速度が低下してもビデオが途切れ

ないことを，iSCSI を用いたビデオ再生実験により検証した．得られた結論は，以下の通りである．

- iSCSI を用いたビデオ再生実験により，動的レート制御を用いることにより，動的レート制御を用いないときと比べて，負荷の種類によらず主観評価品質を高く維持できる．
- 新たに考案した，制御ファイルを用いる方式を用いることで，動的レート制御において読み出す必要のあるファイルをより小さくできる．

第 4 章では，指導者が遠隔地にいる学習者に力覚を伝えながら文字や図形の描き方を教示する，力覚を利用した遠隔描画教示と遠隔習字を対象とし，重要度を考慮した誤り制御方式を提案した．その方式は，運筆が速い場合の位置情報を含む MU を重要な MU とみなし，その MU に対してのみ，誤り制御を行う．誤り制御には，各 MU を 2 度送信する Replication，XOR 演算やリードソロモン符号を用いた FEC などを採用した．その結果，提案方式の有効性が次の結論から示された．

- 誤り制御を行うことにより，誤り制御を行わないときよりもメディア出力品質を高く維持できる．
- 重要度を考慮した誤り制御を用いることで，重要度を考慮しない誤り制御を用いたときに近いメディア出力品質をわずかなトラヒック量の増加で達成できる．
- 客観評価の結果から主観評価結果が高精度に推定可能である．

第 5 章では，5 種類の力覚メディア内同期アルゴリズム (VTR, Buffering, Skipping, QM 及び ABC) を扱った．そして，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．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において，主観評価から次のような結論を得た．

- NIST Net を用いるとき，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 の出力品質が最も高い．また，SPIDAR-G AHS を使用する場合においては，VTR, Buffering, Skipping 及び QM の出力品質が最も高い．また，Falcon を用いる場合においては，VTR, Skipping 及び QM の出力品質が最も高い．
- ルータを用いた実験システムにおいて，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．

遠隔描画教示において、主観評価から次のような結論を得た。

- NIST Net を用いるとき、VTR と Buffering の出力品質が最も高い。
- ルータを用いるとき、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。

遠隔習字において、主観評価から次のような結論を得た。

- NIST Net を用いるとき、VTR, Buffering と ABC の出力品質が最も高い。
- ルータを用いるとき、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が、五つのアルゴリズムのなかで、Skipping の MOS が最も小さい傾向にある。
- VTR は、いずれの作業においても最も優れている。

これらの結果から、以下の結論を得た

- VTR は、いずれの作業においても最も優れている。

iSCSI を用いたビデオ再生に関して残された課題としては、以下のようなものがある。

- 他のビデオコンテンツを用いるときの動的レート制御の有効性の確認。
- 3 種類以上のビデオを用いるときの動的レート制御の有効性の確認。
- 他の符号化方式を用いたビデオファイルの切り替え方法の検討。
- T_{interval} , T_{period} の最適値の決定方法の明確化。
- 被験者の年齢と性別の多様化。

力覚メディア通信に関する今後の課題としては、以下のものが挙げられる。

- 今回扱った作業とは異なる作業における重要度を考慮した誤り制御の有効性の確認。
- 今回扱った作業とは異なる作業における力覚メディア内同期アルゴリズムの出力品質の比較。
- 今回用いられた触覚インタフェース装置以外の装置を用いたときの力覚メディア内同期アルゴリズムの出力品質の比較。

また、以下に挙げるものも今後の課題である。

- マネージド IP ネットワークを用いたときの、提案した QoS 制御の有効性の検討と評価。

謝辞

本研究において，熱心にご指導並びにご助言をいただいた石橋 豊教授に心から深く感謝いたします．また，ご助言をいただきました田坂 修二教授及び高橋 直久教授に深く感謝いたします．さらに，御討論いただいた菅原 真司准教授に感謝いたします．

実験プログラムの作成に関してご協力いただいた石橋・菅原研究室の勇 雅人君，黒川 陽一君，藤本 猛君，孫 樹春君に感謝します．最後に，日頃お世話になりました，その他関係各位に感謝いたします．

参考文献

- [1] 内野 雅司, 舟城 亮一, 遠藤 隆久, “PC クライアントのセキュアな環境を実現する FlexClient,” 東芝レビュー, vol. 62, no. 10, pp. 58-61, Oct. 2007.
- [2] 關 信彦, “マルチメディアネットワーク環境におけるシンククライアント関連技術の動向: Linux ベースシンククライアントについて,” 信学技報, CQ2006-50 Sep. 2006.
- [3] 川島 博幸, 小柴 国博, 土持 和記, 二村 和宏, 榎本 雅彦, 渡辺 正泰, “仮想 PC 型シンククライアントシステム,” NEC 技報, vol. 60, no. 3, pp. 52-56, July 2007.
- [4] 嵯峨 智, 川上 直樹, 舘 日章, “力覚の主体性を活用した教示手法に関する研究,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 10, No. 3, pp. 363-369, Mar. 2005.
- [5] O. Wongwirat and S. Ohara, “Haptic media synchronization for remote surgery through simulation,” IEEE Multimedia, vol. 13, no. 3, pp. 62-69, July-Sep. 2006.
- [6] 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.
- [7] M. A. Srinivasan and C. Basdogan, “Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges,” Computers and Graphics, vol. 21, no. 4, pp. 393-404, Apr. 1997.
- [8] ITU-T Recommendation G.114, “International telephone connections and circuits . General Recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection: One-way transmission time,” May 2003.
- [9] 小森 優, 吉田 隆太, 湊 小太郎, 菅 幹生, 松田 哲也, 高橋 隆, “医用 VR システムにおける反力反応の及ぼす影響の定量測定,” 第 39 回日本 ME 学会大会, 2H1-4, May 2000.
- [10] S. Matsumoto, I. Fukuda, H. Morino, K. Hikichi, K. Sezaki, and Y. Yasuda, “The influence of network issues on haptic collaboration in shared virtual envi-

- ronments,” Proc. the Fifth PHANToM User Group Workshop, Oct. 2000.
- [11] 阿部 威郎, 石橋 豊, 吉野 秀明, “次世代のサービス品質技術動向,” 信学会誌, vol. 91, no. 2, pp. 82-86, Feb. 2008.
 - [12] 田坂 修二, 石橋 豊, “分散マルチメディアアプリケーションにおける QoS と QoS マッピング,” 信学技報, CQ2001-40, July 2001.
 - [13] 石橋 豊, 田坂 修二, “分散マルチメディアアプリケーションにおけるメディアの時間構造と QoS,” 信学誌, vol. 87, no. 3, pp. 220-226, Mar. 2004.
 - [14] 田坂 修二, “情報ネットワークの基礎,” 数理工学社, 2003.
 - [15] 高田 久靖, 笠原 久嗣, “インターネットにおけるビデオストリーミング技術,” 信学技報, IE98-70, vol. 98, no. 364, pp. 11-17 Oct. 1998.
 - [16] 公森 義貴, 笠原 正治, 杉本 謙二, “エンドユーザレベルの QoS を考慮したストリーミング配信用動的レート制御方式の検討,” 信学技報, IN2003-287, vol. 103, no. 692, pp. 191-194, Feb. 2004.
 - [17] 酒澤 茂之, 宮地 悟史, 滝嶋 康弘, 和田 正裕, “TCP ビデオストリーミングの動的レート制御方式の検討,” 映情学技報, BCS2002-58, vol. 26, no. 77, pp. 19-24, Nov. 2002.
 - [18] リアルネットワークス社, “SureStream について,”
<http://service.jp.real.com/help/faq/surestream.html>.
 - [19] Microsoft Corporation, “マルチビット レートのビデオ,”
http://www.microsoft.com/windows/windows2000/ja/advanced/help/ns.tools_concepts_rsaq.htm?id=4810.
 - [20] G. Carle and E. W. Biersack, “Survey of error recovery techniques for IP-based audio-visual multicast applications,” IEEE Network, vol. 11, no. 6, pp. 24-36, Nov./Dec. 1997.
 - [21] A. S. Tanenbaum, “Computer Networks,” Prentice Hall, Mar. 1996.
 - [22] Z. Cen, M. W. Mutka, D. Zhu, and N. Xi, “Supermedia transport for teleoperations over overlay networks,” Proc. 4th International IFIP-TC6 Networking Conference, pp. 1409-1412, May 2005.
 - [23] 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「教育・訓練」特集号, vol. 11, no. 4, pp. 459-467, Dec. 2006.
 - [24] Y. Ishibashi, S. Tasaka, and T. Hasegawa, “The virtual-time rendering algorithm for haptic media synchronization in networked virtual environments,”

- Proc. the 16th International Workshop on Communications Quality and Reliability (CQR'02), pp. 213-217, May 2002.
- [25] K. Hikichi, H. Morino, Y. Yasuda, I. Arimoto, and K. Sezaki, "The evaluation of adaptive control for haptics collaboration over the Internet," Proc. the 16th International Workshop on Communications Quality and Reliability (CQR2002), pp. 218-222, May 2002.
 - [26] J. K. Salisbury and M. A. Srinivasan, "Phantom-based haptic interaction with virtual objects," IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 17, no. 5, pp. 6-10, Sep./Oct. 1997.
 - [27] SensAble Technologies, Inc., "GHOST SDK programmer's guide," Version 3.0, 2004.
 - [28] SensAble Technologies, Inc., "3D SDK OpenHaptics Toolkit programmer's guide," Version 1.0, 2004.
 - [29] 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.
 - [30] Novint Technologies, Inc., "HDAL programmer's guide," Version 1.1.0 Beta, 2007.
 - [31] 福田 一郎, 松本 壮樹, 引地 謙治, 森野 祐直, 瀬崎 薫, 安田 靖彦, "触覚デバイスを用いたコラボレーションにおけるメディア同期," 信学技報, IN2000-126, CQ2000-50, Nov. 2002.
 - [32] 有本 勇, "触覚デバイスの概要と触覚通信システムの問題点," サイバービジネス研究会資料, Aug. 2001.
 - [33] 望月 要, 山崎 聡, 大西 仁, 中村 直人, 結城 暁曠, "力覚ディスプレイがユーザに与える感覚の心理物理学的検討," 信学技報, NS2003-190, CQ2003-107, TM2003-68, Nov. 2003.
 - [34] Y. Ishibashi, T. Kanbara, T. Hasegawa, and S. Tasaka, "Traffic control of haptic media in networked virtual environments," Proc. IEEE KMN'02, pp. 11-16, July 2002.
 - [35] M. Sato, "Development of string-based force display: SPIDAR," Proc. VSMM'02, pp. 775-782, Sep. 2002.
 - [36] 藤田 欣也, "グローブ型仮想物体硬さ感覚呈示装置の試作と評価," 信学論 (D), vol. J81-D-II, no. 10, pp. 2394-2400, Oct. 1998.

- [37] H. Iwata, H. Yano, F. Nakaizumi, and R. Kawamura, "Project FEELEX: Adding haptic surface to graphics," Proc. ACM SIGGRAPH'01, pp. 469-475, 2001.
- [38] Y. Ikei, K. Wakamatsu, and S. Fukuda, "Texture display for tactile sensation," Proc. 7th International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 961-964, Aug. 1997.
- [39] J. Postel, "Internet Protocol," RFC 791, Sep. 1981.
- [40] 青木 利晴, 宮内 充, 田中 千速, 河西 宏之, "インターネット & 情報スーパーハイウェイ," オーム社, 1995.
- [41] J. Postel, "Transmission Control Protocol," RFC 793, Sep. 1981.
- [42] J. Satran, K. Meth, C. Sapuntzakis, M. Chadalapaka, and E. Zeidner, "Internet Small Computer Systems Interface (iSCSI)," RFC3720 Apr. 2004.
- [43] American National Standard for Information Technology, "Working Draft SCSI Architecture Model - 5 (SAM-5)," T10/2104-D Revision 01, Jan. 2009.
- [44] G. Blakowski and R. Steinmetz, "A media synchronization survey: Reference model, specification, and case studies," IEEE J. Sel. Areas in Commun, vol. 14, no. 1, pp. 5-35, Jan. 1996.
- [45] 田坂 修二, "ネットワーク環境におけるメディア同期," 信学誌, vol. 84, no. 3, pp. 177-183, Mar. 2001.
- [46] Y. Ishibashi and S. Tasaka, "A comparative survey of synchronization algorithms for continuous media in network environments," Proc. IEEE LCN'00, pp. 337-348, Nov. 2000.
- [47] Y. Ishibashi, A. Tsuji, and S. Tasaka, "A group synchronization mechanism for stored media in multicast communications," Proc. IEEE INFOCOM'97, pp. 693-701, Apr. 1997.
- [48] J. Escobar, C. Partridge, and D. Deutsch, "Flow synchronization protocol," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 2, no. 2, pp. 111-121, Apr. 1994.
- [49] I. F. Akyildiz and W. Yen, "Multimedia group synchronization protocol for integrated services networks," IEEE J. Sel. Areas in Commun., vol. 14, no. 1, pp. 162-173, Jan. 1996.
- [50] Y. Ishibashi and S. Tasaka, "A synchronization mechanism for continuous media in multimedia communications," Proc. IEEE INFOCOM'95, pp. 1010-1019, Apr. 1995.

- [51] Y. Ishibashi and H. Kaneoka, "Group synchronization for haptic media in a networked real-time game," *IEICE Trans. Commun., Special Section on Multimedia QoS Evaluation and Management Technologies*, vol. E89-B, no. 2, pp. 313-319, Feb. 2006.
- [52] M. C. Lin, W. V. Baxter, V. E. Scheib, and J. D. Wendt, "Physically based virtual painting," *Communications of the ACM*, vol. 47, no. 8, pp. 41-47, Aug. 2004.
- [53] 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, Sep. 2007.
- [54] T. Asano, Y. Ishibashi, and S. Kameyama, "Interactive haptic transmission for remote control systems," *Proc. IEEE ICME'06*, pp. 2113-2116, July 2006.
- [55] 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, Apr. 2006.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] T. Fujiura, M. Isamu, and Y. Ishibashi, "Influences of network latency and packet loss on video-playback quality in iSCSI system," *Proc. SPIE Optics East, Multimedia Systems and Applications X*, vol. 6777, no. 10, Sep. 2007.
- [59] 藤浦 豊徳, 勇 雅人, 石橋 豊, "iSCSI を用いたビデオ再生のための動的レート制御," *電気学会論文誌 (C)*, vol. 129, no. 8, Aug. 2009.
- [60] 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, Sep. 2008.
- [61] 藤浦 豊徳, 孫 樹春, 藤本 猛, 石橋 豊, "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," *信学論 (B)*, vol. J92-B, no. 7, July 2009.
- [62] 高崎 達哉, "シンククライアントの仕組みを探る," *ZDNet Japan*, Oct. 2005, <http://japan.zdnet.com/sp/feature/netsecurity1/story/0,2000056696,20087694,00.htm>.

- [63] 市川 俊一, 岡 順一, 鷺坂 光一, “iSCSI を活用したシンクライアント PC システム STRAGEX,” 先進的計算基盤システムシンポジウム SACSIS2006, May 2006.
- [64] 野口 清広, 市川 俊一, 鷺坂 光一, 三栄 武, “ストレージセントリックネットワーク技術,” 信学誌, vol. 89, no .11, pp. 954-961, Nov. 2006.
- [65] NTT-IT 社 Shared PC ホームページ,
<http://www.ntt-it.co.jp/goods/ssj/spc/index.html>.
- [66] R. J. Recio, “Server I/O networks past, present, and future,” Proc. ACM SIGCOMM’03 workshop on Network-I/O convergence, pp. 163-178, Aug. 2003.
- [67] M. Chadalapaka, U. Elzur, M. Ko, H. Shah, and P. Thaler, “A study of iSCSI extension for RDMA (iSER),” Proc. ACM SIGCOMM’03 workshop on Network-I/O convergence, pp. 209-219, Aug. 2003.
- [68] Y. Lu and D. H. C. Du, “Performance study of iSCSI-based storage subsystems,” IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 8, pp. 76-82, Aug. 2003.
- [69] 豊田 真智子, 山口 実靖, 小口 正人, “複数台 iSCSI Initiator を用いた高遅延ネットワーク環境における TCP 輻輳ウィンドウ制御手法の性能評価,” 第 17 回電子情報通信学会データ工学ワークショップ (DEWS’06) 論文集, 7C-o4, Mar. 2006.
- [70] 布目 敏郎, 田坂 修二, 石橋 豊, “蓄積メディアストリーミング技術の性能比較,” 信学論 (B), vol. J83-B, no. 6, pp. 824-835, June 2000.
- [71] Internet Activities Board, “Protocol standard for a NetBIOS service on a TCP/UDP transport: Detailed specification,” RFC1002, Mar. 1987.
- [72] P. Leach and D. Perry, “CIFS: A Common Internet File System,” Microsoft Internet Developer, Nov. 1996.
- [73] ISO/IEC 11172: “International Standard MPEG-1 Video,” 1993.
- [74] Windows Media Player ホームページ,
<http://www.microsoft.com/japan/windows/windowsmedia/default.msp>.
- [75] M. Carson and D. Santay, “NIST Net - A Linux-based network emulation tool,” ACM SIGCOMM, vol. 33, no. 3, pp. 111-126, July 2003.
- [76] Microsoft Corp., “Microsoft iSCSI Software Initiator Version 2.2,” 2005,
<http://www.microsoft.com/windowsserver2003/technologies/storage/iscsi/msfiSCSI.msp>.
- [77] The iSCSI Enterprise Target Project, iscsitarget-0.4.12,
<http://iscsitarget.sourceforge.net/>.
- [78] The official SAMBA site, <http://us2.samba.org/samba/>.

- [79] M. Allman, V. Paxson and W. Stevens, “TCP congestion control,” RFC2581, Apr. 1999.
- [80] 藤浦 豊徳, 野瀬 昌禎, 石橋 豊, “ディスクレスシステム STRAGEX への無線 LAN の適用,” 平 18 信学ソ大, B-5-104, pp. 464, Sep. 2006.
- [81] 後藤 和弘, 江原 裕幸, 中川 俊哉, 千葉 大作, “自治体におけるオープンソースソフトウェア活用に向けての導入実証,” 月刊 LASDEC, vol. 36, no. 12, pp. 44-52, Dec. 2006.
- [82] V. Jacobson, “Compressing TCP/IP Headers,” RFC1144 Feb. 1990.
- [83] D. Rand, “PPP Predictor Compression Protocol,” RFC1978, Aug. 1996.
- [84] R. Friend and W. Simpson, “PPP Stac LZS Compression Protocol,” RFC1974, Aug. 1996.
- [85] International Telecommunication Union: “Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures,” ITU-R Recommendation BT.500-11 June 2002.
- [86] 市川 明男, 新名 崇, 山岡 克式, 酒井 善則, “ネットワーク上での MPEG ビデオ伝送における時空間解像度の変更方式,” 信学ソ大, D-11-61, p. 176, Sep. 1998.
- [87] MindCraft Inc., “WebStone,” <http://www.mindcraft.com/webstone/>.
- [88] M. A. Srinivasan and C. Basdogan, “Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges,” Computers and Graphics, vol. 21, no. 4, pp. 393-404, Apr. 1997
- [89] 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.
- [90] G. Carle and E. W. Biersack, “Survey of error recovery techniques for IP-based audio-visual multicast applications,” IEEE Network, vol. 11, no. 6, pp. 24-36, Nov./Dec. 1997.
- [91] S. Shirmohammadi and N. D. Georganas, “An end-to-end communication architecture for collaborative virtual environments,” ACM Computer Networks, vol. 35, issues 2-3, pp. 351-367, Feb. 2001.
- [92] S. Dodeller and N. D. Georganas, “Transport layer protocols for telehaptics update messages,” Proc. 22nd Biennial Symposium on Communications, June 2004.
- [93] S. Lee, S. Moon, and J. Kim, “Performance evaluation of transport protocols for networked haptic collaboration,” Proc. SPIE Optics East, Multimedia Systems

- and Applications IX, vol. 6391, no. 9, Oct. 2006.
- [94] 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.
 - [95] SensAble Technologies, Inc., “3D Touch SDK OpenHaptics Toolkit programmer’s guide,” Version 1.0, 2004.
 - [96] “Paretonormal distribution table generator,” <https://svn.openfabrics.org/svn/openib/gen2/branches/1.1/src/userspace/ipoibtools/iproute2/netem/paretonormal.c>.
 - [97] 續木 湖山, “新毛筆書写辞典,” 教育出版株式会社, June 1979.
 - [98] 梅原 清山, 山内 觀, “読売書法講座 10 教育書,” 読売新聞社, Mar. 1993.
 - [99] S. K. Singhal and D. R. Cheriton, “Using a position history-based protocol for distributed object visualization,” Technical Report, Stanford University, Department of Computer Science, 1994.
 - [100] Y. Ishibashi, T. Hasegawa, and S. Tasaka, “Group synchronization control for haptic media synchronization in networked virtual environments,” Proc. the 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (Haptics’04), pp. 106-113, Mar. 2004.
 - [101] 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.
 - [102] 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,” 平 20 信学総大, B-11-3, Mar. 2008.