

力覚及び嗅覚を利用した分散仮想環境における
サービス品質制御とユーザ体感品質評価
に関する研究

QoS Control and QoE Assessment
in Networked Virtual Environments
Using Haptic Sense and Olfaction

2013年

黄 平国

Huang Pingguo

目次

第1章	序論	1
1.1	分散仮想環境	2
1.2	力覚及び嗅覚を利用した分散仮想環境	2
1.3	力覚メディア	2
1.3.1	力覚メディアの特徴	2
1.3.2	触覚インタフェース装置	3
1.4	嗅覚メディア	5
1.4.1	嗅覚メディアの特徴	5
1.4.2	嗅覚ディスプレイ	5
1.5	サービス品質 (QoS)	6
1.6	QoS 制御	6
1.6.1	メディア同期制御	6
1.6.2	予測制御	7
1.7	ユーザ体感品質 (QoE)	8
1.7.1	主観評価	8
1.7.2	客観評価	8
1.7.3	主観評価と客観評価の関係	9
1.8	本論文の目的と構成	9
第2章	力覚を利用した協調作業におけるネットワーク遅延の影響	11
2.1	まえがき	11
2.2	協調作業	12
2.3	システムモデル	13
2.4	評価環境	15
2.4.1	評価システム	15
2.4.2	評価方法	16
2.5	評価結果と考察	16
2.6	むすび	17
第3章	力覚を利用した積み木遊びにおけるネットワーク遅延及びパケット欠落の影響	20

3.1	まえがき	20
3.2	協調作業による積み木遊び	20
3.2.1	積み木の家を積み上げる作業	21
3.2.2	積み木を運ぶ作業	22
3.3	システムモデル	22
3.4	評価環境	24
3.4.1	評価システム	24
3.4.2	評価方法	24
3.5	評価結果と考察	27
3.5.1	ネットワーク遅延の影響	28
3.5.2	パケット欠落の影響	30
3.6	むすび	30
第4章	力覚を利用した作業における予測を用いた端末間同期制御の効果	36
4.1	まえがき	36
4.2	力覚を利用した作業	37
4.3	予測を用いた端末間同期制御	39
4.4	評価環境	41
4.4.1	評価システム	41
4.4.2	評価方法	42
4.5	評価結果と考察	45
4.5.1	遠隔描画教示	45
4.5.2	積み木遊び	47
4.6	むすび	48
第5章	嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花における香り空間の大きさの影響	55
5.1	まえがき	55
5.2	嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花	56
5.3	システムモデル	59
5.4	評価環境	60
5.4.1	評価システム	60
5.4.2	評価方法	60
5.5	評価結果と考察	62
5.6	むすび	64
第6章	嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花における香りの動的出力タイミング制御の効果	66
6.1	まえがき	66
6.2	香りの動的出力タイミング制御	66
6.3	評価環境	69
6.3.1	評価システム	69

6.3.2	評価方法	70
6.4	評価結果と考察	70
6.5	むすび	72
第7章	結論	77
	謝辞	80
	参考文献	81

第1章

序論

近年のネットワークの普及および高速化によって、一般家庭でもネットワークを介して、ビデオや音声など様々な形態の情報を統合して扱うマルチメディア通信が広く利用されるようになってきている。また、コンピュータの高性能化によって、臨場感が高い3DCG(3-Dimensional Computer Graphics)技術がより身近なものとなってきている。そして、CGにより構築された分散仮想環境 [1]-[5] に、ビデオ、音声などのメディアを、複数の端末間でリアルタイムに転送する研究が盛んに行われている。さらに、触覚インタフェース装置 [6]-[13] や嗅覚ディスプレイ [14]-[19] の研究開発により、力覚及び嗅覚を用いた分散仮想環境の研究が活発になりつつある。力覚を用いることにより、利用者は、仮想空間内のオブジェクトの形状、重さ、弾力などを感じることができる。また、嗅覚を利用することにより、利用者は、仮想空間内の香り発生源の香りも感じることができる。そのため、遠隔医療、遠隔ロボット制御、遠隔教育、遠隔デザインなどの分野において、様々な作業に力覚や嗅覚が利用されるようになってきている [20]-[56]。また、力覚、嗅覚を従来から使われている視覚や聴覚と一緒に使うことにより、臨場感の高いコミュニケーションが可能となる [57]。本論文では、分散仮想環境において、力覚及び嗅覚を利用した作業を検討対象とする。

しかし、インターネットなどのサービス品質 (QoS: Quality of Service) [58] 保証のないネットワークを介して、力覚メディア、嗅覚メディア、ビデオやサウンドといったメディアを転送する場合、ネットワーク遅延やその揺らぎ、パケット欠落などにより、メディアの時間関係に乱れが生じ、その出力品質が大きく劣化する恐れがある [59]-[61]。これらの影響を明らかにするためには、ユーザ体感品質 (QoE: Quality of Experience) [62] 評価が重要である。また、QoEの劣化を避け、できるだけ高く維持するためには、QoS制御が必要となる。さらに、分散仮想環境において嗅覚を利用するときに、どのタイミングで香りを出力すれば良いかについては調べられていない。これは臨場感に影響を与える可能性がある。そのため、香りの出力タイミングがQoEにどのような影響を及ぼすかをQoE評価により調査し、香り出力のQoS制御を検討する必要もある。

本論文では、まず、力覚を利用した作業において、ネットワーク遅延などの影響をQoE評価により調査する。次に、力覚を利用した作業に対して、QoS制御を検討する。そして、嗅覚及び力覚を利用した作業を対象に、香りの出力タイミングがQoEに及ぼす影響を調査し、香り出力のQoS制御を検討する。

以下では、まず、1.1で分散仮想環境について述べ、1.2で力覚及び嗅覚を利用した分散仮想環境について説明する。次に、1.3と1.4でそれぞれ力覚メディアと嗅覚メディアについて紹介する。1.5ではQoS、1.6ではQoS制御について述べる。そして、1.7でQoEを説明し、最後に、1.8で本論文の目的と構成を示す。

1.1 分散仮想環境

分散仮想環境 [1] とは、ネットワークを介して接続されたコンピュータ上に構築された仮想的な環境のことである。この環境を共有することによって、利用者は、地理的に離れた場所にいる利用者間での情報交換や協調作業、リアルタイムゲームなどが可能となる。

分散仮想環境には、利用者が自分のアバタ (化身) を送り込み、仮想空間内を自由に移動し、他の利用者とコミュニケーションを取ることができるものがある [2]。現在では、よりリアルに仮想空間を表現するため、CGで構築された仮想空間に、視覚、聴覚の他に、力覚、嗅覚などの感覚を用いることにより、コミュニケーションの表現力を高める研究が行われている [57]。

1.2 力覚及び嗅覚を利用した分散仮想環境

力覚及び嗅覚を分散仮想環境に導入することにより、視覚と聴覚のみを用いる場合に比べて、作業対象に触ること、作業対象を持ち上げること、物体の香りを感じる事が可能となるため、臨場感が高くなると期待されている。さらに、その力覚情報や香り情報をメディアとして転送することで、複数の利用者が力覚情報や嗅覚情報を共有することができる。その結果として、臨場感や作業の効率や教示の効果を大幅に改善できると期待されている [57]。

力覚を利用したアプリケーションの例として、仮想空間内での遠隔手術シミュレーション [35] や、ロボットの遠隔操作 [37] などが挙げられ、遠隔地にいる意匠デザイナー、設計エンジニア、製造エンジニアなどの専門家が、仮想的に一堂に会して共同で効率よく三次元形状物体の設計、製造を行うことや、仮想博物館などがある [20]-[29]。また、嗅覚を利用したアプリケーションとしては、ゲーム [51]、料理 [52]、仮想空間システム [50] などが挙げられる。さらに、力覚と嗅覚を利用したアプリケーションについて、ゲーム [55]、仮想の企業のオフィススイート (corporate office suite) [53] などが考えられている。

本論文では、力覚を利用した作業と嗅覚及び力覚を用いた作業を対象とする。

1.3 力覚メディア

1.3.1 力覚メディアの特徴

力覚メディアは、力を伝えるための情報である。力覚メディアが、音声やビデオなどのメディアと大きく異なる点は、入力と出力が一つの触覚インタフェース装置を通じて行わ

れるという点である。また、触覚インタフェース装置 [6]-[13] より出力される力(反力)を自然に表現するためには、反力の更新を一定頻度で行う必要があり、更新レートが極めて高いという特徴がある。柔らかい物体で数 10Hz から数 100Hz、精密なモデルを再現するには数 100Hz から数 1000Hz [63] を必要とする。そのため、ネットワーク遅延やその揺らぎの影響を受けやすく、許容できる遅延を音声と比較すると、音声は 400ms 程度 [64] であるのに対し、力覚メディアは 30ms から 60ms である [65], [66]。

文献 [36], [67] 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、利用者に呈示される反力が不自然になると報告されている。文献 [33], [34] では、クライアント・サーバモデルのシステムにおいて、力覚メディアに対して、ネットワーク遅延が利用者の QoE 評価に与える影響を調査している。このように、力覚メディアは、ネットワーク遅延に弱いので、定量的に評価を行い、その特徴を調査することが必要である。

これまで、触覚インタフェース装置は様々な研究機関で別々に研究開発されており、その形態は多様である。そのため、異なる触覚インタフェース装置には互換性が少なく、力覚メディアを共有できない場合がある。そこで、文献 [68] では、触覚インタフェース装置に依存しない触覚用共通ソフトウェア HIP(Haptic Interface Platform) を用い、異なる種類の触覚インタフェース装置間で協調作業を行っている。

1.3.2 触覚インタフェース装置

触覚インタフェース装置には、大きく分けて点型、面型、テクスチャ型の三種類がある [69]。点型は、一点で仮想物体に触ったり操作することができ、面型は、対象物の凹凸を再現することができる。そして、テクスチャ型は、対象物の質感を再現することが可能である。以下に、本論文で扱っている触覚インタフェース装置について説明する。

(1) PHANToM

PHANToM [6], は、MIT(マサチューセッツ工科大学) で開発された点型の触覚インタフェース装置である。反力の計算には、Spring-Damper モデル [70] が用いられる。反力を計算するとき、PHANToM のカーソル(仮想空間内における PHANToM のスタライスの先端を表す点) と仮想空間内のオブジェクトとの接触判定を行う。接触していた場合には、反力 \mathbf{F} が次式で計算される。

$$\mathbf{F} = K_s \cdot \mathbf{x} + K_d \cdot \mathbf{v} \quad (1.1)$$

ここで、 K_s , K_d , はそれぞれスプリング係数, ダンパ係数であり、 \mathbf{x} はオブジェクトと PHANToM カーソルとの干渉深度(めり込み) のベクトル、 \mathbf{v} はカーソルとオブジェクトとの相対速度の接触面に垂直な成分である (図 1.1 参照。この図は利用者がオブジェクトをカーソルで下から持ち上げている様子を示している)。

PHANToM として、PHANToM Omni, PHANToM Desktop, PHANToM Premium 1.0 などが市販されている。第 2 章では PHANToM Desktop と PHANToM Omni を用い、第 3 章から第 6 章では PHANToM Omni を用いている。表 1.1 に PHANToM Desktop と PHANToM Omni の仕様を示す。

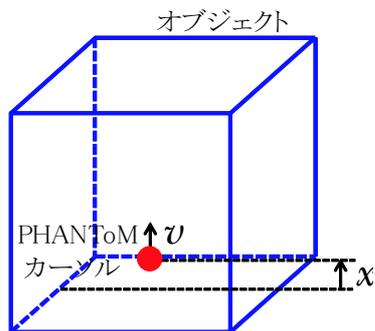


図 1.1 オブジェクトと PHANToM カーソルとの位置関係

表 1.1 PHANToM Desktop と PHANToM Omni の仕様

	PHANToM Desktop	PHANToM Omni
力覚ワークスペース	160(W) × 120(H) × 120(D)mm	160(W) × 120(H) × 70(D)mm
位置精度	1100dpi(0.023mm)	450dpi(0.055mm)
自由度	3DOF	3DOF
更新レート	1kHz	1kHz
最大呈示反力	7.9N	3.3N
連続呈示反力	1.75N	0.88N

(2) SPIDAR

SPIDAR [8] は、東京工業大学の佐藤研究室で開発された点型の触覚インタフェース装置である。立方体のフレームの四隅から、それぞれ糸が中央にある指先キャップに繋がっており、ユーザは親指から薬指までの各指先にキャップをはめ込んで操作する。指先の位置は、それぞれ糸の長さから検出され、その位置情報と仮想物体との相互関係から、指先に加えるべき反力を求める。

第2章では、SPIDAR モデルの一つである SPIDAR-G AHS[9] を用いている。この装置では、利用者の指に糸をつけるのではなく、8本の糸で吊されたグリップと呼ばれる球体を操作し、利用者は仮想空間内の物体に触ったり操作する。表 1.2 に SPIDAR-G AHS の仕様を示す。

(3) Falcon

Falcon [10] は、Novint Technologies 社が開発した点型の触覚インタフェース装置である。本体から3本のアームが伸びており、アームの先に取り付けられた球状のグリップを操作することで、ユーザは仮想オブジェクトに触れることが可能となる。第2章では、Falcon も用いている。表 1.3 に Falcon の仕様を示す。

表 1.2 SPIDAR-G AHS の仕様

	SPIDAR-G AHS
力覚ワークスペース	200(W) × 120(H) × 200(D)mm
位置精度	24bit カウンタ × 8ch
自由度	6DOF
更新レート	2kHz

表 1.3 Falcon の仕様

	Falcon
力覚ワークスペース	75(W) × 75(H) × 75(D)mm
位置精度	400 dpi より大
自由度	3DOF
更新レート	1kHz

1.4 嗅覚メディア

1.4.1 嗅覚メディアの特徴

嗅覚メディアは、匂いを伝えるための情報である。嗅覚メディアの入出力はそれぞれ匂いセンサと嗅覚ディスプレイを介して行われる。匂いセンサは、香りを客観的に計測するための機器である。匂いの構成する元素は明らかになっていないため、匂いセンサを用いて香りを客観的に分析し、その情報を基にいくつかの香りを組み合わせて香りを再現することを目的とした研究が行われており、今後の発展が期待されている [14]-[16]。嗅覚ディスプレイは、匂いを出力し、利用者に提示するための機器である。本論文では、嗅覚ディスプレイのみを扱っているため、これは次の節で詳しく説明する。

嗅覚メディアの特徴として、嗅覚ディスプレイによっては、利用者の鼻と嗅覚ディスプレイの間の距離によって、香りが利用者に届くまでの時間が変わることが挙げられる。そのため、香りが利用者に届くまでの時間が端末間で異なる。また、香りを出力する際、人が一時的に香りを感じなくなってしまう順応や、香りがその場に残留してしまう残り香が起こることがある [19]。

1.4.2 嗅覚ディスプレイ

嗅覚ディスプレイは、香りを出力し、利用者に提示するための機器である。利用者に香りを提示する方式としては、チューブを用いた方式 [16]、渦輪を用いた方式 [17]、及び送風を用いた方式 [18] がある。以下では、本論文で扱っている送風を用いた方式の装置を説明する。

送風を用いた方式は、香りを風に乗せて利用者の鼻先に届ける方式である。この方式は、チューブを用いた方式と渦輪を用いた方式と比べ、香りの届く範囲が広い利点と、香料の使用量が多く、香りがその場に残留しやすいという欠点がある。本論文で扱う SyP@D2 [18] は、この方式に属するものである。SyP@D2 は、あらかじめ本体に装着した香料カートリッジへ風を送り込むことで、香りを利用者に提示する。カートリッジは最大六つまで装着可能で、それぞれの香りを任意のタイミングで提示することができる。

1.5 サービス品質 (QoS)

QoS とは、通信におけるサービス品質を指す。QoS は、通信プロトコルと同様に、階層化されており、物理レベル、ノードレベル、ネットワークレベル、エンドツーエンドレベル、アプリケーションレベル、ユーザレベルの六つに分類している [71]。特に、サービスの最終的な受け手はユーザであるため、ユーザレベル QoS (QoE とも呼ばれる) は最も重要になる [72], [73]。

1.6 QoS 制御

力覚、嗅覚メディアなど複数のメディアをインターネットのような QoS 保証のないネットワーク介して転送する場合、ネットワーク遅延やその揺らぎ、パケット欠落などによって、メディアの時間関係が乱され、メディアの出力品質が大きく劣化し、高効率な教示や作業などができないという問題を解決するため、QoS 制御を行う必要がある。QoS 制御としては、トラフィック制御、誤り制御、メディア同期制御、因果順序制御、一貫性制御、予測制御などが挙げられる [56], [74]。ここでは、本論文扱うメディア同期制御と予測制御について、詳しく説明する。

1.6.1 メディア同期制御

メディア同期制御は、ネットワーク遅延やその揺らぎを吸収するために用いられる。メディア同期制御は、メディア内同期制御、メディア間同期制御、端末間同期制御に分けられる [75]。メディア内同期制御は、単一メディアにおいて、メディアユニット (メディア同期制御における処理単位。以下 MU と略す) 間の時間関係を維持する制御である。メディア間同期制御は、複数メディア間の時間関係を維持するための制御であり、端末間同期制御は複数の端末間の出力タイミングを揃える制御である。以下では、本論文用いるメディア内同期制御と端末間同期制御について簡単に説明する。

(1) メディア内同期制御

メディア内同期制御は、一つの出力先において、単一メディアにおける MU の出力間隔を維持する制御である。メディア内同期制御の例を図 1.2 に示す。この図のように、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 の発生間隔と異なってしまいう可能性がある。そこで、メディア内同期制御を行い、MU の出力間隔を発生間隔と等しくすることで、出力品質を高く保つことができる。

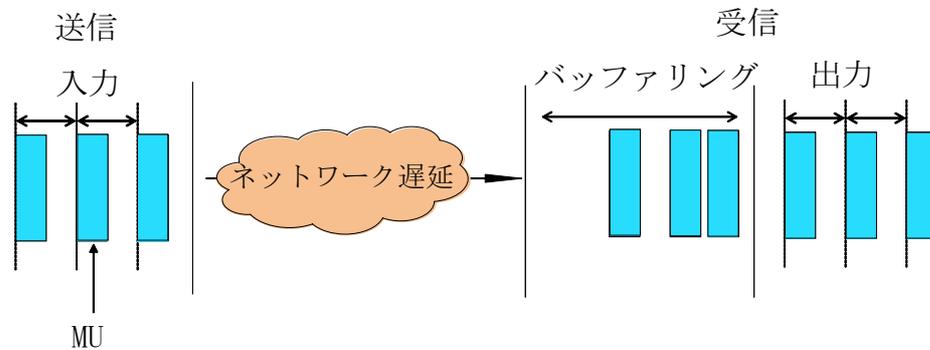


図 1.2 メディア内同期制御の例

(2) 端末間同期制御

端末間同期制御は、複数のメディア出力先の間で、メディアの出力タイミングを合わせる制御である。ネットワークを介して複数の出力先にメディアを転送すると、ネットワーク遅延とその揺らぎにより、端末間で MU の出力時刻がずれる恐れがある。端末間で MU の出力時刻がずれると、端末間に不公平が生じる原因となる。そこで、端末間同期制御を行い、端末間での MU の出力タイミングを揃える。端末間同期制御の例を図 1.3 に示す。

1.6.2 予測制御

予測制御は、インタラクティブ性（遠隔ユーザ間とユーザ・システム間の即時対話性を指す）の改善や、パケット欠落などによって、情報の到着が遅れたり、届かなかったりする問題を解決するために用いられる。予測には、文献 [76] の Dead-reckoning や文献 [77] の予測（過去の情報（例えば、位置）出力すべき時刻になっても到着していない情報を予測して出力）と、文献 [78] の予測（将来（出力すべき時刻より、一定時間後）の情報（位置）を予測して出力）がある。また、予測方式として、線形一次予測、二次予測 [79]、カルマンフィルタ [80] などが挙げられる。ここでは、第 4 章で扱っている線形一次予測について説明する。

線形一次予測には、最後に受信された二つの情報 ($n \geq 2$) と $n - 1$ 番目の情報とする) の発生時間を示すタイムスタンプをそれぞれ t_n, t_{n-1} 、それらの情報に含まれる一情報が示す位置をそれぞれ $\mathbf{P}(t_n), \mathbf{P}(t_{n-1})$ とする。このとき、実際に受信された二つの最新の情報に含まれる位置情報から速度を計算し、時刻 t_n の $T_{\text{predict}} (\geq 0)$ 秒後の予測位置 $\mathbf{P}(t_n + T_{\text{predict}})$ を次のように計算する。

$$\mathbf{P}(t_n + T_{\text{predict}}) = \mathbf{P}(t_n) + \frac{\mathbf{P}(t_n) - \mathbf{P}(t_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} T_{\text{predict}} \quad (1.2)$$

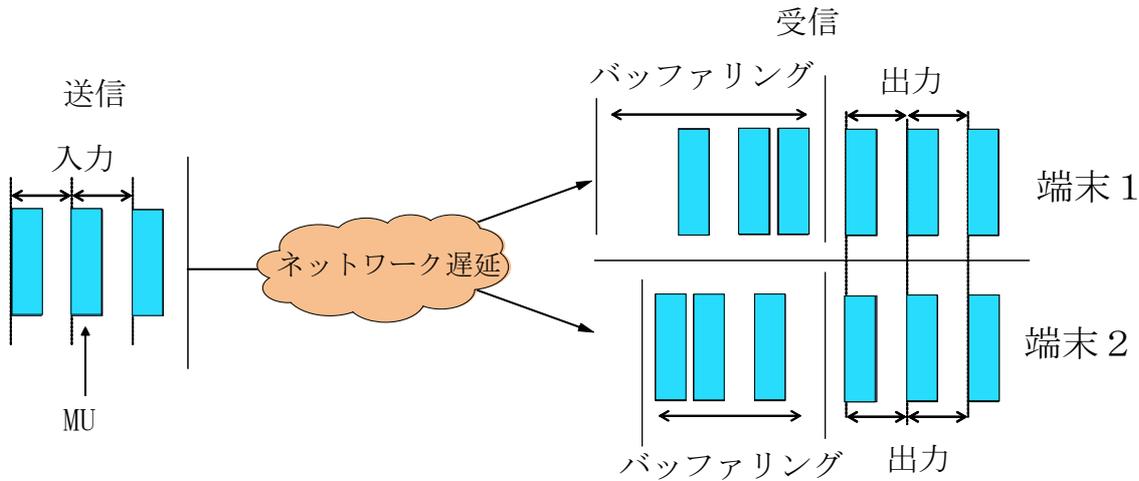


図 1.3 端末間同期制御の例

1.7 ユーザ体感品質 (QoE)

通信サービスの最終的な受け手は利用者であるため、QoE の評価が重要である。QoE 評価には主観評価と客観評価がある [56], [81].

1.7.1 主観評価

主観評価は、利用者の主観に基づく評価であり、例えば、触覚インタフェース装置の操作のしやすさ、きれいな画面、画面内の物体の滑らかな動きなどの抽象的な評価である。評価方法として評定尺度法 [82], SD(Semantic Differential) 法 [83], 系列カテゴリー法 [84], 一対比較法 [82], 恒常法 [85], アンケート調査法 [81] などが用いられている [56]. ここでは、本論文で扱う評定尺度法について説明する。

評定尺度法は、予め何段階かのカテゴリーを設定し、そのカテゴリーに従って評価する方法である。評価尺度としては、主な基準からの劣化の度合を評価する妨害尺度と、品質を評価する品質尺度がある [82]. 代表的なものは、五段階評価尺度を扱い、平均オピニオン評点 (MOS: Mean Opinion Score) [86] を求める方法である。表 1.4 と表 1.5 にそれぞれ五段階の品質尺度と妨害尺度を示す。

1.7.2 客観評価

客観評価は、利用者の主観に依存せず、客観的に測定できる対象を用いて評価を行う。しかし、これらの評価結果も被験者によって違ってくる。評価尺度としては、作業効率 (例えば、追従率、平均作業時間、平均距離)、勝率などが挙げられる。また、主観評価では、信頼性が低いという問題 [81] (被験者が評点を正確につけるのが難しい) があるので、客観評価結果から高い精度で主観評価結果を推定できると、主観評価を行う必要性が低くなること

表 1.4 五段階品質尺度

評点	評価基準
5	非常に良い
4	良い
3	普通
2	悪い
1	非常に悪い

表 1.5 五段階妨害尺度

評点	評価基準
5	劣化が分からない
4	劣化が分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

考えられる。

1.7.3 主観評価と客観評価の関係

主観評価と客観評価の結果の関係を調べるため、本論文では、回帰分析 [87], [88] を用いる。回帰分析とは、従属変数 (目的変数) と独立変数 (説明変数) の間に式をあてはめ、従属変数が独立変数によってどれくらい説明できるのかを定量的に分析する手法である。つまり、従属変数に主観評価結果を、独立変数に客観評価結果を当てはめて回帰分析を行うことにより、両者の関係を分析することが可能となる。

1.8 本論文の目的と構成

前述のように、力覚メディアに関しては、触覚インタフェース装置によって、ネットワーク遅延やその揺らぎがQoEに与える影響が異なるため、その特徴について調査する必要がある。また、ネットワーク遅延やその揺らぎにより、QoEが劣化する問題に対して、QoS制御を検討する必要もある。さらに、嗅覚メディアを扱うとき、香りの出力タイミングがQoEに及ぼす影響を明らかにすることも重要である。

触覚インタフェース装置を用いた作業に関する研究としては、文献 [89]–[92] が挙げられる。しかし、これらの研究では、使用された装置の種類が少なく、QoEの主観評価も行われていない。仕様などが異なる触覚インタフェース装置を扱うと、ネットワーク遅延やその揺らぎ、パケット欠落によって受ける影響も異なる。そこで、より多くの種類の触覚インタフェース装置を扱い、主観評価により調査を行う必要がある。

また、力覚メディアを用いた協調作業を対象とした研究には、三次元仮想空間内のオブジェクト数が少なく、単純な作業を扱ったものが多い。文献 [89]–[97] においては仮想空間内のオブジェクト数が一つである。しかし、オブジェクト数が増えると、作業が難しくなり、ネットワーク遅延とその揺らぎやパケット欠落などが協調作業に及ぼす影響も違ってくる可能性がある。そのため、オブジェクト数が多く、複雑な作業における調査が必要である。

オブジェクト数が多く、複雑な作業の例として、文献 [98] がある。文献 [98] では、一つ

の三次元仮想空間において、二人の利用者が触覚インタフェース装置を用いた協調作業によって行う積み木遊びを検討対象としている。この積み木遊びでは、オブジェクトとして複数の積み木を扱っており、二人の利用者が協調して、積み木の家を積み上げる。そして、ネットワーク遅延がこれらの作業に及ぼす影響を客観評価により明らかにしている。しかし、QoE評価は行われていない。そのため、ネットワーク遅延やその揺らぎ、パケット欠落などが協調作業に及ぼす影響のQoE評価を行う必要がある。

また、作業のしやすさに及ぼす影響だけではなく、ネットワーク遅延やその揺らぎなどによって、端末間でメディアの出力タイミングがずれて、利用者間で見ている仮想空間が異なり、協調作業が効率よくできなくなったり、競合作業の公平性が保てなくなる可能性がある [99]–[103]。この問題を解決するためには、QoS制御として、複数の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 [75]を行うことが必要である。しかし、端末間同期制御によって、インタラクティブ性が劣化するという問題も起こり得る。この問題を解決するためには、新たな制御を考える必要がある。

さらに、嗅覚メディアを用いた研究としては、文献 [50], [54]が挙げられる。文献 [50]では、仮想空間システム Friend Park を構築し、仮想空間内の嗅覚情報を表現するために、「アロマ」という概念、及びアロマの伝達される範囲を表した「アロマオーラ」を定義し、アロマオーラ内にいるユーザにアロマの伝達を行っている。しかし、このアロマオーラのサイズは固定されていることによって、香りの出力タイミングも固定されている。文献 [54]では、嗅覚・力覚・視覚(CG)を用いた三次元仮想空間内における果物狩りを扱い、嗅覚と力覚メディア間の同期誤差がQoEに及ぼす影響を調査している。この研究では、果実をもぎ取ると、直ちに果実の香りを出力するとしている。しかし、どのようなタイミングで香りを出力すればよいかは必ずしも十分には検討されていない。

そこで、本研究では、まず、異なった種類の触覚インタフェース装置を扱い、二つの装置間で、仮想空間内の一つのオブジェクトを協力して持ち上げて動かす作業を行う。そして、ネットワーク遅延が作業に及ぼす影響をQoE評価により調査する。次に、仮想空間内のオブジェクト数が複数個である積み木遊びを検討対象として、ネットワーク遅延やその揺らぎ、パケット欠落などが作業に及ぼす影響をQoE評価により調査する。その後、力覚を利用した作業に対して、端末間同期制御によってインタラクティブ性が劣化する問題を解決するために、端末間同期制御を改良する。また、嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花を構築し、香りの出力タイミングがQoEに及ぼす影響を調査する。さらに、その調査結果に基づき、QoS制御として、高いQoEを実現する香りの出力タイミング制御を検討する。

以下では、まず、第2章において、異種触覚インタフェース装置を用いた協調作業におけるネットワーク遅延の影響を調査する [104]。次に、第3章では、協調作業による積み木遊びにおけるネットワーク遅延及びパケット欠落の影響を調査する [105]。第4章では、力覚を利用した作業に対して、端末間同期制御を改良し、その効果を検証する [106], [107]。そして、第5章において、嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花を対象に香り空間の大きさの影響を調査する [108], [109]。第6章では、第5章の結果に基づいて、香りの出力タイミング制御を提案し、効果を検証する [110], [111]。最後に、第7章で、本研究の結論と今後の課題について述べる。

第2章

力覚を利用した協調作業におけるネットワーク遅延の影響

2.1 まえがき

前述のように、力覚メディアを扱うための装置として、ペン型やグローブ型などの様々な触覚インタフェース装置が開発されている。これらの装置は、作業空間（力覚ワークスペース）の大きさ、利用者に提示できる反力の大きさ、位置精度等の仕様が異なる。そのため、仕様の異なる触覚インタフェース装置を用いて作業を行う場合、様々な問題が発生する [68]。

そのような問題を扱った研究として、文献 [68], [90], [91] などが挙げられる。文献 [68] では、仮想空間において、触覚インタフェース装置に依存しない触覚用基本ソフトウェア (HIP: Haptic Interface Platform) を開発・実装している。そして、ある一つのオブジェクトの硬さを被験者に認識してもらう実験を行い、異なる触覚インタフェース装置を用いる場合においても、被験者が得る感覚量には有意な差が見られないことを示している。しかし、触覚インタフェース装置間の仕様の違いを吸収する方法についての検討は必ずしも十分には行われていない。また、文献 [91] では、PHANToM Omni [6](以下、Omni と略す) と SPIDAR-G AHS [9](以下、SPIDAR と略す) を用いて、作業空間の大きさの違いが競合作業と協調作業に及ぼす影響を実験によって明らかにしている。文献 [90] では、異種触覚インタフェース装置間の競合作業（ネットワーク型ゲーム）と協調作業において、ネットワーク遅延がこれらの作業に及ぼす影響を客観評価により明らかにしている。しかし、QoE の主観評価は行われていない。また、同文献では、扱う装置の種類が二つ (Omni 及び SPIDAR) だけであり、その他の種類の装置については扱われていない。

そこで、本章では、形や仕様などが異なる触覚インタフェース装置として、PHANToM Desktop [6](以下、Desktop と略す)、Omni、SPIDAR、及び Falcon [10] の四種類を扱い、二つの装置間で協調作業を行う。各装置の外観を図 2.1 に示す。そして、ネットワーク遅延が協調作業における触覚インタフェース装置の操作のしやすさに及ぼす影響を QoE の主観評価と客観評価により調査する。

以下では、まず、2.2 において本評価を利用した協調作業について説明する。次に、2.3 で



(a) PHANToM Omni
(Omni)



(b) PHANToM Desktop
(Desktop)



(c) SPIDAR-G AHS
(SPIDAR)



(d) Falcon

図 2.1 四つの触覚インタフェース装置の外観

システムモデルについて説明する。また、2.4において評価環境について紹介する。そして、2.5で評価結果について考察する。

2.2 協調作業

協調作業として、二人の利用者は図 2.2に示す仮想空間において、一つのオブジェクト(立方体)を両側から挟んで協力して持ち上げて動かす作業を行う。扱う触覚インタフェース装置間の作業空間の大きさの違いによる影響をなくすため、仮想空間の大きさを Desktop の作業空間(幅: 160mm, 高さ: 120mm, 奥行き: 120mm), Omni の作業空間(幅: 160mm, 高さ: 120mm, 奥行き: 70mm), SPIDAR の作業空間(幅: 200mm, 高さ: 120mm, 奥行き: 200mm), Falcon の作業空間(幅: 75mm, 高さ: 75mm, 奥行き: 75mm)の四つの空間全て

に含まれる大きさ (幅: 75mm, 高さ: 75mm, 奥行き: 70mm) に設定する. 仮想空間内には, 一辺が 25mm, 質量が 500g の立方体 (剛体のオブジェクト) がある.

二人の利用者は, 自分の端末の触覚インタフェース装置を用いて, 図 2.2 の仮想空間において, オブジェクトを両側から挟んで持ち上げ, 目標物体と重なり続けるように移動させる. ただし, このオブジェクトには, 重力加速度として, 常に下向きに 2.0m/s^2 の力が働くため, 二人の利用者が協力して正確に作業をしなければ容易に床に落ちてしまう. 目標物体は, xy 平面を y 軸に関して 45 度回転した平面上に存在する, 半径が 25mm の円軌道上を等速度で移動する. 目標物体とその軌道は, オブジェクトおよびカーソルと衝突しない. なお, オブジェクトは, 傾くことない. また, カーソルとオブジェクトは衝突判断があり, カーソルとオブジェクト間の静止摩擦係数は 0.6 であり, 動摩擦係数を 0.4 とする. これらの物理パラメータは, 予備実験を行い, ネットワーク遅延を付加しない状態で, 協調作業を円滑に行えるときの値に設定されている.

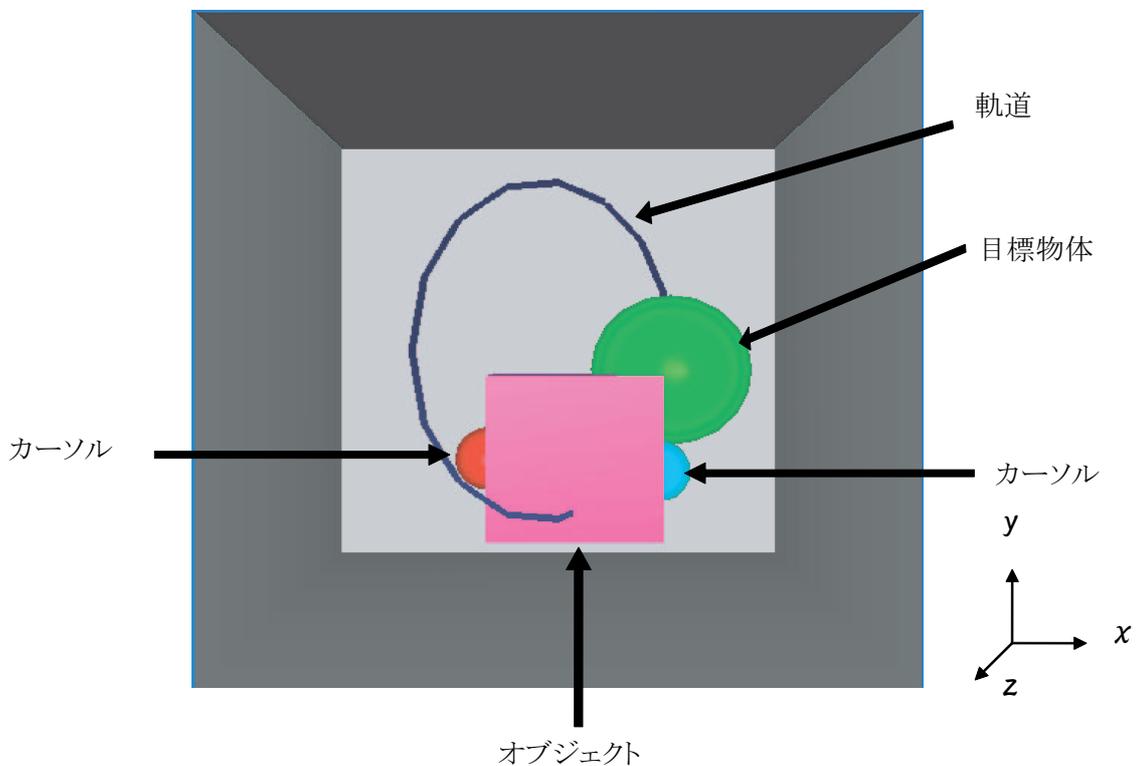


図 2.2 協調作業の仮想空間

2.3 システムモデル

図 2.3 にサーバ及び各クライアントの機能を示す. 図 2.3 において, クライアント 1 には Desktop, Omni, Falcon のいずれかが, クライアント 2 には Desktop, Omni, Falcon,

SPIDAR のいずれかが接続されている。そして、二つの触覚インタフェース装置を組み合わせることで協調作業を行う。以下に、クライアントとサーバの機能を説明する。

クライアント 1, 2 は、1kHz のサーボループ毎に仮想空間の触覚インタフェース装置のカーソル位置を取得する。そして、タイムスタンプ等の制御情報を付与し、MU として、サーバに送信する。

サーバは、クライアントから 1kHz の周期で送られてくる MU を処理するために、タイマを用いて 1ms 周期のクロックを発生させる。そして、クロック毎に、受信した MU 内のカーソル位置情報から、オブジェクトにかかる力を計算し、オブジェクトの位置を更新する。その情報は、1ms 毎に MU として各クライアントへ送信される。

各クライアントは、MU のメディア内同期制御のために、Skipping [112] を用いる。これにより、MU のバッファリングは行われず、各 MU は受信されると直ちに出力される。しかし、受信される MU は直前に出力された MU より古い場合は、その MU を破棄する。各クライアントは、受信したオブジェクトの位置情報から、オブジェクトの位置を更新し、反力を計算して出力及び画面の更新を行う。

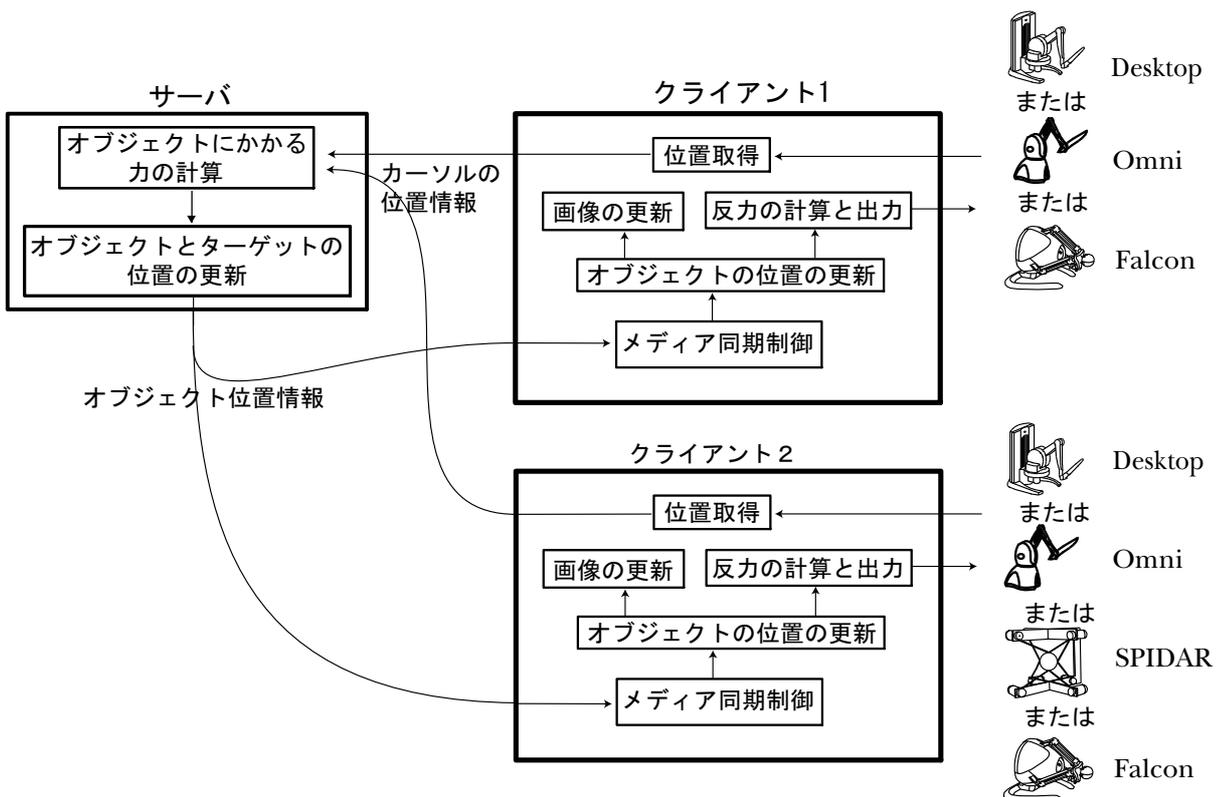


図 2.3 異種触覚インタフェース装置を用いた協調作業のクライアントとサーバの機能

2.4 評価環境

2.4.1 評価システム

評価システムを図 2.4 に示す。このシステムでは、一つのサーバと二つのクライアント (CPU: Pentium4 2.8GHz, OS: WindowsXP) は、ネットワークエミュレータ (NIST Net) [113] と 100Mbps の Ethernet スイッチングハブを介して接続されている。クライアント 1 には Desktop, Omni, Falcon のいずれかが接続され、クライアント 2 には Desktop, Omni, Falcon, SPIDAR のいずれかが接続される。また、NIST Net を用いて、サーバから各クライアント方向に固定の遅延を付加する。MU の転送にはトランスポートプロトコルとして UDP を使用する。

各クライアントは、カーソルの位置情報を MU(32 バイト) として、サーバに送信する。サーバは、オブジェクトの位置情報及び他方のクライアントのカーソル位置情報を MU(56 バイト) として送信する。クライアントからサーバへの MU の平均ビットレートは 256kbps であり、サーバから各クライアントへの MU の平均ビットレートは 448kbps である。

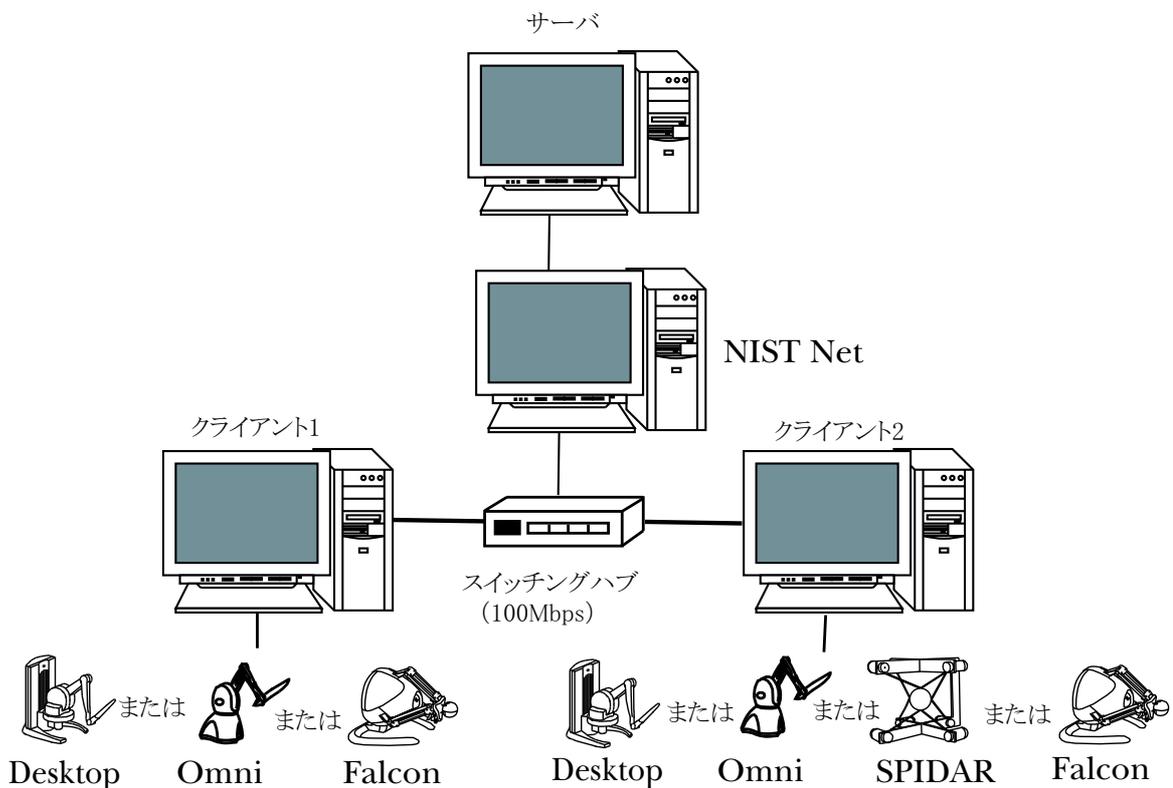


図 2.4 異種触覚インタフェース装置を用いた協調作業の評価システムの構成

2.4.2 評価方法

ITU-R BT.500-11 の単一刺激法に基づき、QoE 評価の主観評価尺度として、MOS (Mean Opinion Score) を求める。NIST Net によって付加する遅延は、10ms の間隔で 0ms から 60ms とする。付加遅延の大きさはランダムな順序で提示し、被験者には操作のしやすさを表 1.4 の五段階品質尺度で評価をしてもらう。

本実験の被験者は 21 歳から 24 歳までの男女 20 人である。被験者には作業に慣れてもらうため、評価の前に、ネットワーク遅延を付加しない状態で 3 分間にわたり協調作業の練習を行ってもらう。その後、遅延を付加して評価を行う。一回の評価時間は 30 秒である。また、QoE の主観評価と同時に QoE の客観評価も行う。QoE の客観評価尺度として、オブジェクトと目標物体との平均距離 [112] を採用する。これは、目標物体にどの程度正確に追従してオブジェクトを動かすことができたかを示している。すなわち、この平均距離が小さいほど、利用者はオブジェクトを目標物体に正確に追従することができているため、作業効率が良い。

2.5 評価結果と考察

固定付加遅延に対する MOS 値を図 2.5, 図 2.6 に、客観評価結果は図 2.7, 図 2.8 に示す。これらの MOS 値は、触覚インタフェース装置の組合せ (例えば、Falcon と SPIDAR を組み合わせて用いる場合は、Falcon-SPIDAR または SPIDAR-Falcon と表記) のうち、左側の装置を操作している被験者の値 (例えば、Falcon-SPIDAR の場合は、Falcon を操作している被験者の MOS 値) である。また、異種触覚インタフェース装置を扱って作業を行う場合は、SPIDAR-Desktop, Desktop-Omni, SPIDAR-Omni, Desktop-Falcon, Omni-Falcon, SPIDAR-Falcon の場合の MOS 値は、それぞれ Desktop-SPIDAR, Omni-Desktop, Omni-SPIDAR, Falcon-Desktop, Falcon-Omni, Falcon-SPIDAR の場合のそれとほとんど同じであったため、これらは図 2.6 に示されていない。

図 2.5, 図 2.6 から、全ての触覚インタフェース装置の組合せの MOS 値は、固定付加遅延が増加するにつれ、減少することが確認できる。また、これらの図から、固定付加遅延が 40 ms 以上の場合、MOS 値が 2 より小さいことがわかる。このとき、協調作業における操作のしやすさは大きく劣化し、作業がほとんどできない状態である。

図 2.5 から、固定付加遅延が 0ms から 60ms の間、Omni-Omni と Desktop-Desktop の MOS 値はほぼ同じであることがわかる。また、固定付加遅延が約 60ms 以下の場合、Omni-Omni と Desktop-Desktop の MOS 値 Falcon-Falcon の MOS 値より高いことがわかる。

図 2.6 から、固定付加遅延が 50ms 以下の場合、Falcon-SPIDAR の MOS 値が一番低いことがわかる。これは、SPIDAR の操作方法が他の装置に比べると難しく、また、ネットワーク遅延が大きくなると、Falcon の操作のしやすさが他の触覚インタフェース装置 Desktop, Omni 及び SPIDAR に比べると低いと考えられる。また、この図から、固定付加遅延が約 10ms 以上、40ms 以下の場合、Omni-Desktop の MOS 値が一番高いことが見られる。

以上の結果から、固定付加遅延が約 50ms 以下の場合、Falcon-SPIDAR と Falcon-Falcon の MOS 値は他の組合せに比べ、低いことがわかる。一方、Desktop-Desktop, Omni-Omni

及び Omni-Desktop の MOS 値は他の組合せより高くなる。

また、図 2.5, 図 2.6 を見ると、同じ付加遅延を付加する場合、Falcon-Desktop, Falcon-Omni の MOS 値は Falcon-Falcon の MOS 値より高いことがわかる。この原因は、装置を組み合わせる作業をするとき、Falcon はよい操作性を持っている Desktop や Omni から助けられると考えている。

図 2.7, 図 2.8 に客観評価の結果を示す。図 2.7 から、固定付加遅延が約 10ms 以上の場合、Omni-Omni と Desktop-Desktop の平均距離はほぼ同じであり、Falcon-Falcon の平均距離は長く、作業効率はこの二つの組み合わせに比べると良くないといえる。また、図 2.8 から、Falcon-SPIDAR の平均距離が一番長く、作業効率は一番低いことがわかる。以上の結果から、主観評価結果とほぼ同じ傾向を示した。そこで、主観評価結果と客観評価結果の関係を調査するため、回帰分析を行った。その結果、次の式が得られた。

$$V_{\text{mos}} = 6.94 - 0.183\bar{D} \quad (2.1)$$

ただし、 V_{mos} はオブジェクトと目標物体の平均距離 (\bar{D}) からの推定値である。また、この式の自由度調整済み決定係数 (これは MOS の実測値と推定値の一度を表す。決定係数は寄与率とも呼ばれる) [114] は 0.876 であった。従って、オブジェクトと目標物体の平均距離から高い精度で MOS を推定することができる。

2.6 むすび

本章では、異種触覚インタフェース装置 (Desktop, Omni, SPIDAR, Faicon) を用いた協調作業を行い、QoE 評価と客観評価より、ネットワーク遅延が装置の操作のしやすさに及ぼす影響に関して調査した。その結果、四種類の触覚インタフェース装置の操作のしやすさについて、ネットワーク遅延が増加するにつれ、MOS 値が低くなり、操作がしにくくなることが明らかになった。ネットワーク遅延が約 40ms 以上の場合は、操作がしにくくなり、協調作業がほとんどできなくなることがわかった。また、ネットワーク遅延が約 50ms 以下の場合、Desktop-Desktop, Omni-Omni 及び Omni-Desktop の MOS 値が他の組み合わせに比べると、高い傾向が得られた。Falcon-Falcon, Falcon-SPIDAR の MOS 値は他の組み合わせに比較して、低い傾向が判明した。また、異種触覚インタフェース装置を用いた協調作業をするとき、操作がしやすい装置は操作がしにくい装置を助けることもわかった。

今後は、本章で扱った協調作業以外の作業 (アプリケーション) において、異種触覚インタフェース装置の操作のしやすさについて調査し、ネットワーク遅延などが装置の操作しやすさに及ぼす影響と作業 (アプリケーション) との関係も明らかにする必要がある。また、今回扱った装置以外の装置に対して、ネットワーク遅延やパケット欠落が装置の操作しやすさに及ぼす影響について調査することも重要である。

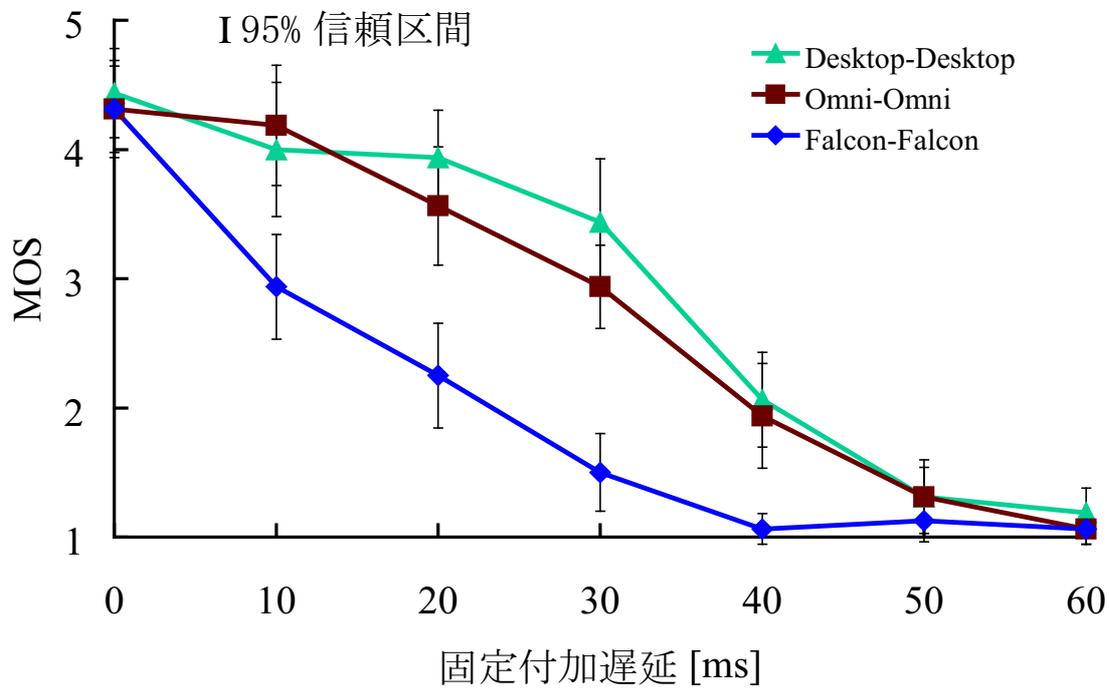


図 2.5 同じ触覚インタフェース装置同士を扱うときの MOS

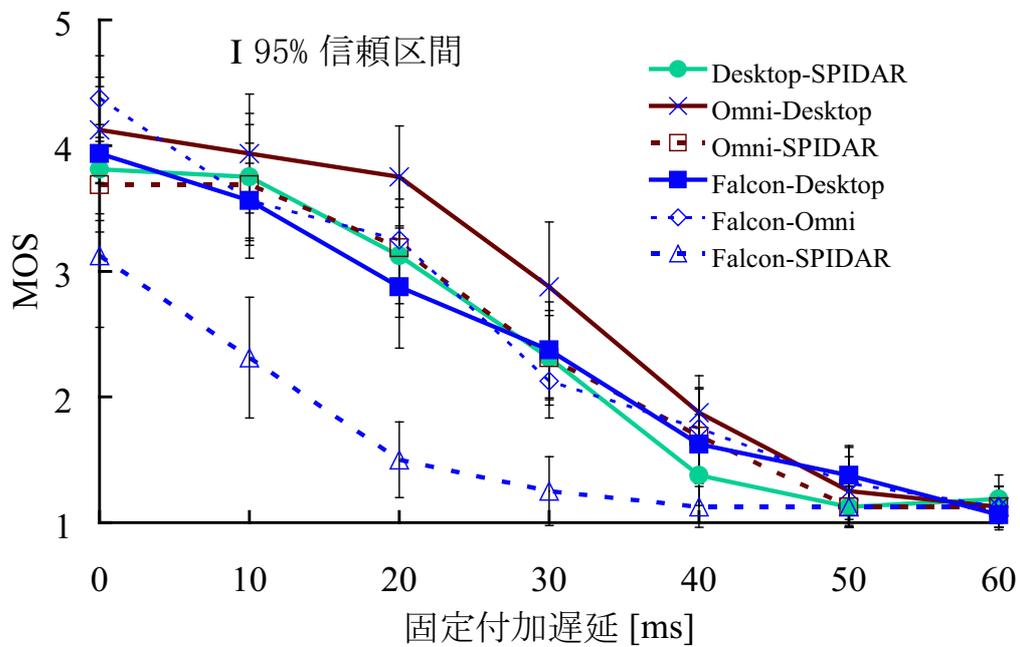


図 2.6 異種触覚インタフェース装置を扱うときの MOS

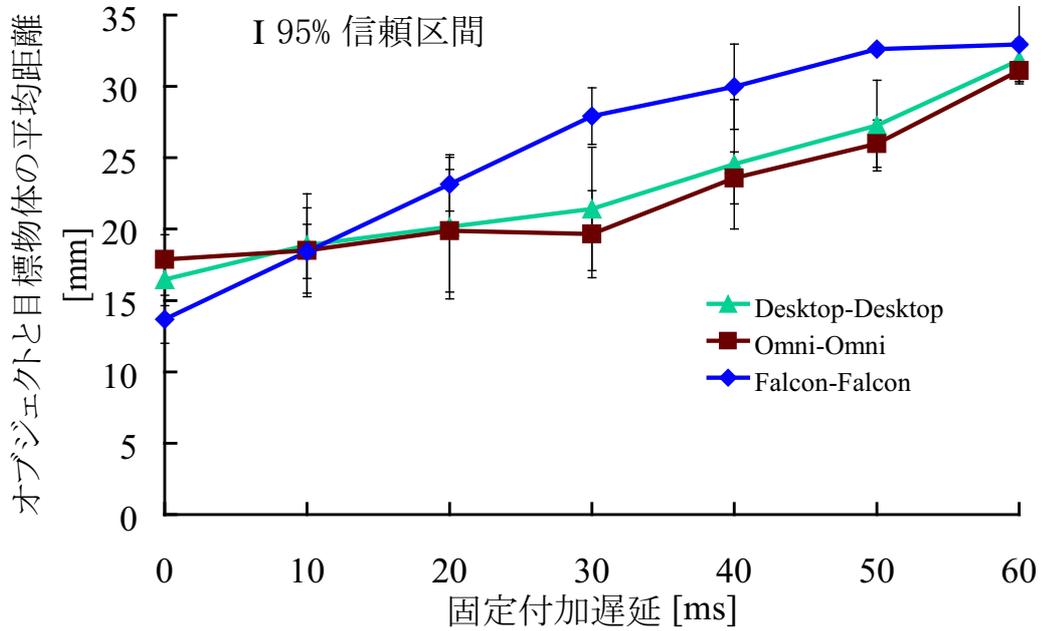


図 2.7 同じ触覚インタフェース装置同士を扱うときの平均距離

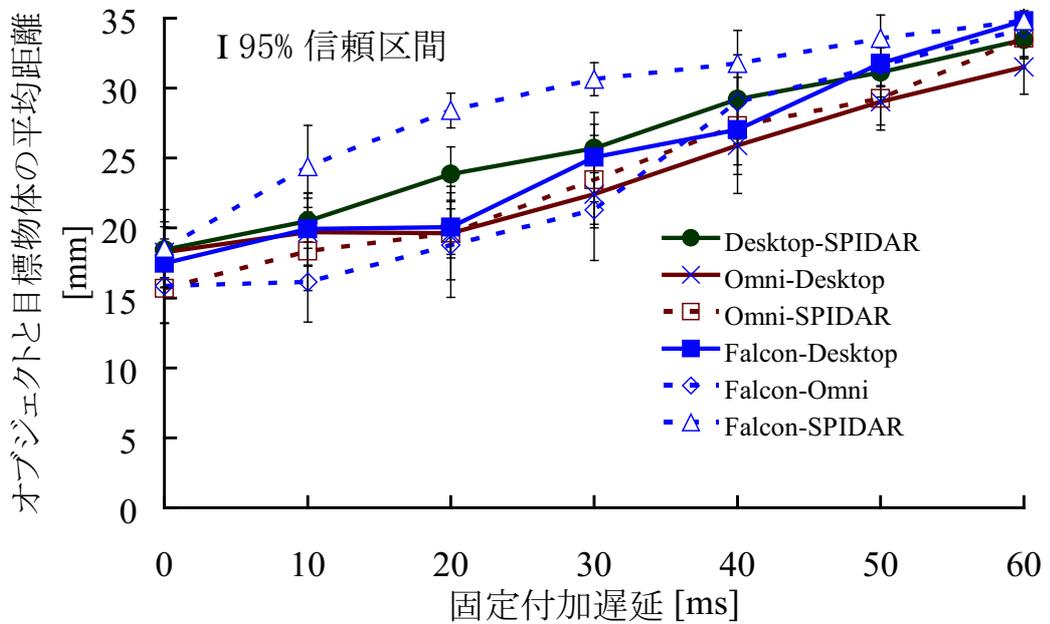


図 2.8 異種触覚インタフェース装置を扱うときの平均距離

第3章

力覚を利用した積み木遊びにおけるネットワーク遅延及びパケット欠落の影響

3.1 まえがき

第2章の作業のように、力覚メディアを用いた協調作業は、三次元仮想空間内のオブジェクトの数が少なく、単純な作業を扱ったものが多い [33], [95], [97]. これに対し、文献 [98] では、複雑な作業の積み木遊びを扱っている. しかし、遅延揺らぎやパケット欠落が作業のしやすさに及ぼす影響が調査されていない. また、協調作業の作業方法についても、二種類の協調作業方法のみを扱っており、ネットワーク遅延が協調作業の作業方法に及ぼす影響の調査も必ずしも十分ではない. さらに、文献 [98] では、ネットワーク遅延に揺らぎがない場合に対して、客観評価しか行われていない. サービスの最終的な受け手はユーザであるため、QoEの主観評価は最も重要である.

本章では、積み木で家を積み上げる作業 [98] と積み木を運ぶ作業において、三つの協調作業方法(一緒に持って作業をする場合、別々に持って交互に作業をする場合、手渡して作業をする場合)を扱う. そして、ネットワーク遅延揺らぎとパケット欠落が協調作業のしやすさに及ぼす影響を QoE の主観評価と客観評価により調査する.

以下では、まず、3.2 で積み木遊びについて説明する. 次に、3.3 でシステムモデルについて紹介し、3.4 で評価環境を述べる. そして、3.5 で評価結果について考察する.

3.2 協調作業による積み木遊び

本章では、二人の利用者がそれぞれの触覚インタフェース装置 PHANToM Omni(以下、PHANToM と略す)を用いて、三次元仮想空間内にばらばらに配置された積み木を協力しながら積み上げて、家を作る作業と、仮想空間内の左側の初期位置に配置された積み木を右側の目標位置に運ぶ作業の二種類の作業を扱う.

3.2.1 積み木の家を積み上げる作業

積み木の家を積み上げる作業の仮想空間を図 3.1 に示す。この図は、二人で屋根の積み木を持ち上げて家を組み立てている様子を示している。なお、この積み木の家は 26 個の積み木で構成される。

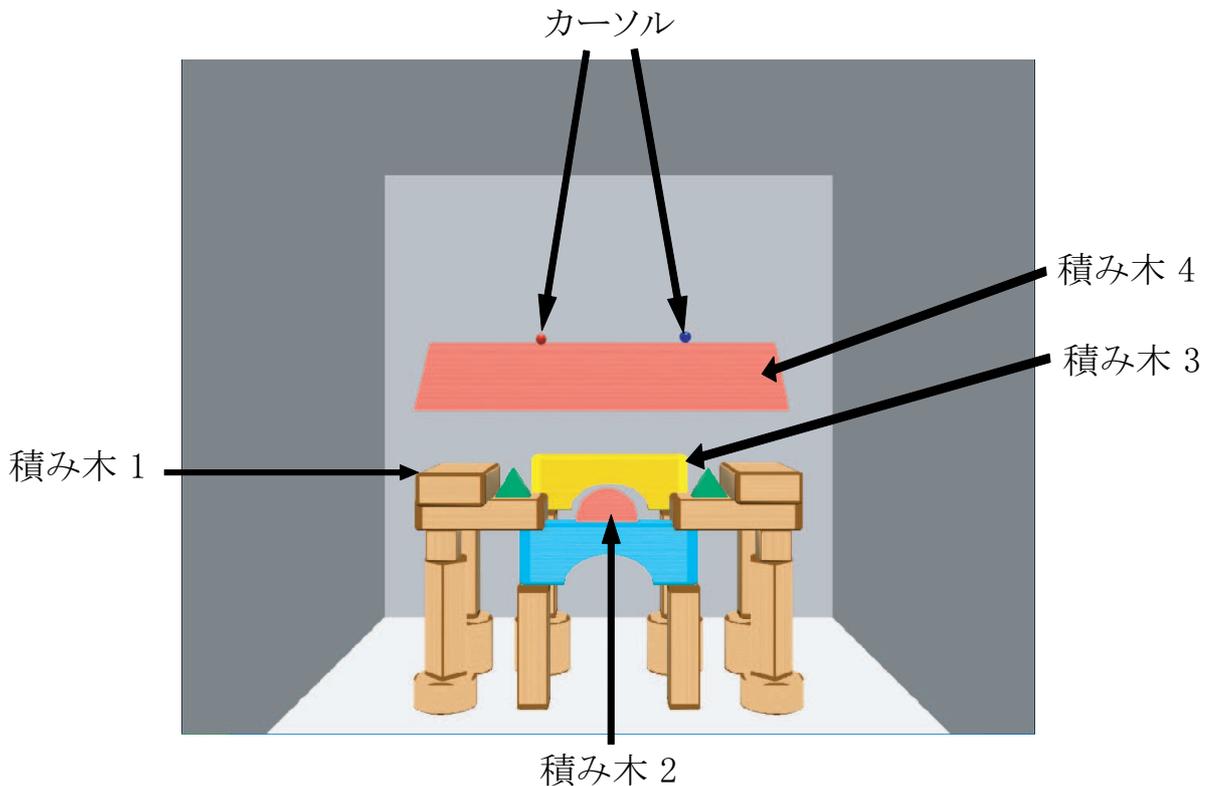


図 3.1 積み木の家を積み上げる作業の仮想空間

この積み木遊びにおいて、各利用者は、壁、床及び天井に囲まれた立方体の形をした、重力のある三次元仮想空間において、PHANToM を用いてカーソル (利用者が仮想空間内で触ろうとする点) を操作して、積み木を触る。また、カーソルが積み木に触れた状態で PHANToM のスタイラスボタンを押すと、カーソルが積み木に接着し、その積み木を持ち上げて動かすことができるようになる。このとき、その積み木の中心点を利用者が持っているように扱われる。そのため、カーソルがその積み木のどこに触れていたとしても、中心点を持っている状態と同じようにその積み木を動かすことができる。

カーソルが積み木に触れた状態でスタイラスボタンが押されていない場合には、利用者は積み木を触ることができても動かすことはできない。この場合には、カーソルが積み木に与える力と同じ大きさで、反対方向の力が反力として利用者の PHANToM に提示される。

積み木を持ち上げた状態で、PHANToM のスタイラスボタンを離すと、カーソルと積み木は接着されなくなり、積み木は重力にしたがって落下する。なお、一人の利用者が一つの積み木を持ち上げるだけでなく、二人の利用者が同一の積み木を一緒に持ち上げることも

可能である。二人の利用者が同一の積み木を持ち上げるときには、積み木の重さが二人に分配されるため、一人で持ち上げるよりも小さい力で持ち上げることができる。また、二人の利用者が同一の積み木を持ち上げているとき、その積み木には、二人がその積み木に加える力と重力の合力 \mathbf{F} がかかる [98]。その合力 \mathbf{F} は次式のように計算される。

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + m\mathbf{g} \quad (3.1)$$

ただし、 \mathbf{F}_1 は一人の利用者が積み木に加える力、 \mathbf{F}_2 は他の利用者が積み木に加える力、 m は積み木の質量、 \mathbf{g} は重力加速度である。積み木は合力 \mathbf{F} の方向に動かされる。PHANToMに提示される反力は $-\mathbf{F}_1 + (m\mathbf{g})/2$ 及び $-\mathbf{F}_2 + (m\mathbf{g})/2$ である。 \mathbf{F}_1 と \mathbf{F}_2 は、自端末の直前のカーソル位置と現在のカーソル位置とのずれにばね定数をかけることによって計算される。

さらに、積み木と壁、床、天井や、積み木同士の衝突検出を行っており、衝突時には、お互いにめり込むことなく反発する。また、二人の利用者が異なる積み木を操作しており、それらの積み木が衝突した場合には、衝突時の速度に応じた反力が各利用者に提示される。積み木間には摩擦があり、滑りにくくなっている。そのため、二人の利用者はPHANToMを用いて積み木を持ち上げ、他の積み木の上に載せることができる。なお、本システムでは、簡単のため、オブジェクトは傾かないようにしている。

3.2.2 積み木を運ぶ作業

積み木を運ぶ作業の仮想空間を図 3.2 に示す。この図は、二人で積み木を手渡している様子を示している。なお、この仮想空間内には 40 個の積み木がある。

利用者は、積み木を積み木の初期位置から、目標位置に運ぶ作業を行う。仮想空間内の重力、摩擦力、反力などのパラメーターの設定は積み木の家と同じようにする。

3.3 システムモデル

図 3.3 にサーバ及びクライアントの機能を示す。図 3.3 において、サーバ及びクライアントには PHANToM が接続されている。サーバとクライアントは、各積み木に対して、MU として、スタイラスボタンの ON/OFF に関する情報、仮想空間内でのカーソルの位置情報、積み木の ID 番号、積み木の位置情報、シーケンス番号などを、それぞれクライアントとサーバに転送する。サーバ及びクライアントでは、受信した MU に対して順序制御が行われている。順序制御では、受信した MU のシーケンス番号が、直前に出力された MU のそれよりも新しい場合には受信した MU を出力し、古い場合にはその MU を廃棄する。

図 3.3 に示すように、サーバとクライアントはスタイラスボタンの ON/OFF に関する情報や仮想空間内でのカーソルの位置情報などを取得する。そして、それらの情報と i ($1 \leq i \leq N$: N は仮想空間内の積み木の総数) 番目の積み木の ID 番号及び位置情報を MU として、1 番目から N 番目まで順番に送信した後、反力の提示や画面の更新を行う。また、サーバ及びクライアントは、受信した全ての積み木の情報を保管しており、MU を受信すると、受信した MU に含まれている積み木の情報を更新する。 i 番目の積み木の位置情報を更新する際、サーバでは、サーバでの i 番目の積み木の位置とクライアントから受信

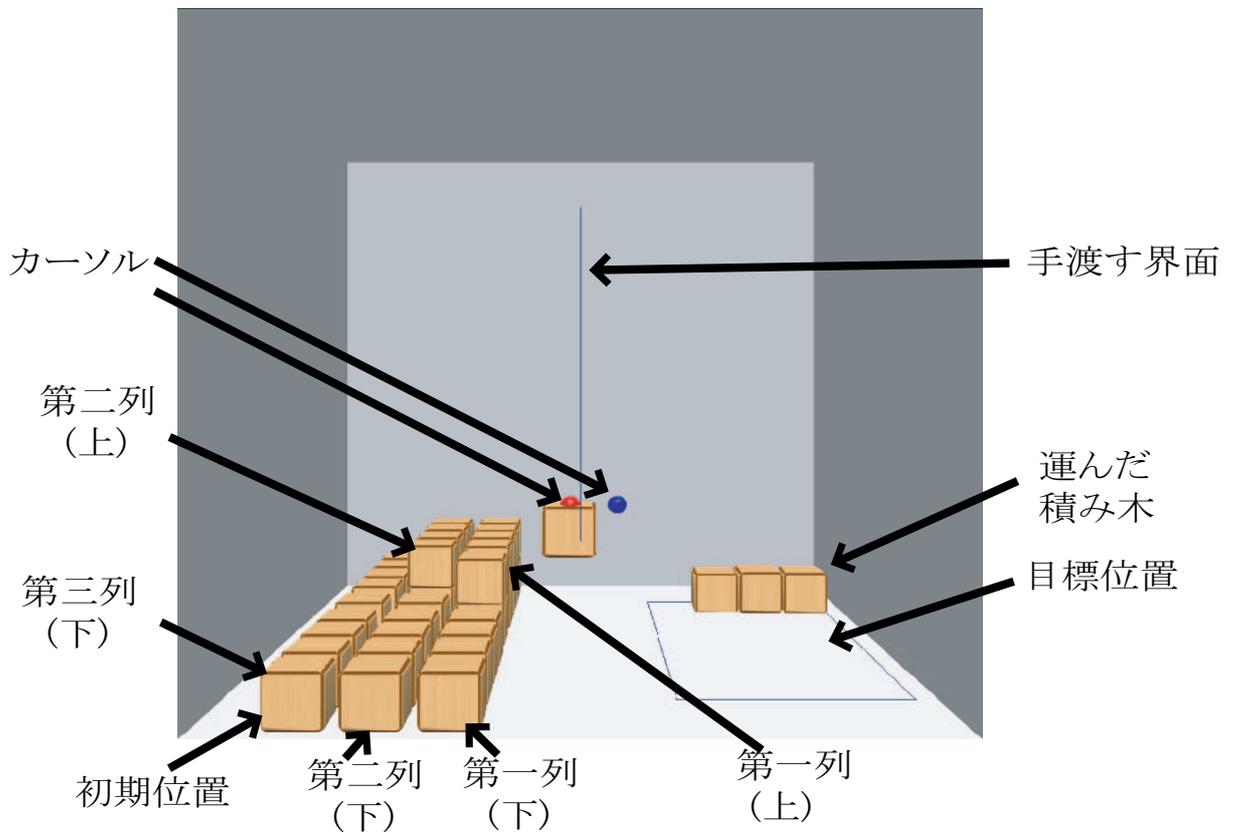


図 3.2 積み木を運ぶ作業の仮想空間

した i 番目の積み木の位置の中間の位置を, i 番目の積み木の新しい位置とする. また, クライアントでは, サーバから送られてきた i 番目の積み木の位置 (サーバとクライアントの i 番目の積み木の中間の位置) を, i 番目の積み木の新しい位置とする. そのため, サーバでは, i 番目の積み木の位置情報を更新した後, その積み木の MU を送信する. クライアントでは, i 番目の積み木の MU を送信した後に, その積み木の位置情報を更新する. ただし, サーバ及びクライアントがそれぞれクライアント及びサーバから送られてくる i 番目の積み木の MU を受信していないときには, 保管している i 番目の積み木の位置情報を基に, 新しい i 番目の積み木の位置の更新を行う. なお, スタイラスボタンの ON/OFF とカーソルの位置情報の取得, 反力の提示と画面の更新は約 60Hz で行われる.

利用者は, カーソルが積み木に触れた状態で PHANToM のスタイラスボタンを押すことにより, その積み木を持ち上げて動かすことができる. 利用者が積み木を持ち上げているとき, PHANToM にはその積み木の重さが提示される. このとき, 積み木を動かすと, 積み木の重さに加えて, 直前のカーソル位置と現在のカーソル位置とのずれにばね定数をかけた力が PHANToM に提示される. また, PHANToM のスタイラスボタンを押さずに積み木に触れた場合, その積み木の形状は分かるが, 動かすことはできない. この場合には, 前述のように, カーソルがその積み木に与える力と同じ大きさで, 反対方向の力が反力として PHANToM に提示される. なお, すべての積み木には, 重力や空気抵抗による力が働く.

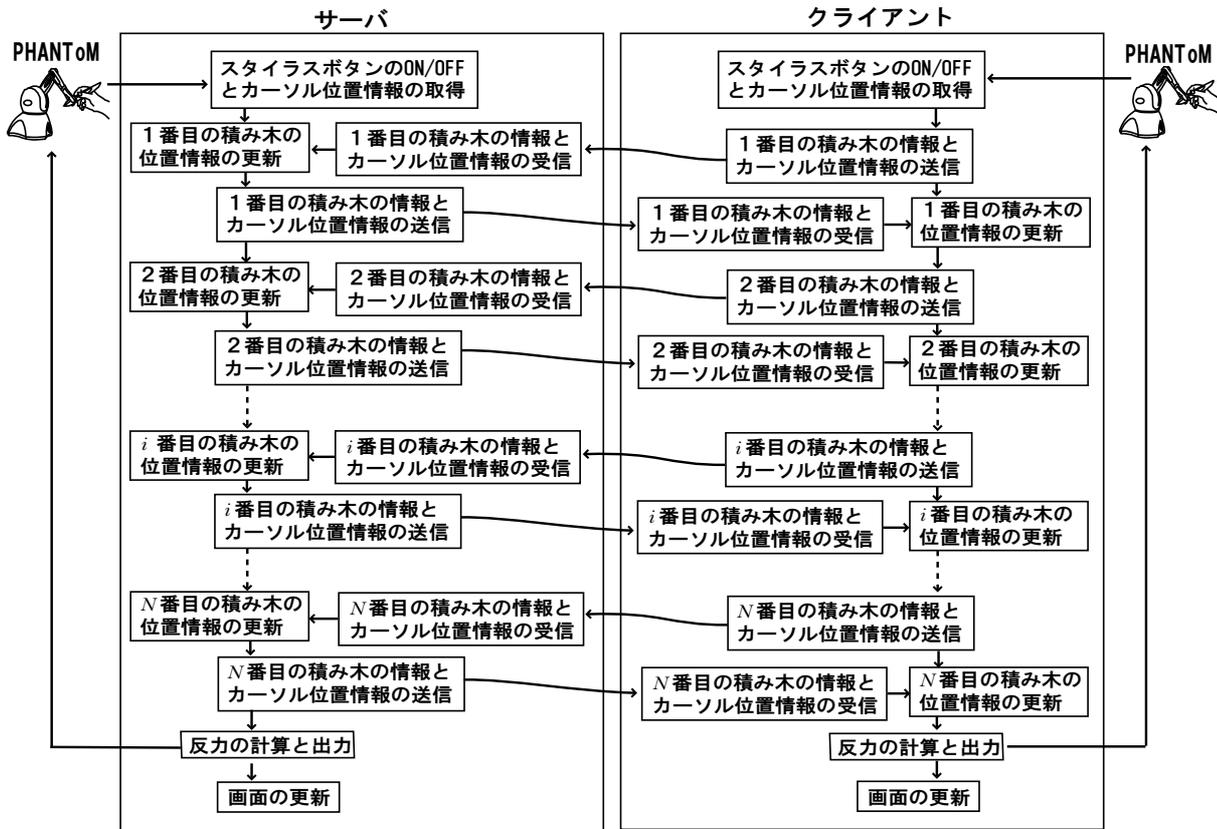


図 3.3 積み木遊びのサーバ及びクライアントの機能

3.4 評価環境

3.4.1 評価システム

評価システムを図 3.4 に示す. 図 3.4 に示すように, サーバとクライアントはネットワークエミュレータ (NIST Net [113]) を介して接続される. NIST Net は, サーバとクライアント間で転送される MU に対して, 遅延を付加したり, パケット欠落を発生させるために用いられる. MU の転送には, 転送プロトコルとして UDP を使用する.

本評価では, 仮想空間の大きさは一辺が 50mm の立方体であり, 空気抵抗係数は 10g/s (空気抵抗は速度に比例すると仮定), 重力加速度は 9.8m/s^2 となっている. また, 各積み木の質量はすべて 5g であり, その静止摩擦係数及び動摩擦係数は 0.8 に設定されている.

3.4.2 評価方法

本評価では, 協調作業として, 二人の利用者が積み木を一緒に持って作業をする場合と, 別々に持って交互に作業をする場合, 及び手渡して作業をする場合の三通りを扱う.

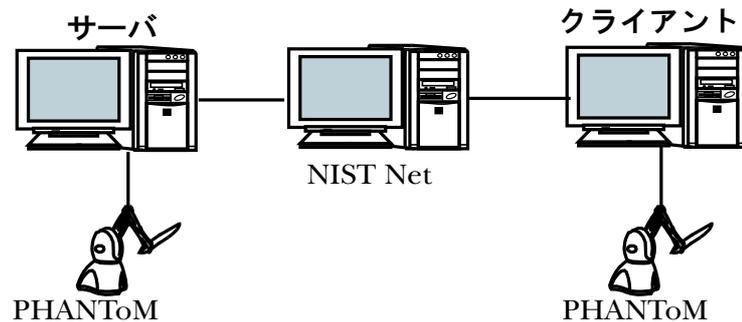


図 3.4 積み木遊びの評価システム

(1) 積み木の家を積み上げる作業

積み木の家は 26 個の積み木の積み木からなり、この内 22 個積み木は前もって積み上げられている。積み木の家を作る作業の前後の仮想空間の様子をそれぞれ図 3.5 及び図 3.6 に示す。利用者は、図 3.5 に示すように、ばらばらに置かれた積み木 1 から積み木 4 をその順番で積み上げて、図 3.6 に示すような家を完成させる。積み木を一緒に持って作業をする場合は、二人で一緒に協力して、積み木 1 から積み木 4 を積み上げる。ただし、別々に持って交互に作業をする場合には、サーバの利用者が積み木 1 と積み木 3 を扱い、クライアントの利用者が積み木 2 と積み木 4 を扱う。手渡して作業をする場合は、サーバの利用者は積み木が仮想空間の地面から、仮想空間の高さの半分ぐらゐのところまで持ち上げ、クライアントの利用者に手渡す。クライアントの利用者は、積み木を受け取ったら、目標地点に積み上げる。

(2) 積み木を運ぶ作業

積み木を運ぶ作業としては、仮想空間内に 40 個の積み木があり、図 3.7 に示すように、三列に並べている。毎列の積み木は 9 個であり、第一列は二階も並べている。第二列は、奥の四つの積み木だけ二階に並べている。作業の順番として、第一列二階の手前から奥まで、第一列二階の積み木が終わったら、第二列の二階の手前から奥まで、次に、第一列一階の手前から奥まで、第二列の手前から奥まで、第三列の手前から奥までの順番で、積み木を目標位置に運ぶ。目標位置で並べる方法としては、図 3.7 の目標位置の枠内で、奥の右側から、一つ一つの積み木を並べる。一回作業が終了した後の仮想空間を図 3.8 に示す。

また、協調作業の三つの作業方法に対して、一緒に持って作業をする場合は、二人の利用者が一緒に協力して、積み木の初期位置から目標位置に並べる。別々に持って交互に作業をする場合は、二人の利用者は同時に並行して作業を行う。手渡して作業をする場合は、サーバの利用者は積み木の初期位置から、図中手渡す界面まで運び、クライアントの利用者に手渡す。クライアントの利用者は積み木を受け取ったら、目標位置に運び、決めた順に並べる。

これら二種類の協調作業において、付加遅延の標準偏差またはパケット欠落率を変化させて、QoE の主観評価により調査する。主観評価のために、ITU-R BT.500-11 の単一刺激

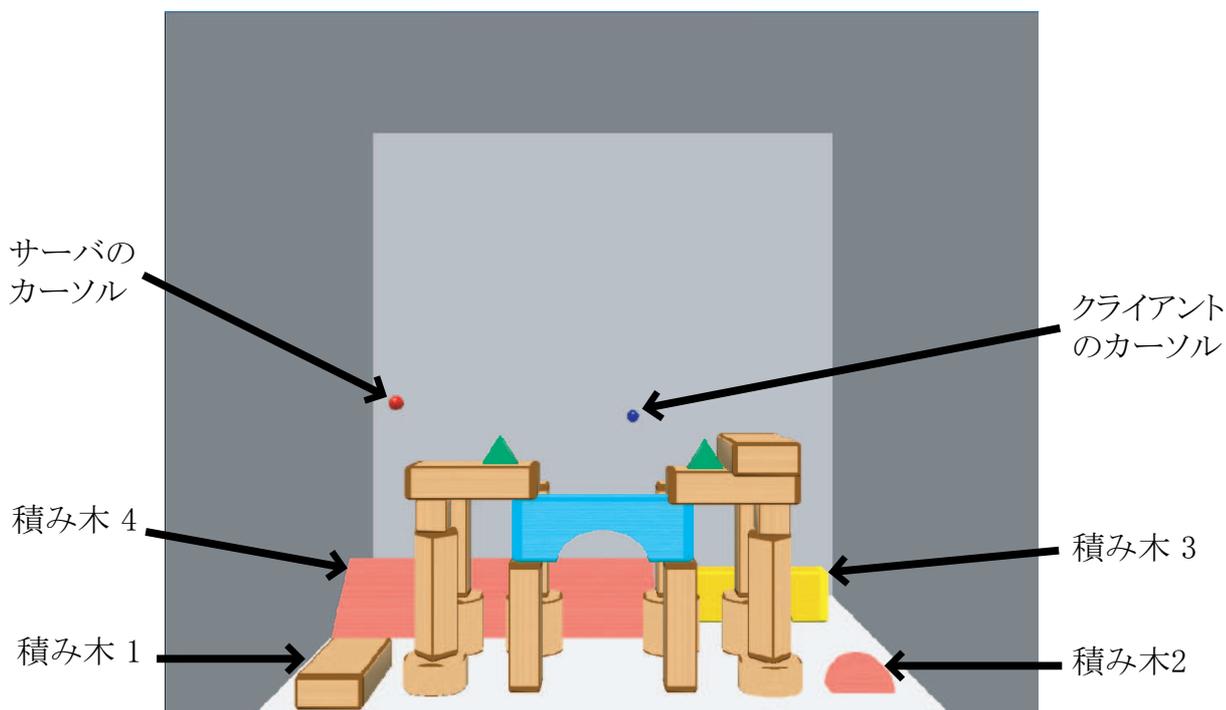


図 3.5 作業前の仮想空間 (積み木の家を積み上げる作業)

法を拡張して用いる。評価を行う前に、被験者には、付加遅延とパケット欠落がない状態で作業を1回行ってもらう。その後、付加遅延やパケット欠落を発生させた状態で、被験者は作業を行い、作業のしやすさを評価する。被験者には、表 1.5 に示す5段階妨害尺度に従って評点をつけてもらい、MOSを求める。

サーバ及びクライアント間で転送される各MUに対しては、NIST Netを用いて、固定遅延、遅延揺らぎ、及びパケット欠落のいずれかが付加する。固定遅延を付加する場合は、50msの間隔で0msから300msまで双方向に付加する。付加遅延に揺らぎを発生させる場合には、平均付加遅延が50msと100msの二通りを行う。平均付加遅延が50msのとき、双方向に転送されるMUの付加遅延の標準偏差を5msの間隔で0msから25msまで変化させる。そして、平均付加遅延が100msのときには、双方向に転送されるMUのそれを10msの間隔で0msから50msまで変える。なお、付加遅延に揺らぎを発生させる場合には、パケット欠落率を0%とする。また、パケット欠落を発生させるとき、50msまたは100msの固定ネットワーク遅延を双方向に付加する。そして、パケット欠落を発生させ、付加遅延に依らず、双方向に転送されるMUの欠落率を10%の間隔で0%から60%までとする。なお、この場合においては、付加遅延の標準偏差を0msとする。また、固定遅延の大きさ、パケット欠落率と付加遅延の標準偏差の大きさはランダムな順序で選択される。評価は、積み木の家を積み上げる作業と積み木を運ぶ作業に対して、別々の日に行われた。

積み木の家を積み上げる作業では、まずは、固定遅延を付加する場合、パケット欠落を発生させる場合、及び遅延揺らぎを発生させる場合の順番で、二人で一緒に持って作業をする場合と二人で別々に持って交互に作業をする場合の二通りの実験を行う。そして、同じ

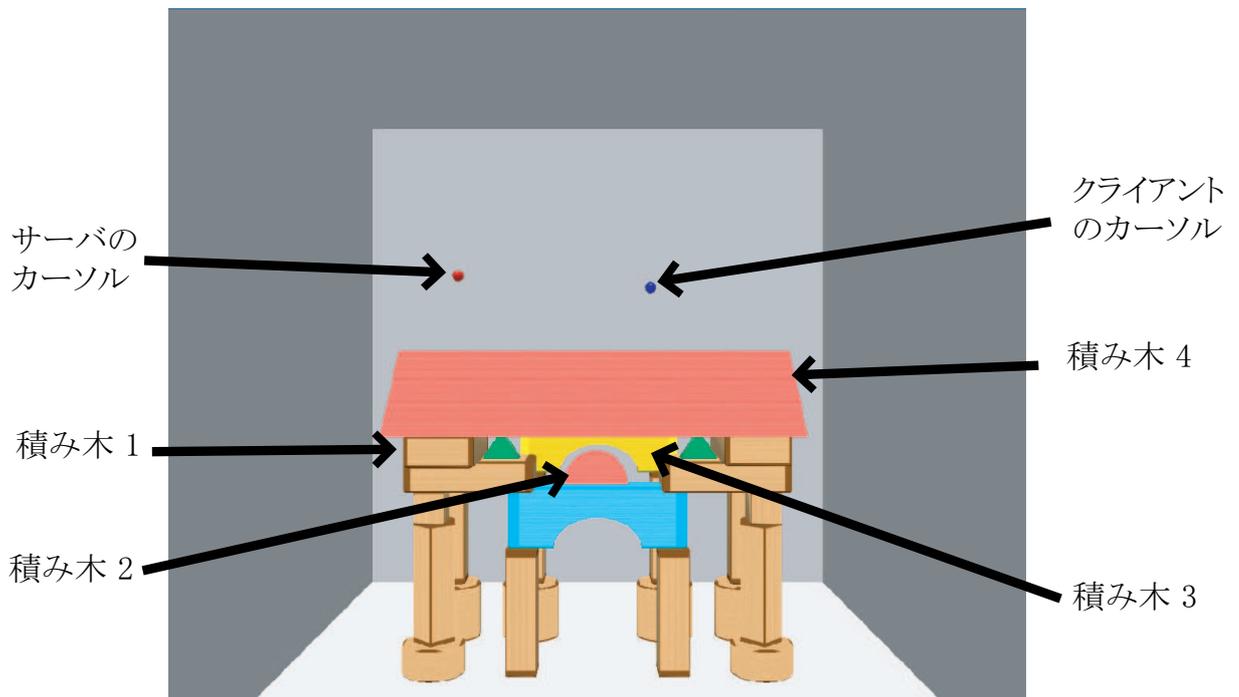


図 3.6 作業後の仮想空間(積み木の家を積み上げる作業)

順番で、協調作業の作業方法について、手渡して作業をする場合を追加する。作業時間には、二人で一緒に持って作業をする場合と二人で別々に持って交互に作業をする場合の作業時間はおよそ3時間であり、手渡して作業をする場合にはおよそ2時間である。積み木を運ぶ作業に対して、固定遅延を付加する場合、パケット欠落を発生させる場合、遅延揺らぎを発生させる場合において、三つの協調作業の方法について調査する。作業の順番は固定遅延を付加する場合、パケット欠落を発生させる場合、遅延揺らぎを発生させる場合で調査する。そして、三つの協調作業の方法について、順番は、二人で一緒に持って作業をする場合、二人で別々に持って交互に作業をする場合、手渡して作業をする場合の順番で行う。作業時間は、およそ3時間である。

二人の被験者は、サーバとクライアントにおいて上記の評価を行い、40分程度毎に評価を行った後、約10分間の休憩をとった。被験者は、21歳から25歳までの男女20人である。

3.5 評価結果と考察

積み木の家を積み上げる作業と積み木を運ぶ作業において、主観評価結果を図 3.9 から図 3.18 に示す。これらのうち、図 3.9、図 3.10 は固定付加遅延に対する MOS 値であり、図 3.11 から図 3.14 は付加遅延の標準偏差に対する MOS 値であり、図 3.15 から図 3.18 はパケット欠落率に対する MOS 値である。

また、二人で一緒に持って作業をする場合と二人で別々に持って交互に作業をする場合の二通りにおいて、クライアントの利用者の MOS 値はサーバの利用者の MOS 値とほと

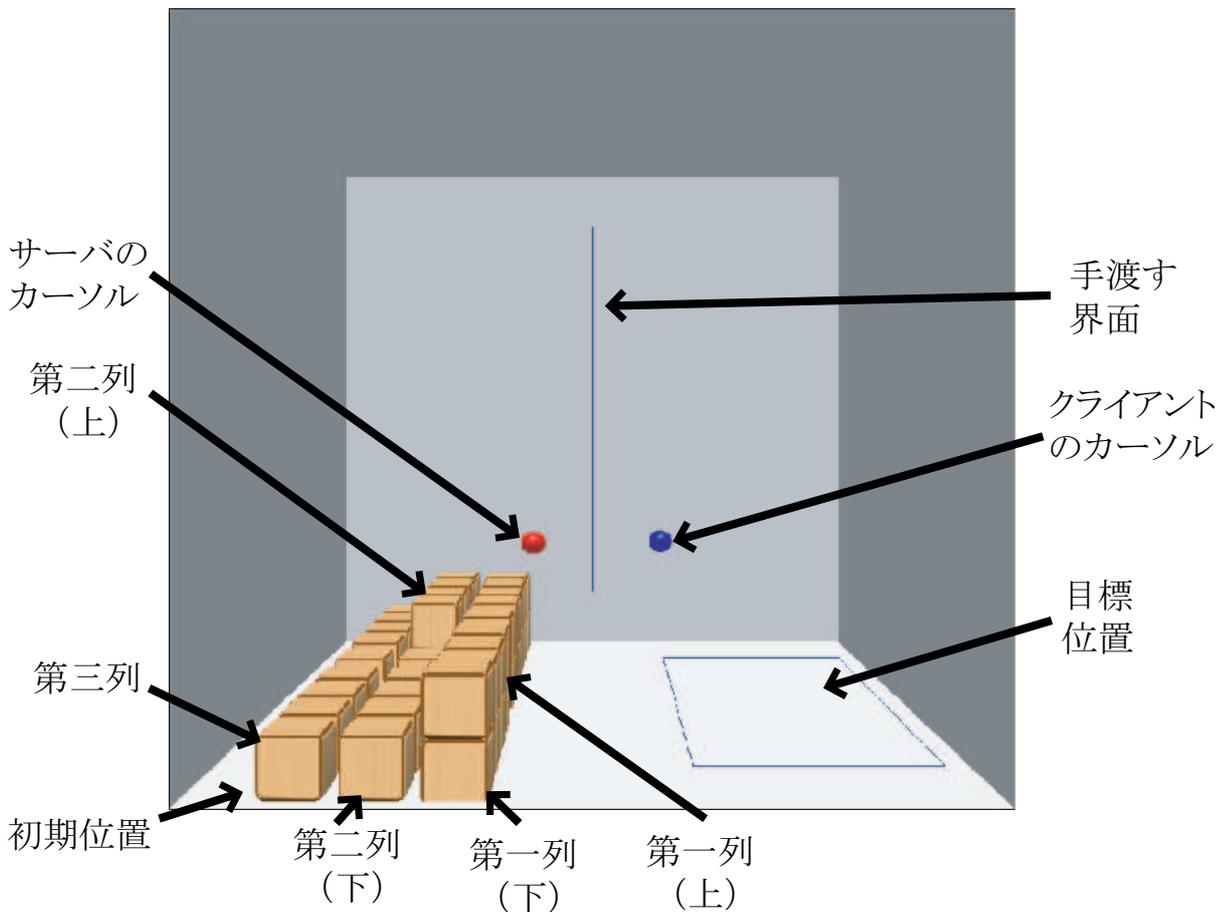


図 3.7 作業前の仮想空間 (積み木を運ぶ作業)

んど同じであったため、これを省略する。手渡して作業をする場合において、クライアントの利用者の MOS 値とサーバの利用者の MOS 値は有意差があったため、別々に示す。

3.5.1 ネットワーク遅延の影響

(1) 固定付加遅延の影響

図 3.9 と図 3.10 から、固定付加遅延が増加するにつれ、協調作業の三つの作業方法において、MOS 値が減少することが確認できる。これは、固定付加遅延が大きくなると積み木が重く感じられ、動かしにくくなることにより、作業が難しくなるためである。これらの図から、固定付加遅延が約 100 ms 以上の場合において、MOS 値が 3 より小さいことが見られる。このとき、操作性がよくないことがわかる。また、これらの図から、二人で一緒に持って作業をする場合の MOS 値は二人で別々に持って交互に作業をする場合の MOS 値よりわずかに高いことが見られる。これ原因としては、二人で一緒に持って作業をする場合、持ち上げる積み木の重さが二人の利用者に分配されるためである。また、二人が一緒

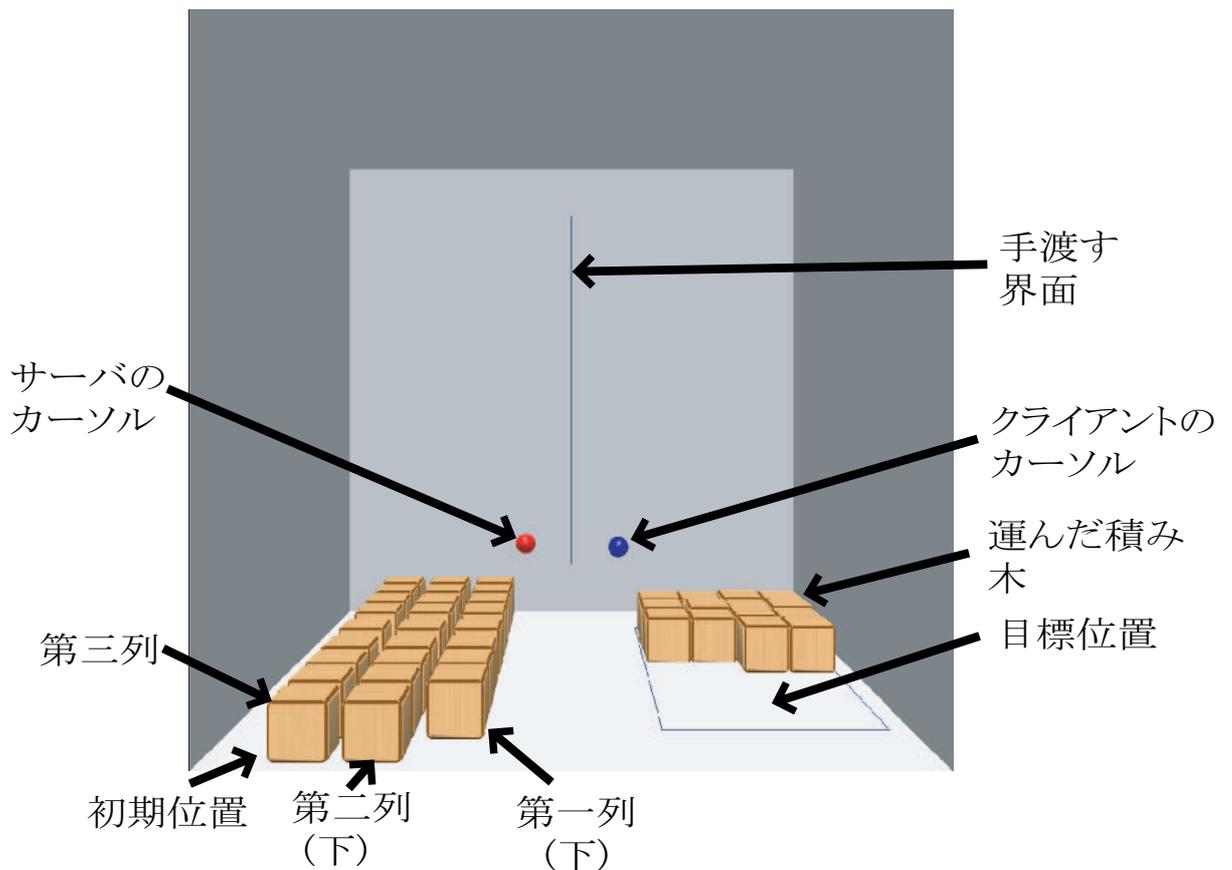


図 3.8 作業後の仮想空間 (積み木を運ぶ作業)

に持つことにより、積み木の動きが安定することによって、目標地域を大きくはずすことがなくなるためでもある。

また、図 3.9, 図 3.10 では、手渡して作業をする場合のサーバ端末の利用者の MOS 値は二人で別々に交互に持って作業をする場合の MOS 値より大きい、二人で一緒に持って作業をする場合の MOS 値より小さいことが示されている。手渡して作業をする場合のクライアント端末の利用者の MOS 値が一番低いことがわかる。これは、手渡して作業をするとき、サーバの利用者は積み木が初期位置からある位置まで積み上げるだけの簡単な作業であり、クライアントの利用者は積み木を受け取ったら、目標位置で順番に並べる複雑な作業であるためである。そこで、遅延が大きくなると、クライアントの利用者が受けやすくなると考えられる。

(2) 標準偏差の影響

図 3.11~図 3.14 より、標準偏差が増加するにつれ、協調作業の三つの作業方法において、MOS が減少することがわかる。これは、標準偏差が大きくなると、順序制御によって廃棄された MU の数が多くなり、画面のスムーズさが悪くなるので、作業が難しくなるため

ある。

また、これらの結果を見ると、二人で一緒に持って作業をする場合の MOS 値は最も高い、手渡して作業をする場合のサーバの利用者の MOS 値は二人で別々に持って交互に作業をする場合 MOS 値より高い、手渡して作業をする場合のクライアントの利用者の MOS 値は最も低いという、固定付加遅延の結果と同じ傾向が見られる。

3.5.2 パケット欠落の影響

図 3.15～図 3.18 より、パケット欠落率が増加するにつれ、協調作業の三つの作業方法において、MOS が減少することがわかる。これは、パケット欠落率が大きくなると、到着した MU の数が少なくなり、画面のスムーズさが悪くなる、作業が難しくなるためである。

また、これらの結果を見ると、二人で一緒に持って作業をする場合の MOS 値は一番高い、手渡して作業をする場合のサーバの利用者の MOS 値は二人で別々に持って交互に作業をする場合 MOS 値より高い、手渡して作業をする場合のクライアントの利用者の MOS 値は一番低いという、固定付加遅延、付加遅延の標準偏差の結果と同じ傾向が見られる。

3.6 むすび

本章では、三次元仮想空間において、二人の利用者が力覚を利用した協調作業によって行う積み木遊びを検討対象とした。そして、協調作業として、二人の利用者が積み木を一緒に持って作業をする場合と、別々に持って交互に作業をする場合、及び手渡して作業をする場合の三通りを扱い、ネットワーク遅延とその揺らぎ及びパケット欠落が協調作業の作業のしやすさに及ぼす影響を QoE の主観評価により調査した。主観評価結果から、ネットワーク遅延とその揺らぎ、またはパケット欠落率が増加するにつれ、MOS 値は減少し、協調作業が難しくなることが確認した。また、二人の利用者が一緒に持って作業をする場合の MOS 値は最も高い、手渡して作業をする場合のサーバの利用者の MOS 値は二人で別々に持って交互に作業をする場合の MOS 値より高い傾向が判明した。手渡して作業をする場合のクライアントの利用者の MOS 値は最も低い傾向にあることがわかった。

今後、QoE の主観評価の結果と客観評価の結果との関係を調べることで、他の複雑な作業も扱い、ネットワーク遅延などの影響を調べる予定である。

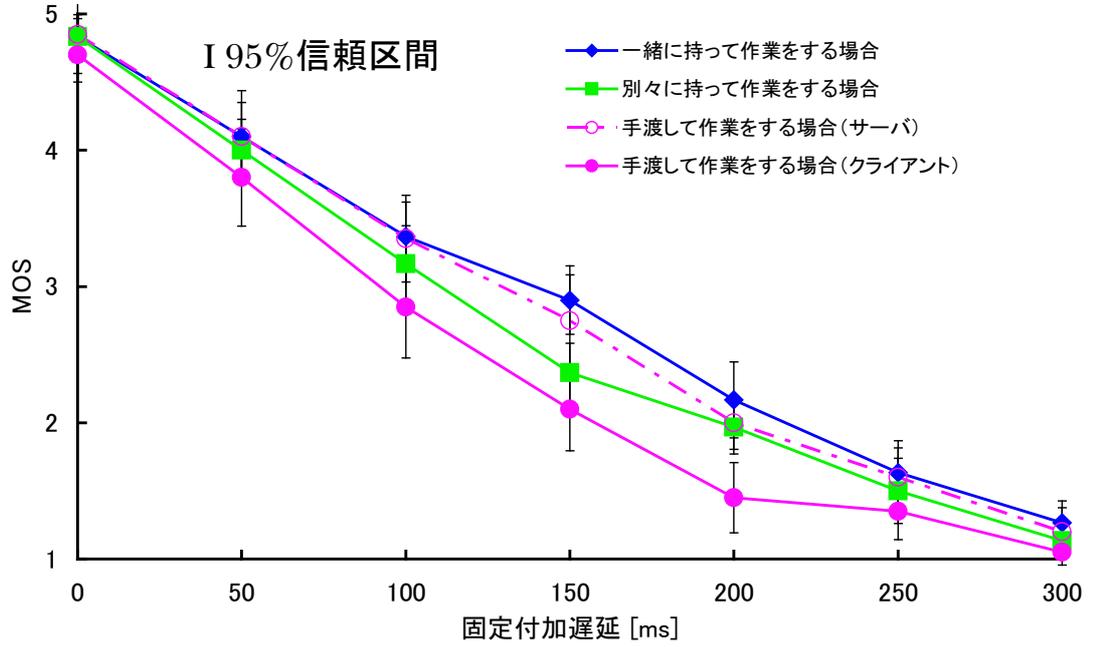


図 3.9 固定付加遅延に対する MOS 値 (積み木の家を積み上げる作業)

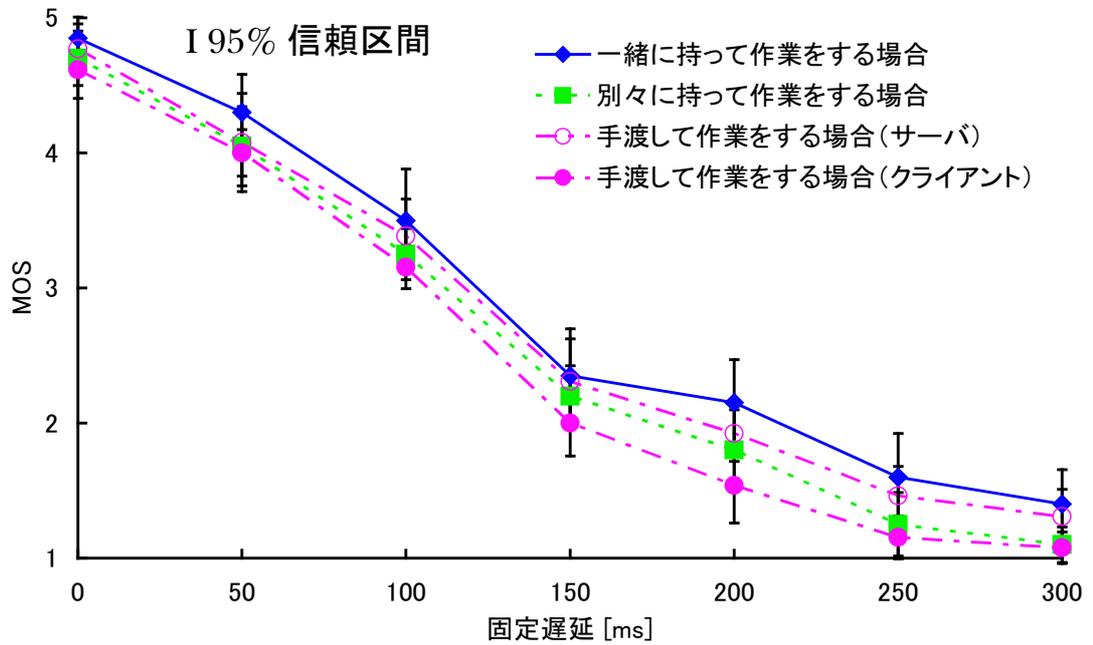


図 3.10 固定付加遅延に対する MOS 値 (積み木を運ぶ作業)

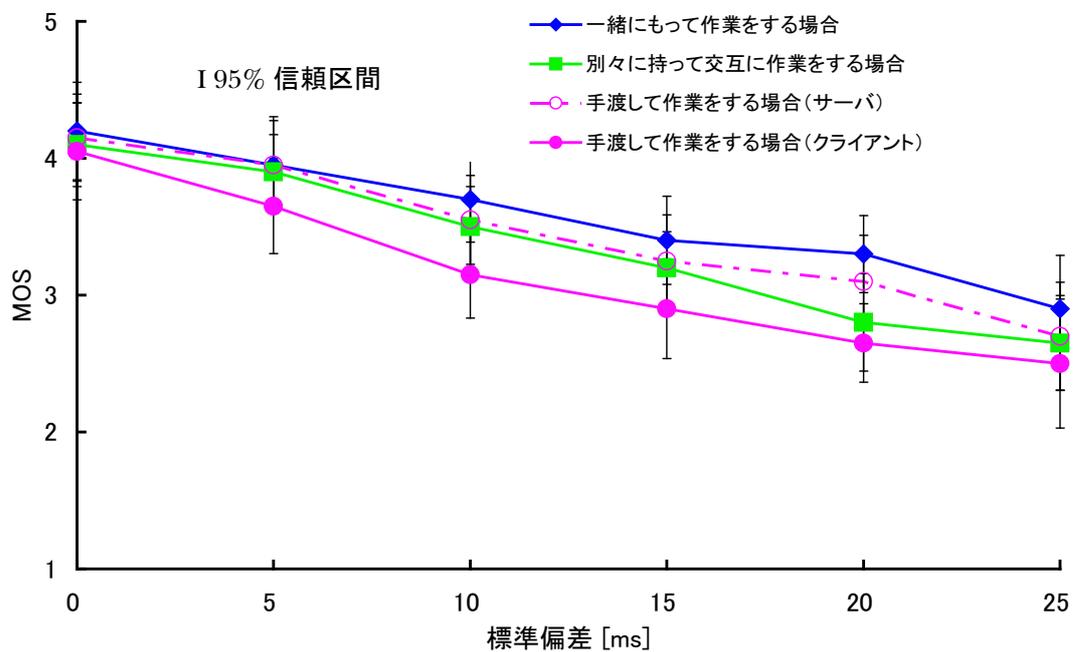


図 3.11 付加遅延の標準偏差に対する MOS 値 (積み木の家を積み上げる作業, 平均付加遅延: 50ms)

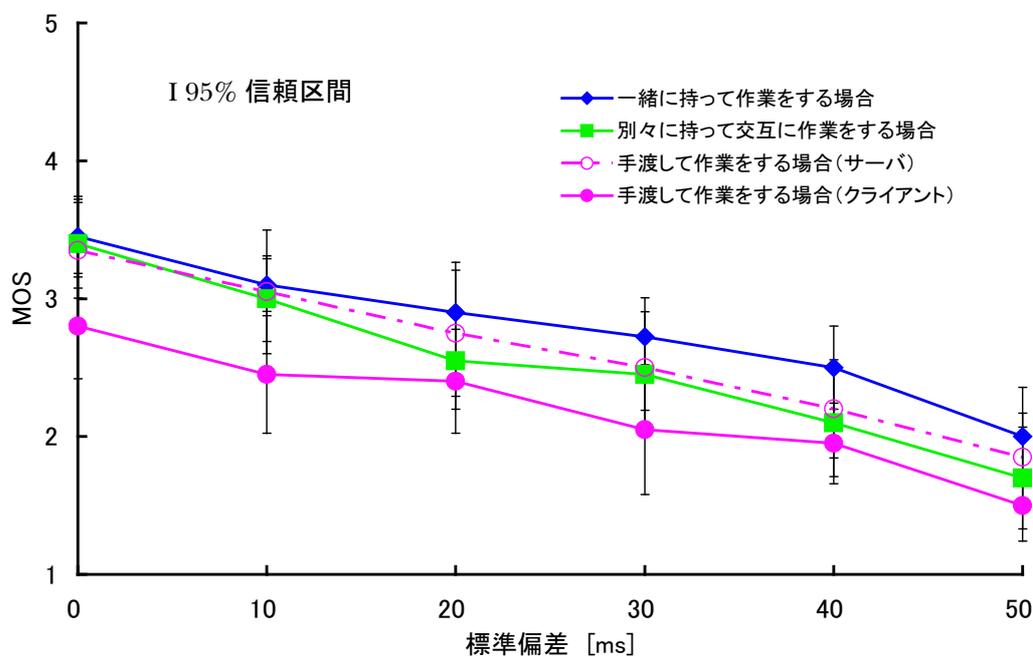


図 3.12 付加遅延の標準偏差に対する MOS 値 (積み木の家を積み上げる作業, 平均付加遅延: 100ms)

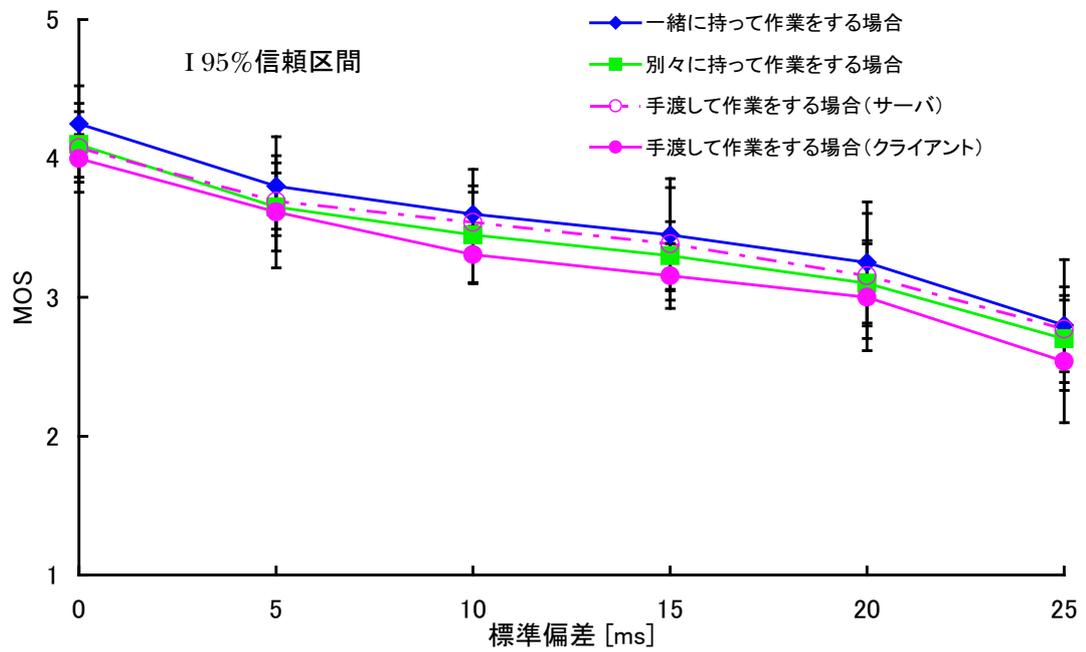


図 3.13 付加遅延の標準偏差に対する MOS 値 (積み木を運ぶ作業, 平均付加遅延 : 50ms)

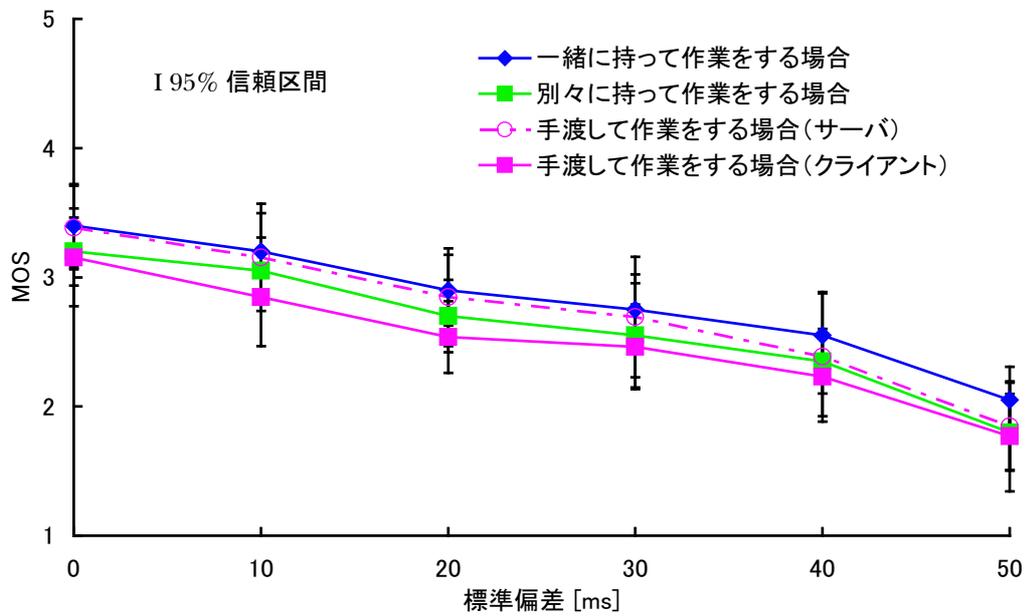


図 3.14 付加遅延の標準偏差に対する MOS 値 (積み木を運ぶ作業, 平均付加遅延 : 100ms)

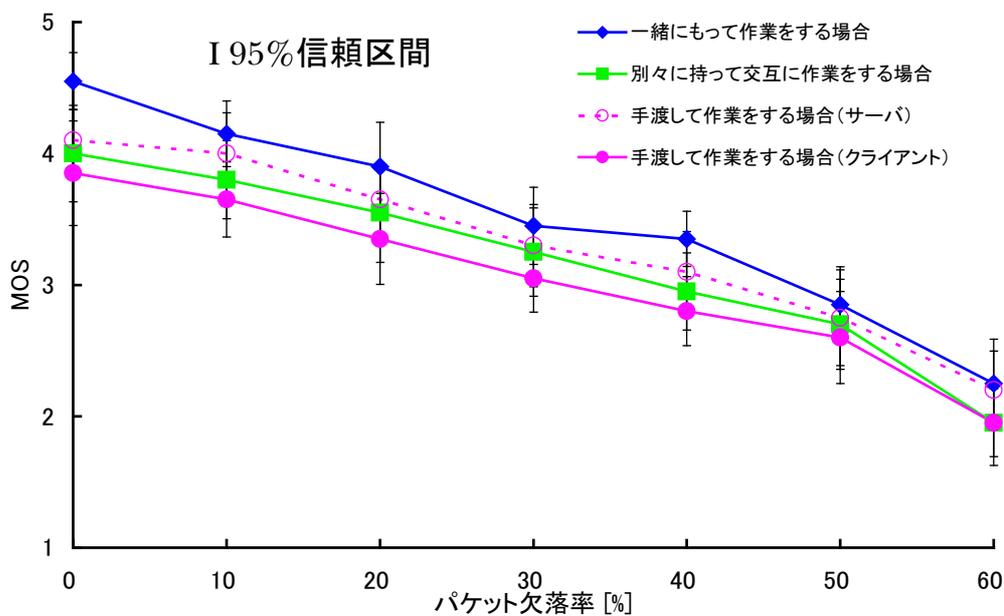


図 3.15 パケット欠落に対する MOS 値 (積み木の家を積み上げる作業, 固定遅延: 50ms)

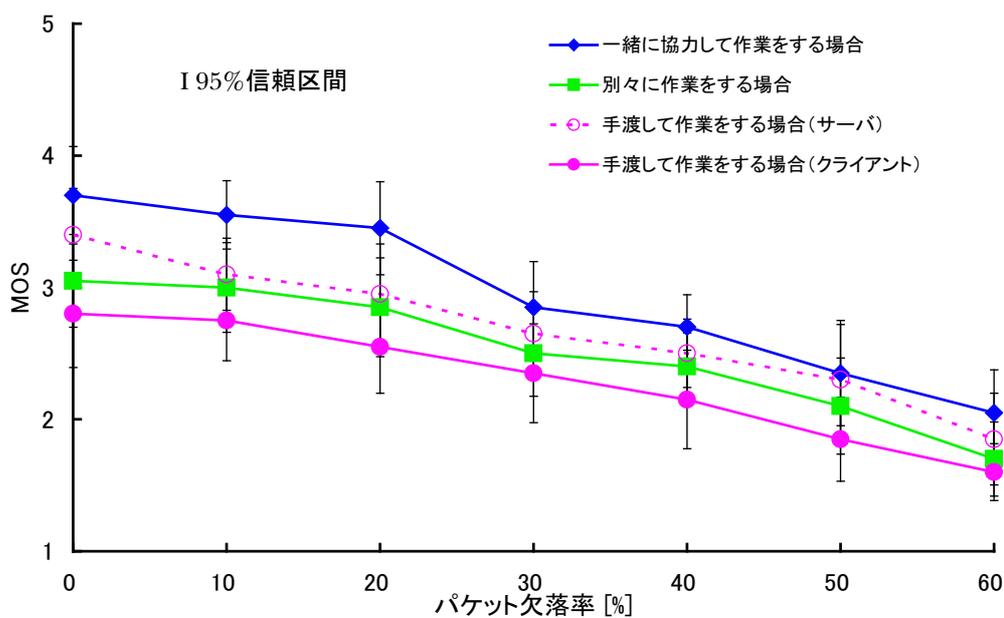


図 3.16 パケット欠落に対する MOS 値 (積み木の家を積み上げる作業, 固定遅延: 100ms)

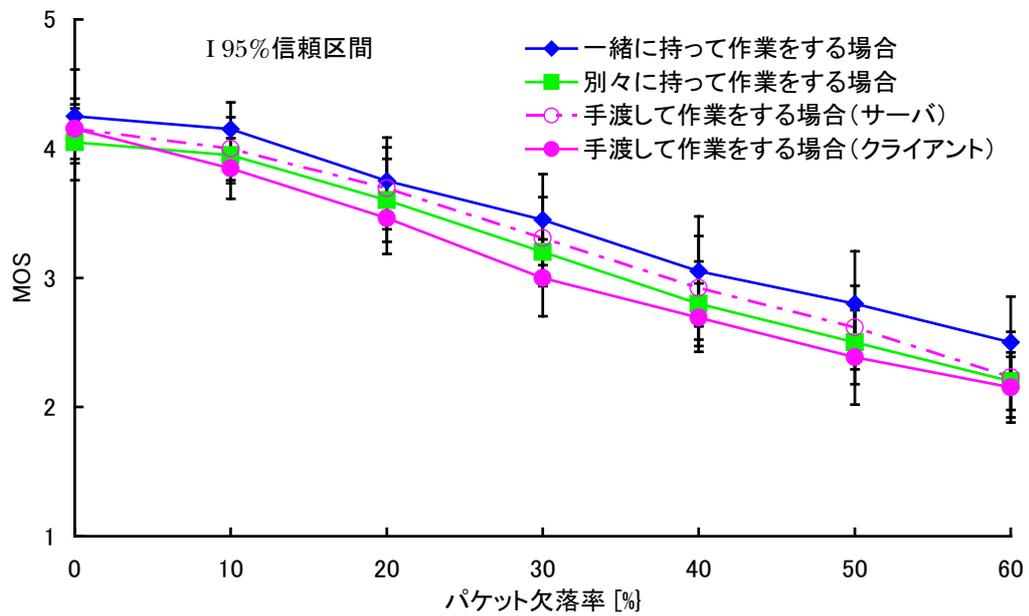


図 3.17 パケット欠落に対する MOS 値 (積み木を運ぶ作業, 固定遅延: 50ms)

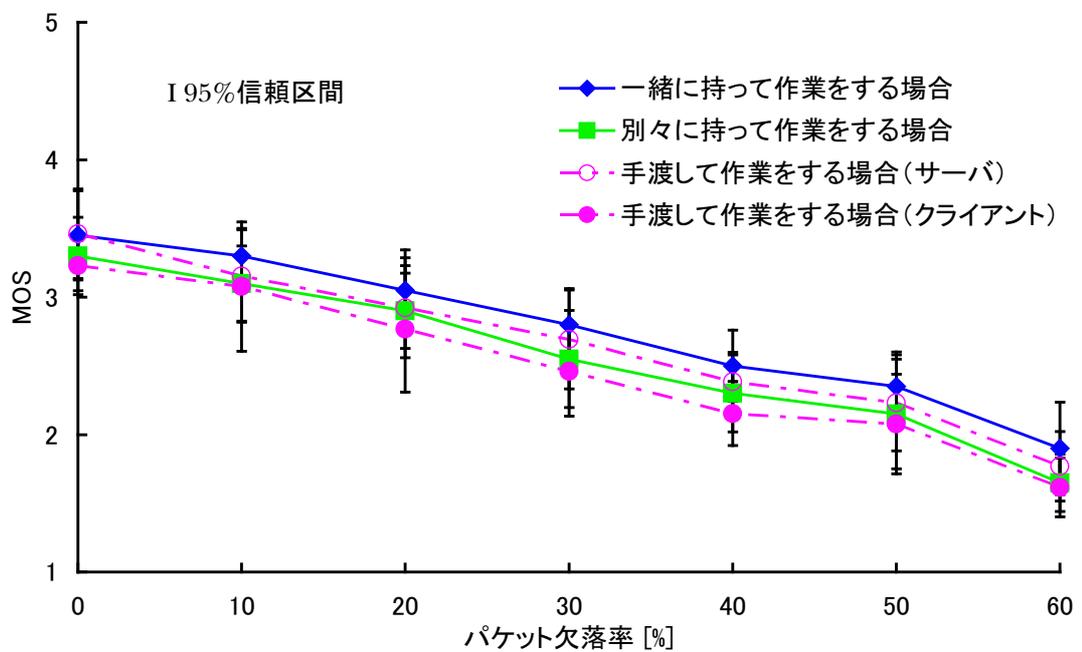


図 3.18 パケット欠落に対する MOS 値 (積み木を運ぶ作業, 固定遅延: 100ms)

第4章

力覚を利用した作業における予測を用いた 端末間同期制御の効果

4.1 まえがき

第1章で述べたように、端末間でメディアの出力タイミングずれて、利用者間で見ている仮想空間が異なり、協調作業が効率よくできなくなったり、競合作業の公平性が保てなくなる問題に対して、複数の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を行うことが必要である。競合作業において、端末間同期制御を導入することによって、端末間同期制御をしない場合より、公平性を良好に維持し、高い作業効率を達成できることが報告されている [115]。しかし、協調作業において、文献 [116] では、サーバ端末の作業効率は改善されるが、クライアント端末のそれは劣化することが示されている。また、端末間同期制御によって、インタラクティブ性 (遠隔ユーザ間とユーザ・システム間の即時対話性を指す) が劣化するという問題も起こり得る。これは、端末間で出力タイミングを揃えるために、相手端末から受信するメディアの出力時刻だけでなく、自端末のメディア出力時刻も遅らせるからである。

インタラクティブ性を改善するために、予測を行うことが考えられる [78]。文献 [78] の予測では、文献 [76] の Dead-reckoning や文献 [77] などの予測 (出力すべき時刻になっても到着していない情報 (例えば、位置) を予測して出力) と異なり、将来 (出力すべき時刻より、一定時間後) の情報 (位置) を予測する。Dead-reckoning は予測と補正からなり、予測では、過去の位置情報から現在の位置を予測し、その予測位置と実際の位置を比較し、誤差がある閾値を越えたときのみ、実際の位置情報を送信する。これにより、位置情報に関するトラフィックを削減できる。文献 [77] では、力覚を用いた遠隔描画教示システムを対象として、ネットワーク遅延とその揺らぎ、及びパケット欠落による劣化に対して、予測を用いたメディア内同期方式を提案し、その効果を検証している。文献 [78] のような将来の位置を予測する方法は、インタラクティブ性の改善につながるが、Dead-reckoning と文献 [77] はインタラクティブ性の改善はできない。そこで、本論文では、文献 [78] の予測と同様に、将来の位置を予測する手法を用いることにする。

本章では、端末間同期制御が必要となる、力覚を利用した作業を対象とし、インタラク

ティブ性を高く保持するため、予測を用いた端末間同期制御方式を提案する。そして、システムの構成、力の計算方法、力覚の送信レートなどが異なる二つの作業（遠隔描画教示 [77] と協調作業による積み木遊び [98]）に対して、提案方式を実装し、QoE 評価により、その方式の有効性を検証する。これらの二つの作業のうち、遠隔描画教示では、指導者と学習者の間で力覚を双方向に伝達して図形等の描き方を教示することができる。積み木遊びでは、第 3 で述べたように、二人の利用者が力覚を利用し、一緒に協力して、仮想空間内でオブジェクトとして複数個の積み木を扱い、家などを積み上げることが可能である。そして、QoE 評価として、客観評価と主観評価の二通りを扱う。さらに、客観評価結果と主観評価結果の関係も調べる。

以下では、まず、4.2 で力覚を利用した二つの作業について説明する。次に、4.3 において予測を用いた端末間同期制御方式について述べる。最後に、4.4 では評価環境を説明し、4.5 において評価結果の考察を行う。

4.2 力覚を利用した作業

ここでは、システムの構成、力の計算方法、力覚の送信レートなどが異なる二つの作業の中の遠隔描画教示 [77] の概要について説明する。積み木遊びについては、第 3 章を参照されたい。

遠隔描画教示では、ネットワークを介して、一人の指導者と一人の学習者が力覚をインタラクティブに感じながら、筆運びの指導を行う（図 4.1）。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)が備え付けられている。この PHANToM を画筆とみなして、CG(Computer Graphics)で作成された画布(縦: 152mm, 横: 214mm)の上に図形を描くことができる。各端末には、指導者と学習者が描いた軌跡が表示される。

各端末は、自端末の PHANToM 位置情報と受信した相手の PHANToM 位置情報から、画布上に一定の大きさの正方形(一辺の長さ: 0.258mm)を描画する。そして、PHANToM 位置情報に基づいて描画された正方形を一辺の 5 倍の太さ(1.29mm)の線で結ぶことで、描画を実現する。正方形を結ぶ線を太くしているのは、正方形の位置によって、結ぶ線が正方形の一辺よりも細くなることのないようにするためである [77]。

また、指導者が PHANToM のスタイラスボタンを押すと、学習者の PHANToM には指導者の PHANToM カーソル(画布と接触している場合は接触点、接触していない場合は筆の先端を表す)に近づく力が働き、引っ張られるように学習者の PHANToM が動く。指導者の PHANToM には学習者の PHANToM カーソルに近づく力が働く。力の大きさは、指導者と学習者の PHANToM カーソル間の距離に比例するように計算される [77]。指導者は、学習者の力を感じながら学習者を先導して、描画の指導を行う。学習者は、表示される指導者の軌跡の後を追いつながら、かつ、学習者の PHANToM に伝達される指導者の力を感じながら、描画を行う。

遠隔描画教示のシステム構成は、一台の指導者の端末と一台の学習者の端末から成る P2P(Peer-to-Peer) モデルに基づいている。各端末は、PHANToM のカーソルの位置情報を相手端末へ送信する。指導者の端末と学習者の端末の具体的な機能については文献 [116]

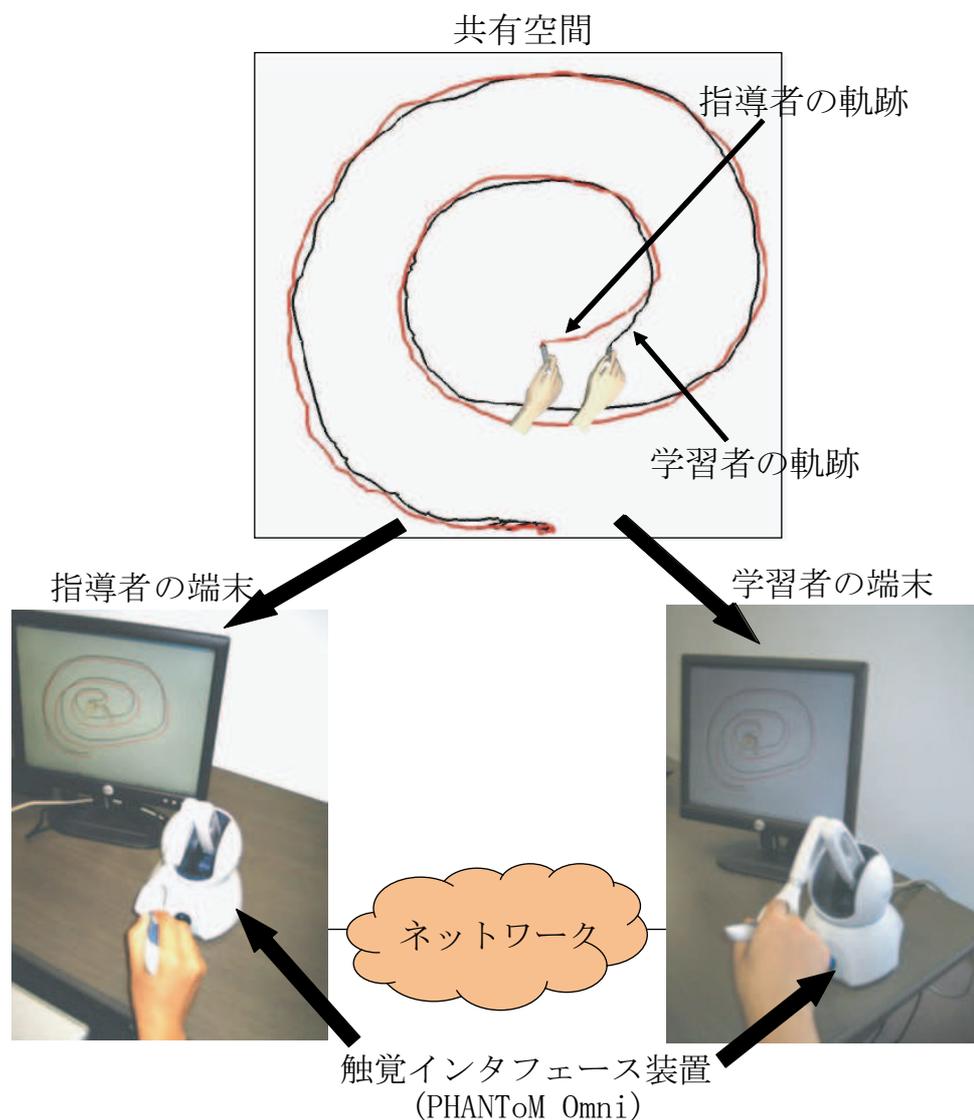


図 4.1 遠隔描画教示のシステム構成

を参照されたい。各端末の位置情報送信レート (力覚の送信レート) と描画レートは共に 30Hz とする。また, PHANToM カーソルの位置情報入出力のためのサーボループ [7] は 1kHz である。

以上の二つの作業を選んだのは, 前述のシステムの構成, 力の計算方法, 力覚の送信レートが異なる以外に, カーソル軌跡が仮想空間内に描画されるものと, されないものを扱うためである。遠隔描画教示では, カーソル軌跡が仮想空間内に描画されるので, 被験者が予測の誤差などを容易に確認することができる。一方, 積み木遊びでは, カーソル軌跡が仮想空間内に描画されないので, 被験者が予測の誤差などを目視で確認することが困難である。

4.3 予測を用いた端末間同期制御

本論文では、遠隔描画教示の端末間同期制御には、文献 [116] と同様に、制御情報を分散管理している分散制御方式 [117] を採用する。これは、遠隔描画教示が P2P モデルに基づいているからである。そして、積み木遊びでは、クライアント・サーバモデルに基づいているので、端末間同期制御のために、制御情報を集中管理している同期マエストロ方式 [118] を採用する。積み木遊びに対して、同期マエストロ方式の代わりに、分散制御方式を採用する場合の評価も行った結果、同期マエストロ方式を採用する場合の主観評価結果と客観評価結果とほとんど同じ結果が得られた。本論文では、同期マエストロの機能はサーバ端末に持たせる。同期マエストロ方式と分散制御方式との違いは、出力タイミングの決定方法にある。そこで、本論文では、分散制御方式を詳しく説明し、同期マエストロ方式については分散制御方式との違いのみを述べる。

分散制御方式では、MU(メディアユニット)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出力すべき時刻)[119] を発生時刻 $+ \delta$ とする。ここで、 δ は目標遅延時間であり、 $0 \leq \delta \leq \Delta_{al}$ を満たす。 Δ_{al} は、最大許容遅延を表し、触覚メディアのインタラクティブ性を保つために用いられる(実験では、 δ の初期値を 100ms, $\Delta_{al} = 400$ ms とし、その他のパラメータ値は、文献 [116] と同じとする)。しかし、ネットワーク遅延によっては、発生時刻 $+ \delta$ までに MU が到着しない場合がある。その場合、VTR(Virtual-Time Rendering) アルゴリズム [112] により、その MU の目標出力時刻(ネットワーク遅延揺らぎがある場合に出力すべき時刻)[112] が変更される可能性がある。これが変更されると、端末によって、同一の理想的な目標出力時刻を持つ MU の出力時刻が異なってしまう。これを揃えるため、出力タイミングに関する情報を他の端末に送信する。この情報は、MU と一緒に他の端末に送信される。

各端末は、出力タイミングに関する情報を受信すると、基準とすべき出力タイミング [119] を決定する。出力タイミングが基準とすべきものと異なる場合、少しずつ出力タイミングを基準とすべきものに合わせていく。この理由は、一度に大きく出力タイミングを変更すると、出力品質が大きく劣化する恐れがあるからである。本論文では、基準とすべき出力タイミングとして、ネットワーク遅延が最も大きい端末の出力タイミングを選択する。このようにして、二つの端末で出力タイミングを揃えることによって、端末間同期を達成する。

同期マエストロ方式では、各端末の MU の目標出力が変更されると、出力タイミングに関する情報を同期マエストロに送信する。同期マエストロは、各端末における MU 出力タイミングの情報を収集する。そして、基準とすべき出力タイミングを決定し、全端末に通知する。各端末は、出力タイミングが基準とすべきものと異なる場合、少しずつ出力タイミングを基準とすべきものに合わせていく。このようにして、端末間同期を実現する。

予測を用いた端末間同期制御方式では、インタラクティブ性を高く保持するために、受信した MU の目標出力時刻 t の $T_{\text{predict}} (\geq 0)$ 秒後の位置 $\mathbf{P}(t + T_{\text{predict}})$ を予測して目標出力時刻 t に正方形(遠隔描画教示)またはカーソル(積み木遊び)として出力する。予測には、簡単のため、よく使われている position history-based な線形一次予測 [79] を用いる。そして、自端末の MU の出力時刻を T_{predict} 秒だけ早める。このように、端末間同期制御の機能を拡張して、予測を組み合わせることにするのは、次の理由による。端末間同期制御と

予測を単純に組み合わせると、端末間同期制御を行った後に、予測を行うことになる。この場合は、相手端末の位置を予測することに大きな問題は生じないが、自端末の位置も予測すると、バッファリングされている実際の位置との誤差が生じ、自端末の PHANToM が操作しにくくなるからである。

線形一次予測における $\mathbf{P}(t + T_{\text{predict}})$ は、受信した MU の目標出力時刻 t の T_{predict} 秒後の PHANToM の予測位置であり、次式によって与えられる。

$$\mathbf{P}(t + T_{\text{predict}}) = \mathbf{P}(t) + \frac{\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}(t - \delta)}{\delta} T_{\text{predict}} \quad (4.1)$$

ただし、 δ は一つ前の MU と受信した MU の目標出力時刻の間隔、 $\mathbf{P}(t)$ は目標出力時刻が t の MU に含まれる PHANToM の位置、 $\mathbf{P}(t - \delta)$ は目標出力時刻が $t - \delta$ の MU に含まれる PHANToM の位置である。

端末間同期制御のみを行う方式と予測を用いた端末間同期制御方式における遠隔描画教示の描画例をそれぞれ図 4.2, 図 4.3 に示し、積み木遊びのカーソル軌跡の表示例をそれぞれ図 4.4, 図 4.5 に示す。図 4.3 と図 4.5 は、それぞれ図 4.2 の描画例と図 4.4 のカーソル軌跡の表示例に対して、予測を適用したものである。これらの図は、同時刻における描画例及びカーソル軌跡の表示例を表している。積み木遊びのカーソル軌跡の表示例は、遠隔描画教示の描画例と同様なので、以下では、図 4.2, 図 4.3 についてのみ説明する。ただし、図 4.2, 図 4.3 では表示される MU のシーケンス番号の間隔が 33 になっているのに対し、図 4.4 と図 4.5 ではその間隔が 16 になっている。これは、遠隔描画教示の描画レートが 30Hz であり、積み木遊びの画面の更新レートが約 60Hz だからである (MU の入出力は 1kHz で行われるので、シーケンス番号は 1ms に 1 だけ進むことに注意されたい)。

図 4.2(a) では、指導者の端末は、自端末で発生したシーケンス番号が 100 までの MU を保持している。また、図 4.2(b) でも、学習者の端末は、自端末で発生した 100 までの MU を保持している。しかし、ネットワーク遅延により、MU の到着が遅れるので、図 4.2(a) の学習者の端末のシーケンス番号は 34 までしか表示されていない。同様に、図 4.2(b) の指導者の端末のそれも 34 までである。図 4.2(a) において、指導者の描画は、シーケンス番号が 100 の位置まで行うことができるが、実際には 34 の位置までしか行われていない。これは、端末間同期制御を行うことにより、指導者の端末の MU の出力タイミングを遅らせるからである。また、図 4.2(b) の学習者の描画についても、同様の理由により、シーケンス番号が 100 の位置まで描画できるが、34 までしか描画されていない。これらによって、指導者と学習者の端末間で両者の描画軌跡は一致する。

図 4.2(a) に予測と早期出力を適用した図 4.3(a) において、学習者の描画は、34 までではなく、67 まで行われている。これは、学習者の端末の MU に対して、図 4.2(a) のときより T_{predict} 秒 (この図では 33ms としている) だけ先の位置を予測しているからである。また、指導者の描画に関しても、学習者と出力タイミングを合わせるために、図 4.2(a) のときよりも T_{predict} 秒だけ出力時刻を早めているため、67 まで表示されている。図 4.3(b) でも、図 4.3(a) と同様に、学習者と指導者の描画が 67 まで行われている。しかし、図 4.3 の指導者と学習者の描画において、予測によって描かれた 67 の位置と出力タイミングを早めることによって描かれた 67 の位置を比べると、端末間で誤差が生じていることが分かる。

以上のことから、図 4.3 において、 T_{predict} を大きくすると、インタラクティブ性をより高く保持することができるといえる。しかし、このとき、予測誤差が大きくなることが分かる。

また、積み木遊びにおいて、端末間同期制御のみを行う方式と予測を用いた端末間同期方式におけるカーソルの軌跡の表示例をそれぞれ図 4.4, 図 4.5 に示す。本作業中、カーソルの形は球体となっているので、表示例は円で表す。積み木遊びのカーソル軌跡の表示例は、遠隔描画教示の描画例と同様なので、ここでは省略する。

4.4 評価環境

4.4.1 評価システム

(1) 遠隔描画教示

図 4.6 に示すように、ネットワークエミュレータを介して、指導者と学習者の端末を Ethernet ケーブル (100BASE-TX) によって接続する。各端末は、各 MU を 1 パケットとし、UDP によって送信する。

本論文では、ネットワーク遅延がメディア出力品質に及ぼす影響を調査する。そのため、NIST Net を用いて、通過する各 MU に対し、パレート正規分布 [113] に従う遅延を付加する (以下、付加遅延と呼ぶ)。

評価では、「渦」の形を描画し (図 4.1 参照)、予測時間 T_{predict} の値を 0ms から 100ms まで 25ms 間隔で変化させた。なお、 $T_{\text{predict}}=0\text{ms}$ のとき、予測を行わず、端末間同期制御のみを行うことになる。これらの予測時間に対し、付加遅延の平均を 100ms または 200ms とした。平均付加遅延が 100ms のとき、付加遅延の標準偏差を 0ms, 10ms, 20ms 及び 30ms に設定し、平均付加遅延が 200ms のとき、付加遅延の標準偏差を 0ms, 20ms, 40ms 及び 60ms に設定し、評価を行った。このとき、パケット欠落率は 0% とした。予測時間、付加遅延の平均及び標準偏差の大きさはランダムな順序で選択された。

(2) 積み木遊び

図 4.6 に示すように、サーバ端末とクライアント端末は NIST Net を介して接続される。MU の転送には、トランスポートプロトコルとして UDP を使用する。

評価では、二人の利用者が積み木を一緒に持って、家を積み上げた。作業方法については、第 3 章を参照されたい。そして、予測時間 T_{predict} の値を 0ms, 10ms, 20ms, 30ms, 50ms と変化させた。これらの予測時間に対し、平均付加遅延を 50ms または 100ms とした。平均付加遅延が 50ms のとき、付加遅延の標準偏差を 5ms の間隔で 0ms から 20ms まで変化させ、平均付加遅延が 100ms のとき、付加遅延の標準偏差を 10ms の間隔で 0ms から 40ms まで変化させて、評価を行った。このとき、パケット欠落率は 0% とした。予測時間、付加遅延の平均及び標準偏差の大きさはランダムな順序で選択された。

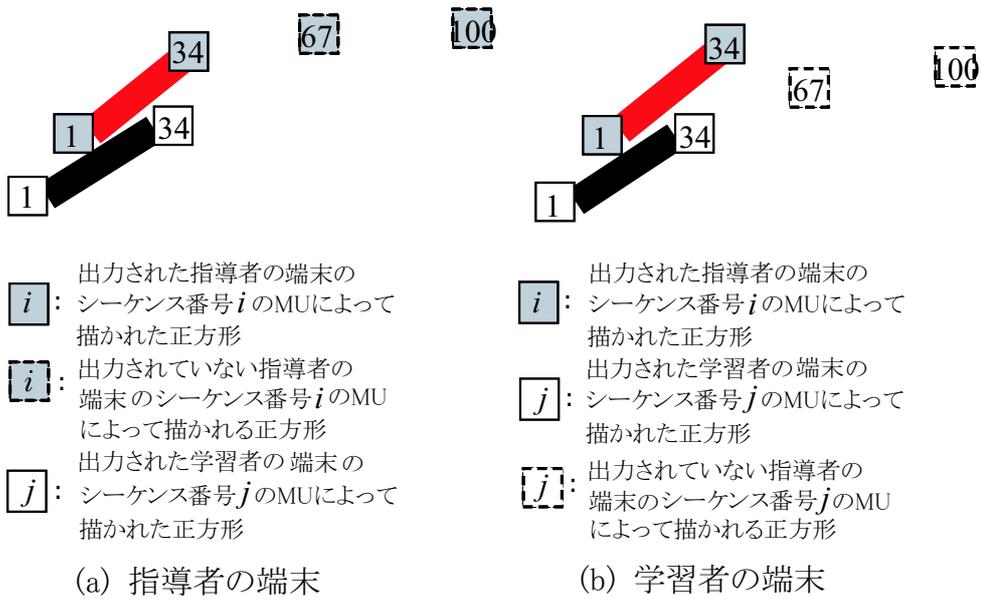


図 4.2 端末間同期制御のみを行う方式における描画例

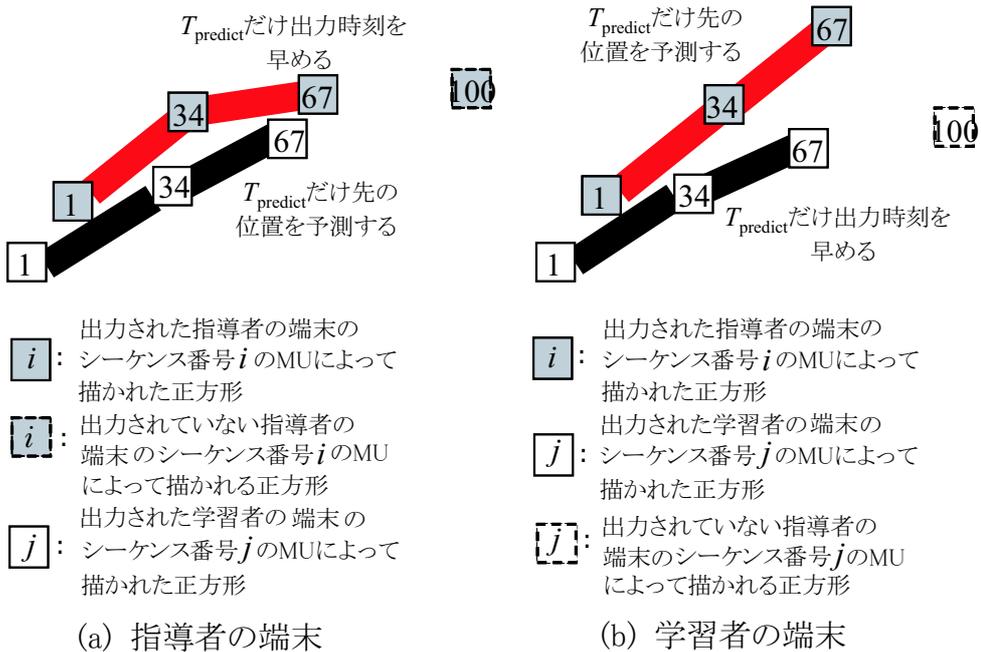


図 4.3 予測を用いた端末間同期制御方式における描画例

4.4.2 評価方法

主観評価方法には、ITU-R BT. 500-11 の単一刺激法を拡張して用いた。単一刺激法では、被験者は、まず、ネットワーク遅延がない状態で作業を行い、その後、ネットワーク遅

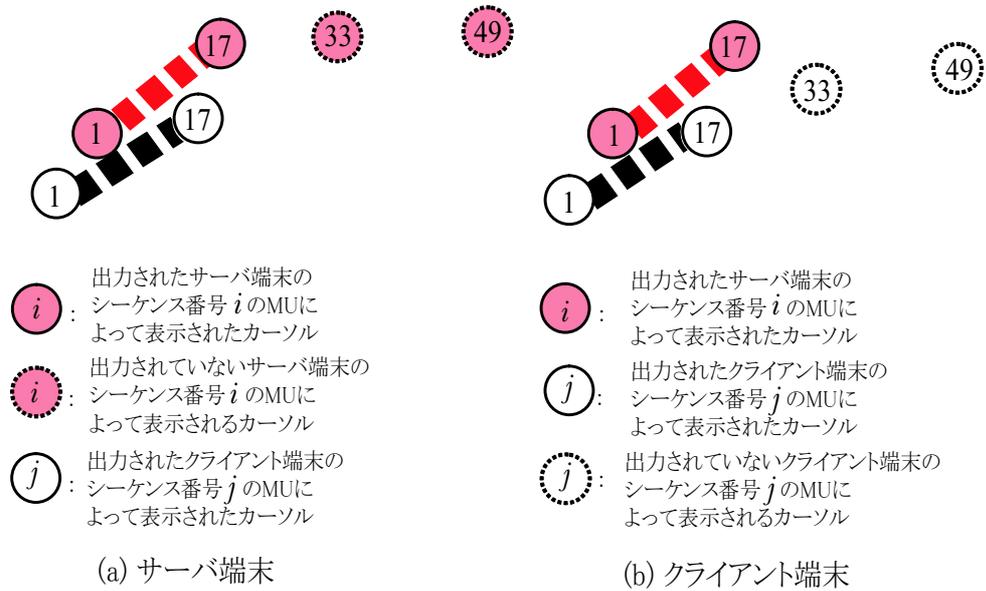


図 4.4 端末間同期制御のみを行う方式におけるカーソル軌跡の表示例

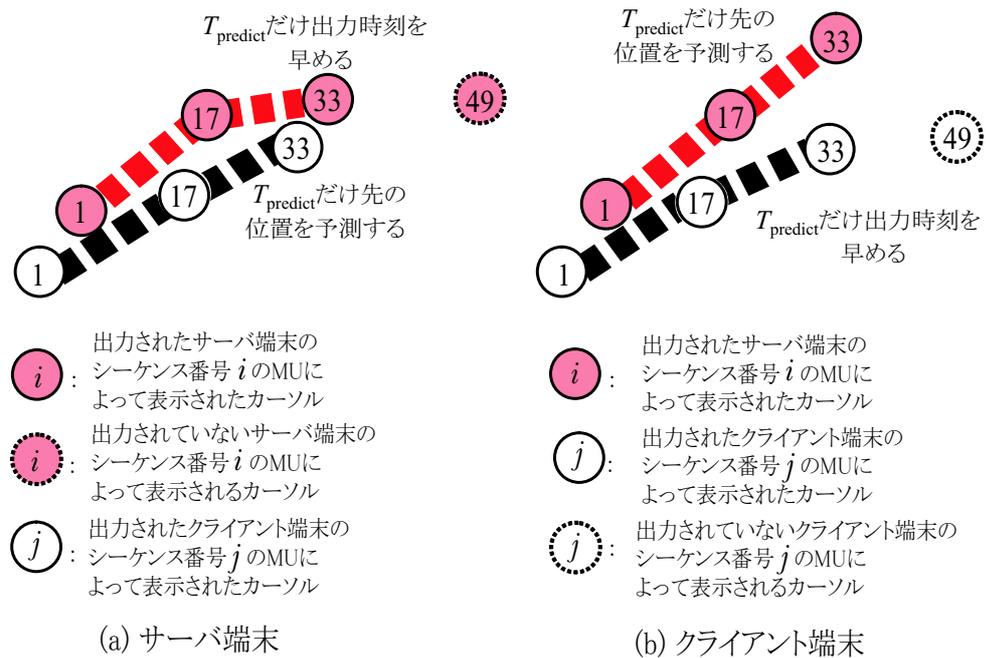


図 4.5 予測を用いた端末間同期制御方式におけるカーソル軌跡の表示例

延やその揺らぎを付加し、作業を行った。そして、ネットワーク遅延がない状態を基準として評価した。

遠隔描画指示において、評価の前に、端末間同期制御を行わず、ネットワーク遅延を付加しない状態で、各被験者に「渦」の形を2, 3回描画してもらった。その後、端末間同期制

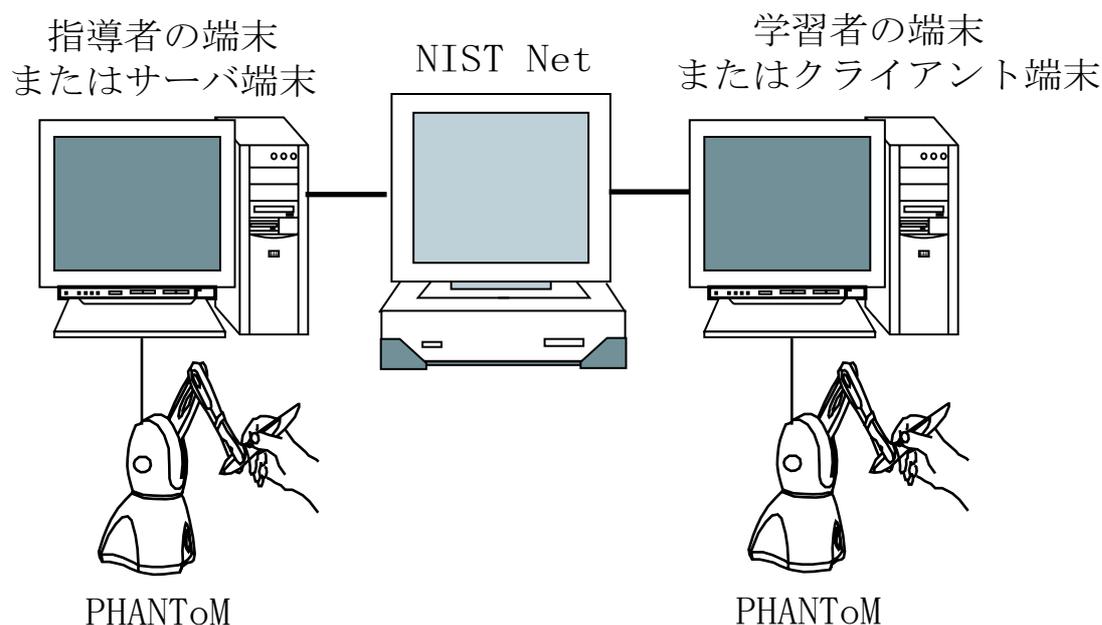


図 4.6 評価システム

御のみを行う方式及び予測を用いた端末間同期制御方式を導入して、ネットワーク遅延を付加し、力覚と描画の劣化の度合に対して5段階妨害尺度(表 1.5)で各被験者に評点を付けてもらい、MOSを求めた。

積み木遊びにおいては、評価の前に、端末間同期制御を行わず、ネットワーク遅延を付加しない状態で、各被験者に積み木の家を積み上げる作業を2,3回練習してもらった。その後、端末間同期制御のみを行う方式及び予測を用いた端末間同期制御方式を導入して、ネットワーク遅延を付加し、作業のしやすさに対して5段階妨害尺度(表 1.5)で各被験者に評点を付けてもらい、MOSを求めた。ここで、作業のしやすさとは、作業全体に対する評価のことであり、具体的には、次の三つを総合したものである。一つは、自分の操作が正確に画面上へ反映されるかどうかである。二つ目は、自端末のPHANToMを意図通りに円滑に操作できるか否かであり、三つ目は、相手が自分の意図と合致した操作を行ってくれるかどうかである。この作業のしやすさの定義を評価の前に、各被験者に説明した。

遠隔描画指示に対する評価と積み木遊びに対する評価は別々の日に行われた。被験者数は30名(21歳から26歳の男女)である。遠隔描画指示では一人当たりの総評価時間は1時間程度であり、積み木遊びでは約2時間であった。なお、遠隔描画指示では、約30分経過したところで、5分から10分程度の休憩をとった。また、積み木遊びでは、約40分毎に、5分から10分程度の休憩をとった。

主観評価と同時に、客観評価も行った。客観評価尺度として、遠隔描画指示では追従率、積み木遊びでは平均作業時間を採用する。追従率は、各端末で、学習者のPHANToMカーソルの位置が指導者のそれから一定の距離(1.5cmとする)以内に納まった時間の評価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。1.5cmを選んだ理由は次の通りである。筆者らは、円の半径を1.0cm, 1.5cm, 2.0cm

と変化させ、予備実験を行った。その結果、1.5cm のときに予測時間の違いによる追従率の差が最も明確に現われたからである。平均作業時間は、被験者が作業開始から家を完成させるまでの時間の平均である。これは、被験者の作業効率を表す。

4.5 評価結果と考察

4.5.1 遠隔描画教示

(1) 主観評価結果

平均付加遅延が 100ms のときの付加遅延の標準偏差に対する指導者端末と学習者端末の MOS 値をそれぞれ図 4.7, 図 4.8 に示す。また、平均付加遅延が 200ms のときのそれらを図 4.9, 図 4.10 に示す。

図 4.7, 図 4.8 では、予測時間 T_{predict} が 25ms または 50ms のときの MOS 値が他の予測時間のそれより高く、図 4.9, 図 4.10 では、予測時間 T_{predict} が 50ms のときの MOS 値が最も高い傾向が見られる。このことから、予測時間には最適値が存在し、その最適値は付加遅延の平均と標準偏差に依存することが分かる。しかし、これらの図において、予測時間 T_{predict} が 75ms 以上の場合の MOS は、 $T_{\text{predict}} = 0\text{ms}$ (端末間同期制御のみを行う方式) のそれよりも低い傾向がある。これは、予測により、インタラクティブ性を高めることができるが、予測時間が長くなることによって、予測位置と実際の出力位置が大きく異なったからである。

図 4.7 から図 4.10 の結果に対し、予測時間と標準偏差を要因として二元配置分散分析 [120] を行った。その結果、予測時間の有意差はそれぞれ 0.005, 0.000, 0.003, 0.043 であり、0.05 より小さいので、予測時間が実験結果に影響を及ぼすことを確認した。また、予測時間と標準偏差の交互作用はなかった。さらに、多重比較を行った結果、図 4.7 と図 4.9 の指導者の MOS 値において、平均付加遅延が 100ms のとき、MOS 値が最も高くとなる予測時間 ($T_{\text{predict}}=25\text{ms}$) の予測時間 T_{predict} が 0ms(端末間同期制御のみを行う方式) に対する有意確率は 0.046, MOS 値が最も高くとなる予測時間 ($T_{\text{predict}}=25\text{ms}$) の MOS 値が最も低くなる予測時間 ($T_{\text{predict}}=100\text{ms}$) に対する有意確率は 0.001 であり、いずれも 0.05 より小さいので、有意差が存在することが分かった。平均付加遅延が 200ms のとき、MOS 値が最も高くとなる予測時間 ($T_{\text{predict}}=50\text{ms}$) の予測時間 T_{predict} が 0ms(端末間同期制御のみを行う方式) に対する有意確率は 0.049, MOS 値が最大となる予測時間 ($T_{\text{predict}}=50\text{ms}$) の MOS 値が最小となる予測時間 ($T_{\text{predict}}=100\text{ms}$) に対する有意確率はそれぞれ 0.031, 0.000 である。いずれも 0.05 より小さいので、有意差が存在することがわかった。図 4.8 と図 4.10 の学習者の MOS 値において、有意差検定を行った結果、図 4.7 と図 4.9 の有意差検定の結果と同様に、MOS 値が最も高くなる予測時間の予測時間が 0ms(端末間同期制御のみを行う方式), MOS 値が最も高くなる予測時間が MOS 値が最小となる予測時間に対する有意確率は 0.05 より小さかったので、有意差が存在することがわかった。従って、予測を用いた端末間同期制御方式は有効であり、予測時間には最適値が存在する。

さらに、著者らは、一次予測の代わりに、二次予測 [79] を用いて、4.4 節の遠隔描画教示

に対する評価と同様の評価を行った。その結果、二次予測の場合の MOS 値が最も高くなる予測時間は、一次予測の場合のそれとほとんど同じであった。しかし、二次予測の場合の MOS 値は、一次予測の場合のそれより僅かに高い傾向があった。この理由は、PHANToM カーソルを円を描くように動かすので、二次予測の誤差の方が一次予測のそれよりも小さくなったからである。

その他、大きな方向変更を伴う動作に対する効果を調査するため、「鋸」の形を描く作業の評価も行った。その結果、「鋸」の形を描く場合の MOS 値が最も高くなる予測時間は、「渦」の形を描く場合のそれとほとんど同じであった。即ち、予測時間 T_{predict} が 25ms または 50ms のとき最も MOS 値が高くなる傾向が得られた。一方、「鋸」の形を描くときの MOS 値は、「渦」の形を描くときのそれより僅かに高いことが分かった。これは、「鋸」は複数の直線から成るので、一次予測では、予測位置と実際の位置との差が「渦」の形を描くときよりも小さくなるからである。

以上の結果から、提案方式は T_{predict} が 25ms または 50ms のとき最も有効であるといえる。

(2) 客観評価結果

平均付加遅延が 100ms と 200ms のときの付加遅延の標準偏差に対する指導者端末で測定された追従率をそれぞれ図 4.11, 図 4.12 に示す。学習者端末の追従率は、指導者端末のそれとほとんど同じであったため、割愛する。

図 4.11, 図 4.12 から、予測時間 T_{predict} が 25ms または 50ms のときの追従率が最も高くなっていることが分かる。これらの結果は、図 4.7 から図 4.10 の MOS とほぼ同じ傾向である。

図 4.11 と図 4.12 の結果に対し、予測時間と標準偏差を二元配置分散分析の要因として分析を行った結果、主観評価結果の有意差検定の結果と同様に、予測時間の有意差は 0.05 より小さかったので、予測時間が実験結果に影響を及ぼすことを確認した。また、予測時間と標準偏差の交互作用はなかった。多重比較を行った結果、追従率が最大となる予測時間の予測時間が 0ms (端末間同期制御のみを行う方式)、追従率が最大となる予測時間が MOS 値が最小となる予測時間に対する有意確率は 0.05 より小さかったので、有意差が存在することがわかった。従って、予測を用いた端末間同期制御方式は有効であり、予測時間には最適値が存在する。

その他、二次予測を用いた場合の客観評価結果について、主観評価結果と同様に、追従率が最も良くなる予測時間は、一次予測の場合のそれとほとんど同じであった。しかし、二次予測の場合の追従率は、一次予測の場合のそれより僅かに高い傾向があった。この理由は 5.1 節 (1) の理由と同じである。

以上の結果からも提案方式は有効であるといえる。

(3) 主観評価結果と客観評価結果の関係

主観評価結果と客観評価結果の関係を調べるために、回帰分析を行った。独立変数を追従率 R_{follow} とし、MOS の推定値 V_{mos} を従属変数として回帰分析を行った結果、次の回帰

式が得られた。

$$V_{\text{mos}} = 7.258R_{\text{follow}} - 2.872 \quad (4.2)$$

上式の自由度調整済み決定係数は0.861であった。自由度調整済み決定係数はMOSの実測値と推定値の一致度を表すものである。従って、追従率から高い精度でMOSを推定できるといえる。高い精度での推定が可能になれば、主観評価を行う必要性が低くなる。主観評価では、信頼性が低いという問題 [81](被験者が評点を正確につけるのが難しい)があるので、これを行う必要性が低くなることは一つの利点である。

4.5.2 積み木遊び

(1) 主観評価結果

積み木遊びにおいて、平均付加遅延が50msと100msのときの付加遅延の標準偏差に対するサーバ端末のMOS値をそれぞれ図4.13, 図4.14に示す。クライアント端末のMOS値は、サーバ端末のMOS値とほとんど同じであったため、割愛する。

図4.13では予測時間 T_{predict} が20ms, 図4.14では20msまたは30msのときに、MOS値が最も高くなっている。このことから、遠隔描画教示の場合と同様に、予測時間の最適値が存在し、その最適値は付加遅延の平均と標準偏差に依存することが分かる。また、図4.13, 図4.14から、予測時間 T_{predict} が10ms, 20ms, 30msのときのMOS値は $T_{\text{predict}} = 0\text{ms}$ (端末間同期制御のみを行う方式)のそれより高い傾向があることが分かる。しかし、 T_{predict} が50msのときのMOS値は T_{predict} が0msのときのそれより低い傾向にある。これは、前述のように、予測により、インタラクティブ性を高めることができるが、予測時間が長くなることによって、予測位置と実際の出力位置が大きく異なったからである。

図4.13と図4.14の結果に対し、予測時間と標準偏差を二元配置分散分析の要因として分析を行った結果、遠隔描画教示の主観評価結果の有意差検定の結果と同様に、予測時間の有意差は0.05より小さかったので、予測時間が実験結果に影響を及ぼすことを確認した。また、予測時間と標準偏差の交互作用はなかった。多重比較を行った結果、MOS値が最も高くなる予測時間の予測時間が0ms(端末間同期制御のみを行う方式)、MOS値が最も高くなる予測時間がMOS値が最小となる予測時間に対する有意確率は0.05より小さかったので、有意差が存在することがわかった。従って、予測を用いた端末間同期制御方式は有効であり、予測時間には最適値が存在する。

また、著者らは、一次予測の代わりに、二次予測を用いて、4.4節の積み木遊びに対する評価と同様の評価を行った。その結果、二次予測の場合のMOS値は、一次予測の場合のそれとほとんど同じであった。この理由は、PHANToMカーソルの動きが直線的になることがあるので、二次予測と一次予測の誤差が同程度であったからである。

以上の結果から、提案方式は T_{predict} が20msまたは30msのとき最も有効であるといえる。この結果は5.1節(1)の結果と異なる。これは、二つの作業の内容に加えて、システムの構成、力の計算方法、力覚の送信レート、カーソルの軌跡が描画されるか否かが異なるからであると考えられる。

(2) 客観評価結果

平均付加遅延が 50ms と 100ms のときの標準偏差に対する平均作業時間をそれぞれ 図 4.15, 図 4.16 に示す.

図 4.15 から, 予測時間 T_{predict} が 20ms のときの平均作業時間が最も短いことが分かる. また, 図 4.16 では, 予測時間 T_{predict} は 20ms または 30ms のときに, 平均作業時間は最も短くなっている. これらの結果は, 図 4.13 と図 4.14 の MOS 値とは大小関係が逆になっていることに注意されたい.

図 4.15 と図 4.16 の結果に対し, 予測時間と標準偏差を二元配置分散分析の要因として分析を行った結果, 主観評価結果の有意差検定の結果と同様に, 予測時間の有意差は 0.05 より小さかったので, 予測時間が実験結果に影響を及ぼすことを確認した. また, 予測時間と標準偏差の交互作用はなかった. 多重比較を行った結果, 平均作業時間が最も短くなる予測時間の予測時間が 0ms(端末間同期制御のみを行う方式), 平均作業時間が最も短くなる予測時間が平均作業時間が最も長くなる予測時間に対する有意確率は 0.05 より小さかったので, 有意差が存在することがわかった. 従って, 予測を用いた端末間同期制御方式は有効であり, 予測時間には最適値が存在する.

その他, 二次予測を用いた場合の平均作業時間は, 主観評価結果の場合と同様に, 一次予測の場合のそれとほとんど同じであった. この理由は 5.2 節 (1) の理由と同じである.

以上の結果からも提案方式は有効であるといえる.

(3) 主観評価結果と客観評価結果の関係

主観評価結果と客観評価結果の関係を調べるために, 回帰分析を行った. 独立変数を平均作業時間 T_{ope} とし, MOS の推定値 V_{mos} を従属変数として回帰分析を行った結果, 次の回帰式が得られた.

$$V_{\text{mos}} = 7.598 - 0.103 T_{\text{ope}} \quad (4.3)$$

上式の自由度調整済み決定係数は 0.923 であった. 従って, 平均作業時間から高い精度で MOS を推定できる.

4.6 むすび

本章では, 端末間同期制御が必要となる, 力覚を利用した作業を対象として, インタラクティブ性を高く保持しながら, 予測を用いた端末間同期制御を提案した. そして, 力覚の伝達方法やシステムの構成などが大きく異なる二つの作業(遠隔描画教示と積み木遊び)¹において, 提案制御を実装し, QoE 評価により, その制御の有効性を検証した. その結果, 予測時間の最適値が存在し, 遠隔描画教示においては, 予測時間 T_{predict} が 25ms または 50ms のとき, 積み木遊びでは, 予測時間 T_{predict} が 20ms または 30ms のとき, 予測を用いた端末

¹ この他, 筆者らは, 実空間内で作業を行う遠隔ペン習字システム [121] について, 提案制御を実装し, その効果を調べた. その結果, 遠隔ペン習字システムでも, 提案制御は有効であることが分かった.

間同期制御が最も有効であることが示された。さらに、客観評価結果から高い精度で主観評価結果 (MOS) を推定できることが分かった。

提案制御は、端末間同期制御が必要となる作業、特に複数人が協調して行うような作業に適用可能である。しかし、ネットワーク遅延が大きくなると、作業を行うのが困難になり、提案制御の効果が小さくなる。このときには、ネットワーク遅延やその揺らぎを軽減するため、文献 [67] のトラヒック制御などを行うことが考えられる。

今後の課題として、他の様々な作業において、提案制御の有効性を検証することが挙げられる。また、最適な予測時間と作業内容の関係を明らかにすることも重要である。さらに、本論文で扱っている一次予測と二次予測よりも、精度が高い予測手法 (例えば、現在の筆やカーソルの位置と共に現時点の瞬間的な速度や加速度を用いた予測手法、カルマンフィルタ [80]) を用いて、その効果を調べ、主観評価結果と客観評価結果の関係を調査することも必要である。

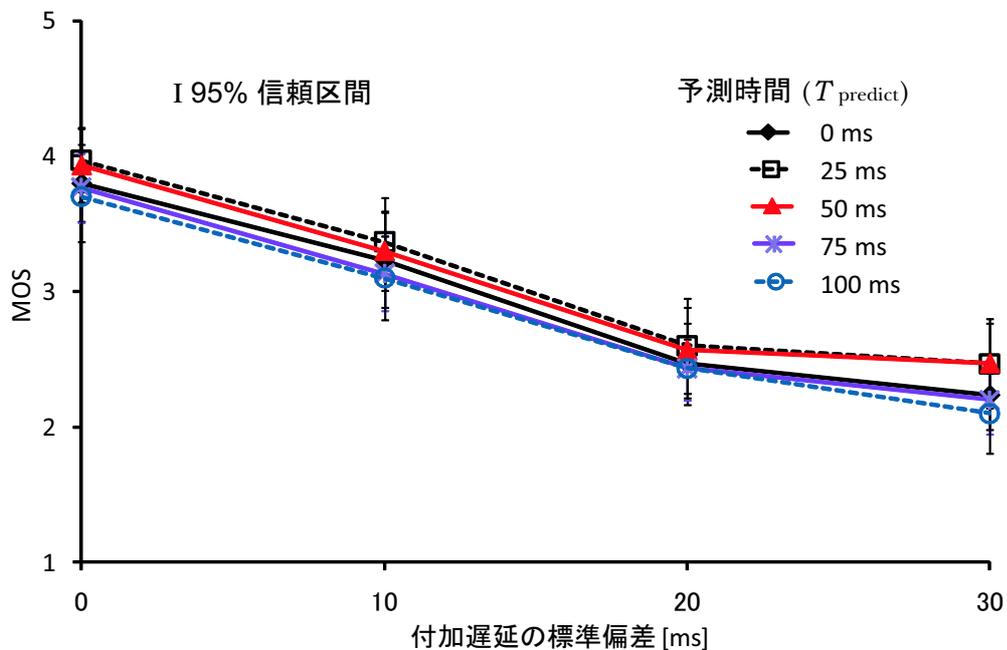


図 4.7 付加遅延の標準偏差に対する指導者端末の MOS (平均付加遅延: 100ms)

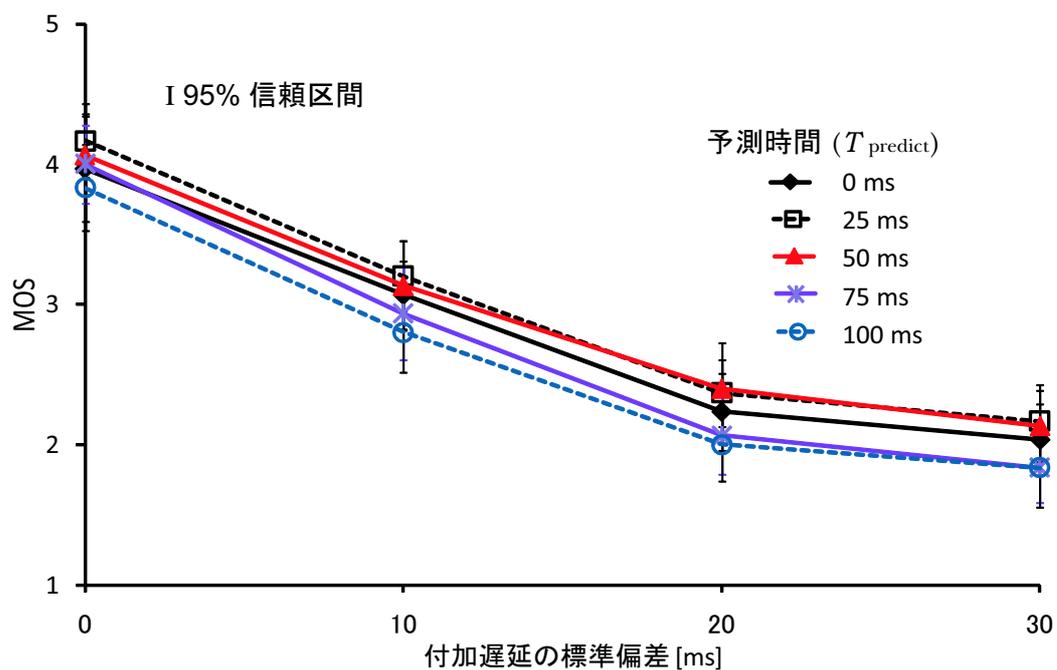


図 4.8 付加遅延の標準偏差に対する学習者端末の MOS (平均付加遅延: 100ms)

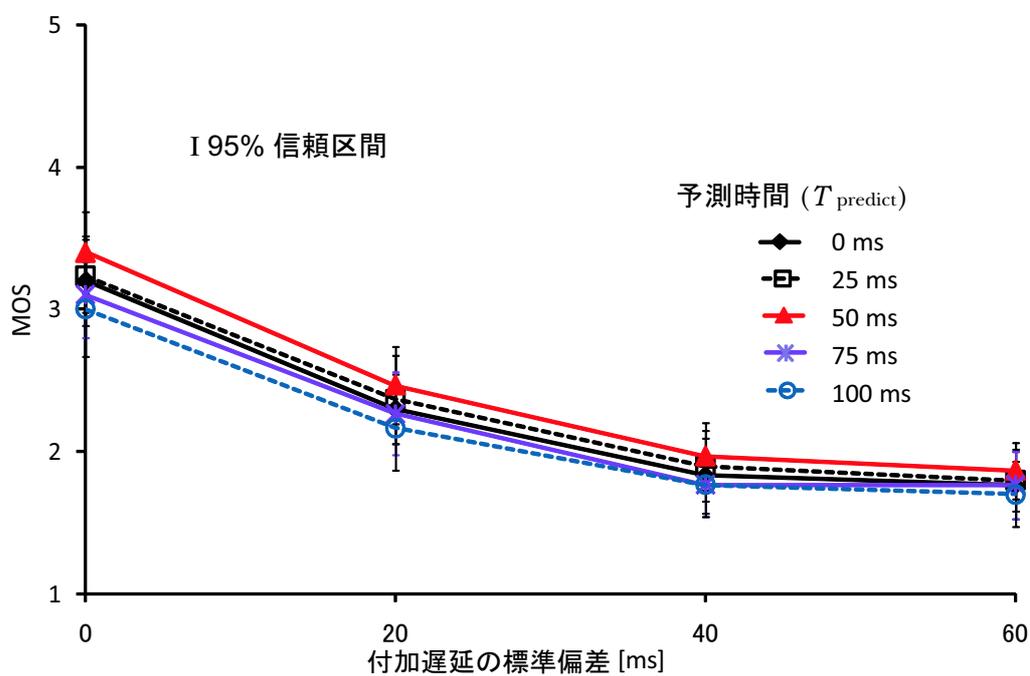


図 4.9 付加遅延の標準偏差に対する指導者端末の MOS (平均付加遅延: 200ms)

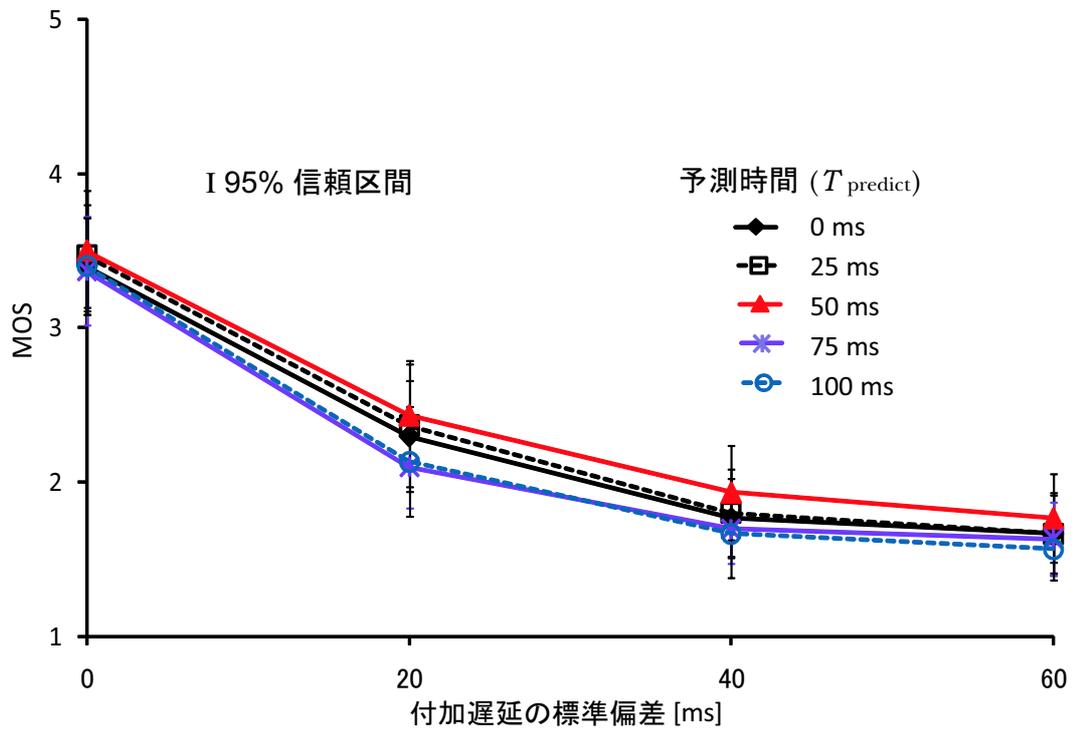


図 4.10 付加遅延の標準偏差に対する学習者端末の MOS (平均付加遅延: 200ms)

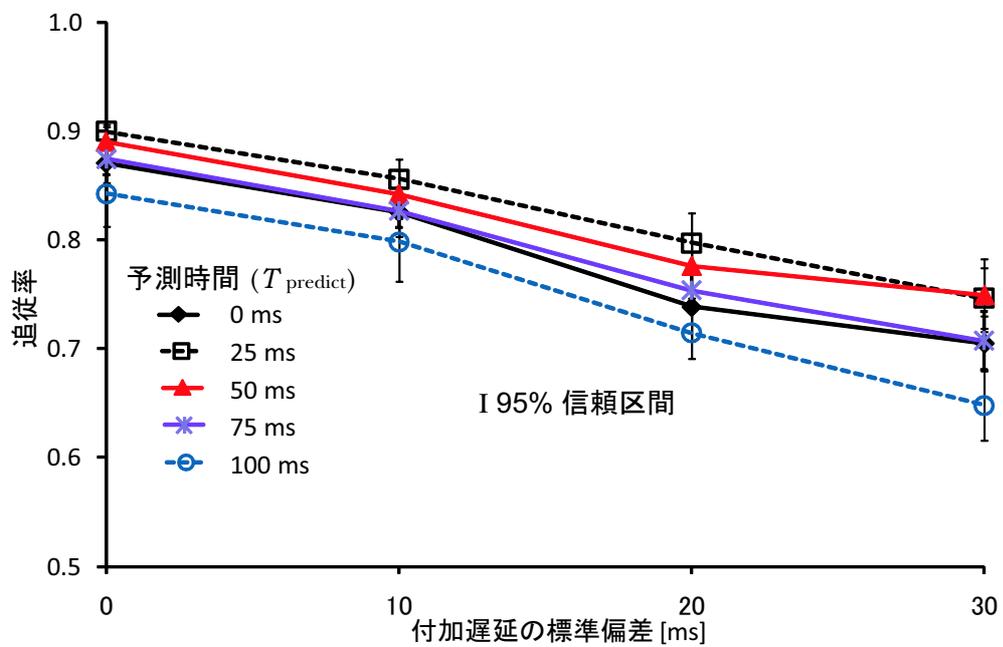


図 4.11 付加遅延の標準偏差に対する指導者端末で測定された追従率 (平均付加遅延: 100ms)

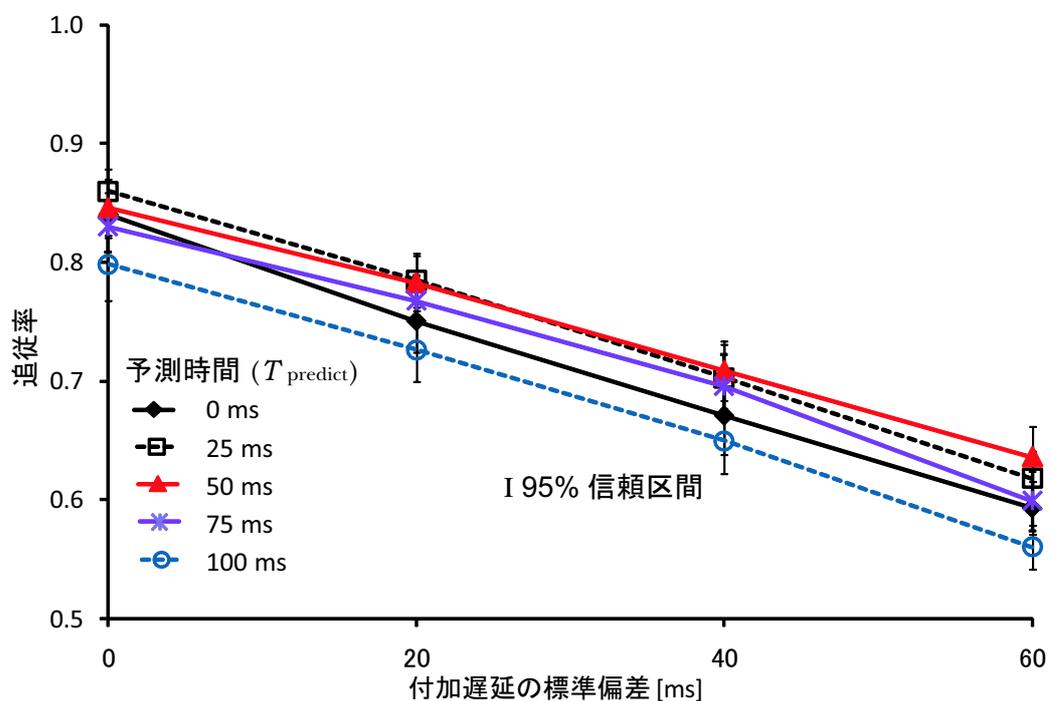


図 4.12 付加遅延の標準偏差に対する指導者端末で測定された追従率 (平均付加遅延: 200ms)

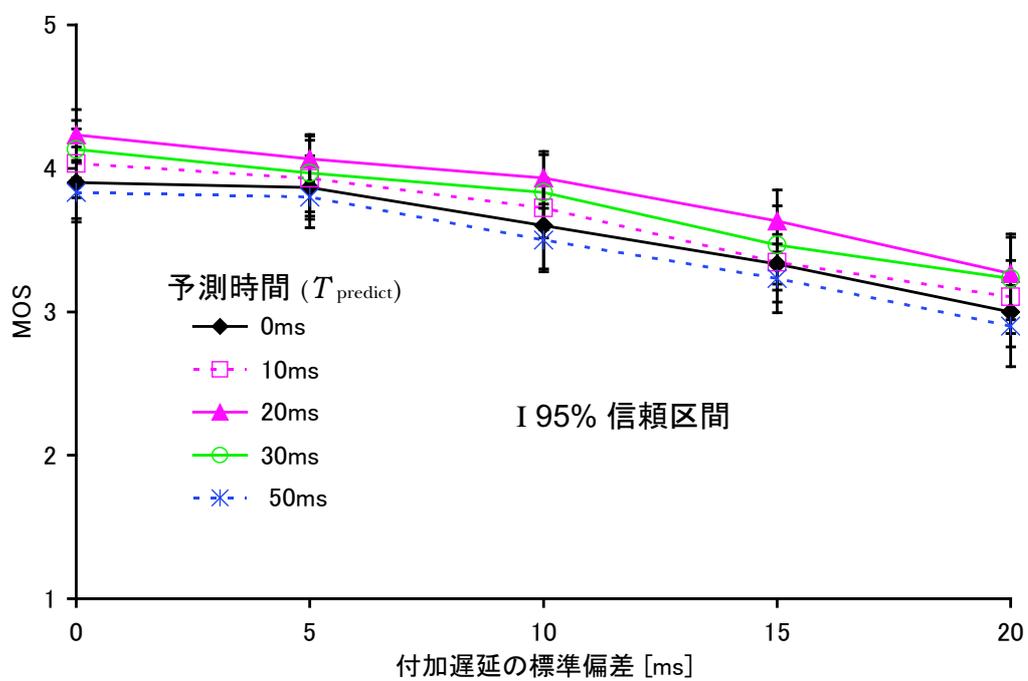


図 4.13 付加遅延の標準偏差に対するサーバ端末の MOS (平均付加遅延: 50ms)

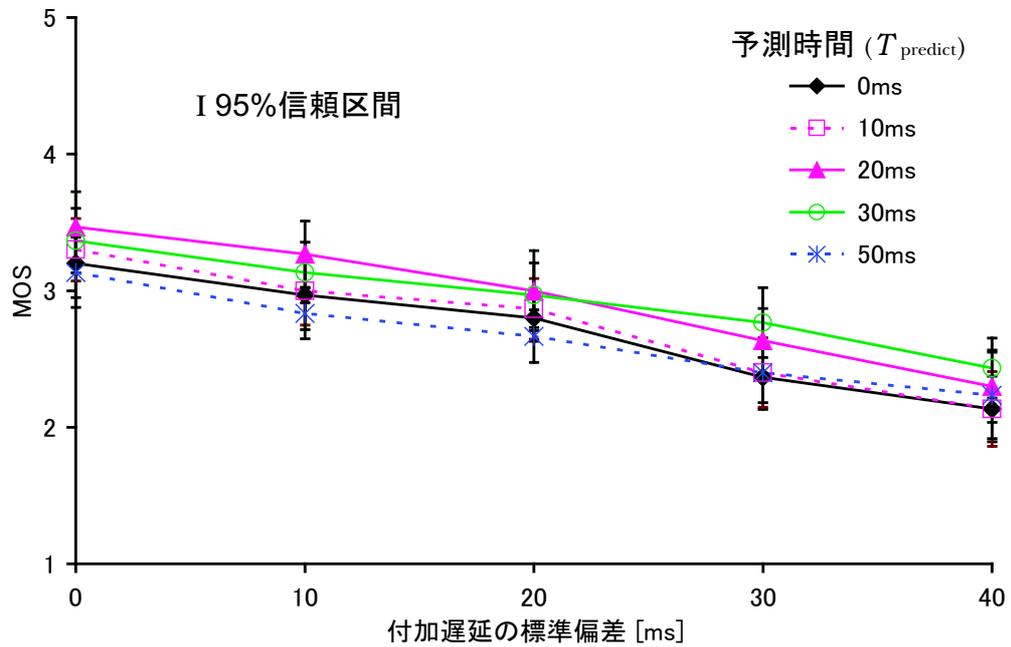


図 4.14 付加遅延の標準偏差に対するサーバ端末の MOS (平均付加遅延: 100ms)

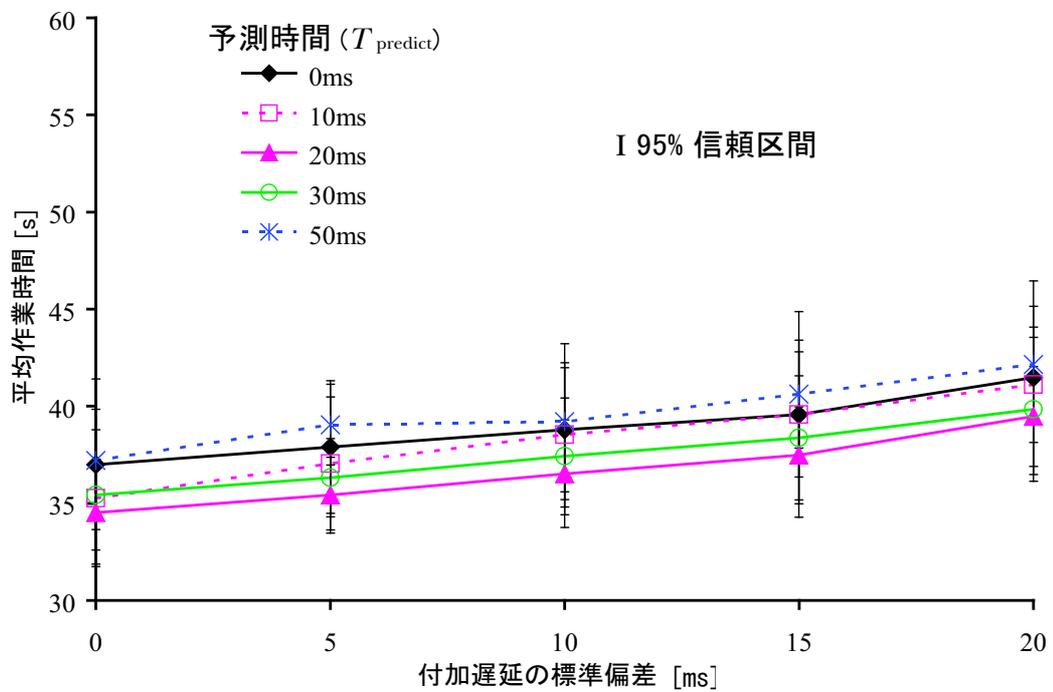


図 4.15 付加遅延の標準偏差に対する平均作業時間 (平均付加遅延: 50ms)

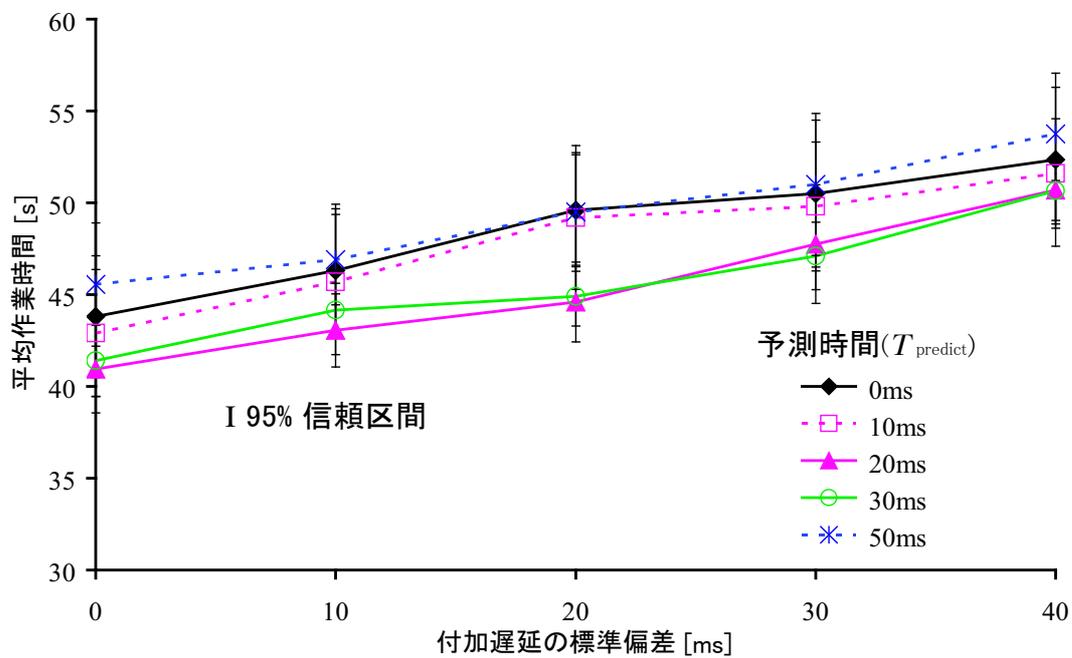


図 4.16 付加遅延の標準偏差に対する平均作業時間 (平均付加遅延: 100ms)

第5章

嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花における 香り空間の大きさの影響

5.1 まえがき

第1章で述べたように、嗅覚を視覚、聴覚、力覚等と一緒に扱うことにより、臨場感の高いコミュニケーションが可能となる。そのため、多くのアプリケーションが考えられている [50], [55], [52]。そこで、本章では嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花を扱う。

文献 [50] では、香りが感じられる範囲を表すアロマオーラを定義し、利用者がこのアロマオーラに入ると、香りを感じられるようにしている。また、どのようなタイミングで香りを出力すると、QoEが高くなることについても調査されていない。文献 [55] では、嗅覚・力覚を利用した果物狩り競争ゲームを対象に、ネットワーク遅延が利用者間の公平性に及ぼす影響を QoE 評価により調査している。これらの研究では、香りの出力タイミングが固定されている。しかし、仮想空間における嗅覚メディアの利用には、香りの出力タイミングが QoE に影響を及ぼし、どのようなタイミングで香りを出力すればよいかを調査する必要がある。

そこで、嗅覚、力覚を扱い、三次元仮想空間内で、地理的に離れた先生が生徒に生け花を教えることができる遠隔生け花を扱う。このシステムでは、先生及び生徒が反力を感じながら、花を持って、茎の長さをハサミで調整し、剣山に挿すことができる。また、嗅覚ディスプレイによって、花の香りも感じることもできる。本章では、香りの出力タイミングが QoE に及ぼす影響を評価する。

以下では、まず、5.2 で構築した嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花について説明する。次に、5.3 においてシステムモデルを紹介する。そして、5.4 では評価環境を説明し、5.5 において評価結果の考察を行う。

5.2 嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花

図 5.1 に嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花の構成を示し、図 5.2 に図 5.1 の仮想空間の側面図を示す。この遠隔生け花は、先生と生徒が同一の三次元仮想空間を共有し、触覚インタフェース装置を用いて反力を感じながら、花を持って (図 5.3 参照, 図 5.3 は生徒がバラを持っている様子を示している), 茎の長さをハサミで調整し (図 5.1 参照, 図 5.1 は生徒がバラの茎を切ろうとしている様子を示している)。仮想空間内のハサミの長さを 1 とすると、視点 (図 5.1 の仮想空間中央の手前, 図 5.2 の側面図を参照) と切ろうとするバラの距離は約 6 である), 剣山に挿することができる (図 5.4 参照, 図 5.4 はバラを剣山に挿した後の様子を示している)。また、嗅覚ディスプレイによって、花の香りも感じられるようになっている。嗅覚を提示する嗅覚ディスプレイとして SyP@D2 を、力覚を提示する触覚インタフェース装置として PHANToM Omni (以下, PHANToM と略す) を利用する。

この生け花システムでは、先生と生徒は、壁、床及び天井に囲まれた、重力のある三次元仮想空間において、PHANToM を用いてカーソル (先生や生徒が仮想空間内で触ろうとする点または触っている点) を操作して、花の茎に触ることができる。花 (バラまたはユリ) は、最初に机の右奥に並べて置かれている (図 5.1 参照)。また、カーソルで花の茎に触った状態で PHANToM のスタイラスボタンを押すと、その花がカーソルに接着し、持ち上げて動かすことができるようになる。そのとき、式 (5.1) によって計算される反力 F_f が PHANToM に提示される。

$$F_f = m_f g \quad (5.1)$$

ただし、 m_f は花の質量であり ($m_f=0.05\text{kg}$), g は重力加速度である (ハサミの長さを 1 とすると、 $g=21/s^2$)。

カーソルで花の茎に触るとき、カーソルが茎に与える力と同じ大きさで、反対方向の力が反力として PHANToM に提示される。そして、花を持ち上げた状態で、PHANToM のスタイラスボタンを離すと、カーソルと花は接着されなくなり、花は重力にしたがって落下する。

花の茎の長さを調整するためには、その花を机の上から持ち上げて手前に持って来て、「F1」キーを一回押すことによって、花をその位置で固定する。そして、カーソルで机の上にあるハサミの柄を触りながら、PHANToM のスタイラスボタンを押すことによって、ハサミを持ち上げる。カーソルでハサミの柄を触るときに、PHANToM に提示される反力は、カーソルで花の茎に触るときの反力と同じ方法で計算される。ハサミを持ち上げるとき、次式によって計算される反力 F_s が PHANToM に提示される。

$$F_s = m_s g \quad (5.2)$$

ただし、 m_s はハサミの質量である ($m_s=0.05\text{kg}$)。そして、ハサミを持って、固定されている花に向かって移動し、ハサミの刃が花の茎に当たると、茎がカットされる。カットするとき、式 (5.3) の反力 F_c が PHANToM に提示される。

$$F_c = K D_c \quad (5.3)$$

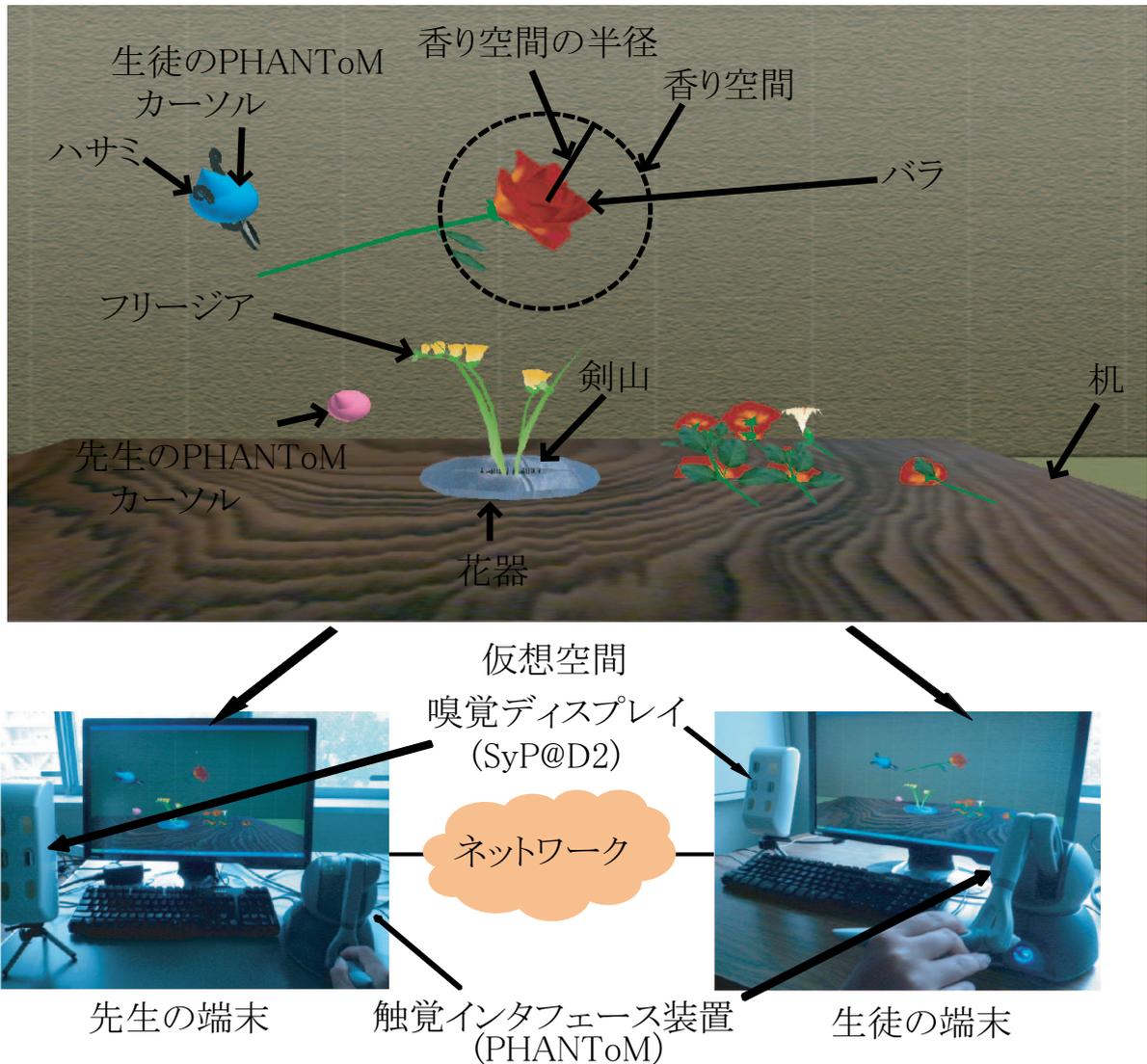


図 5.1 遠隔生け花システムの構成

ただし, K は定数であり ($K=0.01$), \mathbf{D}_c は花の茎との接触点からハサミの刃の中心点までのベクトルである.

花の茎をカットした後, カーソルで茎に触わり, スタイルボタンを押した状態で, 「F1」キーをもう一回押すことによって, 花を持って動かすことができるようになる. 先生または生徒は, 花を持って, 剣山に挿することができる. 花を剣山に挿すとき PHANToM に提示される反力 \mathbf{F}_i は式 (5.4) のように計算される.

$$\mathbf{F}_i = -K\mathbf{D}_i \quad (5.4)$$

ただし, \mathbf{D}_i は剣山と茎の接触点から茎の先端(花冠のない方)までのベクトルである. 剣山にめり込んだ茎の長さが0.08(ハサミの長さを1としていることに注意されたい)を超えると, 花が剣山に挿される.



図 5.2 図 5.1 の仮想空間の側面図

剣山に挿された花の位置や角度, 茎の長さなどを直したいときには, 挿された花を剣山から引っ張ることによって, 花を抜く. このとき PHANToM に提示される反力 F_p は次式のように計算される.

$$F_p = KD_i \quad (5.5)$$

剣山にめり込んだ茎の長さが 0.02 より短くなると, 花が剣山から抜ける. その後, 茎の長さや挿す角度を調整し, 再度挿す.

本論文では, 花の香りは, 花冠を中心として, 一定の距離まで届くとする. 即ち, 香りが届く範囲は, 図 5.5 に示すような球となるこの球を香り空間 (文献 [50] のアロマオーラに相当) と呼ぶ. 先生または生徒の視点が香り空間内に入ると, その花の香りを SyP@D2 から出力する. このとき, 文献 [54] と同様に, 出力される香りは約 2 秒後に先生または生徒に届く (SyP@D2 と先生または生徒の鼻先間の距離を約 0.3m とし, 香りの強さ (風力) を最大とする). また, 視点が香り空間の外に出ると, その花の香りの出力を停止する. 先生または生徒は, 約 2 秒後に香りを感じなくなる [109].

著者らは, この遠隔生け花に対して, 先生と生徒の立場からアンケート調査を行い, システムの有効性の他, 力覚と嗅覚の重要性を示している [122], [123].



図 5.3 生徒がバラを持っている仮想空間の表示例



図 5.4 バラを剣山に挿した後の仮想空間の表示例

5.3 システムモデル

本システムでは、一台の先生の端末と一台の生徒の端末から成る P2P モデルを用いる。図 5.6 に各端末の機能を示す。仮想空間内での PHANToM のカーソル位置、及びスタライ

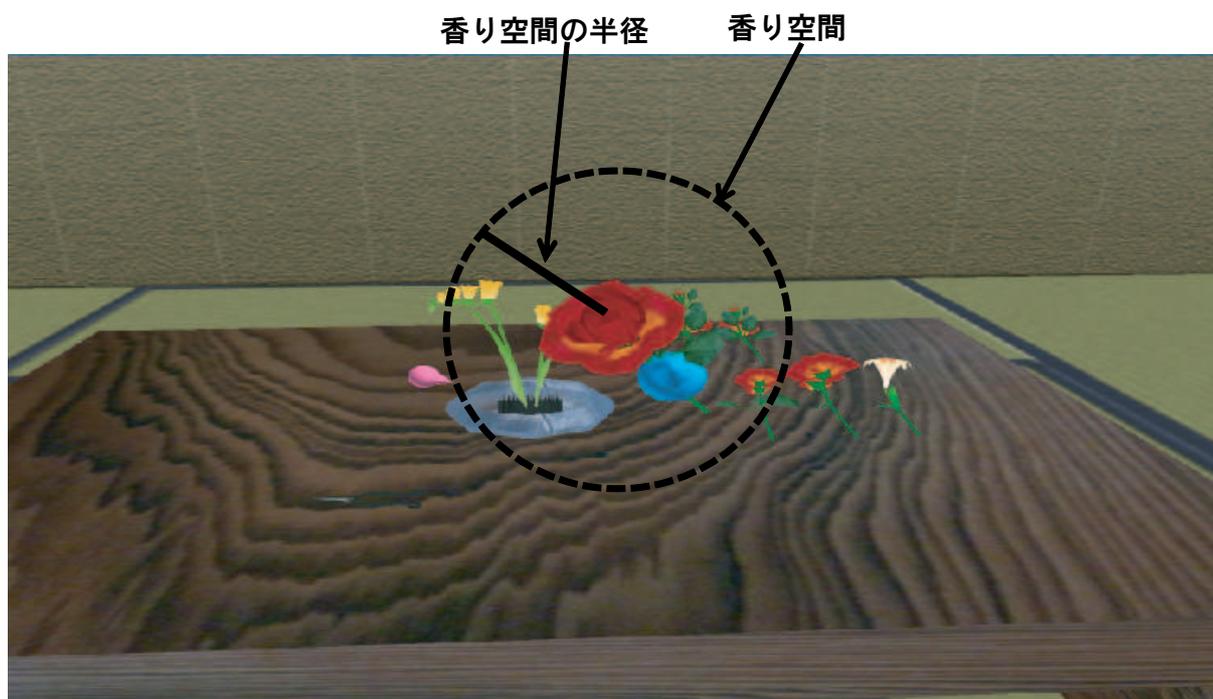


図 5.5 花の香り空間

スポットの ON/OFF 情報の取得は 1kHz で行われる。各端末は、トランスポートプロトコルとして UDP によって、自端末のカーソルの一情報とスタライスポットの ON/OFF 情報、持っているオブジェクト (花やハサミ) の情報 (ID 番号と位置情報) を MU として相手端末に送信する。また、相手端末から同様の情報を受信する。これらの情報に基づいて、反力の計算と、花とハサミの位置の更新を行う。その後、触覚メディアと嗅覚メディアを出力し、画面の更新を行う。情報の送受信、反力の計算、花とハサミの位置の更新、メディアの出力及び画面の更新は約 100Hz で行われる。

5.4 評価環境

5.4.1 評価システム

評価システムを図 5.7 に示す。このシステムでは、一つの先生端末と一つの生徒端末から構成される。これらの端末は、100 BASE-TX Ethernet ケーブルで直結されている。各端末には、PHANToM と SyP@D2 が接続されている。

5.4.2 評価方法

QoE 評価では、被験者は生徒端末を用い、机の上のバラを一本選んで、自分の視点に近付ける作業と視点から遠ざける作業を行う。視点に近付ける作業では、花の香りを発生し

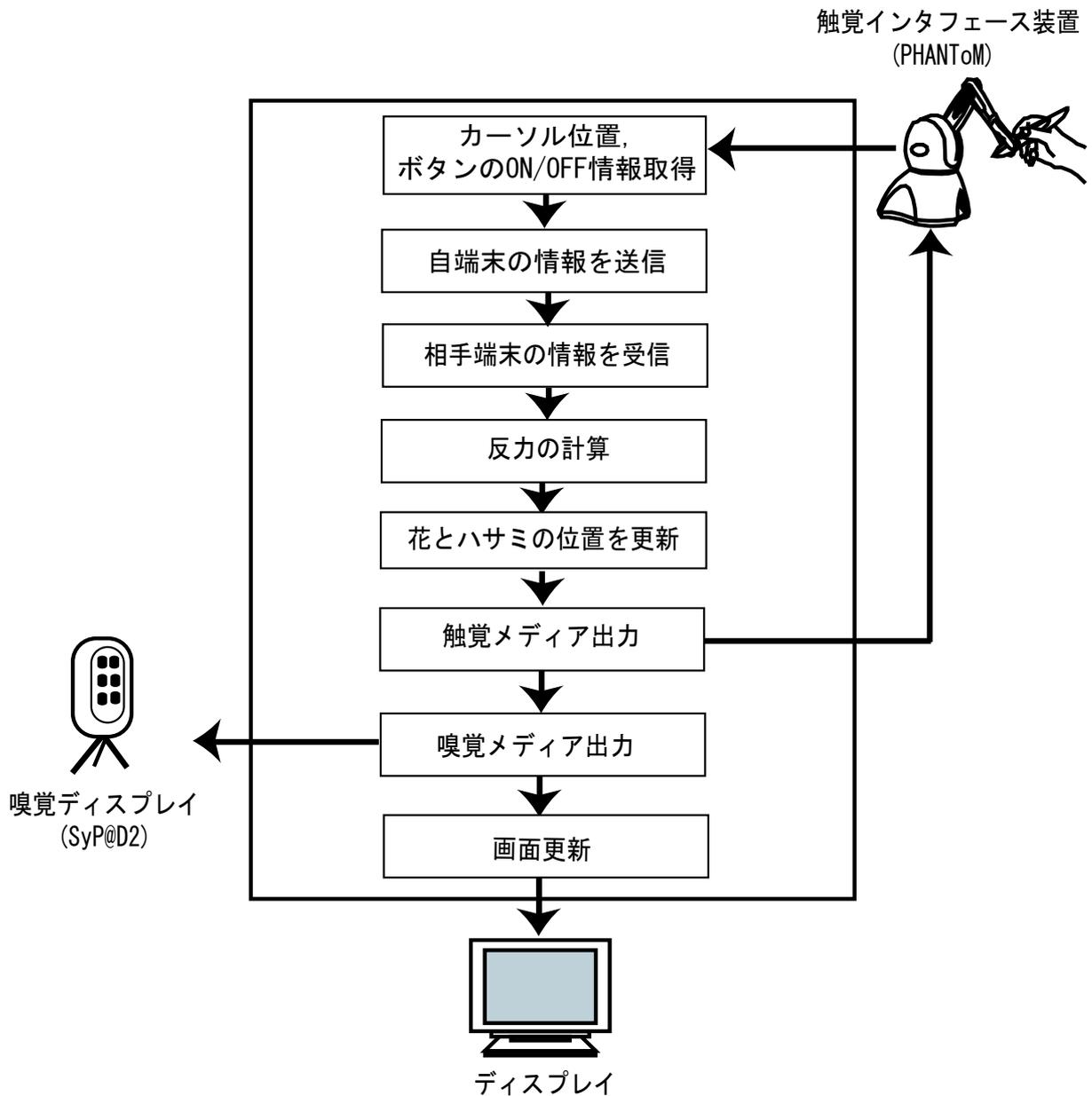


図 5.6 各端末の機能

ていない状態から、花の香りを感じるまで、ほぼ一定の速度で手前に持ってくる。また、視点から遠ざける作業としては、花の香りを発生している状態から、花の香りを感じなくなるまで、ほぼ一定の速度で花を遠ざける。花の平均移動速度については、各作業に対して二通りずつを扱う。評価を開始する前に、筆者がバラを持って動かす方法と、二通りの移動速度を被験者に見せた。移動速度としては、ハサミの長さを1とすると、近付ける作業では0.68/s及び1.46/s、遠ざける作業では0.51/s及び1.50/sであった。これは、評価結果が移動速度に依存する可能性があるからである。香り空間の半径として、4, 6, 8, 10, 12,

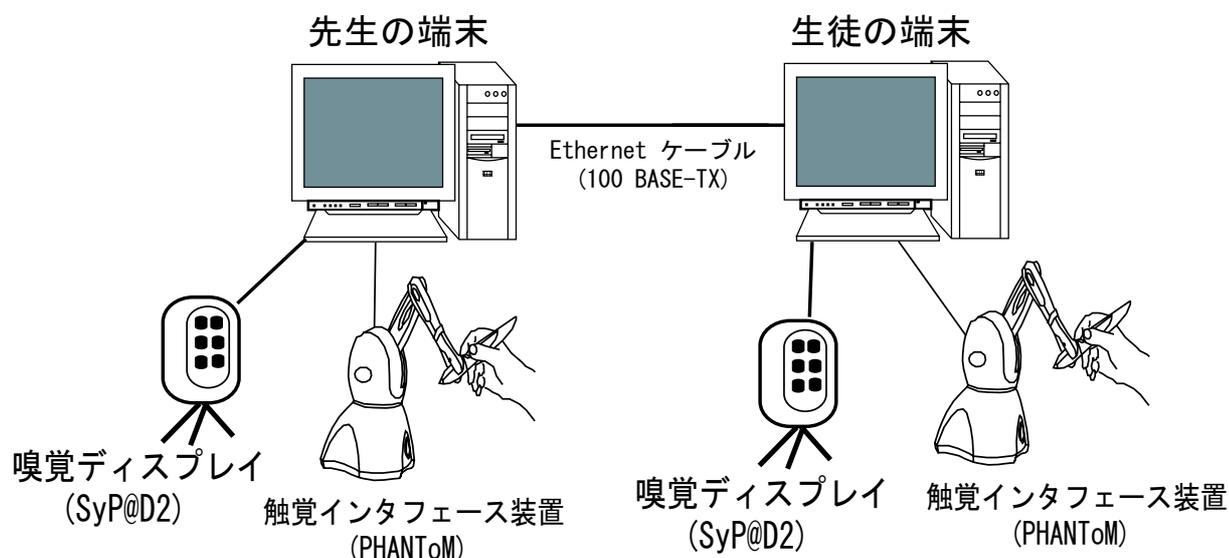


図 5.7 嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花の評価システムの構成

14, 16 の七つを扱った。嗅覚ディスプレイ SyP@D2 が出力し始めるときの花の大きさを図 5.8 (a) から (g) に示す。

QoE の主観評価手法として、ITU-R BT.500-11 の単一刺激法を用いる。香り空間の半径は各被験者にランダムな順序で提示される。一回の評価を終えたら、約 30 秒後に次の評価を行う（これは、嗅覚の順応や残り香の影響をなくすためである）[54], [108]。そして、各被験者には、表 1.4 に示す五段階品質尺度を用いて評価してもらう。こうして得られた評点を平均して、MOS(Mean Opinion Score) を求める。

花を持って視点に近付ける作業の評価と視点から遠ざける作業の評価は別々の日に行われた。各作業に対して、一人当たりの総評価時間はおおよそ 10 分であった。評価人数は 21 歳から 30 歳までの男女 15 人である。

5.5 評価結果と考察

図 5.9, 図 5.10 に香り空間の半径に対する MOS 値を示す。図 5.9 は視点に近付けるときの結果であり、図 5.10 は視点から遠ざけるときのものである。これらの図には、95%信頼区間も示されている。

図 5.9 から、視点に近付ける作業では、平均移動速度が 1.46/s の場合、香り空間の半径が 10 のとき、平均移動速度が 0.68/s の場合、香り空間の半径が 8 のとき、MOS 値が最も高いことが分かる。香りの発生開始から被験者に届くまで約 2 秒かかるので、前者の場合と後者の場合で香り空間の半径が最適値のとき、被験者が香り感じ始めるときの花の大きさ（画面上に見える花の大きさ）は平均移動速度にほとんど依存せず、ほぼ同じである（このときの視点と花冠との平均距離を測定したところ、平均移動速度が 0.68/s の場合は 6.92 であり、1.46/s の場合は 7.13 であった）。従って、香り空間の半径の最適値は、花の香りを

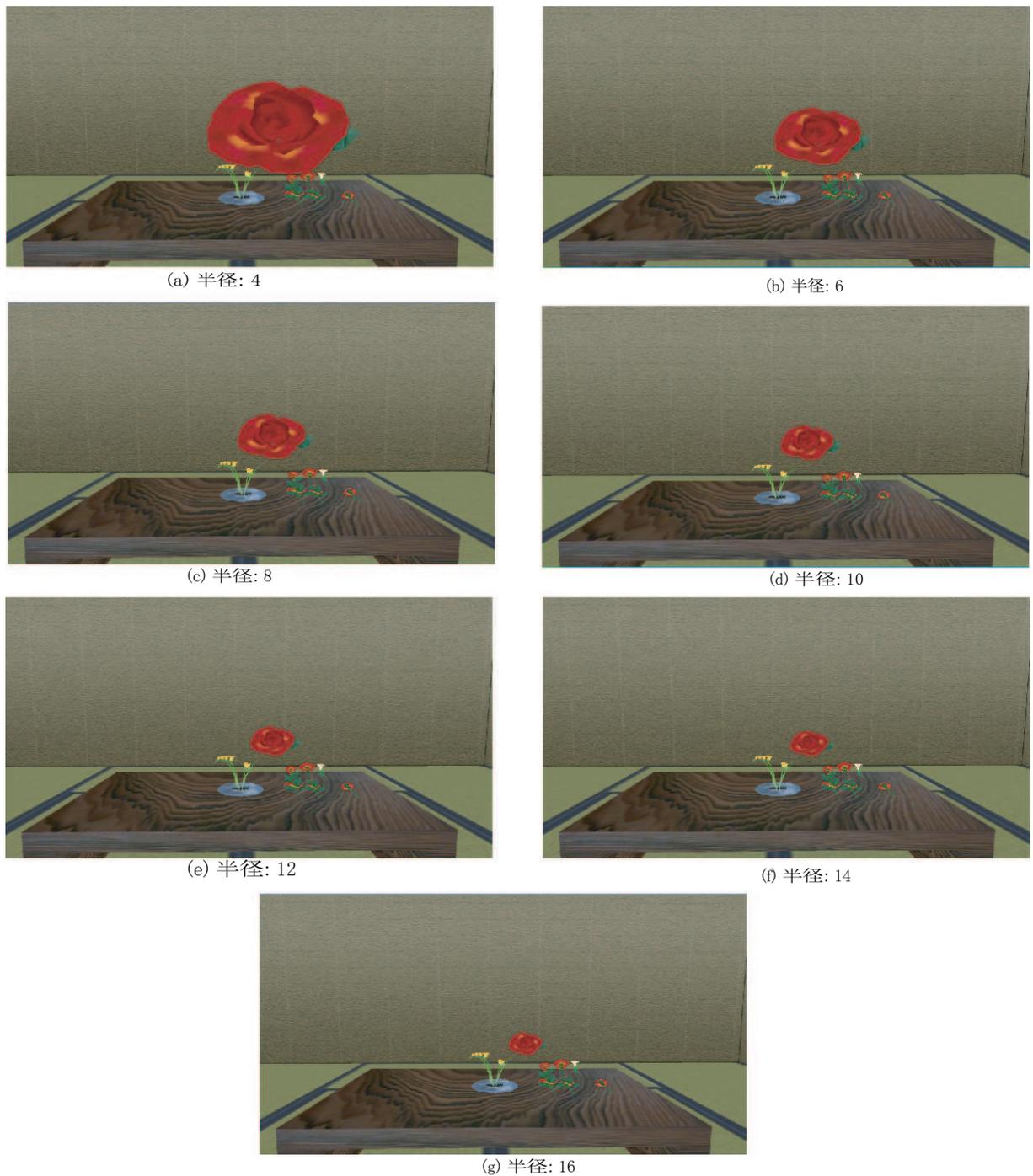


図 5.8 花の香りを出力し始めるときの香り空間の表示例

感じ始めるときのタイミングに強く依存する。

また、図 5.10 より、視点から遠ざける作業では、平均移動速度が $1.50/s$ の場合、香り空間の半径が 6 のとき、平均移動速度が $0.51/s$ の場合、香り空間の半径が 8 のとき、MOS 値が最も高いことが分かる。香りの出力を停止してから被験者が香りを感じなくなるまで約

2秒かかる [108] ので、両者の場合で香り空間の半径が最適値のとき、被験者が香りを感じなくなるときの花の大きさも平均移動速度にほとんど依存せず、ほぼ同じである（このときの視点と花冠との平均距離は、平均移動速度が0.51/sの場合は9.36であり、1.50/sの場合は9.85であった）。

以上より、香り空間の半径の最適値が存在し、視点に近付ける場合と遠ざける場合とで異なることが分かる。また、この最適値は平均移動速度に依存するが、最適値のときに、香りを感じ始めるときの花の大きさと、香りを感じなくなるときの花の大きさは、平均移動速度にほとんど依存しない。

5.6 むすび

本章では、嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花を構築し、香りの出力タイミングがQoEに及ぼす影響を調査した。その結果、香り空間の大きさには最適値が存在し、視点に花を近付ける場合と遠ざける場合とで異なり、花の平均移動速度に依存することが分かった。また、香り空間の大きさが最適値のとき、香りを感じ始めるときの花の大きさと、香りを感じなくなるときの花の大きさは、平均移動速度にほとんど依存しないことが判明した。

今後、本章で扱っていた香り以外の香りを用いて調査を行うことと、遠隔生け花以外のアプリケーションも扱って、評価を行う必要がある。

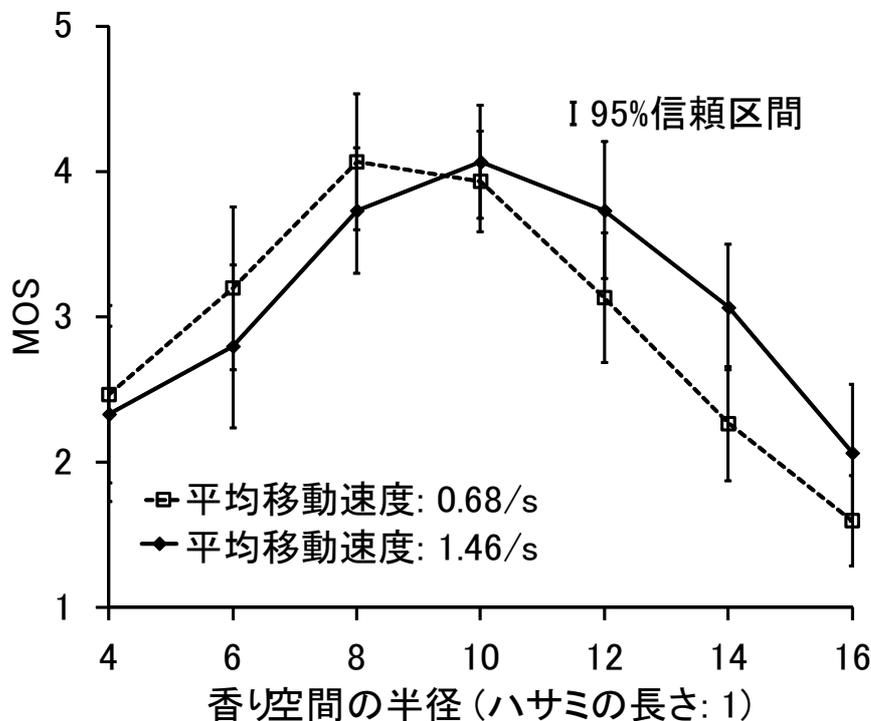


図 5.9 香り空間の半径に対する MOS(近付けるとき)

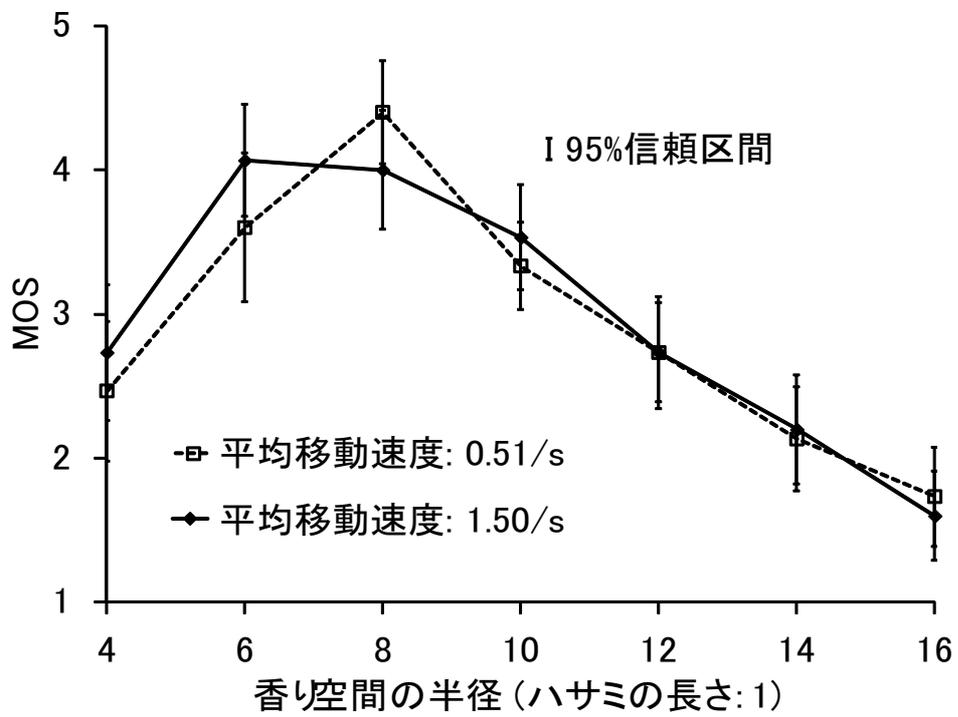


図 5.10 香り空間の半径に対する MOS(遠ざけるときの)

第6章

嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花における香りの動的出力タイミング制御の効果

6.1 まえがき

第5章において、嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花を構築し、花を持って利用者の視点に近付ける場合と、視点から遠ざける場合に分けて QoE 評価を行い、香り空間の大きさの影響を調べた。その結果、香り空間の大きさには最適値が存在し、花の平均移動速度や方向に依存することがわかった。従って、花の香り空間の大きさのある値に固定すると、花の移動速度や方向によっては、香りの出力タイミングの QoE が大きく劣化する恐れがある。

そこで、本章では、この問題を解決するため、第5章の評価結果に基づいて、香りの動的出力タイミング制御を提案する。本制御では、香りの発生源として三次元仮想環境内に表示されているオブジェクトを三次元仮想環境内で移動させる速度と方向に応じて、そのオブジェクトの香り空間の大きさを動的に変更するによって、香りの出力タイミングを動的に変更する。そして、嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花に動的制御を実装し、その制御の効果を QoE 評価により調査する。

以下では、まず、6.2 で香りの動的出力タイミング制御を提案し、次に、評価環境について説明する。そして、6.4 において評価結果について考察する。

6.2 香りの動的出力タイミング制御

この制御では、ある一定の周期 T (本論文では $T=0.3$ 秒とする) で、利用者の視点に対する香り発生源のオブジェクトの移動速度と方向を測定し、それらに応じて香り空間の半径を変更する。以下では、遠隔生け花システムを対象として、視点の移動は行わず、一つの花を移動する場合について、制御の説明を行う。また、 $n(\geq 1)$ 番目の周期における香り空間の半径を $R_n(>0)$ で表す。さらに、 n 番目の周期の終了時点における花と視点間の距離を $D_n(\geq 0)$ とし、 D_0 を花の初期位置 (1 番目の周期の開始時点における位置) と視点間の距離とする。そして、視点に対する花の移動速度を $v_n(\geq 0)$ で表し、 $v_n=|D_n-D_{n-1}|/T$ と定義

する.

第 5 章の結果によると, 視点が花の香り空間に入っていない状態で視点に花を近付ける場合, 平均移動速度が 0.68/s (ハサミの長さを 1 とする. 以下同様) のとき, 香り空間の半径の最適値は 8 であり, 1.46/s のとき, 10 である. また, 視点が香り空間に入っている状態で視点から花を遠ざける場合, 平均移動速度が 0.51/s, 1.50/s のとき, 香り空間の半径の最適値はそれぞれ 8, 6 である. 本論文では, 香り空間の半径の最適値と平均移動速度は線形関係にあると仮定する. このとき, 花を近付ける場合の R_n は以下ようになる.

$$R_n = 2.56v_{n-1} + 6.26 \quad (6.1)$$

ただし, $v_0=0/s$ とする. また, 花を遠ざける場合の R_n は次式で与えられる.

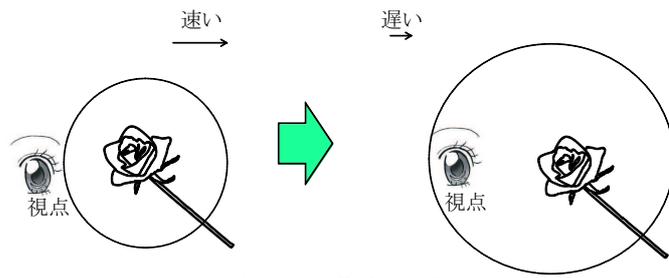
$$R_n = -2.02v_{n-1} + 9.23 \quad (6.2)$$

$n=1$ のとき, 式 (6.1) と式 (6.2) で R_1 の値が異なるので, 初期状態では花の香り空間は視点に入っておらず, 花の香りを出力していないと仮定する. このとき, R_1 は次のようになる.

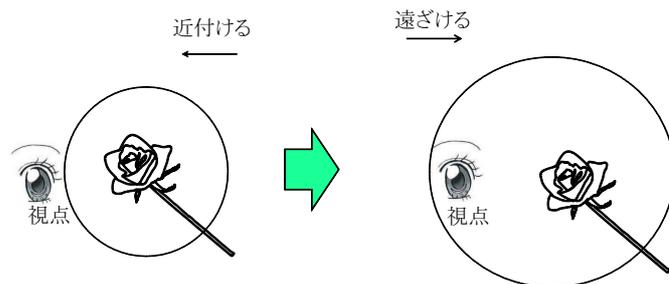
$$R_1 = 6.26 \quad (6.3)$$

以上の式を用いて制御を行うと, 次のような問題が生じ得る. それは, 香りを出力していない状態で, 花を遠ざけることによって香りを出力する場合や, 香りを出力している状態で, 花を近付けることによって香りの出力を停止する場合があることである. 前者の場合には, 例えば, 花を遠ざける速度が途中で遅くなると, 香りを出力することがある (図 6.2 (a) 参照). この理由は, 移動速度が遅くなると, 香り空間の半径が大きくなり (式 (6.2) 参照), 視点が再び香り空間に入る可能性があるからである. また, 花を近付ける動作から遠ざける動作に切り替えるときも香りを出力することがある (図 6.2 (b)). これは, 遠ざけるときの香り空間の半径が近付けるときのそれより大きくなる可能性があるからである. 後者の場合には, 例えば, 近付ける速度が途中で遅くなると, 香りの出力を停止することがある (図 6.2 (a)). これは, 移動速度が遅くなると, 香り空間の半径が小さくなり (式 (6.1) 参照), 視点が香り空間から外に出る可能性があるからである. また, 遠ざける動作から近付ける動作に切り替えるときも香りの出力を停止することがある (図 6.2 (b)). これは, 近付けるときの香り空間の半径が遠ざけるときのそれより小さくなる可能性があるからである.

この問題を防ぐために, 香りを出力していない状態で遠ざける場合, n 番目の周期における香り空間の半径 (R_n) を $n-1$ 番目の周期におけるそれ (R_{n-1}) になるようにする (即ち, $R_n=R_{n-1}$). また, 花を出力している状態で近付ける場合も同様に $R_n=R_{n-1}$ とする.

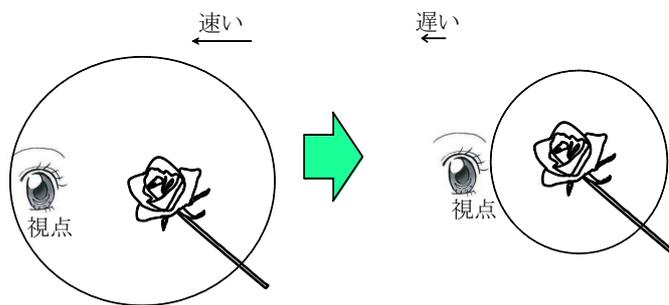


(a) 速度が遅くなる場合

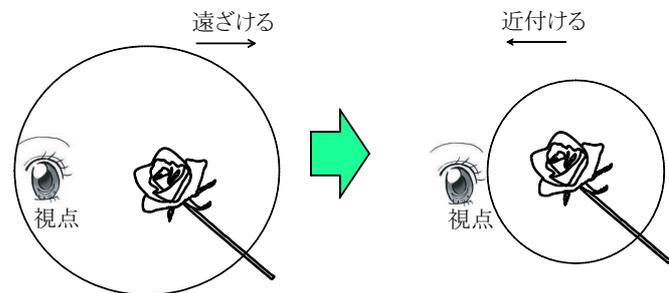


(b) 近付けてから遠ざける場合

図 6.1 香りを出力していない状態から香りを出力する場合



(a) 速度が遅くなる場合



(b) 遠ざけてから近付ける場合

図 6.2 香りを出力している状態から香りの出力を停止する場合

以上をまとめると、香り空間の半径 $R_n (n \geq 2)$ は次のようになる。

$$R_n = \begin{cases} 2.56v_{n-1} + 6.26 & (\text{香りを出力しておらず} \\ & (D_{n-1} \geq R_{n-1}), \text{視点に近付ける場合}) \\ R_{n-1} & (\text{香りを出力しておらず} \\ & (D_{n-1} \geq R_{n-1}), \text{視点から遠ざける場合}) \\ R_{n-1} & (\text{香りを出力しており} \\ & (D_{n-1} < R_{n-1}), \text{視点に近付ける場合}) \\ -2.02v_{n-1} + 9.03 & (\text{香りを出力しており} \\ & (D_{n-1} < R_{n-1}), \text{視点から遠ざける場合}) \end{cases} \quad (6.4)$$

6.3 評価環境

6.3.1 評価システム

評価システムを図 6.3 に示す。このシステムでは、一つの先生端末と一つの生徒端末から構成される。これらの端末は、100 BASE-TX Ethernet ケーブルで直結されている。各端末には、PHANToM と SyP@D2 が接続されている。

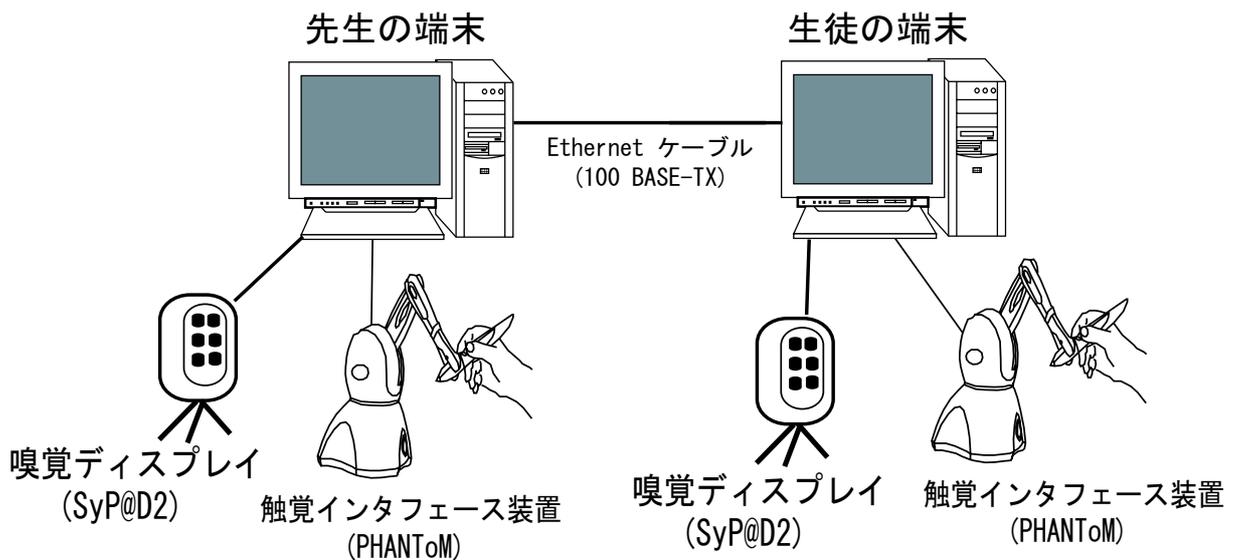


図 6.3 香りの動的出力タイミング制御の評価システム

6.3.2 評価方法

QoE 評価では、被験者は生徒の端末を用いる。SyP@D2 と各被験者の鼻先間の距離を約 0.3m とし、SyP@D2 の風力を最大とする。そして、各被験者は、机の上の花 (本報告ではバラとする) を一本選んで、自分の視点に近付ける作業 (作業 1 と呼ぶ) と視点から遠ざける作業 (作業 2) を行う。また、先生が机の上の花 (バラ) を一本選んで動かす場合を想定し、生徒 (被験者) の視点に近付ける作業 (作業 3) と遠ざける作業 (作業 4) も行う。作業 3 と作業 4 では、先生の視点と生徒 (被験者) の視点は同じであると仮定し、簡単のため、先生の作業を自動化し、生徒の端末で花が自動的に動くようにする。さらに、作業 1 から作業 4 において、視点は動かさないものとする。

視点に近付ける作業では、花の香りを発生していない状態 (図 6.4(a) 参照。視点と動かす花の距離は約 16) から、花の香りを感じるまで、ほぼ一定の速度で手前に持ってくる。また、視点から遠ざける作業においては、花の香りを発生している状態 (図 6.4(b) 参照。視点と動かす花の距離は約 2) から、花の香りを感じなくなるまで、ほぼ一定の速度で花を遠ざける。作業 1, 2 における花の平均移動速度として、約 0.5/s, 約 1.5/s, 約 2.5/s 及び約 3.5/s の四通りを扱う。作業 3, 4 においても、花の平均移動速度を 0.5/s, 1.5/s, 2.5/s 及び 3.5/s とする。香り空間の半径として、視点に近付ける作業では、6, 8, 10, 12 または 14 に固定する場合と動的出力タイミング制御を行う場合の六つを扱う。また、視点から遠ざける作業では、半径を 4, 6, 8, 10 または 12 に固定する場合と動的出力タイミング制御を行う場合の六つを扱う。今回の評価では、花を初期状態から少し動かしただけでも香り空間に入るまたは出ることを防ぐために、動的出力タイミング制御における香り空間の半径を、初期状態の花と視点間の距離の 2 と 16 の間に設定する。具体的には、 $4 \leq R_n \leq 14$ とする。

QoE の評価手法として、ITU-R BT.500-12 の単一刺激法を用いる。香り空間の半径を固定する五つの場合と動的出力タイミング制御を行う場合は各被験者にランダムな順序で提示される。一回の評価を終えたら、約 30 秒後に次の評価を行う。これは、嗅覚の順応や残り香の影響をなくすためである [54], [108]。そして、各被験者には、表 1.4 に示す五段階品質尺度を用いて香りの出力タイミングの適切さを評価してもらう。こうして得られた評点を平均して、MOS (Mean Opinion Score) を求める。

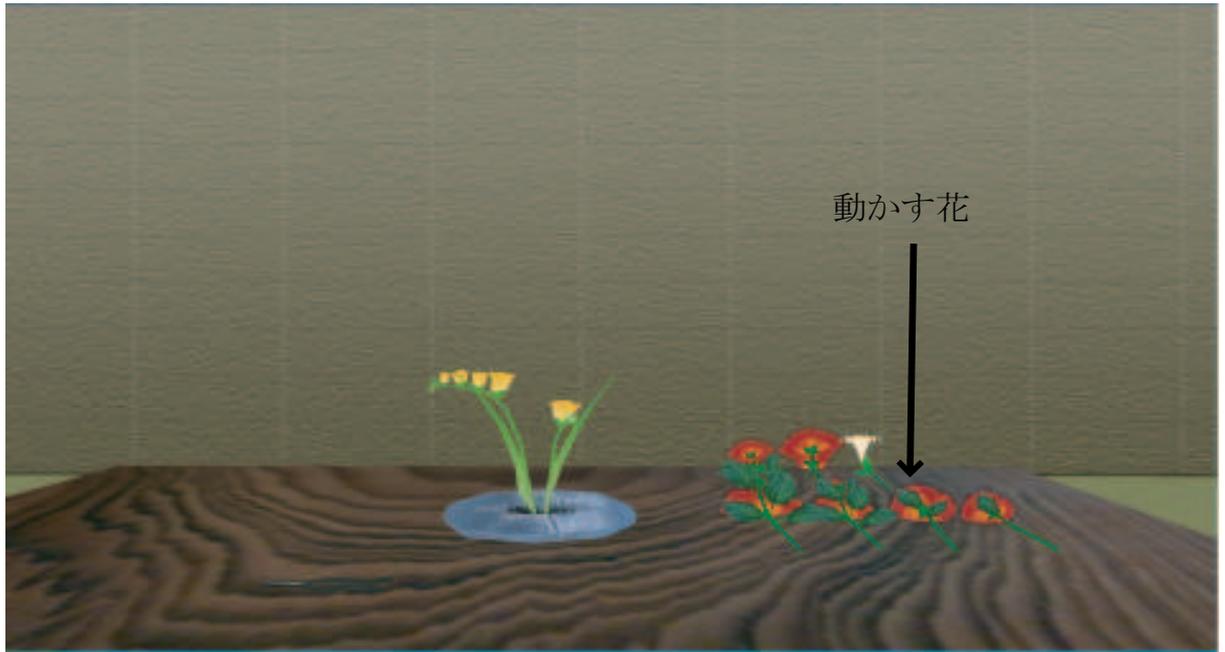
作業 1, 2 と作業 3, 4 は別の日に行われた。また、視点に近付ける作業を行った後、遠ざける作業を行った。作業 1, 2 における一人当たりの総評価時間は一時間半程度であり、作業 3, 4 のそれは約一時間であった。被験者は 21 歳から 29 歳までの男女 15 名であった。

また、主観評価と同時に、客観評価も行った。客観評価の尺度として、作業 1 と作業 3 において、香りを感じ始めるときの花と視点間の距離を採用し、作業 2 と作業 4 において、香りを感じなくなるときの花と視点間の距離を採用する。

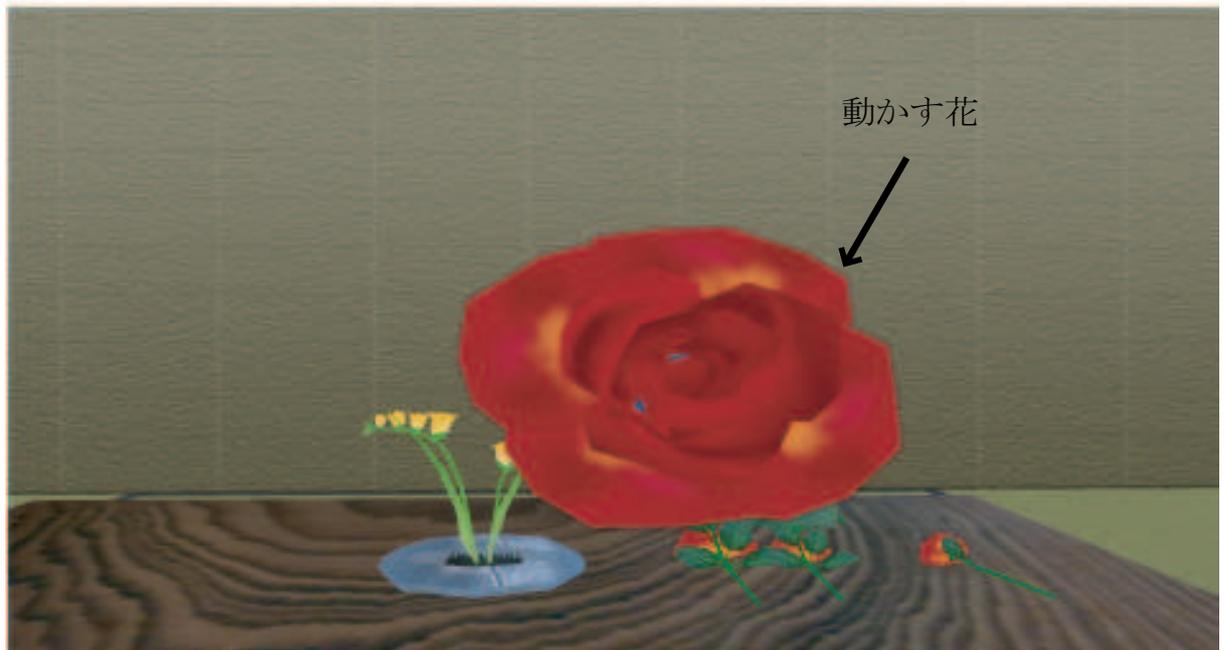
6.4 評価結果と考察

図 6.5 から図 6.8 にそれぞれ作業 1 から作業 4 の平均移動速度に対する MOS 値を示す。これらの図には 95% 信頼区間も示されている。

図 6.5 から図 6.8 より、動的出力タイミング制御の MOS 値は、平均移動速度に大きく依



(a) 視点に近付ける作業



(b) 視点から遠ざける作業

図 6.4 評価における仮想空間の初期状態

存せず, 3.5 より高くなっていることが分かる. 文献 [124] より, MOS が 3.5 以上であれば, 許容可能であるといえる. また, その MOS 値は香り空間の半径を固定とする場合に平均

移動速度に応じて最適な半径を選んだときの MOS 値に近くなっている。これは、動的出力タイミング制御を行う場合、花を持って近付ける作業における、花の香りを感じ始めたときの花の大きさは平均移動速度に大きく依存しておらず、ほぼ同じであり、花を持って遠ざける作業における、花の香りを感じなくなったときの花の大きさもほぼ同じであるからである。このことを確認するために、花の香りを感じ始めたときの花と視点間の平均距離と、花の香りを感じなくなったときの花と視点間の平均距離を測定した。その結果をそれぞれ図 6.9 から図 6.12 に示す。これらの図から、動的出力タイミング制御の平均距離は、平均移動速度に大きく依存せず、ほぼ一定であることが確認できる。

また、花の香りを感じ始めたときと感じなくなったときの花と視点間の平均距離と MOS の関係を調べるために、回帰分析を行った。その際、独立変数を平均距離 \bar{D} とし、MOS の推定値 V_{mos} を従属変数とした。その結果、作業 1 から作業 4 の結果に対し、それぞれ式 (6.5) から式 (6.8) が得られた。

$$V_{\text{mos}} = 4.25 - 0.40|\bar{D} - 7.00| \quad (6.5)$$

$$V_{\text{mos}} = 4.32 - 0.33|\bar{D} - 9.00| \quad (6.6)$$

$$V_{\text{mos}} = 4.16 - 0.35|\bar{D} - 7.00| \quad (6.7)$$

$$V_{\text{mos}} = 4.20 - 0.33|\bar{D} - 9.00| \quad (6.8)$$

上式の自由度調整済寄与率はそれぞれ 0.93, 0.97, 0.88, 0.97 であった。従って、花と視点間の平均距離から高い精度で MOS を推定できる。

6.5 むすび

本章では、分散仮想環境における香りの出力について、高い QoE を実現するための QoS 制御として、香りの動的出力タイミング制御を提案した。この制御では、利用者の視点に対する香り発生源のオブジェクトの移動速度や方向に応じて香りの出力タイミングを動的に変更する。そして、嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花システムにその制御を実装し、その効果を QoE 評価により調査した。その結果、制御を用いた場合の MOS 値は、平均移動速度や方向に大きく依存せず高くなり、香り空間の半径を固定とする場合に平均移動速度に応じて最適な半径を選んだときの MOS に近くなることが分かった。従って、香りの動的出力タイミング制御は有効である。

今後の課題としては、香り発生源のオブジェクトを移動させるだけでなく、視点も移動する場合の評価を行うことが挙げられる。また、バラ以外の香りを用いて評価を行うことも必要である。さらに、ネットワーク遅延やその揺らぎ、パケット欠落などがメディアの出力品質に及ぼす影響を明らかにし、QoS 制御を検討することも重要である。

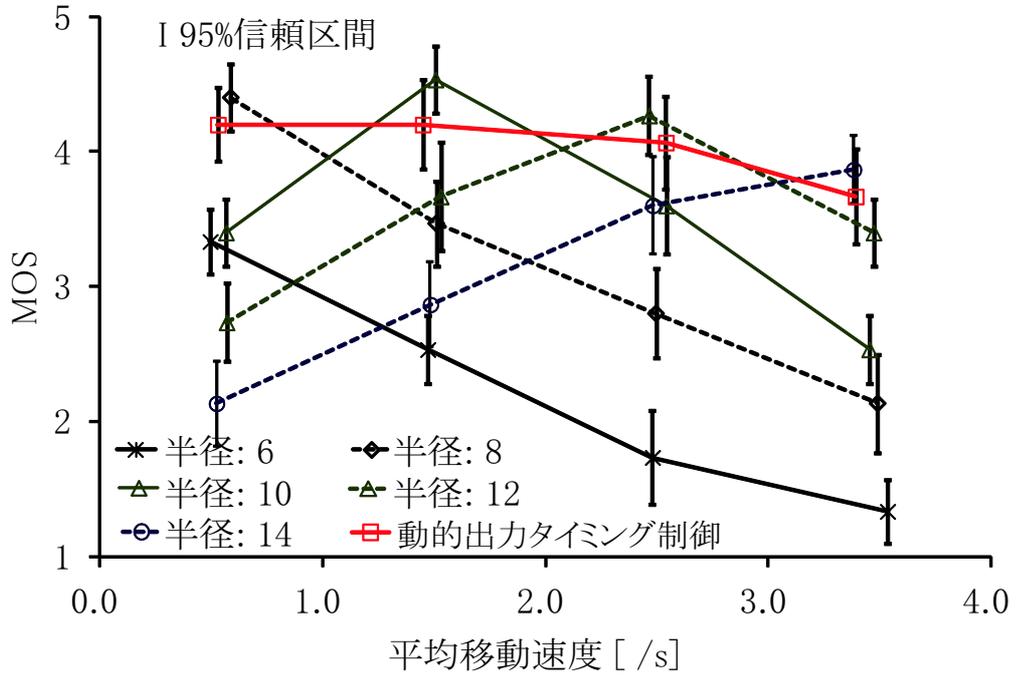


図 6.5 作業 1 における MOS

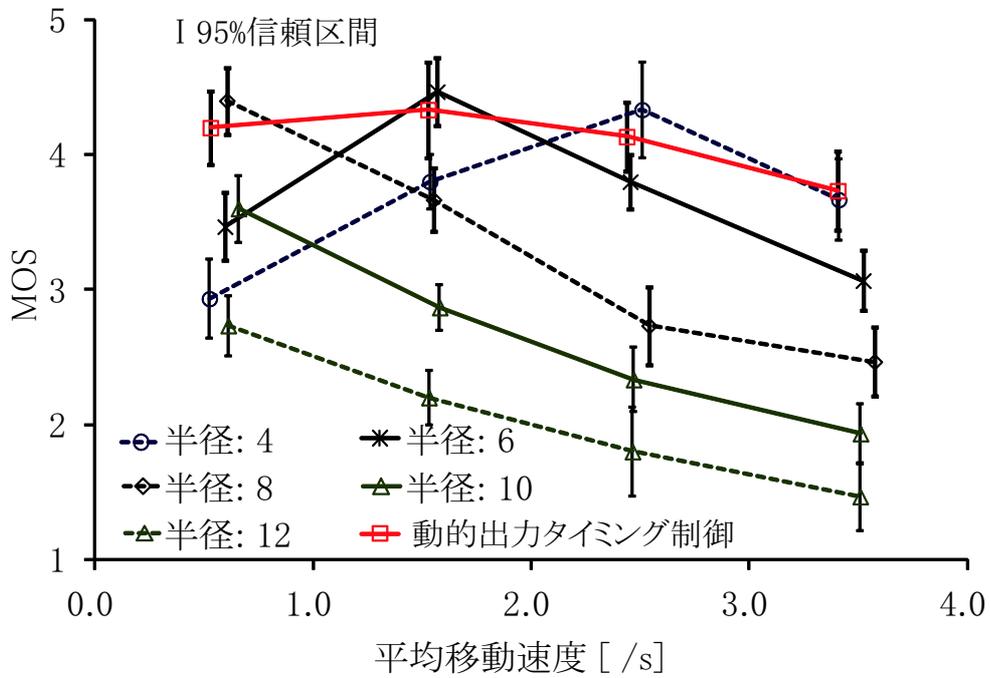


図 6.6 作業 2 における MOS

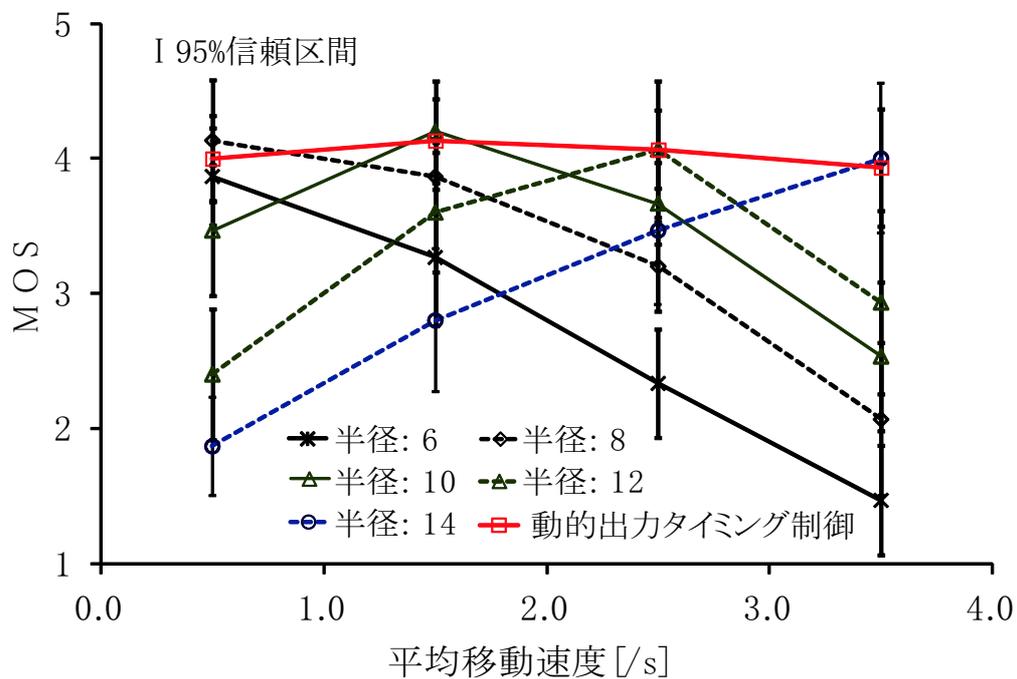


図 6.7 作業 3 における MOS

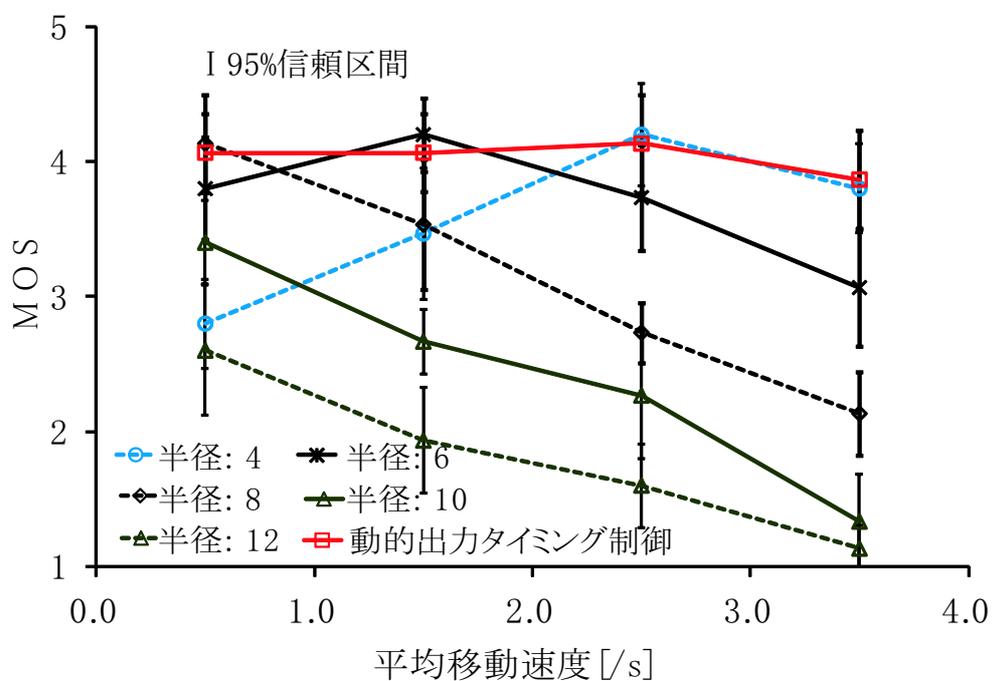


図 6.8 作業 4 における MOS

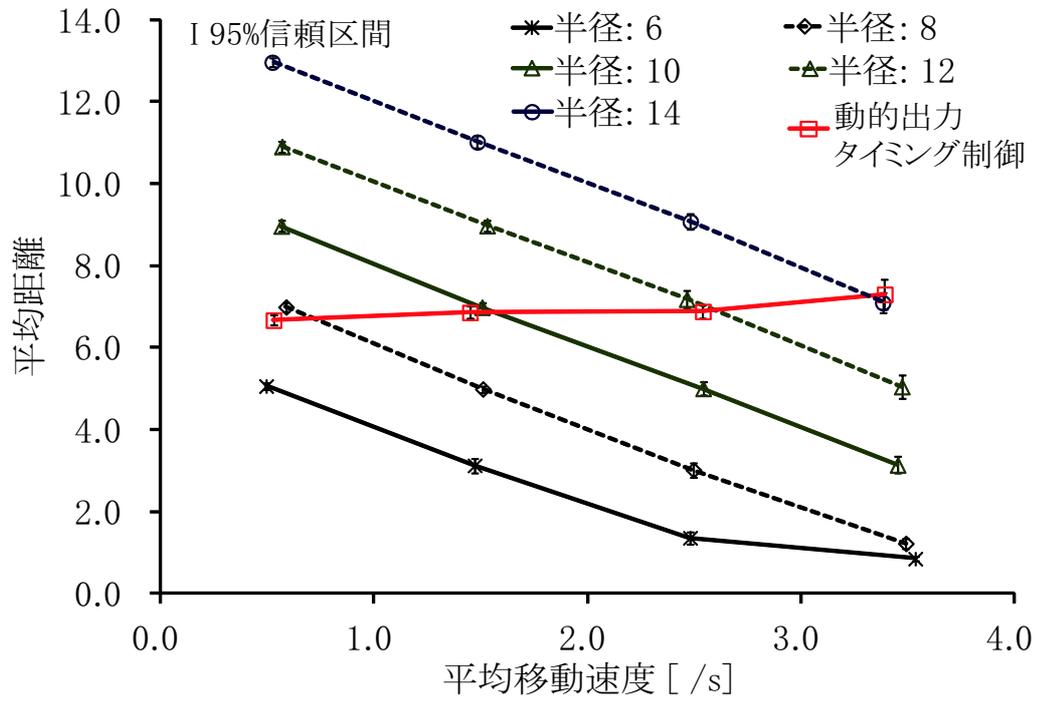


図 6.9 作業 1 における平均距離

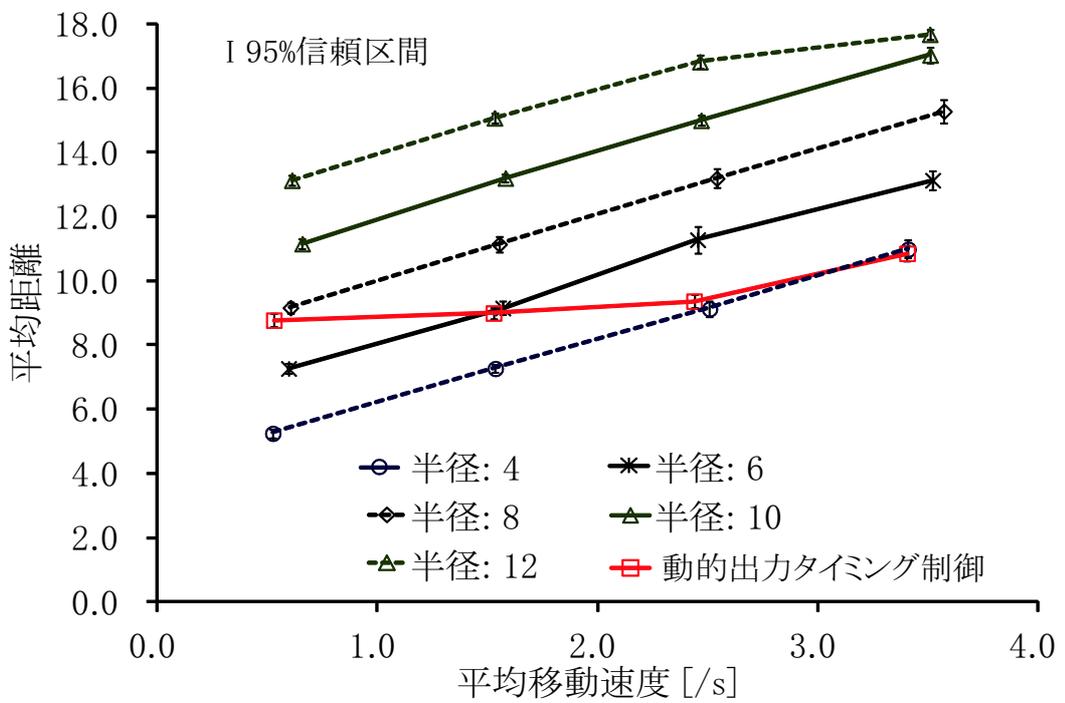


図 6.10 作業 2 における平均距離

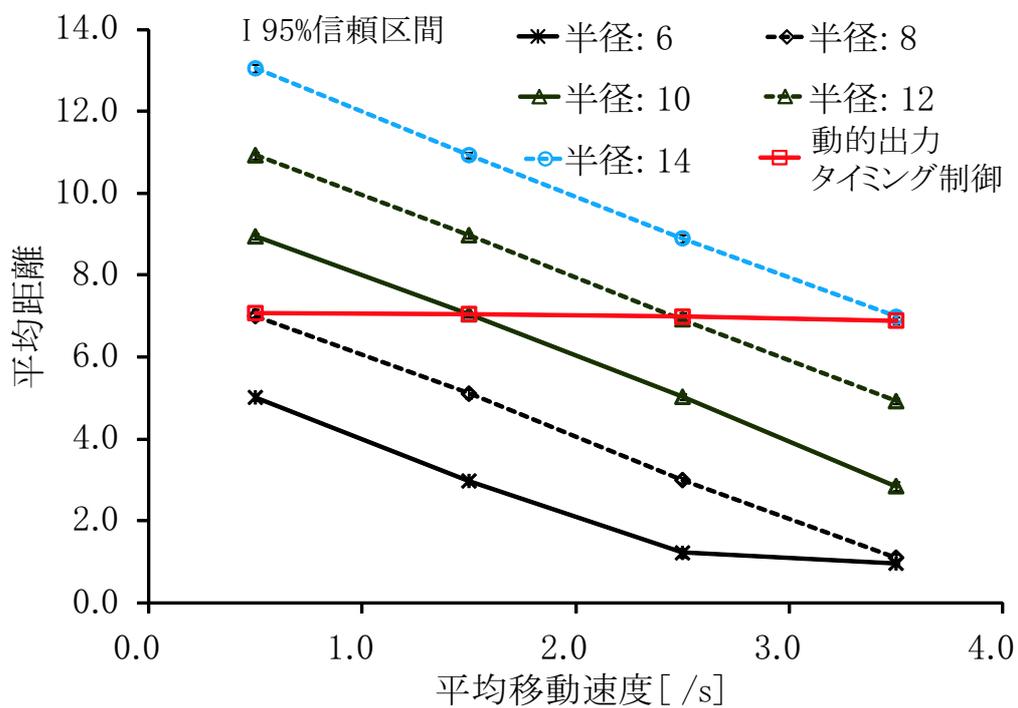


図 6.11 作業 3 における平均距離

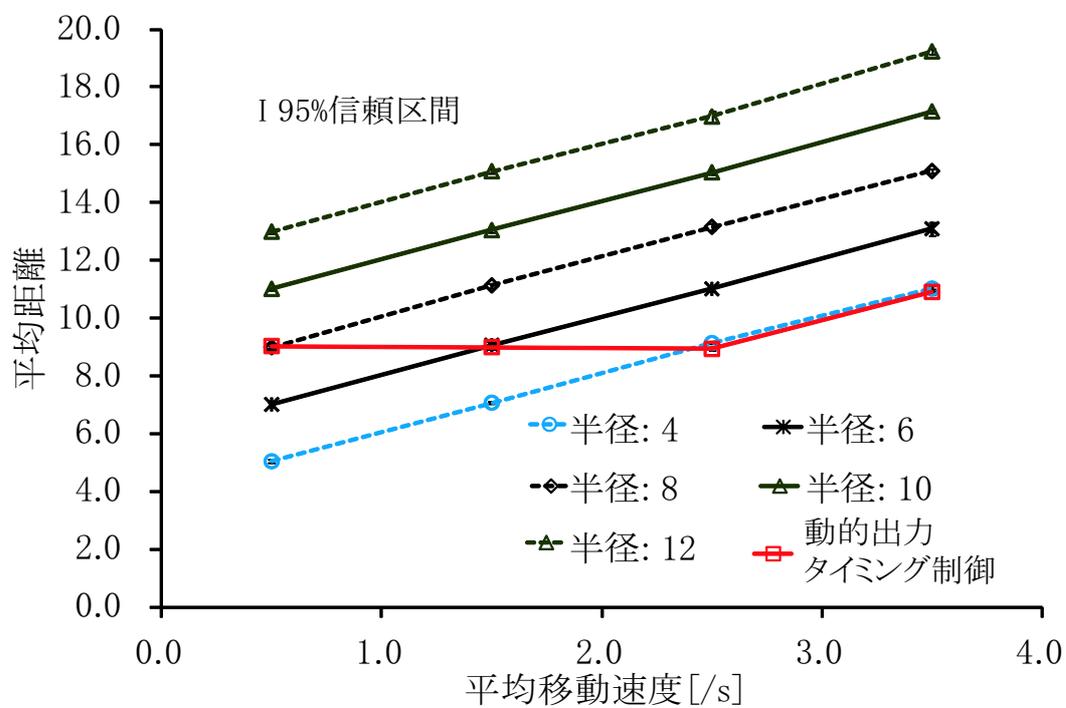


図 6.12 作業 4 における平均距離

第7章

結論

本論文では、力覚及び嗅覚を利用した分散仮想環境において、まず、力覚を利用した作業（一つのオブジェクトを一緒に協力して持ち上げる作業と積み木遊び）において、ネットワーク遅延などの影響を QoE 評価により調べた。次に、力覚を利用した作業（遠隔描画指示と積み木遊び）に対して、QoS 制御を検討し、その効果を QoE 評価により調査した。そして、嗅覚及び力覚を利用した作業（遠隔生け花）を対象に、香りの出力タイミングが QoE に及ぼす影響を調べ、香りの出力の QoS 制御を検討した。

第2章では、二人の利用者が四種類の触覚インタフェース装置 (PHANToM Desktop, 以下 Desktop, PHANToM Omni, 以下 Omni, SPIDAR-G AHS, 以下 SPIDAR, Falcon) の中の二つの触覚インタフェース装置を用いて、仮想空間内の一つのオブジェクトを一緒に協力して持ち上げ、目標物体に重なり続けるように協調作業を行う。そして、ネットワーク遅延が協調作業における触覚インタフェース装置の操作のしやすさに及ぼす影響を調査した。そして、次の結論が得られた。

- 四種類の触覚インタフェース装置の操作のしやすさについて、ネットワーク遅延が増加するにつれ、MOS 値が低くなり、操作がしにくくなる。
- ネットワーク遅延が約 40ms 以上の場合は、操作がしにくくなり、協調作業がほとんどできなくなる。
- ネットワーク遅延が約 50 ms 以下のとき、Desktop-Desktop, Omni-Omni 及び Omni-Desktop の操作のしやすさは他の組み合わせに比べると高い。また、Falcon-Falcon, Falcon-SPIDAR の操作のしやすさは他の組み合わせに比較して低い傾向がある。
- 異種触覚インタフェース装置を用いた協調作業をするとき、操作がしやすい装置は操作がしにくい装置を助ける。

第3章では、力覚を利用した積み木遊びを対象に、ネットワーク遅延とその揺らぎ、及びパケット欠落が協調作業のしやすさに及ぼす影響を調査した。また、ネットワーク遅延とその揺らぎ、及びパケット欠落が協調作業の三つの作業方法（一緒に持って作業をする場合、別々に持って交互に作業をする場合、手渡して作業をする場合）に及ぼす影響も調査した。その結果、次のことがわかった。

- ネットワーク遅延とその揺らぎ, またはパケット欠落率が増加するにつれ, MOS 値は減少し, 協調作業が難しくなる
- 三種類の作業方法について, 二人の利用者が一緒に持って作業をする場合の MOS 値は最も高い, 手渡して作業をする場合のサーバの利用者の MOS 値は二人で別々に持って交互に作業をする場合の MOS 値より高い傾向が判明した. 手渡して作業をする場合のクライアントの利用者の MOS 値は最も低い傾向にあることが分かった.

第 4 では, 端末間同期制御が必要となる, 力覚を利用した作業を対象として, インタラクティブ性を高く保持するために, 予測を用いた端末間同期制御を提案した. 提案制御では, インタラクティブ性を高く保持するために, 受信した MU の目標出力時刻の T_{predict} 秒後の位置を予測して目標出力時刻に出力する. さらに, 自端末の MU の出力時刻を T_{predict} 秒だけ早める. そして, 遠隔描画教示と積み木遊びにおいて, 提案制御を実装し, 効果を調べた. 得られた結論は, 以下の通りである.

- 予測を用いた端末間同期制御は有効である.
- 予測時間の最適値が存在し, 遠隔描画教示においては, 予測時間 T_{predict} が 25ms または 50ms のとき, 積み木遊びでは, 予測時間 T_{predict} が 20ms または 30ms のとき, 予測を用いた端末間同期制御が最も有効である.
- 客観評価結果から高い精度で主観評価結果 (MOS) を推定できる.

第 5 章では, 嗅覚, 力覚を扱い, 地理的に離れた先生が生徒に生け花を教えることができる遠隔生け花システムを構築した. そして, 香り空間の大きさ (半径) を変化させて香りの出力タイミングを変えることによって, QoE に及ぼす影響を評価した. QoE の主観評価から次のような結論を得た.

- 香り空間の大きさには最適値が存在し, その最適値は, 視点に花を近付ける場合と遠ざける場合とで異なり, 花の平均移動速度に依存する.
- 香り空間の大きさが最適値のとき, 香りを感じ始めるときの花の大きさと, 香りを感じなくなるときの花の大きさは, 平均移動速度にほとんど依存しない.

第 6 章では, 第 5 章の評価結果に基づいて, 香りの動的出力タイミング制御を提案した. 提案制御では, 香りの発生源として三次元仮想環境内に表示されているオブジェクトを三次元仮想環境内で移動させる速度と方向に応じて, そのオブジェクトの香り空間の形状と大きさを動的に変更するによって, 香りの出力タイミングを動的に変更する. そして, 嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花に動的制御を実装し, その制御の効果を QoE 評価により調査した. その結果, 次の結論が得られた.

- 香りの動的出力タイミング制御は有効である.
- 制御を用いた場合の MOS は, 平均移動速度や方向に大きく依存せず高くなり, 香り空間の半径を固定とする場合に平均移動速度に応じて最適な半径を選んだときの MOS に近くなる.

以上より、本論文では、分散仮想環境において、力覚及び嗅覚を利用する場合に、高いQoEを得るために、どのようなQoS制御が必要かを明らかにすることができた。力覚を利用した協調作業では、特に端末間同期制御が必要となる複数人が協調して行う作業に、提案制御によってインタラクティブ性を改善することができた。また、仮想空間内の嗅覚利用では、香り発生源の平均移動速度や方向に依存せず、香りの出力タイミングについて、常に高いQoEを得ることができた。

これらの結果は、嗅覚及び力覚を利用したアプリケーション(例えば、遠隔医療分野、遠隔教育分野などのアプリケーション)の開発者やサービス提供者が、利用者に高い品質のサービスを提供するため、ネットワーク遅延やその揺らぎ及び香りの出力タイミングを固定することによるQoEの劣化問題に対する解決方法を提供している。

今後の課題としては、以下の以下のようなことが考えられる。

- 異種触覚インタフェースを用いた協調作業について、本論文で扱った協調作業以外の作業(アプリケーション)において、異種触覚インタフェース装置の操作のしやすさについて調査し、ネットワーク遅延などが装置の操作しやすさに及ぼす影響と作業(アプリケーション)との関係も明らかにする必要がある。また、今回扱った装置以外の装置に対しても、ネットワーク遅延やパケット欠落が装置の操作しやすさに及ぼす影響について調査する。
- 力覚を利用した積み木遊びにおいて、QoEの主観評価の結果と客観評価の結果との関係を調べることで、積み木遊び以外の複雑な作業も扱い、ネットワーク遅延などの影響を調べる予定である。
- 今回の作業の以外に、他の様々な作業において、予測を用いた端末間同期制御の有効性を検証する。また、最適な予測時間と作業内容の関係を明らかにする。
- 予測を用いた端末間同期制御について、本論文で扱っている一次予測と二次予測よりも、精度が高い予測手法(例えば、現在の筆やカーソルの位置と共に現時点の瞬間的な速度や加速度を用いた予測手法、誤差適応型の予測フィルタ、カルマンフィルタ)を用いて、その効果を調べ、主観評価結果と客観評価結果の関係を調査する。
- 香りの出力タイミングについて、本論文で扱っているバラの香り以外の香りを用いて調査を行うことで、遠隔生け花以外のアプリケーションも扱い、本論文の評価と同様の評価を行う。
- 香り出力タイミングの動的制御の効果の調査について、香り発生源のオブジェクトを移動させるだけでなく、視点も移動する場合の評価を行うことが挙げられる。
- 嗅覚及び力覚を利用した作業において、ネットワーク遅延やその揺らぎ、パケット欠落などがメディアの出力品質に及ぼす影響を明らかにし、QoS制御を検討する。

謝辞

本研究において、熱心に御指導ならびに御助言して頂いた石橋 豊教授に心から深く感謝致します。また、本論文をまとめるに当たり、ご助言をいただきました岩田 彰教授、高橋直久教授に厚く御礼申し上げます。さらに、研究について御討論頂いた菅原 真司准教授、福嶋 慶繁助教に深く感謝致します。

嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花を構築する際に、御助言を頂いた生け花の専門家の安藤 順子先生に感謝致します。そして、御助言を頂いた石橋・菅原研究室の藤本 猛先輩に感謝致します。日頃お世話になりました石橋・菅原研究室の諸氏、ならび関係者各位にこの場を借りて感謝の意を表します。最後に、私の学業に支持してくれた私の妻朴 景淑と家族に感謝致します。

参考文献

- [1] 岡田 謙一, “サイバースペース上のバーチャルリアリティ,” 情報処理学会誌, vol. 42, no. 03, pp. 236-240, May 2001.
- [2] 大井 充, 加藤 洋一, 清末 悌之, 小長井 俊介, 谷川 博哉, “サイバーコミュニケーションフォーム: インタースペース,” NTT R&D, vol. 47, no. 4, pp. 453-458, Apr. 1998.
- [3] 大井 充, 加藤 洋一, 清末 悌之, 小長井 俊介, 谷川 博哉, “インタースペースにおける音声制御方式,” NTT R&D, vol. 47, no. 4, pp. 465-470, Apr. 1998.
- [4] 湯田 佳文, 清末 悌之, 小西 孝明, “オフィス適用型インタースペースシステム,” NTT R&D, vol. 47, no. 4, pp. 489-494, Apr. 1998.
- [5] T. Ogi, K. Tamagawa, T. Yamada, and M. Hirose, “Collaborative scientific visualization in networked immersive virtual environment,” Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), no. 6, pp. 86-91, Oct. 1999.
- [6] 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.
- [7] SensAble Technologies, Inc., “3D Touch SDK OpenHaptics Toolkit programmer’s guide,” Version 1.0, 2004.
- [8] M. Sato, “Development of string-based force display : SPIDAR,” Proc. the 8th International Conference on Virtual System and Multi Media (VSMM), pp. 1034-1039, Sep. 2002.
- [9] 赤羽 克仁, “SPIDAR-G/AHS1.0A ユーザーズマニュアル,” Version 2.0, Apr. 2005.
- [10] Novint Technologies, Inc., “Haptic device abstraction layer programmer’s guide,” Version 1.1.9 Beta, Sep. 2007.
- [11] Immersion Corporation: CyberGrasp, “http://www.immersion.com/3d/products/cyber_grasp.php.”

- [12] H. Iwata, H. Yano, F. Nakaizumi, and R. Kawamura, "Project FEELEX: Adding haptic surface to graphics," Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 469-475, Aug. 2001.
- [13] Y. Ikei, K. Wakamatsu, and S. Fukuda, "Image data transformation for tactile texture display," Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS), pp. 51-58, Mar. 1998.
- [14] 中本 高道, "嗅覚ディスプレイ: におい・香りのマルチメディアツール," フレグランスジャーナル社, Oct. 2008.
- [15] 外池 光雄, "におい・香りの情報通信," フレグランスジャーナル社, Feb. 2007.
- [16] T. Nakamoto, M. Nimsuk, B. Wyszynski, H. Takushima, M. Kinoshita, and N. Cho, "Experiment on teleolfaction using odor sensing system and olfactory display synchronous with visual information," Proc. the 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp. 85-92, Dec. 2008.
- [17] Y. Yanagida, S. Kawato, H. Noma, A. Tomono, and N. Tetsutani, "Projection based olfactory display with nose tracking," Proc. IEEE Virtual Reality (VR), pp. 43-50, July 2004.
- [18] Exhalia, "<http://www.exhalia.com/>."
- [19] 杉本 紗友美, 野口 大介, 坂内 祐一, 岡田 謙一, "呼吸に同期させた香りの切り替え手法," 情報処理学会論文誌, vol. 52, no. 3, pp. 1204-1212, Mar. 2011.
- [20] 佐藤 誠, 石井 雅博, 山本 泰秀, 高松 亮, 河原田 弘, "力覚ディスプレイを用いたリモートコラボレーションシステムの提案," 電子情報通信学会論文誌 (A), vol. J79-A, no. 2, pp. 481-488, Feb. 1996.
- [21] T. Miyasato, H. Noma, and F. Kishino, "Subjective evaluation of perception of delay time between visual information and tactile information," IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E79-A, no. 5, pp. 655-657, May 1996.
- [22] M. L. McLaughlin, G. Sukhatme, J. Hespanha, A. Ortega, and G. Mekioni, "The haptic Museum," Proc. Conference on Electronic Imaging and the Visual Arts (EVA), 2000.
- [23] 早乙女 恵子, 高橋 季穂, 笹田 晋司, 佐藤 誠, "インタラクティブ性を持つニューアーカイブの研究," 芸術科学論文誌, vol. 1, no. 3, pp. 105-107, Oct. 2002.
- [24] C. Scharver, R. Evenhouse, A. Johnson, and J. Leigh, "Designing cranial implants in a haptic augmented reality environment," Communications of the ACM, vol. 47, no. 8, pp. 33-40, Aug. 2004.

- [25] 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.
- [26] A. Rosenbloom and S. Editor, "Interactive immersion in a 3D computer graphics," *Communications of the ACM*, vol. 47, no. 8, pp. 29-32, Aug. 2004.
- [27] T. Asano and Y. Ishibashi, "A haptic museum in distributed virtual environments," *Proc. World Telecommunications Congress incorporating the International Switching Symposium (WTC/ISS)*, Sep. 2004.
- [28] T. Asano and Y. Ishibashi, "Guidance services for a haptic museum in distributed virtual environments," *Proc. ICAT Workshop on VR Applications and Entertainment Technology*, pp. 39-42, Nov./Dec. 2004.
- [29] 浅野 寿朗, 石橋 豊, 峯澤 聡司, "触る分散仮想博物館における展示オブジェクト表示と解説情報ストーリーミング開始の適応型制御," *日本バーチャルリアリティ学会論文誌「触・力覚情報の処理と呈示」特集号*, vol. 1, no. 1, pp. 27-37, Mar. 2006.
- [30] T. Harada, S. Ohno, and M. Sato, "The influence of multi-modal sensory information display on dribbling of a basket-ball in a virtual workspace," *Proc. the 4th International Conference on Virtual System and Multi-media*, vol. 21, no. 4, pp. 393-404, Apr. 1997.
- [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," *電子情報通信学会技術研究報告, CQ2000-50*, Nov. 2000.
- [32] 森野 祐直, 引地 謙治, 有本 勇, 兼安 祐介, 瀬崎 薫, 安田 靖彦, "触覚を含む仮想空間共有システムにおけるネットワーク変動に関する検討," *電子情報通信学会技術研究報告, CQ2001-102*, Feb. 2002.
- [33] 引地 謙治, 森野 祐直, 福田 一郎, 松本 壮樹, 瀬崎 薫, 安田 靖彦, "触覚インターフェースのネットワーク応用における遅延耐性に対する一検討," *電子情報通信学会技術研究報告, MVE2000-82*, Nov. 2000.
- [34] 森野 祐直, 引地 謙治, 福田 一郎, 松本 壮樹, 瀬崎 薫, 安田 靖彦, "予測を用いた触覚通信システムのネットワーク耐性に関する検討," *電子情報通信学会技術研究報告, CQ2000-95*, Feb. 2001.
- [35] A. Liu, F. Tendick, K. Cleary, and C. Kaufmann, "A survey of surgical simulation: Applications, technology, and education," *Presence*, vol. 12, no. 6, pp. 599-614, Mar. 2003.

- [36] 望月 要, 山崎 聡, 大西 仁, 中村 直人, 結城 皖曠, “力覚ディスプレイがユーザに与える感覚の心理物理学の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, NS2003-190, CQ2003-107, TM2003-6, Nov. 2003
- [37] 嶋田 宏史, 鈴木 達也, 早川 聡一郎, 大熊 繁, 藤原 文治, “仮想環境下で操作するオペレータと自律性を有するスレーブロボットの協調作業,” 計測自動制御学会論文集, vol. 40, no. 2, pp. 33-40, Feb. 2004.
- [38] 引地 謙治, 有本 勇, 瀬崎 薫, 安田 靖彦, “触覚を用いたリモートナビゲーションにおけるネットワーク品質の影響,” 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2004-66, July 2004.
- [39] 嵯峨 智, 川上 直樹, 館 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, Sep. 2005.
- [40] O. Wongwirat and S. Ohara, “Moving average based adaptive buffer for haptic media synchronization in telehaptics,” Proc. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (IEEE/ASME), pp. 1305-1311, July 2005.
- [41] 有本 勇, 引地 謙治, 瀬崎 薫, 安田 靖彦, “触覚オーディオアプリケーションにおける遅延の影響,” 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2005-65, Sep. 2005.
- [42] 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,” 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2006-2, Apr. 2006
- [43] O. Wongwirat and S. Ohara, “Haptic media synchronization for remote surgery through simulation,” IEEE MultiMedia, vol. 13, no. 3, pp. 62-69, July 2006.
- [44] S. Lee, S. Monn, and J. Kim, “A network-adaptive transport scheme for hapticbased collaborative virtual environments,” Proc. ACM the 5th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames), Oct. 2006.
- [45] K. Hikichi, Y. Yasuda, A. Fukuda, and K. Sezaki, “The effect of network delay on remote calligraphic teaching with haptic interfaces,” Proc. ACM the 5th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames), Oct. 2006.
- [46] 黒川 陽一, 浅野 寿朗, 石橋 豊, “触覚を利用した遠隔描画教示システムにおける端末間同期制御の効果,” 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2006-74, Nov. 2006.
- [47] 藤本 猛, 亀山 征二, 石橋 豊, “触覚メディア及び音声を用いた協調作業におけるネットワーク遅延の影響,” 平成 19 年電子情報通信学会総合大会, B-11-17, Mar. 2007.
- [48] T. Asano and Y. Ishibashi, “A remote haptic painting lesson system,” Proc. SPIE Optics East, Multimedia Systems and Applications X, vol. 6777, no. 28, Sep. 2007.

- [49] S. Sun, T. Fujimoto, Y. Ishibashi, and S. Sugawara, "A comparison of output quality among haptic media synchronization algorithms," Proc. the 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp. 43-50, Dec. 2008
- [50] 重野 寛, 本田 新九郎, 大澤 隆治, 永野 豊, 岡田 謙一, 松下 温, "仮想空間における風と香りの表現手法," 情報処理学会論文誌, vol. 42, no. 7, pp. 1922-1932, July 2001.
- [51] A. Mochizuki, T. Amada, S. Sawa, T. Takeda, S. Motoyashiki, K. Kohyama, M. Imura, and K. Chihara, "Fragra: A visual-olfactory VR game," Proc. ACM SIGGRAPH, Aug. 2004.
- [52] T. Nakamoto, S. Otaguro, M. Kinoshita, M. Nagahama, K. Ohnishi, and T. Ishida, "Cooking up an interactive olfactory game display," IEEE Computer Graphics and Application, vol. 28, no. 1, pp. 75-78, Jan./Feb. 2008.
- [53] H. Q. Dinh, N. Walker, L. F. Hodges, S. Chang, and A. Kobayashi, "Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments," Proc. IEEE Virtual Reality (VR), pp. 222-228, Mar. 1999.
- [54] S. Hoshino, Y. Ishibashi, N. Fukushima, and S. Sugawara, "QoE assessment in olfactory and haptic media transmission: Influence of inter-stream synchronization error," Proc. IEEE International Workshop Technical Committee on Communications Quality and Reliability (CQR), May 2011.
- [55] 星野 聡介, 石橋 豊, 福嶋 慶繁, 菅原 真司, "ネットワーク型ゲームにおける香りが利用者に届くまでの時間が公平性に及ぼす影響," 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2011-62, Jan. 2012.
- [56] P. Huang and Y. Ishibashi, "QoS control and QoE assessment in multi-sensory communications with haptics," IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 2, Feb. 2013.
- [57] 広瀬 通孝, "五感情報通信技術," バイオメカニズム学会誌, vol. 31, no. 2, pp. 71-74, May 2007.
- [58] ITU-T Rec. I. 350, "General aspects of quality of service and network performance in digital networks, including ISDNs," Mar. 1993.
- [59] Y. Ishibashi and S. Tasaka, "A synchronization mechanism for continuous media in multimedia communications," Proc. IEEE the 14th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Bringing Information to People (INFOCOM), pp. 1010-1019, Apr. 1995.
- [60] G. Blakowski and R. Steinmetz, "A media synchronization survey: Reference model, specification, and case studies," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 14, no. 1, pp. 5-35, Jan. 1996.

- [61] 田坂 修二, “ネットワーク環境におけるメディア同期,” 電子情報通信学会誌, vol. 84, no. 3, pp. 177-183, Mar. 2001.
- [62] ITU-T Rec. P. 10/G. 100 A mendment 1, “New appendix I- Definition of quality of experience (QoE),” Jan. 2007
- [63] M. Lin and K. Salisbury, “Haptic rendering: Beyond visual computing,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 24, no. 2, pp. 22-23, Mar. 2004.
- [64] ITU-T Recommendation G.114, “Transmission systems and media, general characteristics of international telephon connections and international telephon circuits: One-way transmission time,” Feb. 1996.
- [65] 小森 優, 吉田 隆太, 湊 小大郎, 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.
- [66] S. Matsumoto, I. Fukuda, H. Morino, K. hikichi, K. Sezaki, and Y. Yasuda, “The influence of network issues on haptic collaboration in share virtual environments,” Proc. the 5th PHANToM User Group Workshop, Oct. 2000.
- [67] Y. Ishibashi, T. Kanbara, T. Hasegawa, and S. Tasaka, “Traffic control of haptic media in networked virtual environments,” Proc. IEEE Workshop on Knowledge Media Networking (KMN), pp. 11-16, July 2002.
- [68] 広瀬 通孝, 岩田 洋夫, 池井 寧, 小木 哲朗, 広田 光一, 矢野 博明, 筧 直之, “触覚用共通ソフトウェア(HIP)の開発,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 3, no. 3, pp. 111-119, Sep. 1998.
- [69] 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.
- [70] “3D Touch SDK OpenHaptics Toolkit programmer’s guide version 1.0,” SensAble Technologies, Inc., 2004.
- [71] 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,” 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2001-40, July 2001.
- [72] 伊藤 嘉浩, 田坂 修二, “音声・ビデオ伝送におけるメディア同期を対象としたユーザレベルQoSの定量的評価及びマッピング,” 電子情報通信学会論文誌(B), vol. J86-B, no. 3, pp. 485-498, Mar. 2003.
- [73] 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,” 電子情報通信学会論文誌, vol. 87, no. 3, pp. 220-226, Mar. 2004.
- [74] Y. Ishibashi, “QoS control in networked multimedia,” IEICE Communications Society, GLOBAL NEWSLETTER, vol. 35, no. 2, pp. 10-12, June 2011.

- [75] Y. Ishibashi, A. Tsuji, and S. Tasaka, "A group synchronization mechanism for stored media in multicast communications," Proc. the 16th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM), pp. 693-701, Apr. 1997.
- [76] S. Singhal and M. Zyda, "Networked virtual environments designed and implementation," ACM Press. SIGGRAPH Series, 1999.
- [77] 浅野 寿郎, 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制御品質評価," 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.
- [78] 妻木 勇一, 横浜 真誠, 工藤 聖真, "加速度指令型遠隔操作における予測運動表示," 日本ロボット学会誌, vol. 26, no. 8, pp. 951-956, Nov. 2008.
- [79] S. K. Singhal and D. R. Cheritton, "Using a position history-based protocol for distributed object visualization," Technical Report, Stanford University, Department of Computer Science, 1994.
- [80] G. Welch and G. Bishop, "An introduction to the Kalman filter," Notes of ACM SIGGRAPH tutorial on the Kalman filter, 2001.
- [81] P. Brooks and B. Hestnes, "User measures of quality of experience: Why being objective and quantitative is important," IEEE Network, vol. 24, no. 2, pp. 8-13, Mar./Apr. 2010.
- [82] ITU-T Rec. P. 911, "Subjective audiovisual quality assessment methods for multimedia applications," Dec. 1998.
- [83] C. E. Osgood, "The nature and measurement of meaning," Psychological Bulletin, vol. 49, no. 3, pp. 197-237, May 1952.
- [84] S. Tasaka and Y. Ito, "Psychometric analysis of the mutually compensatory property of multimedia QoS," Conf. Rec. IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1880-1886, May 2003.
- [85] H. Ohnishi and K. Mochizuki, "Effect of delay of feedback force on perception of elastic force: A psychophysical approach," IEICE Trans. on Communications, vol. E90-B, no. 1, pp. 12-20, Jan. 2007.
- [86] ITU-R Rec. BT. 500-12, "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures," Sep. 2009.
- [87] 木下 栄蔵, "多変量解析入門," 哲学出版, 1987.

- [88] 白旗 慎吾, “統計解析入門,” 共立出版, 1992.
- [89] S. Kameyama and Y. Ishibashi, “Influence of difference in workspace size between haptic interface devices on networked collaborative and competitive work,” Proc. SPIE Optics East, Multimedia System and Applications X, vol. 6777, no. 30, Sep. 2007.
- [90] 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,” 平成 20 年電子情報通信学会総合大会, B-11-3, Mar. 2008.
- [91] T. Fujimoto, P. Huang, Y. Ishibashi, and S. Sugawara, “Interconnection between different types of haptic interface devices: Absorption of difference in workspace size,” Proc. the 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp. 319-322, Dec. 2008.
- [92] A. Tatematsu and Y. Ishibashi, “Mapping workspaces to virtual space in work using heterogeneous haptic interface devices,” IN-TECH, Advances in Haptics, Chapter 33, pp. 621-636, Apr. 2010.
- [93] M. Y. Sung, Y. You, N. J. Kim, and K. Jun, “Experiments for a collaborative haptic virtual reality,” Proc. the 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp. 174-179, Nov./Dec. 2006.
- [94] J. Kim, H. Kim, B. K. Tay, M. Muniyandi, M. A. Srinivasa, J. Jordan, J. Mortensen, M. Oliveira, and M. Slater, “Transatlantic touch: A study of haptic collaboration over long distance,” Presence, vol. 13, no. 3, pp. 328-337, June 2004.
- [95] S. Kameyama and Y. Ishibashi, “influences of network latency of voice and haptic media on efficiency of collaborative work,” Proc. International Workshop on Future Mobile and Ubiquitous Information Technologies (FMUIT), pp. 154-157, May 2006.
- [96] 越智 剛, 松田 昇, 岡本 敏雄, “協調作業と個人作業を融合するオブジェクト指向ネットワーク作業環境,” 情報処理学会論文誌, vol. 39, no. 1, pp. 123-130, Jan. 1998.
- [97] 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.
- [98] 藤浦 豊徳, 藤本 猛, 石橋 豊, “力覚を利用した協調作業による積み木遊び,” 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2008-54, Nov. 2008.
- [99] M. Glencross, C. Jay, J. Feasel, L. Kohli, and M. Whitton: “Effective cooperative haptic interaction over the Internet,” Proc. IEEE Virtual Reality (VR), pp. 115-122, Mar. 2007.

- [100] I. Arimoto, K. Hikichi, K. Sezaki, and Y. Yasuda: "Influence of network delay on ensemble application," Proc. IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications, Oct. 2005.
- [101] Y. Ishibashi and H. Kaneoka: "Fairness among game player in networked haptic environments: Influence of network latency," Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), July 2005.
- [102] K. Hikichi, H. Morino, I. Arimoto, I. Fukuda, S. Matsumoto, M. Iijima, K. Sezaki, and Y. Yasuda: "Architecture of haptics communication system for adaptation to network environments," Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Aug. 2001.
- [103] H. Kaneoka and Y. Ishibashi: "Effects of group synchronization control over haptic media in collaborative work," Proc. the 14th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp. 138-145, Nov./Dec. 2004.
- [104] P. Huang, T. Fujimoto, Y. Ishibashi, and S. Sugawara, "Collaborative work between heterogeneous haptic interface devices: Influence of network latency," Proc. the 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), pp. 293-296, Dec. 2008.
- [105] P. Huang, Y. Ishibashi, N. Fukushima, and S. Sugawara, "Collaborative haptic play with building blocks," Proc. ACM International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE), Oct. 2009.
- [106] P. Huang, Y. Ishibashi, N. Fukushima, and S. Sugawara, "Interactivity improvement of group synchronization control in collaborative haptic play with building blocks," Proc. ACM the 9th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames), Nov. 2010.
- [107] P. Huang, Y. Ishibashi, N. Fukushima, and S. Sugawara, "QoE assessment of group synchronization control scheme with prediction in work using haptic media," International Journal of Communications, Network and System Sciences (IJCNS), vol. 5, no. 6, pp. 321-331, June 2012.
- [108] P. Huang, Y. Ishibashi, N. Fukushima, and S. Sugawara, "Remote ikebana with olfactory and haptic media in virtual environments," Proc. the 21st International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), Nov. 2011.
- [109] P. Huang, Y. Ishibashi, N. Fukushima, and S. Sugawara, "QoE assessment of olfactory media in remote ikebana with haptic media," Proc. IEEE International Workshop Technical Committee on Communications Quality and Reliability (CQR), May 2012.

- [110] P. Huang, Y. Ishibashi, N. Fukushima, and S. Sugawara, "Effect of dynamic control of fragrance output timing in networked virtual environment," Proc.the 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Oct. 2012.
- [111] 黄平国, 石橋豊, 福嶋慶繁, 菅原真司, "分散仮想環境における香りの動的出力タイミング制御のユーザ体感品質評価," 映像情報メディア学会誌「ヒューマンインフォメーション」特集号, vol. 66, no. 12, pp. J495-J499, Dec. 2012.
- [112] 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), pp. 213-217, May 2002.
- [113] M. Carson and D. Santay, "NIST Net - A linux-based network emulation tool," ACM SIGCOMM, vol. 33, no. 3, pp. 111-126, July 2003.
- [114] 田中豊, 脇本和昌, "多変量統計解析法," 現代数学社, 1983.
- [115] 橋本達也, 石橋豊, "協調作業を用いたネットワーク型リアルタイムゲームにおける触覚メディアの端末間同期制御の効果," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌「ハプティックインタラクション」特集号, vol. 13, no. 1, pp 3-13, Mar. 2008.
- [116] 黒川陽一, 石橋豊, 浅野寿朗, "触覚を利用した遠隔描画教示システムにおける端末間同期制御実験: 主観評価と客観評価," 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2006-79, Jan. 2007.
- [117] Y. Ishibashi and S. Tasaka, "A distributed control scheme for group synchronization in multicast communications," Proc. the International Symposium on Communications (ISCOM), pp. 317-323, Nov. 1999.
- [118] Y. Ishibashi and S. Tasaka, "A group synchronization mechanism for live media in multicast communications," Conf. Rec. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), pp. 746-762, Nov. 1997.
- [119] Y. Ishibashi, T. Hasegawa, and S. Tasaka, "Group synchronization control for haptic media in networked virtual environments," Proc. the 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (Haptics), pp. 106-113, Mar. 2004.
- [120] 立川清, "例解統計学: 入門より分散分析まで," 第一出版, 1963.
- [121] H. Mizuno, Y. Ishibashi, and S. Sugawara, "A comparison between transmission methods of sense of force in a remote haptic instruction systems," Proc. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), pp. 1202-1205, June 2009.

- [122] 黄 平国, 石橋 豊, 福嶋 慶繁, 菅原 真司, “嗅覚・力覚を利用した遠隔生け花システムにおける生徒に対するアンケート調査と香り空間の大きさの影響,” 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2011-21, July 2011.
- [123] 黄 平国, 石橋 豊, 福嶋 慶繁, 菅原 真司, “嗅覚・触覚を利用した遠隔生け花システムにおけるアンケート調査,” 情報処理学会全国大会, 2E-7, Mar. 2012.
- [124] 浅谷 耕一, “通信ネットワークの品質設計,” 電子情報通信学会, May 1993.