

複合現実感による遠隔共同作業支援  
における空間構成法に関する研究

平成19年度

坂内 祐一



# 目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	3
1.2	本論文の目的	4
1.3	本研究の概要	5
1.3.1	1 空間を利用した非対称型遠隔 MR 共同作業支援モデル	6
1.3.2	2 空間を利用した対称型遠隔 MR 共同作業支援モデル	6
1.4	本論文の構成	7
第2章	関連研究	9
2.1	コミュニケーションモデル	11
2.2	ビデオベースのリアルタイムグループウェア	13
2.2.1	メディアスペース	13
2.2.2	共有データモデル	14
2.2.3	WYSIWIS	15
2.2.4	アウェアネス	16
2.2.5	シームレスネス	16
2.3	バーチャルリアリティ (VR) を用いた遠隔共有仮想空間	18
2.3.1	共有仮想空間 ( Collaborative Virtual Environment: CVE )	18
2.3.2	オブジェクト共有モデル	19
2.3.3	ユーザ視点モデル	20
2.3.4	オブジェクト操作のためのユーザインタフェース	21
2.3.5	CVE でのアウェアネスモデル	22
2.3.6	没入型 CVE	22
2.4	実物体・実空間を用いる遠隔協調作業支援	23
2.4.1	実世界志向インタフェース	23
2.4.2	タンジブルユーザインタフェース	25
2.4.3	実物体を用いた遠隔共同作業支援システム	27
2.4.4	実空間を利用した遠隔共同作業支援システム	28
2.5	複合現実感および応用システム	30

---

2.5.1	複合現実感	30
2.5.2	複合現実感の作業支援への応用	32
2.5.3	複合現実感を用いた対面型共同作業支援	34
2.5.4	複合現実感を用いた遠隔型共同作業支援	35
<b>第3章</b>	<b>複合現実感による遠隔共同作業支援モデル</b>	<b>41</b>
3.1	はじめに	43
3.1.1	複合現実感における現実と仮想の要素	43
3.1.2	コミュニケーション手段とメディア	44
3.2	遠隔 MR による共同作業支援モデル	46
3.2.1	モデルの要素	46
3.2.2	座標系の関係	47
3.2.3	共有オブジェクトに対する操作レベル	48
3.2.4	モデルの表記	49
3.2.5	実物体オブジェクトの有効性	50
3.2.6	遠隔 MR における実空間の利用とモデルの対称性	51
3.3	1 空間を利用した遠隔 MR 共同作業支援モデル	52
3.3.1	従来研究例のモデル表現	52
3.3.2	提案モデル	54
3.4	2 空間を利用した遠隔 MR 共同作業支援モデル	56
3.4.1	2 空間の座標系の関係	56
3.4.2	2 空間モデルにおける非対称性	57
3.4.3	提案モデル	58
3.4.4	タンジブルレプリカ概念	60
3.4.5	タンジブルレプリカを用いた共同作業イメージ	61
3.5	まとめ	62
<b>第4章</b>	<b>1 空間を利用した非対称型遠隔 MR 作業支援モデル</b>	<b>65</b>
4.1	はじめに	67
4.2	1 空間を利用した非対称型遠隔 MR の機能要件	67
4.2.1	指示者ポインティング機能	68
4.2.2	仮想物体による動作例示機能	70
4.2.3	WYSIWIS の実現と指示者視点の制約	70
4.3	1 空間を利用した非対称型遠隔 MR の構成要件	70
4.3.1	ビデオシースルー HMD	70
4.3.2	ハードウェア構成	71

---

4.3.3	ソフトウェア構成 . . . . .	73
4.4	ポインティング機能に関する評価 . . . . .	73
4.4.1	評価実験条件 . . . . .	73
4.4.2	実験結果 . . . . .	75
4.5	組立て作業指示に関する評価 . . . . .	78
4.5.1	評価実験条件 . . . . .	78
4.5.2	組立て作業に関する計測結果 . . . . .	79
4.6	1空間非対称型遠隔MRシステムの評価と考察 . . . . .	80
4.7	まとめ . . . . .	82
<b>第5章</b>	<b>2空間を利用した対称型遠隔MR作業支援モデル</b>	<b>85</b>
5.1	はじめに . . . . .	87
5.2	2空間を用いる対称型遠隔MRシステムの機能・構成要件 . . . . .	88
5.2.1	タンジブルレプリカの物体座標系 . . . . .	88
5.2.2	座標変換 . . . . .	89
5.2.3	共有仮想物体同期管理 . . . . .	90
5.2.4	レプリカへの仮想物体重畳表示 . . . . .	90
5.2.5	共有仮想物体への制御権管理 . . . . .	91
5.2.6	ハードウェア・ソフトウェア構成 . . . . .	92
5.3	ポインティング動作の評価 . . . . .	93
5.3.1	ポインティング動作評価実験 . . . . .	93
5.3.2	ポインティング動作評価実験結果 . . . . .	95
5.3.3	ポインティング動作評価実験考察 . . . . .	96
5.4	環境の違いによるポインティング動作の評価 . . . . .	97
5.4.1	ポータブル環境と固定環境との比較実験概要 . . . . .	97
5.4.2	ポータブル環境と固定環境との比較実験結果・考察 . . . . .	98
5.5	ドロ잉機能の評価 . . . . .	99
5.5.1	ドロ잉機能を用いた立体五目並べゲーム . . . . .	99
5.5.2	ドロ잉機能の評価実験 . . . . .	100
5.5.3	ドロ잉機能評価結果・考察 . . . . .	100
5.6	まとめ . . . . .	101
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>105</b>
	参考文献	111
	論文目録	123



# 目 次

2.1	Video Draw の構成図 [93]	17
2.2	Video White Board の構成図 [94]	17
2.3	Clear Board の構成図 [37]	18
2.4	DIVE の画面例 [11]	20
2.5	MASSIVE における aura, nimbus, focus の概念 [11]	22
2.6	TUI と GUI との対応関係 [38]	26
2.7	Agora の構成図 [107]	28
2.8	SharedView の構成図 [50]	29
2.9	GestureMan のロボットと指示者インタフェース [51]	30
2.10	仮想と現実の連続性 [57]	31
2.11	AR を用いた配線作業支援システム (ボーイング社) [13]	33
2.12	Studierstube を用いた 3D ペインティングアプリケーション [76]	35
2.13	BlockParty における指示者と作業者の画面 [7]	36
2.14	Real world teleconferencing におけるデスクトップと HMD の画面 [6]	37
2.15	Distributed Designer's Outpost における 2 つのサイトの様子と画面 [20]	39
3.1	R 要素と V 要素の組合せによる複合現実空間構成 [56]	43
3.2	複合現実空間の構成例 [56]	44
3.3	遠隔 MR に用いられる座標系	47
3.4	座標系の関係	48
3.5	遠隔 MR による共同作業支援モデルの要素の表記	49
3.6	遠隔コミュニケーションシステムにおける空間の使われ方 [39]	51
3.7	Gesture Man と Block Party のモデル	53
3.8	1 空間を利用した遠隔 MR 共同作業支援モデル	55
3.9	2 空間の座標系の関係	56
3.10	2 空間の座標系の関係	58
3.11	2 空間を利用した遠隔 MR 共同作業支援モデル	59
3.12	タンジブルレプリカを用いた共同作業イメージ	61
4.1	1 空間を利用した非対称型遠隔 MR モデル	67

---

4.2	非対称型遠隔作業支援システム	68
4.3	指示者ポインタの表示	69
4.4	ビデオシースルー HMD: VH2002	71
4.5	ハードウェアとソフトウェア構成	72
4.6	ポインティング実験画面	74
4.7	頭部運動範囲	75
4.8	頭部運動速度（並進成分）	76
4.9	頭部運動速度（回転成分）	77
4.10	ポインティング時間	78
4.11	ポインティング位置特定時間	79
4.12	組立て作業実験画面	80
4.13	ポインティング実験画面	81
5.1	2空間を用いる対称遠隔 MR モデル	87
5.2	世界座標系と物体座標系	88
5.3	円筒物体へのドロワーイング	91
5.4	仮想物体シーングラフ	92
5.5	2空間を用いた対称型遠隔 MR システム構成	93
5.6	ポインティング評価実験画面	94
5.7	ポインティング評価実験での被験者の様子	95
5.8	実環境と MR 環境でのポインティング動作時間	96
5.9	固定環境でのポインティング評価実験画面	98
5.10	ポータブル環境と固定環境でのポインティング動作時間	98
5.11	立体五目並べゲーム	99
5.12	視野角と立方体の大きさとの関係	100
5.13	立体五目並べゲームでの1分間の平均手番数	101
5.14	立体五目並べゲームのアンケートのスコア平均値	102



# 表 目 次

1.1	グループウェアの分類 [18]	3
2.1	ノンバーバルコミュニケーションの分類	12
3.1	コミュニケーション手段とメディア	45
3.2	遠隔 MR による共同作業モデルのコミュニケーション手段	47
3.3	操作のレベル	49
3.4	利用する空間の数と対称性による MR システムの分類と特徴	52
3.5	利用する空間の数と対称性による MR システムの例	53
3.6	1 空間を利用した作業支援システムの比較	54
4.1	VH2002 の仕様	72
5.1	仮想物体管理テーブル	90



# 第1章 序論



## 1.1 はじめに

本研究は、下記の表 1.1 に分類されるグループウェアの中で、遠隔地をリアルタイムで結びコミュニケーション支援、共同作業支援を行う同期遠隔インタラクションシステムモデルに関する。

表 1.1: グループウェアの分類 [18]

	同時	非同時
同一地点	対面インタラクション	非同期インタラクション
遠隔地点	同期遠隔インタラクション	非同期遠隔インタラクション

19 世紀後半の電話機の発明以来、電話が唯一のリアルタイム遠隔コミュニケーションだった時代が続いたが、コンピュータとネットワーク技術の発展により、電話と比べはるかにメディアリッチなシステムとして、1980 年代頃よりグループウェアの研究が盛んになった。この研究成果は、ビジネスツール、コミュニケーションツール、またエンターテインメントツールとして社会に普及している。

音声情報に加えてビデオやテキストデータを遠隔で共有して作業を行うリアルタイムグループウェアは、ダグラス・エンゲルバートが 1968 年に行った NLS (oN Line System) のデモ [99] にその原型を見ることが出来るが、汎用のコンピュータとデジタルネットワークを用いて遠隔地のカメラからの映像を相互に送りあう技術をベースにしたメディアスペースの研究で本格化した。

遠隔地の映像を相互に確認できることで、ユーザが対面している環境と同じようにコミュニケーションが行え、さらにはコラボレーションも容易に可能になるという当初の予想とは裏腹に、メディアスペースの研究によって、映像メディアを介することに起因するメディアのゆがみにより、対面環境のような自然なコミュニケーションが取れないことが明らかになってきた (例えば [28] など)。

一方、コンピュータグラフィックスの技術をベースにバーチャルリアリティ (Virtual Reality:VR) の研究の成果として、大規模でリアリティの高い仮想空間が構築できるようになった。このような仮想空間が、マルチユーザ特に遠隔地のユーザによって共有され、コミュニケーションやコラボレーションに用いられるようになり、共有仮想環境 (Collabprative Virtual Environment:CVE) でのアプリケーションも多数開発された [65]。対戦型 TV ゲームはこの技術の代表的な応用例である。

しかしながら VR はあくまでコンピュータの中に閉じた世界であり、われわれの住む現実世界とは直接のかかわりを持たない。このような VR の限界のアンチテーゼとして位置

付けられるのが、ユビキタスコンピューティング [101] の概念であり、この流れを汲むのが実世界志向コンピューティング、モバイルコンピューティングなどの研究である。

複合現実感 (Mixed Reality: MR) もこの実世界指向コンピューティング流れの中に位置付けられるが、視覚的により密接に現実世界と仮想世界とを融合していこうという方向性の研究である。特に位置センシング技術やコンピュータビジョンによる位置合わせ技術の進展で [75]、より複雑な仮想モデルをより正確に、かつより広範囲の実世界に実時間で融合できるようになってきている。

## 1.2 本論文の目的

上述した研究の流れの中から、グループウェアに重要な概念がいくつか生まれてきた。メディアスペースの研究からは、WYSIWIS (What You See Is What I See)、アウェアネス、シームレスネスの概念が、CVE の研究からは、人物情報のアバタ表現やユーザ視点の概念が、実世界志向インタフェースの研究からはタンジブルユーザインタフェースなどである。

MR を利用して共同作業を支援するシステムも提案されており、そのほとんどが表 1.1 の対面型グループウェアに分類される。MR による対面型グループウェアは、同じ実空間内に存在する複数のユーザが、MR を用いてその空間・あるいは空間内の実物体に関連付けられた共有仮想オブジェクトを観察・操作できるシステムである。

この状況では、ユーザが同一空間内に存在するので、上記の WYSIWIS、アウェアネス、シームレスネスが既に実現されており、アバタ表現やユーザ視点の概念を新たに持ち込む必要がない。従ってタンジブルユーザインタフェースとして現実空間の実物体を無理なく利用して、この実物体を共有仮想情報で拡張することができる。

これに対してユーザが遠隔地に分散するケースでは、実空間を共有できない (従って実物体も物理的には共有できない) ユーザの間で仮想と現実を融合させるというパラドックスが生じる。例えば、一方のユーザが所有する実物体の情報を他方のユーザにどのような形式で伝え、実物体の移動などが生じたときに、双方のサイトでどう整合性を取るかなどの課題がある。

本研究では、MR を用いてどのように現実と仮想の要素を組み合わせることで上記の問題を解決し、遠隔コミュニケーション・コラボレーションが行えるのかを検討するため、要素間の関係性を表現するモデルを提案する。このモデルをもとに、遠隔グループウェアに要求される機能についてその特性を検討し、実用的なケースについてシステムとして実装し、評価実験によりその有用性を示すことを目的とする。

### 1.3 本研究の概要

MR を用いて現実と仮想の要素を組み合わせ作業空間を構築するために、まず現実空間に世界座標系を設定し、この座標系を基準として仮想物体の表示を行う。世界座標系の他に、仮想物体を容易に表現するためのオブジェクト座標系、ユーザ視点を表すカメラ座標系なども同時に用いられる。これらの座標系の関係はリアルタイムに計測され、座標変換が行われてユーザ視点からの映像が表示される。

複数のユーザが遠隔に分散している遠隔共同作業支援では、各々のユーザに対して上記座標系が設定されており、これらの座標系をどう関連付けるかで遠隔共同作業支援モデルが決まる。モデル構築にあたって、ユーザの位置関係（特に視点の関係）および座標系との関係（座標変換）を Relation と定義し、この Relation の設定によってモデル特性がどのように変化するかを分析する。

このモデル特性を具体的に調べるために、遠隔共同作業空間構築対象となる実空間の数、およびモデルの対称性に注目してモデルを分類する。本論文で具体的に取り上げる実空間数は 1 または 2 である。前者は、1 人の作業者の存在する実空間を作業空間とし、遠隔地の指示者があたかも作業者の空間に入り込んで作業支援を行うモデルである。それに対して後者は、遠隔地のユーザの実空間にそれぞれ作業空間を設定し、その中で共有オブジェクトへのインタラクションを行うモデルである。

もう一つの分類の観点であるモデルの対称性とは、ユーザ間に構成要素の差がないことに加え、ユーザ間に機能の差・インタフェースの差がないことを言う。われわれの生活している世界では、異なる空間に同じ実物体は同時に存在できないという法則が存在し、実空間や実物体を仮想情報で拡張する MR を遠隔で利用しようとする際の大きな制限になる。例えば MR を用いて一方の空間の実物体を他方の空間で仮想物体として表示した場合、ユーザの作業空間は同一にはならず、非対称性が存在することになる。非対称性の問題は、メディアスペースの研究以来指摘されており（例えば、[33, 51] など）、遠隔でのコミュニケーションを阻害する大きな要因である。

1 空間モデルは非対称となるが、2 空間モデルは対称・非対称の構成が可能である。本論文では 1 空間非対称モデルと 2 空間対称モデルについて実装・評価を含めて検討する。

“ 1 空間を利用した非対称型遠隔 MR 共同作業支援モデル ” は、作業空間に存在する作業者に対して、遠隔の指示者が作業指示を行うのに適した役割非対称モデルである。テレグジスタンスで、遠隔の実空間にあたかも自分が存在するごとく機械操作を行うように、遠隔地の指示者が、あたかも作業者の存在する作業空間に入り込んで作業指示を行うような状況を設定するものである。

“ 2 空間を利用した対称型遠隔 MR 共同作業支援モデル ” では、遠隔地のユーザの実空間にそれぞれ作業空間を設定し、実物体の作業オブジェクトに対して共同で作業を行う状況を想定している。実物体オブジェクトの導入による非対称性を回避するために、タンジ

ブルレプリカの概念を導入し、両者のレプリカに対する操作条件を同一にする手法を提案する。

本研究では、ユーザはすべてビデオシースルー・ヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) を装着することを前提としている。また以下では、MR を用いた遠隔共同作業支援モデル (システム) を単に“遠隔 MR 共同作業支援モデル (システム)”と記することにする。

### 1.3.1 1 空間を利用した非対称型遠隔 MR 共同作業支援モデル

1 空間を利用した非対称型遠隔 MR 共同作業支援モデルは、作業者の存在する空間に作業空間を設定し、作業者が実物体オブジェクトを用いて作業するのを、指示者が仮想物体を用いて遠隔から支援するモデルである。このモデルは構成が非対称であるため、指示者と作業者といったように役割が非対称な場合に適していると考えられ、同様の構成の共同作業支援システムが提案されているが (例えば、[50, 7, 6] など)、ユーザインタフェースが作業者と指示者で大きく異なるため、両者の作業空間に対する認識は一致しない [48, 26]。

本論文のモデルでは、指示者は作業空間の映像を参照しながら、ポインタにより作業空間の実オブジェクトを指し示したり、実オブジェクトをモデル化した仮想オブジェクトを用いて、実オブジェクトの組立て手順を示すことができる。遠隔の指示者のカメラ座標系を作業者のカメラ座標系に一致させる Relation を導入することで、指示者が観察する映像に作業者視点ステレオ映像を用いることになる。このような構成により、指示者・作業者は WYSIWIS の映像でのシームレスなインタラクションが可能となる。

しかしながら本モデルでは、指示者の視点を作業者の視点に無理に合わせることによる副作用 (例えば、自分の意志で視点変更できない点、作業者の頭の動きによるポインティングが困難な点、酔いが発生する点など) が懸念される。

評価実験の結果、作業者の頭部の動きによる作業効率の低下や酔いの発生など、作業指示機能に及ぼす影響は確認されず、指示者はポインティング機能、仮想オブジェクトによる動作例示機能を用いて作業者の支援が可能なが示された。[1, 86, 85]。

### 1.3.2 2 空間を利用した対称型遠隔 MR 共同作業支援モデル

2 空間を利用した対称型遠隔 MR 共同作業支援モデルは、実空間にそれぞれ作業空間を設定するモデルである。まず、ユーザが存在する地点に基準となる床や机を基準オブジェクトとして世界座標系を設定し、各々が同様の作業が可能となる物理空間上に作業空間を構成する。そして、ユーザ間の位置関係や共有オブジェクトが世界座標系で等しくなるような Relation を定める。



このように設定された 2 つの作業空間の一方に共有対象となる実物体を導入すると、他方の作業空間にこの実物体に対応した仮想物体を表示して、整合性を取る必要がある。遠隔地の実物体を移動できないという制約があるため、上記の世界座標系のみでの Relation ではこの非対称性が解消できないことを示す。

また遠隔から実物体を移動できないために生じる双方の空間の不整合を避けるために、共有オブジェクトの物体座標系を用いてポインタをオブジェクトに対して相対位置表示する方式を提案する。このような Relation により遠隔の実物体の移動の表現が可能になるが、作業対象は 1 個の共有オブジェクトに限定される。

共有オブジェクトとして、2 人のユーザが実物体オブジェクトの複製を用いる場合、このオブジェクトをタンジブルレプリカと定義する。このモデルでは、ユーザは、ポータブルなレプリカを手に持ち、ポインタとペンを兼ねたスタイラスでポインティングおよびドロウイングを行う。しかしながらこの方式では、世界座標系で管理されるユーザのビューに物体座標系で管理されるビューが加わるため、作業空間内の仮想物体の動きが複雑になる恐れがある。

ノンバーバル情報として遠隔地に表示されるユーザの身体情報は、スタイラスペンを CG で表示したポインタのみに限定し、評価実験を行った結果、ポインティング動作は問題なく認識できることが確認され、ドロウイング機能を利用したゲームも、対面協調作業と同様にスムーズに行うことが出来た。[4, 5, 3, 105, 90, 89]。

## 1.4 本論文の構成

本論文は以下の 6 章で構成されている。

第 1 章では、本研究の目的と概要について述べた。

次の第 2 章では、関連研究を取り上げ、最初に社会学の分野で行われているコミュニケーション分析の研究からコミュニケーションを成立させる要因をまとめる。

次にグループウェアの研究として、音声にビデオ情報を加えることを大きな特長とするメディアスペースでの研究例とコンピュータグラフィックス (CG) 技術とバーチャルリアリティ (VR) 技術をベースにした、共有仮想環境 (CVE) の研究とを取り上げ、グループウェアに必要な基本的概念を整理する。

さらに実物体や実空間を利用する実世界指向コンピューティングに関する研究と、これをマルチユーザで使うグループウェアの研究をサーベイし、実物体や実空間の使われ方の例を紹介する。最後に本研究における技術的な基盤である複合現実感 (MR) 技術と、その応用システムである作業支援や、グループウェアについて述べる。

第 3 章において、最初にメディアスペース、CVE、および MR を用いたグループウェアでコミュニケーションに必要な情報がどう扱われているかを比較した上で、MR を用い

た遠隔共同作業支援のモデル化に必要な要素をまとめる．これらの要素および要素間の関係を表す表記法によりモデルを表現する．特に要素間の関係として，ユーザ間の関係と座標系の対応関係として Relation の概念を導入する．

この Relation によりモデルの特性がどう影響するかを具体的に検討するために，実空間と対称性に着目して，4 章，5 章のモデルを取り上げる．

第 4 章以降において，具体的なモデルの検討を行う．まず，第 4 章では“ 1 空間を利用した非対称型の遠隔共同作業モデル ”を提案し，その特徴について述べ，モデル実現化したシステムを用いた評価実験結果をまとめて考察を行う．次に，第 5 章の“ 2 空間を利用した対称型の遠隔共同作業モデル ”では，タンジブルレプリカの概念を導入してその特徴をまとめた．次にモデルを具体化したシステム構成を述べ，システムを用いた評価実験結果をまとめて考察する．

最後に，第 6 章において本研究において行った MR を用いた遠隔共同作業支援の空間構成法について総括し，結論と今後の展望を述べる．

## 第2章 関連研究



## 2.1 コミュニケーションモデル

長い間遠隔コミュニケーションの手段は電話が主流であったが，そこにビデオ映像が新たなメディアとして加わった．ビデオ映像を利用することにより，より現実に近いコミュニケーション状況を人工的に作り上げることが可能になったが，後述するように，必ずしも自然なコミュニケーションが実現されたわけではなかった．

遠隔でのコミュニケーションシステムを構築する際に，まず対面環境でどのようにコミュニケーションが成り立っているかを知る必要がある．そこでコミュニケーションの研究例を最初に整理する．

Knapp [46] らはコミュニケーションを成立させる要因としてを以下の 4 項目を挙げている．

1. バーバルコミュニケーション
2. ノンバーバルコミュニケーション
3. オブジェクトへの参照
4. 環境への参照

バーバルコミュニケーションは，言語によるコミュニケーション（会話，書くことなど）であり，ノンバーバルコミュニケーションは，人のジェスチャ・姿勢，顔の表情などである．そしてコミュニケーションは抽象的な話題だけにとどまらず，興味の対象となるオブジェクトや，人が存在する環境に関係することもある．これがオブジェクトへの参照，環境への参照という形でコミュニケーションを成立させる．

バーバルおよびノンバーバルコミュニケーションは，リップシンクという完全に同期をとって現れることもあり，手をたたく，何気ないジェクチャ，そして話しながらの姿勢の変化などのニュアンスを通してリンクすることもある．またオブジェクトや環境は，コミュニケーションのコンテキストを一致させるために重要であり，それら自体がしばしばコミュニケーションの対象となることや，オブジェクトを手に取り，環境の中を動き回るといった行動に結びつくこともある．また，オブジェクトを指して「これを手に取って」と言いながら，別の地点を指して「ここに置いて」と指示することがあるが，これはバーバル情報とノンバーバル情報でオブジェクトや環境を参照している行為である．

ノンバーバルコミュニケーションはさまざまな研究で分類がなされており [10, 32, 66]，ここでは表 2.1 に示すように「対人的空間」，「身体情報」，「準言語」，「接触」，「人の特性」，「人の付属物」の 6 項目に分類する．

これらの項目のうち，作業支援システムに重要である対人的空間および身体情報についてはさらに詳細に分類する．

表 2.1: ノンバーバルコミュニケーションの分類

分類	例
対人的空間	対人距離, 位置関係, 個人または共有作業空間
身体情報	身体動作, 視線, 表情
準言語	声質, 話の間, 流暢さ
接触	相手の身体への接触
人の特性	性別, 年齢, 身体特徴
人の付属物	服装, 化粧, 付属品

### 1. 対人的空間

- 対人距離

Hall の研究 [31] では, 一般的なコミュニケーションにおける対人距離は, 密接距離 (約 46cm 以下), 固体距離 (約 1.2m まで), 社会距離 (3.66m まで), 公衆距離 (それ以上) に分類されている.

- 他者との位置関係

遠隔会議システムなどでは, 実際の会議室における人の配置を模してテーブルを囲むような形式が多く取られるが, 作業支援においては, 作業対象物の大きさ・形状・作業内容などによって位置関係は変化する場合が多い.

- 自分自身の作業空間

共同作業にあたっては, 共有データを利用できるだけでなく, 個人的な情報や作業データを管理できる個人専用の作業空間が提供され, 各自が独立して作業するための環境が整備されている必要がある [55].

### 2. 身体情報

- 体の動き・姿勢

Ekman ら [16] は, 身体動作の機能を表象, 例示的動作, 情動表出, 調整子, 身体操作 5 つに分類している. このうち例示的動作は発話の内容や流れに関連して使われて, 発話内容を強調したり補足したりする動作で, 会話の最中にだけ使われるのが特徴である. 作業支援では, 対象物への指示動作がこれにあたる.

- 視線

アイコンタクトの重要性は, 2.2 章で述べるメディアスペースの研究 (例えば [28]) で指摘されている, 視線不一致によるコミュニケーションの不自然

さとともに、作業支援の場合、相手がどこを注視しているかは、きわめて重要な情報であり、また相手の関心度・理解度をモニタするのにも有効である。

- 表情

顔の表情は人間の情動など心理状態を反映するものである。Ekman ら [17] は、表情を左右する心理的ファクタは、驚き、恐怖、嫌悪、怒り、幸福、悲しみの 6 種類に大別されるとしている。実際のコミュニケーションでは、顔の表情だけからではなく他のノンバーバル情報と共に、より複雑な感情表現が作りだされるが、この 6 種類の表情は、アバタの基本的な表情として多くの VR システムで用いられている。

## 2.2 ビデオベースのリアルタイムグループウェア

### 2.2.1 メディアスペース

電話が発明された 19 世紀後半以来、音声通信はほぼ唯一のリアルタイム遠隔コミュニケーション手段であった。80 年代以降に見られるコンピュータ処理能力の飛躍的な向上と、デジタルネットワークの容量の増大により、音声に加えてビデオ映像や各種デジタルデータ双方向通信機能を利用したコミュニケーションシステムが開発された。

Mantei らは、これらのシステムを総称してメディアスペースという言葉で表現し、以下のように定義した [53]。「メディアスペースとは、ビデオ、オーディオ、コンピュータを統合して利用し、時間的・空間的に分散した人々が共同で作業できるシステムである。」

初期の代表的な研究例が、XEROX 社で開発された電子会議室 Colab である [83]。このシステムは、個々の参加者が所有するコンピュータ端末と、参加者全員が見ることのできる電子ホワイトボードから構成され、ネットワーク接続された端末と電子ホワイトボードを用いてデータを共有しながら会議の進行を支援する。

Colab は、会議室の中の対面環境における参加者を支援するシステムであって、分散した場所にいる参加者同士を支援するシステムではないが、この研究の中で、共有データへの排他制御を行うための操作権制御、各々の参加者に共有データの同一のビューを提供する WYSIWIS (What You See Is What I See)、データの特定の位置を指定するためのテレポインタなど、リアルタイムグループウェアの基本的な概念が数多く提示された。

以下、メディアスペースの研究を中心に、共有データモデル、WYSIWIS、アウェアネス、シームレスネスについての関連研究をまとめる。

### 2.2.2 共有データモデル

遠隔のサイト間でデータを共有し、遠隔サイトとの間でローカルサイトでのデータ変更結果の整合性を取るための手段は、大きくクライアント・サーバモデルとピア・ツー・ピアモデルに分類される。クライアント・サーバモデルは、システム全体の管理をサーバで行う集中型管理モデルで、クライアントによるデータ変更をサーバを介して他のクライアントに伝える。このモデルではシステム全体でのデータの整合性を取りやすいが、ネットワークトラフィックと処理がサーバに集中しやすく、レスポンスが遅くなるという問題点がある。

ピア・ツー・ピアモデルは分散型管理モデルであり、スケーラブルなシステムを構築しやすい、通信トラフィックや処理の集中を防げるなどの利点はあるが、データの整合性を取るための処理が複雑になるという問題点がある。

また複数のクライアントから、同時に共有データに対してアクセス・変更がなされると、システム全体として整合性がとれなくなる恐れがあるため、共有データに対するアクセス制御が必要である。Ellis [18] は、共有オブジェクトの同時アクセス制御について整理した。このうちリアルタイムグループウェアに関する方式は大きく以下のように分類される。

1. ロッキング (locking)

ロッキングはデータを変更する際にデータをロックしてから行うメカニズムである。機構は単純であるが、オーバーヘッドの問題、ロックするデータの粒度の問題、ロックとリリースのタイミングの問題などを解決する必要がある。

2. 操作権 (turn taking protocol)

操作権制御は単純な機構で行えるが、操作権の受け渡しプロトコルがグループ内でうまく機能するかの問題があり、並列度が大きい共同作業に適用困難になる可能性がある。

3. 集中制御 (centralized controllers)

集中制御は、データの管理を管理プロセス (通常サーバに存在) に集中させる方式であるが、管理プロセスとの通信がボトルネックになりやすい。

4. 依存性検出 (dependency-detection) 依存性検出は、データにタイムスタンプを付け、現在保持しているデータと更新データのタイムスタンプを比較して矛盾がない場合に、データ更新を行う方式である。各クライアント間での同期が不要であり応答時間も早いですが、機構が複雑になる。

Colab では、いろいろな方式を検討した結果、上記のような厳密なデータ管理方式を取らず、各端末にデータベースのコピーを保有しておき、ある端末でのデータ変更をプロ



ドキャスト機能を用いて他のメンバーの端末へ送信してデータをアップデートする方式を採用した。確率的に小さいデータの不整合はユーザ間での協調して解決する方式により、応答時間の短縮、および操作の柔軟性を実現している。

Mermaid [100] は、マルチウィンドウ機能を持つ汎用のワークステーションにより実現されたデスクトップ電子会議システムであり、会議管理、ビデオ映像表示、共有ホワイトボードなどの機能がそれぞれウィンドウに実装されている。このシステムを用いて、ISDN 回線経由で動画・音声・データ通信を行い、実際に複数地点間での会議で使用された。以下のような操作権のモードを有しているのがこのシステムの一つの特徴である。

- 議長が指名した人が操作可能になる議長指名モード
- 早く要求した人が操作できる要求順モード
- 現在操作権を持つ人が次の操作者を指名するバトンモード
- 誰でも操作できるフリーモード

### 2.2.3 WYSIWIS

WYSIWIS は、グループメンバーで話し合っている資料の見え方の同一性を保証する原則であり、リアルタイムグループウェアにおけるマルチユーザインタフェースの重要な概念である。話し手が資料を参照しながら説明している場合、WYSIWIS が保証されないと、聞き手が参照している情報と食い違う可能性が生じ、グループコミュニケーションが円滑に進行しない。

ただシステム構成や状況によっては、常に WYSIWIS を厳密に適用するとかえって使い勝手が悪くなる可能性もある。例えば Colab では、グループメンバー全員で共有する共有ウィンドウの他に、各ユーザの個人作業用ウィンドウすべてを表示することはかえって共同作業の妨げになることが指摘されている。

テレポインティングは、グループメンバー全員に対して共有しているオブジェクトを視覚的に指し示すことができる機能であり、これもマルチユーザインタフェースの重要な概念である。バーバルな表現による対象オブジェクトや位置の指定と、ポインタによる指定が同時に可能であることが基本であるが、テレポインタに関してもウィンドウの場合と同様に、各ユーザのポインタが全て表示されると共有画面の視認性が著しく低下するために、Colab では、プレゼンテーションを行っているユーザのポインタのみを表示する、WYSIWIS を緩和したインタフェースが用いられている。

このように、現在では WYSIWIS の原則を維持しつつある程度画面の変更を許容する「緩やかな WYSIWIS」(Relaxed WYSIWIS) が主流になっている [95]。

## 2.2.4 アウェアネス

Dourish ら [14] は、アウェアネスの定義を次のように述べている。「アウェアネスとは、自分自身の活動の方向性 (context) を提供するような他人の活動を理解することである」。

メディアスペースの研究では、会議のようなフォーマルなコミュニケーションを支援するシステムの他に、距離を超えた偶然の出会いを支援するインフォーマルコミュニケーションシステムも開発され、これらの運用の結果、アウェアネスの重要性が認識されるようになった。

例えば Video Window [22] は、離れた場所にある 2 箇所のコーヒーラウンジを常時接続して、お互いの部屋の様子を等身大で表示し、参加者があたかも同じ空間で会話しているような状況を作り出すシステムである。Cruiser [23] は、参加者が仮想的な廊下を歩き回ったり、個室を訪問したりすることによる偶然の出会いをモニタ上のビデオ映像により実現している。

Portholes [15] は、共同作業者の連続静止画 (数秒に 1 回程度更新される静止像) をウィンドウとして常時表示しておくことで、共同作業者の存在やその作業の様子などを把握し、コミュニケーションのきっかけとして利用する、というアウェアネス情報を共有するシステムである。

これらの例に見られるように、遠隔地点間がビデオにより常時接続されているインフォーマルコミュニケーションシステムにおいて、相手に話しかけるタイミングを見計らうためアウェアネスの重要性が認識されるようになった。

ノンバーバル情報である相手の様子 (例えば、何を見ているか、表情、集中度) をアウェアネス情報として得ることは作業支援では重要である。このうち特に視線の情報は、視線のアウェアネス (Gaze Awareness) として次のシームレスネスの項で触れる。

## 2.2.5 シームレスネス

メディアスペースの研究で得られたもう一つの重要な概念がシームレスネスである。例えば Mermaid [100] のように機能が個別のウィンドウごとに実現されると、画面上において、参加者の顔が映っているビデオウィンドウと実際に作業しているホワイトボードウィンドウには、シーム (継ぎ目) が存在する。このシームは対面環境では存在しないもので、参加者の顔・身体動作と作業内容が一致した作業空間として認識されないという問題を引き起こす。また上述した Video Window [22] では、ユーザがお互いに表示されている相手のビデオ映像を見ながら会話しているにもかかわらず、相手との視線の一致が行われないことにより違和感が生じるという問題が提起されている。

シームレスな作業空間 (ワークスペース) での作業や、視線の一致といった対面環境で自然に行なわれている行為を、遠隔地間で実現しようとする研究の代表的なものを以下に

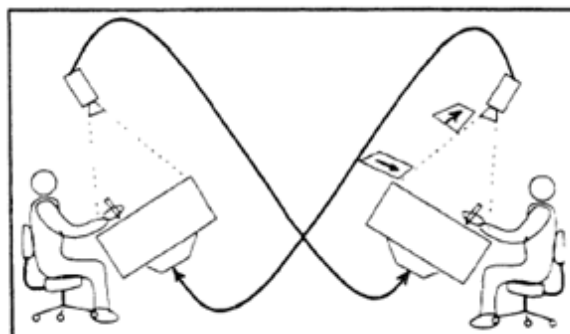


図 2.1: Video Draw の構成図 [93]

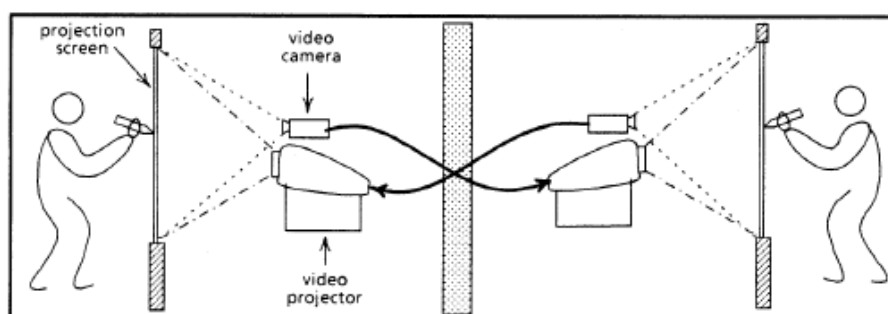


図 2.2: Video White Board の構成図 [94]

列挙する．

Video Draw [93] はビデオベース共有描画システムで，作業者の作業台を上部から撮影するためのカメラと，このカメラからの映像を遠隔地の作業台に投影するために，作業台の裏側に設置したプロジェクタにより構成されるシステムである (2.1)．このシステムでは，描画の情報だけでなく，手の映像も作業台の映像とともに映され伝送されるため，指差して作業台の特定の位置を伝えることも可能である．

図 2.2 に示す Video White Board [94] は，Video Draw を改良し立ち姿勢で複数人が使えるように作業台を光を透過するホワイトボードに置換えた構成になっている．ホワイトボードを裏側からカメラで撮影し，その映像を遠隔地に送りホワイトボードの裏側のプロジェクタから映像を投影するので，人がシルエットで表示され，相手の動作と描画データをシームレスに認識できる．

シームレスネスと視線一致を同時に実現したシステムとして Clear Board [37] がある．図 2.3 の Clear Board において，ホワイトボード上にハーフミラーが貼り付けられ，上部のカメラからホワイトボードの画面とハーフミラーに写るユーザの像が撮影される．この映像が相手側のホワイトボードの裏側からプロジェクタによって投影されることにより，

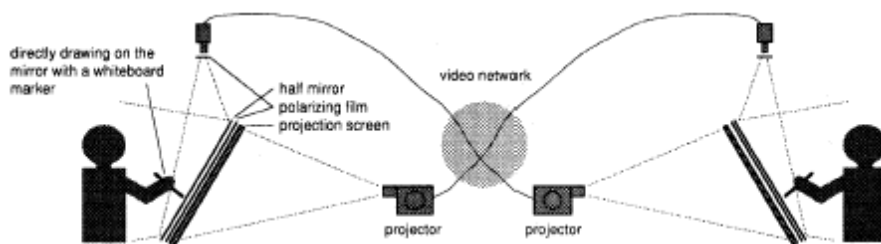


図 2.3: Clear Board の構成図 [37]

映像と相手のホワイトボードに描かれた図とが重畳されて表示される。ユーザは、図を描いている相手の上半身の姿をシームレスに観察できるだけでなく、相手の表情を読み取ったり、視線を合わせたりすることが可能となる。

超鏡 [59] は、自己のビデオ映像（鏡像）と相手のビデオ映像（鏡像）から 1 枚の合成映像（超鏡画面）を作り、対話者全員が共通の自分が含まれている超鏡画面を見ながらコミュニケーションをとることができるシステムである。合成映像は、遠隔の参加者が並んで鏡に映っているような状態で表示されるので、相手の参加者周辺の空間にある物体を指差しにより指示可能であること、また参加者同士の一体感が醸成されることなどの効果が報告されている。

Video Draw, Video White Board, および Clear Board などの共同描画システム、および超鏡は、2 地点のユーザ間でのみ実現可能であるが、3 地点での利用を可能にしたシステムに MAJIC [64] がある。MAJIC は、特殊な半透明のスクリーンを用い、スクリーン後方に設置されたカメラから撮影された参加者の映像を、遠隔地のスクリーン後方に置かれたプロジェクタでスクリーンに等身大で投影することができるシステムである。2 地点の遠隔ユーザに対応するスクリーン、カメラ、プロジェクタをローカルサイトに設置することで、3 地点間のユーザの視線一致を実現しながら、あたかも同一空間でコミュニケーションを行っているかのように感じさせる臨場感を実現している。

シームレスネスを実現するためには高価で大掛かりなシステムが必要であったため、上記システムは実用化には至らなかったが、共同作業支援の重要な設計要件を提供した。

## 2.3 バーチャルリアリティ (VR) を用いた遠隔共有仮想空間

### 2.3.1 共有仮想空間 (Collaborative Virtual Environment: CVE)

コンピュータグラフィックス (CG) およびバーチャルリアリティ (VR) の技術をベースに構築された仮想環境を共有する研究は 90 年代に盛んになり数多くのシステムが提案された。Otto ら [67] は、遠隔共有仮想空間 (CVE) という言葉を次のように定義してい

る。「CVE は、遠隔地に存在する人たちの間で、その中に存在するオブジェクトへのインタラクションや他の参加者への働きかけが可能なネットワーク化されたコンピュータシミュレーションである」。

すなわち、CVE は 2-2 で述べたビデオベースのシステムと異なり、CG によって生成された 3 次元モデルを持ったオブジェクトや環境を共有できる点が特徴である。CVE の数々の研究を通して、以下に述べるオブジェクト共有モデル、ユーザ視点モデル、没入型 CVE などの概念が確立された。

### 2.3.2 オブジェクト共有モデル

マルチユーザ VR システムである CVE では、データ量の多い共有オブジェクトのインタラクション処理を迅速に行うため、分散処理の研究が行われてきた。Broll [9] は、CVE でのオブジェクトの分散処理モデルを以下のように整理した。

#### 1. 能動的複製型 (active replication)

オブジェクトのコピーをすべてのユーザサイトで保持する。あるサイトでのオブジェクトの変更をすべてのサイトへ伝達して、それぞれのサイトのコピーを更新する。各サイトでの更新が独立に行われるので、伝達時間遅れなどを考慮してすべてのコピー間で整合性を取る仕組みが必要となる。

#### 2. オンデマンド複製型 (replication on demand)

共有オブジェクトを必要とするユーザサイトが、オリジナルオブジェクトを保持するサイトにリクエストを出して、そのコピーを受け取る。この動作のためには、オブジェクト自身を管理するマネージャ、またはサイトすべてのオブジェクトを管理するマネージャが必要である。このマネージャは、オブジェクトのコピーの変更を監視し、変更の送信先サイトを管理する。

#### 3. 部分複製とマイグレーションの混合型 (migration combined with partial replication)

アクセス頻度が高いオブジェクトや表示する必要のあるオブジェクトなど、必要最小限のオブジェクトのコピーのみを各サイトで保持し、それ以外のコピーを保持しない方式。各サイトでの表示速度を向上させるために有効な手段である。オブジェクトのコピーに関する管理は上記 1 または 2 の方式をとる。

DIVE [11] は、複数のユーザが 3 次元の CVE をナビゲートすることができる初期のシステムである。このシステムでは、ユーザは図 2.4 のように視線を示す目のついたボディアイコンとして表現され、ユーザが装着しているヘッドマウントディスプレイ (HMD) の動きがトラッキングされてボディアイコンの向きに反映される。共有オブジェクト管理は

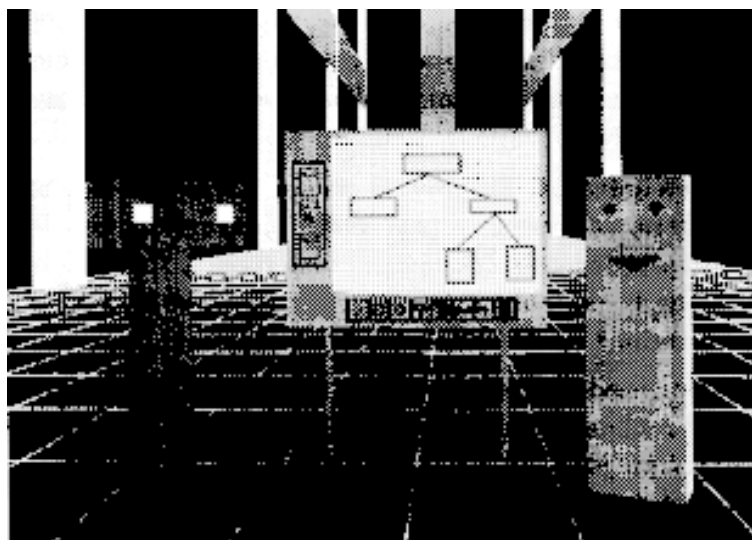


図 2.4: DIVE の画面例 [11]

能動的複製モデルでのロッキング機構により行われており、各サイトに複製を保持して、マルチキャストにより共有オブジェクトの変更が通知され、排他ロック機構により共有オブジェクトの整合性が保たれている。

またインタフェース部を独立させて、ビジュアライザと呼ばれる I/O 管理モジュールを用いて CVE でのインタラクション（オブジェクトを掴むなど）を実現している。

### 2.3.3 ユーザ視点モデル

VRにおける視覚情報の表示はコンピュータグラフィックスの技術をもとに構築されるため、ユーザの視点位置がインタラクティブに変更できるのが、メディアスペースのシステムと異なる特徴である。Poupyrev [70] らは、視点位置と仮想環境 (Virtual Environment: VE) との関係性を以下の2つに分類している。

#### 1. 客観視点 (Exocentric View)

対象とする VE を鳥瞰して、外から VE に対してインタラクションを行うような視点の設定である。もともとは、飛行機のコックピットディスプレイの研究 [103] から生まれた考え方である。World in Miniature [84] は、仮想化されたミニチュア世界を外から見渡ししながら、操作するユーザインタフェースを提供している VE の例である。

#### 2. 主観視点 (Egocentric View)

ユーザが存在する VE の中で、そのユーザの視点から VE を観察し操作を行うよう

な視点の設定であり，CVE システムで一般的に用いられている方法である．

CVE での映像を歪み無く表示するために，主観視点映像は実世界での人間の視野より狭く表示設定される場合が多く，特に共同作業を行う CVE で問題になる場合がある [34]．そのためユーザを含んだより広視野の客観視点映像を提供するシステムや [30]，客観視点を 2 次元マップで表現して主観視点画像と同時に画面表示するシステムなどが提案されている [34]．

### 2.3.4 オブジェクト操作のためのユーザインタフェース

共有オブジェクトの操作のためのインタフェースは CVE で最も重要な要件の一つである．Poupyrev [70] らは，VE のオブジェクト操作を以下のメタファに分類した．

- 仮想の手メタファ (Virtual Hand Metaphors)
- 仮想ポインタメタファ (Virtual Pointer Metaphors)

仮想の手メタファは実際の手の形をモデル化したもので，ユーザは仮想の手でオブジェクトを触って取り上げ，目的の場所に置くなどの動作を行う．実際の手の位置・姿勢がそのまま仮想の手の動きに反映することが望ましいが，そのためには，ユーザの手の位置・姿勢のセンシングの問題，仮想の手の（各関節部分の）自由度をどうモデル化するかの問題がある．例えば，手と指の位置を検出してシステムへ入力するデバイスとしてデータグローブが，初期の VR システムから多く用いられてきており（例えば [88] ら），現在でもその精度や装着感の改善が図られている．

また手のモデル化に関しては，X 線や核磁気共鳴などを用いて骨を精密に測定し実際の手の動きが忠実に反映できるモデルが提案されている [74]．ユーザインタフェースの観点からは，実際の手の移動量を仮想の手の動きに線形に反映させる方法の他に，ユーザの手の届く範囲では線形に反映させそれ以上の距離の場合には仮想の手の動きを大きく反映させる方法などが提案されている [69]．

一方，仮想ポインタメタファは，ユーザがオブジェクトを選択・操作するための位置表現手段である．2 次元スクリーン上のカーソルが，3 次元空間のポインタに拡張されたメタファととらえることができる．ポインタは手のように複雑な動きがないため，モデルは単純であるが，さし棒のように有限の長さを持ったポインタの他，ポインタから伸びた（光線）ベクトルと交差するオブジェクトが選択されるような実現形態も提案されている．Poupyrev ら [70] は，仮想の手と仮想（光線）ポインタとの比較実験の結果，オブジェクトの選択および定置作業におけるタスク遂行時間は，仮想の手の方が仮想ポインタより短かったことを報告している．

### 2.3.5 CVE でのアウェアネスモデル

メディアスペースの研究によってアウェアネスの重要性が認識されたが、ユーザ間の距離など厳密なモデル化はされていなかった。CVE では 3 次元世界を定量的に記述することができるので、Benford らは、アウェアネスに距離の概念を導入したシステム MASSIVE [29] を開発した。

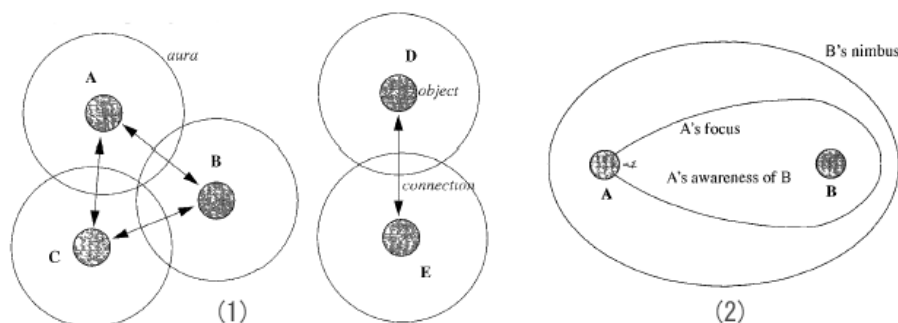


図 2.5: MASSIVE における aura, nimbus, focus の概念 [11]

MASSIVE では、オブジェクト間の基本的関係としてオーラ (aura) をオブジェクト周囲にできる空間であると定義し、複数のオブジェクトのオーラに重なりがある時、オブジェクト間に相互作用が起こる可能性があるとしている。逆にオーラが交わっていない場合には、システムはオブジェクトの相互作用を無視することができる。図 2.5(1) の例では、オブジェクト A, B, C と D, E が相互作用のあるグループを形成している。

複数のオブジェクト間でオーラが交わっているときに、相互のアウェアネスの強さを表す指標としてフォーカス (focus) とニンバス (nimbus) の概念が用いられる。フォーカスは、あるオブジェクトが目目する領域や他のオブジェクトの範囲を示し、ニンバスは観察されるオブジェクトの視界度 (見え易さ) を示す。図 2.5(2) の例では、B のニンバスに A が入っており、A のフォーカスに B が入っていることを表している。

このアウェアネスの定量化は、グラフィックス、音声、テキストのメディアについても定義することができ、MASSIVE はこれらのメディアに対するモデルを持つ CVE である。

### 2.3.6 没入型 CVE

ユーザインタラクショがデスクトップで実現されていた初期の VE (あるいは CVE) に対して、目の前の小型ディスプレイで視野を覆ってしまうヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display: HMD) や、全周型ディスプレイ (Surrounding Display) を用いてユーザに没入感 (Immersion) を与えるシステムが没入型 VR である [67]。



Ellis [19] が指摘するように少なくとも一つの間感覚のモダリティが備わっていれば、コミュニケーションメディアとしての VE が成り立つので、視覚以外の感覚のモダリティも対象となり得るが、人間の情報処理の約 8 割は視覚によって行われているので、没入感を得るシステムも視覚を対象にして、立体視を実現している例が多い。

初期の代表的なシステムが、1991 年にイリノイ大学で開発された CAVE [12] である。これは体験者の周囲に 3m × 3m の平面スクリーンを正面、左右面、床面の 4 面に配置し、ステレオ液晶プロジェクタでそれらの投影面に映像を表示する広視野角の表示システムである。

この論文の中で、視覚的な没入感を得るための最初の要因として、視野角が挙げられている。VE での視野角  $\theta$  は、ディスプレイサイズを  $W$ 、観察距離を  $D$  とすると、

$$\theta = 2 \tan^{-1} W / 2D$$

で計算される。一般に視野角に占めるディスプレイの大きさの比率が、没入感に比例する [81] ため、人間の両眼での視野角約 240 度を超える CAVE システムは視野角の点からは十分なシステムと言える。

大画面ディスプレイの他に、没入感を与えることのできるディスプレイに HMD がある。左右の目にそれぞれの小型ディスプレイからの映像が届くので、左右の視差画像を提示することで容易に立体視を実現可能であり、大型ディスプレイでの没入型 VE と比較して、比較的小規模の設備で体験者に没入感を引き起こすことができる。しかしながら、HMD の視野角は、光学系の制約などにより人の視野角よりかなり狭く、サイズや重さの問題とともに、視野が狭まることへの違和感、装着位置の調整が必要なことなど、人間工学的な課題が多く残っているのが現状である。

一方、臨場感 (Presence) は上記の没入環境などで体験者が引き起こされる感覚で、心理的なものであり、体験者自身が VE で構成された世界の中で、“そこに存在する”という意識を指す [82]。Slater [80] によれば、臨場感は、没入感、インタフェースの自然さ、インタラクションの容易さなどの要因から影響を受けるが、その計測は困難であることが指摘されている。

## 2.4 実物体・実空間を用いる遠隔協調作業支援

### 2.4.1 実世界志向インタフェース

90 年代に入り、コンピュータの小型化・高性能化とともにネットワーク技術との融合が加速した。Weiser は、この現象を捉えて新たなコンピューティングの方向性を“ユビキタスコンピューティング” [101] という概念で示した。この論文の中でユビキタスコンピューティングの特徴として、以下の 4 つが挙げられている。

1. コンピュータがあらゆる場所に遍在する .
2. 総合的な環境としてサービスを提供する .
3. ユーザに装置を意識させず , 作業に集中させることができる .
4. 使う人の状況に合わせたサービスを提供する .

ユビキタスコンピューティングの概念は , これまでのコンピュータスクリーン上で現実世界を模倣したシステムから , より現実空間と密接に結びついたシステムへというパラダイムの転換を促すものであり , この後の研究開発の方向性に大きな影響を与えた .

例えばユーザインタフェースの分野では , デジタル世界に閉じた操作のためのインタフェース ( 主に GUI ) から , 現実世界とデジタル世界を結ぶユーザインタフェースとして実世界志向ユーザインタフェースの研究が行なわれた . 以下 GUI と実世界指向インタフェースを比較しながらその特徴について述べる .

従来主流であったインタフェースの考え方は GUI を含むスクリーン上の直接操作 ( Direct Manipulation ) である . Schneiderman は , 直接操作の特徴を次のように整理している [77] .

1. 操作世界の視覚的表現 ( メタファ )
2. 迅速・逐次的かつ可逆な操作
3. タイピング操作になりかわる指示 ( ポインティング ) と選択 ( セレクション ) 操作
4. 操作結果の即時的な視覚化

これに対して , 実世界志向ユーザインタフェースは直接操作の考え方を踏襲しつつ , 実世界の動作を自然な形で取り込むための工夫が必要となる . 曆本は , 実世界志向ユーザインタフェースの原則として ,

- 現実世界の行為とコンピュータ世界の反応の一致 : 現実世界での自然な行為が仮想世界への適切な指令として解釈される .
- 複数の機器を組合わせた操作の支援 : 利用者の作業が複数の機器に関与する場合でも複雑さが増加しない .
- 仮想物体 ( アイコン等 ) と現実の物体・コンテキストとの連携 : コンピュータスクリーン上の情報と現実情報との自然な関連付けを支援する .

を挙げている [73] .

実世界志向ユーザインタフェースを実現した例として, Pick & Drop [35] がある. このシステムでは, GUI 上のアイコンなどを選択する「ピック」の動作と, ピックしたアイコンを別の場所へ置く「ドロップ」の動作を発展させ, 複数のコンピュータ間でも同一の操作概念でデータを移動させることを可能にした. 具体的には, あるコンピュータスクリーン上でペンを用いてアイコンをタップし, そのまま別のコンピュータスクリーン上でペンを再びタップすると, アイコンがコンピュータ間を移動する. このことによりユーザはコンピュータ間のデータ転送を複雑な手続きによらず直感的な操作で行えるようになる.

実世界指向インタフェースでは, 実世界を認識するためのセンサ技術が不可欠であるが, センサ技術以上に利用者にとっていかに自然で直感的にわかり易い操作感を提供するかという観点が重要である.

## 2.4.2 タンジブルユーザインタフェース

上述した実世界指向ユーザインタフェースにおいて, 特にわれわれの身近な物をそのアフォーダンスを保ちながら操作することによって, デジタル世界の入出力に利用しようとする試みがタンジブルユーザインタフェース (TUI) である. 石井は, タンジブルユーザインタフェースの特徴を以下のように述べている [36] .

- 直接操作性 入出力空間と出力空間との一致  
GUI とマウスによる間接的な操作と比較すると, TUI はタンジブルな情報の外部表現を, インタラクションのための物理的制御メカニズムとしても同時利用することにより, 情報と計算に対する直接操作性を飛躍的に高め, かつ操作結果のアウトプット個々の情報特有な触覚的フィードバックをインタフェースデザインに活かすことができる. この直接操作性の向上には「タンジブルな表現=制御」という原理から導かれる「入力空間と出力空間の一致」という特性が大きく貢献している.
- タンジブルな表現とインタンジブルな表現とのシームレスな融合  
タンジブルな物体外部の物理表現 (たとえば形, 大きさ, 色) をダイナミックに変更することは技術的に困難なので, TUI では, タンジブルな物理外部表現とインタンジブルな表現 (たとえばビデオプロジェクション) を同じ空間に重畳させ, シームレスにつながったハイブリッドな情報表現として, 両者を組合せて利用することができる.
- 専用インタフェース  
汎用インタフェースである GUI と異なり, TUI は特定のアプリケーションドメインにおける操作性向上を目的に特化されたインタフェースを目指している. 特にわれ

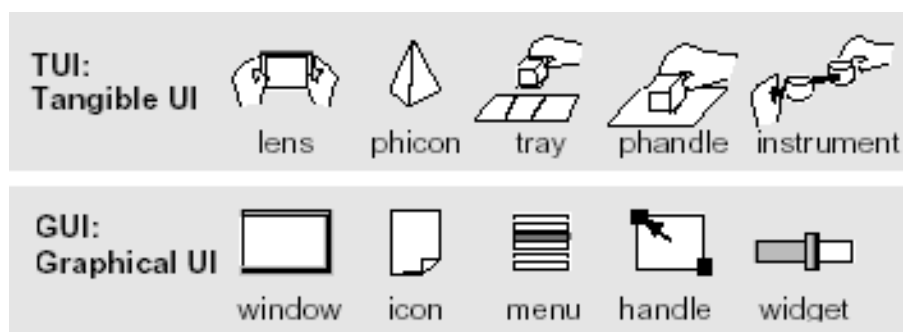


図 2.6: TUI と GUI との対応関係 [38]

われの身近に存在するものに対する直感的理解の容易性と結びつけば、自然で使いやすいインタフェースを構築できる。

- マルチユーザ・マルチハンドインタラクション

TUI の最も重要な特徴は、空間的に多重化された入力を自然なかたちで支援するという点にある。すなわち、両手を使った平衡操作、複数のユーザによる同時並行的な処理を、自然な形でサポートする。

TUI を用いて実現したシステムに石井らの MetaDESK と Tangible Geospace [38] がある。MetaDESK は、GUI で表現されるデスクトップメタファ環境を、TUI により構築したものである。例えば、図 2.6 に示すように GUI のアイコンは TUI の phicon に、ウィンドウはレンズで表される。MetaDESK には背面投影型のプロジェクタが備わっており、机上での phicon 操作の結果が、プロジェクタの表示に反映されるようになっている。

Tangible Geospace はこの MetaDESK を利用したアプリケーションで、机上に表示されている地図を phicon を用いて操作するシステムである。このアプリケーションにおいて、phicon は地図上のランドマークとなる建物を表しており、ユーザが 1 個の phicon を机上の点に置くと、その点を中心とした地図が phicon の建物に合うように表示される。また 2 個の phicon を机上の任意の場所に置くと、この 2 つの建物の位置関係が決まるので、この位置関係にあった縮尺・方向で地図が表示される。このようなインタフェースは上述した 4 つの TUI の特徴を満たし、ユーザに分かり易く、かつ使い易いものとなっている。

TUI は GUI のような汎用性・柔軟性を求めることはできないが、われわれの身の回りにある物をそのまま利用し、自然なわかりやすい操作によってユーザ所望の動作をさせることができるという利点があるため、さまざまな TUI の提案とともに、本論文で述べるように複合現実感により、TUI の制限を緩和する試みが数多く見られる。

### 2.4.3 実物体を用いた遠隔共同作業支援システム

タンジブルユーザインタフェースをシングルユーザでの使用のみならず、遠隔地のマルチユーザで用いる研究も行われている。

PsyBench [8] は、遠隔で同じ構造を持つ実体の机と机上の実物体を共有するシステムで、それぞれの空間に設置された机の下に電磁石を配置した XY ステージが設けられ、机上の物体の底部にも磁石が取り付けられている。一方の空間においてユーザが机上の物体を動かすと、他方の机の下にある XY ステージの電磁石が動き、対応する机上の物体も同じ動きをする。この機構を用いて、同じ構造のチェスボードを遠隔地間で保有してチェスを行うアプリケーションが開発された。

PsyBench では机上の物体がメッシュ上の直線だけしか移動できなかったのに対して、Actuated Workbench [68] においては、物体の動きは 2 次元平面状に拡大されて自由度を増し、遠隔でより自然な物体の動きが再現された。また多数の実物体が同時に操作できるようになったため、より一般的なアプリケーションにも対応可能になった。

In Touch [8] は、3 本の自由に回転するローラの動きを遠隔の同じ構造のローラに伝えることができるシステムである。フォースフィードバック技術により、それぞれのローラと対応するローラが同期制御され、触覚と抵抗力を用いて離れたユーザがその存在を互いに感じることができる。このシステムでは、フィードバック機構によってお互いの気配を感じることができる点が興味深い。具体的な協調作業に用いることは想定されていない。

また Sekiguchi らは RobotPHONE [78] というシステムにおいて、遠隔で互いに所有するテディベア型のロボットの動作をインターネット経由で伝え合うことにより、実物体を介した遠隔コミュニケーションを実現している。このシステムでは片方のテディベアの左腕を振ると、インターネットで接続されているもう一方のテディベアの左腕も同じように動くというような動作の同期を取っている。

以上挙げた例では、触覚を得ながら直感的に操作可能であるというタンジブルインタフェースの長所を引き継いでいるものの、一方の実物体の操作を他方へ伝達するために磁石式や機械式のアクチュエータが必要であり、物体の動き・変形などに物理的な制限があるという問題がある。さらに、相手側の身体動作情報やアウェアネス情報を伝達する手段を持っていないため、相手の動作把握が十分に行われず、相手の操作により自分の空間の実物体が予期せぬ動きをするなどの欠点もある。

共同作業を支援する目的で、実物体を用いたインタフェースを提供しているシステムに Agora [107] がある。Agora は対面の円卓会議のメタファを遠隔地間で実現して、パズルの問題を共同で解くことを支援するシステムである。図 2.7 に示すように、遠隔地の机上に設置されたカメラから撮影された作業者の手と机上の実物体の映像を机上に設置されたプロジェクタで投影し、机の 2 つの端に L 字型に立てかけた大型スクリーンの後方に

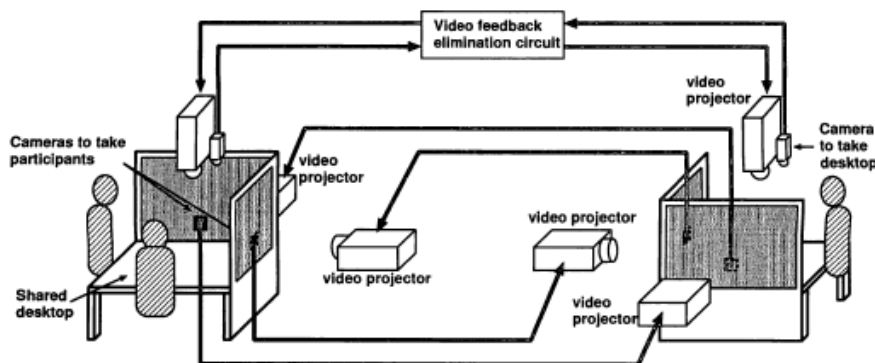


図 2.7: Agora の構成図 [107]

配置されたカメラで撮影された作業者の映像を遠隔のスクリーンに投影する。

このように構成されたシステムで、二次元図形パズルの実物のピースを、重複しないようにそれぞれのサイトに持ち、遠隔地側で実物のピースがない部分には、このピースの映像が表示されるようにし、共同でパズルの問題を完成させる実験を行った。その結果、ノンバーバル情報である作業者の身体動作が、遠隔地の作業者に効果的に伝達できていることが示された。しかしながら、このシステムでは机上の映像を遠隔地に伝送しているだけなので、各サイトにある実物体を遠隔地から操作することはできない。

#### 2.4.4 実空間を利用した遠隔共同作業支援システム

遠隔共同作業支援システムの応用として、機器の組立や修理などの製造現場や、手術などを行う医療現場などは、産業上きわめて有益である。これらの応用例では、実空間にある物体や場所を対象に、参加者が現場を動き回りながらコミュニケーションすることが多い。この場合の作業支援形態として、作業者が HMD とヘッドマウントカメラ (HMC) を装着し、遠隔地の指示者との間で映像の通信を行いながら作業を遂行するものがある。

例えば British Telecom が開発した CamNet [96] では、作業者が HMD と HMC を装着し、指示者は作業者からの映像をデスクトップモニタで見て、映像の一部をマウスで指し示しながら音声にて指示を行う。一方作業者は、映像に重畳された指示者のポインタを見ながら、指示を確認して作業を行うことができる。

Shard View [50] は、上記のような形態の作業を支援するために開発された初期のシステムである。図 2.8 に示すように作業者が着用している HMC からの映像が、遠隔地にいる指示者のデスクトップモニタに送られる。指示者がこのモニタ画面上で行う手振りの指示は、モニタ画面全体を写しているカメラで撮影され、この映像が作業者の HMD 画面に映し出される。この結果、作業者は自分の見ている対象物に対して、指示者の手振り指

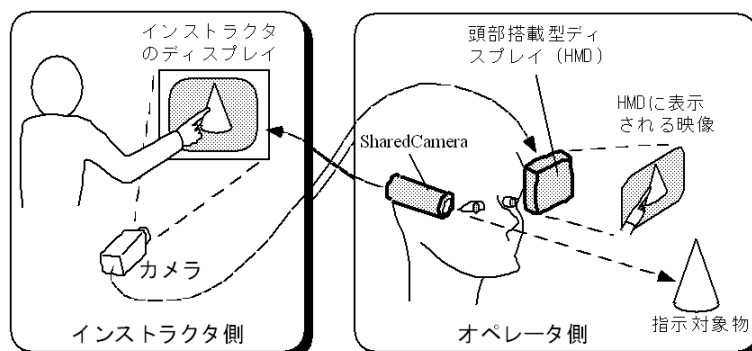


図 2.8: SharedView の構成図 [50]

示を受けることができる。

この2つの例は、双方向の音声通信に加えて、作業側からの映像伝送機能、映像の一部の位置指定機能が提供されることで、実用的なシステムを構築できることを示している。

HMDとHMCで構成されるシステムを用いて作業支援を行った際のコミュニケーションを分析した研究として以下の例がある。Krautら[48]は、作業者がHMDとHMCを装着し、CGの電子マニュアル、指示者の顔映像、およびHMCからの映像を共有して、自転車修理タスクを遂行する過程のコミュニケーション評価を行った。音声通信のみ用いたタスクと、音声と映像通信を用いたタスクとを比較し、両者のタスク達成時間には大きな差がないが、コミュニケーション形態は大きく異なり、映像がある場合には「これ」や「そこ」などの指示語が多用されたのに対し、映像がない場合には物を説明するための明示的な言葉が使われたことを報告している。

またFusselら[26]は同様のシステムを用いて、遠隔からの作業支援と対面での作業支援とを比較した。遠隔からの支援が劣る要因として、HMCの視野の制限、作業者の注視点情報の欠如、作業者の身体情報の欠如が挙げられ、これらの要因が両者の視覚情報共有を不十分にしていることが述べられている。

遠隔ポインティングや作業指示を実物体に直接投影するシステムも提案されている。例えばKuzuokaらのGestureCam[52]には、パン・チルト可能なカメラにレーザーポインタが搭載されており、指示者は遠隔からこのカメラをパン・チルトしながらレーザー照射位置により対象物体を示すことができる。

KurataらのWAC[49]は、Gesture Camを作業者の肩に装着できるようにしたシステムで、カメラに装着されたレーザーポインタにより、作業者は遠隔からポインティングされた物体を認識することができる。レーザーでのポインティングとHMDの画面内でのポインタ表示とを比較した実験の結果、両者の作業遂行時間には差が確認されず、作業者にとってWACL着用時の方が、より快適であったことが報告されている。

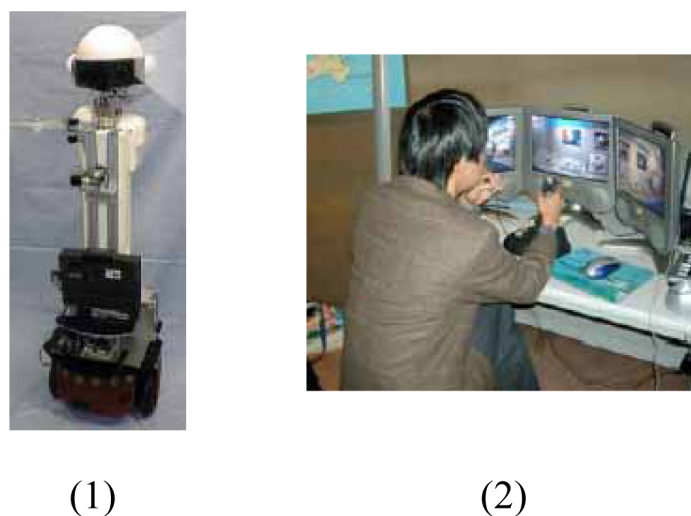


図 2.9: GestureMan のロボットと指示者インタフェース [51]

GestureMan [47] は, GestureCam, WAC を拡張し, 作業者の存在する空間に遠隔地の指示者の代理人となるロボットを配置して, ロボットを通して作業者への作業指示を行うシステムである. 図 2.9 (1) に示すロボットにおいて, 回転可能なロボット頭部に指示者の眼となるカメラが, またロボットの手の部分には, レーザポインタが装着され, 作業者空間の物体を直接指示することが可能である. 作業者空間を自由に動き回ることができるロボットを用いることで, 指示者 (図 2.9 (2)) に能動的な視点を提供することができるとともに, ロボット頭部の向きや腕の動きによって, 作業者が指示者の身体動作を確認することができる点が大きな特長である. この研究では, 遠隔ロボットの使用によるコストの増大や実使用上の制限といった問題はあるものの, 実空間を対象とした対面コミュニケーションの構造を社会学的観点によって分析された結果をもとに技術要素を構成することで, 実空間への遠隔参与という高度な機能を達成している.

## 2.5 複合現実感および応用システム

### 2.5.1 複合現実感

2.3 で取り上げられた VR は, CG 生成技術の進歩とともに, 複雑な CG 映像を実時間生成できるだけのコンピューティングパワーが備わったことにより, 医療, 教育, 都市計画, テーマパーク, ビデオゲームにいたる幅広い分野でインタラクティブシミュレーションツールとして利用されるようになった.



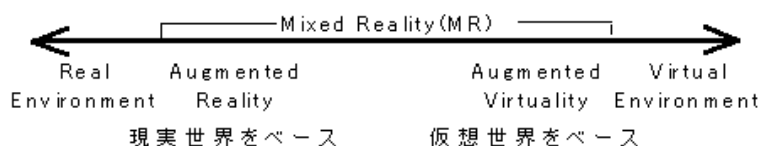


図 2.10: 仮想と現実の連続性 [57]

一旦コンピュータ内に仮想空間が構築されれば、時間や空間の物理的制約を超越して仮想環境が体験できるのが、VRの最大のメリットである [91]。

しかしながら逆の立場から見ると、ここで構築される仮想環境は、われわれが住む現実世界と直接的なつながりを持つものではなく、あくまで閉じた世界である。このような制限を打破し、実世界とデジタル世界とのつながりをもった環境を構築しようとする試みが、2.4で述べたような実世界志向ユーザインタフェースや実物体、実空間を用いたシステムの研究である。

Milgram は、複合現実感 (Mixed Reality) という概念を用いて、仮想世界と現実世界との融合の連続性を示した [57]。この論文の中で彼は、図 2.10 に示すように仮想世界と現実世界とを両極端として、仮想世界を現実世界のデータで拡張する Augmented Virtuality (AV) の方向性と、現実世界を仮想情報で拡張する Augmented Reality (AR) の方向性が存在すること、また AR と AV との間には明確な境界がなくスペクトル的に連続であり、このスペクトル全体を包含する概念が MR であると述べられている。

ここで AV の技術は、CG 分野で古くから用いられているテクスチャマッピングの技術の流れであり、実写画像活用型描画法 (Image Based Rendering) としての研究分野に位置付けされている。

AR 技術の初期の代表的な研究例としてコロンビア大学の KARMA [21] がある。このシステムはプリンタの保守作業ガイドのために、実際のプリンタにプリンタの内部構造や可動物をワイヤフレームで重畳表示している。ユーザは位置検出のための超音波センサが装着されたシースルー HMD をかけており、実際のプリンタの位置に重畳されているワイヤフレームの画像を視点位置から矛盾なく観察することができる。

本論文での複合現実感の定義は、「現実世界と仮想世界のシームレスな融合が実時間で実行され、さらに融合された空間とのインタラクションが可能なシステム」 [104] とする。このシステム実現のための技術課題を田村は以下のように整理した [92]。

1. 空間的ずれの解消 (幾何的整合性)

現実世界と仮想世界の空間座標を一致させ、観察者の位置・視点方向を正確に固定させ、観察視点の移動にも追従できる必要がある。

2. 画質的ずれの解消 (光学的整合性)

仮想世界の映像化結果が、コントラスト、色調等の要因で現実世界との重畳・合成時に（なるべく）違和感が生じないように対策が必要である。

### 3. 時間的ずれの解消（時間的整合性）

観察者の視点位置や方向の変化により、そのセンシングと仮想環境の描画時間の分だけ遅延が生じ、現実世界の変化に対して遅れが生じるので、これを極力軽減する必要がある。

MR システム実現のための表示デバイスとして HMD やプロジェクタなどが用いられるが、HMD はその方式の違いにより大きく以下の 2 つに分類される [25]。

#### 1. 光学シースルー HMD

ハーフミラー等の光学的コンバイナーをユーザの目の前に設置する。ユーザはコンバイナーを通して直接現実世界を観察すると同時に、表示素子に映し出された仮想世界の映像を光学コンバイナーに反射させて観察する。

#### 2. ビデオシースルー HMD

この方式では、HMD に装着されたビデオカメラで現実世界を撮影する。この映像はコンピュータに入力され、そこで生成される仮想世界の映像と電子的に融合される。融合された映像は、1 つのビデオ信号に変換されて HMD 上の表示デバイスに提示される。

光学シースルー方式は、外部環境の変化が大きいため外部環境と仮想情報との画質の整合性がとり難いという問題、また仮想情報のデータ量が増えて描画時間がかかる場合に時間的整合性がとり難いという問題がある、一方ビデオシースルーは、一旦現実世界を画像データとしてコンピュータに取り込むことができるため、上記整合性の問題をコンピュータ処理により調整しやすいという利点がある。

## 2.5.2 複合現実感の作業支援への応用

ここではマルチユーザを対象とした協調型システムではないが、MR の重要な応用分野と考えられる作業支援への応用例について述べる。1990 年代より製造業や建設業などを中心に 3D CAD の導入が進み、設計データの編集・加工機能に加えて、ビジュアル機能や干渉チェック機能が実現されてきた。CAD と VR 技術を融合して用いることで、実物試作以前に多くの確認や検証が可能になり、設計作業の効率化に大きく貢献してきている。従来 VR で行なわれていたビジュアル機能を MR を用いて現実空間で実現し、作業支援に利用しようとする流れは必然的であると言える。以下 MR を用いた作業支援の例をいくつか紹介する。



図 2.11: AR を用いた配線作業支援システム (ボーイング社) [13]

3DCAD データを用いて自動車組立作業者の訓練を目的とした研究例に AR Doorlock Assembly [72] がある。自動車のドアにドアロック部品を取り付ける作業は、両手でねじを取り付ける動作も含まれるため、両手が自由に使えるような MR システムが開発された。設計のアウトプットとしての CAD データはデータ量も膨大であり、生産現場での作業指示に用いるには詳細過ぎるために、このシステムでは CAD データを組立作業上影響がない程度削減し、システムの応答速度を向上させている。本物のドアに位置合わせされた仮想のドアロック部品が表示され、grip や move といった作業指示もアニメーションとして表示させるシステムが構築された。展示会にて来訪者に試用させた結果、問題点として、カメラによるマーカ識別を用いた Tracking でマーカを見失うことがある、早い動きを追従できない (Motion Blur が起こる)、および Hands free UI を実現するために音声認識を試みたが会場の騒音のためうまく動作しなかった等が挙げられている。実用化に向けた計画は述べられていない。

また、Boeing Project [13] は、ボーイング社で 1990 年から開発してきた AR を用いた配線作業支援システムの実験に関する論文である。従来の配線作業は 120X240cm のアルミボード (複数枚) に紙で印刷された配線パターンを貼り付け、マニュアルを参照しながらパターンに合わせて配線を行っていた。作業者が Wearable PC と単眼 HMD を装着する AR システムでは、紙の配線パターンをアルミボード上に重畳するように HMD に表示させる。またユーザがクリックボタン操作により必要な情報を取り出して HMD に表示させることができる。1997 年に 6 週間にわたって 10 名の被験者 (熟練者と初心者が混在) による大規模な実験を上述のアルミボード 2 枚を用いて行なった (図 2.11)。その結果、作業時間についてはユーザマニュアルを読む時間の減少を見込んでいたが、所望の AR データを探し出す UI が良くなかったため時間が相殺され、従来法とほとんど差がな

かった．長時間の HMD 装着による目への影響は検査の結果見られなかった．また実験に際して職場の状況や反応，すなわち担当者の熱意，作業者の抵抗など人間や組織的な阻害要因が大きかったため，本格導入はされていない．

AR Power Plant Maintenance [45] は原子力発電所の保守のためのシステムである．発電所の保守作業は，保守作業者が紙ベースのチェックリストと無線機を現場まで持ち歩き，無線で指示者と更新しながら作業を進めている．この研究は，紙のマニュアルから半自動で電子的な作業工程書を生成し，データベースに蓄積しておいて，作業者の状況に応じたデータを信頼性の低いネットワークでアクセスすることが前提とした Mobile AR system の開発を目的としている．作業者が次の指示を要求すると，画面上の作業部分がハイライトされアノテーションやビデオが表示される．紙ベースのマニュアルをいかに AR 化 (Interactive Electronic Technical Manuals:IETM) して保守場所に応じた作業指示を HMD に表示するかがこの論文の最大のポイントとなっている．

### 2.5.3 複合現実感を用いた対面型共同作業支援

現実世界のオブジェクトを仮想情報で拡張できるという複合現実感の特徴を活かして，マルチユーザを対象とする共同作業支援についても研究が進んでいる．初期の代表的な例が MR システム研究所で開発された AR2 Hockey [63] である．このシステムは，実物の机をはさんで両側に HMD を装着したプレイヤーが実物のマレットを手に持ち，仮想のパックを打ち合うというゲームである．マレットには LED が取り付けられており，マレットの位置が机の上部のカメラからリアルタイムで検出できるようになっている．パックを打つ際のフォースフィードバックは実現されていないが，パックとマレットが接触したときに効果音が出るため，プレイヤーはそれほど違和感なくゲームを楽しめたことが報告されている．

その後 MR システム研究所では，同一空間に対面して存在する複数の参加者が，この空間に重畳されて表示される仮想の敵を共同で攻撃するという，より臨場感の高い多人数型複合現実感ゲーム RV-Boarder Guards [62] を開発した．

Kato [42] らは，マーカーが描かれたカードをテーブルの上に並べて複数のユーザがテーブルを囲んで，3D の仮想物体をカードの上に表示しながらプレイするシステムを開発した．カードという実物体に手を触れながら操作できる点が，ユーザに評価されたことが述べられている．

対面型メディアスペースである電子会議室 Collab の例と上記のシステムを比較すると，前者はプレゼンテーション資料や会議資料といった 2D デジタル情報を PC (デスクトップメタファ) やプロジェクタ (ホワイトボードメタファ) を用いて共有していたのに対し，後者では 3D 情報を実空間や実オブジェクトと関連付けて共有できる点に特徴がある．

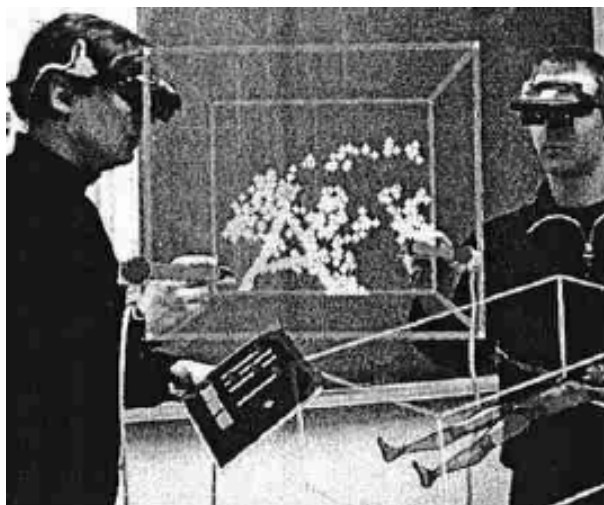


図 2.12: Studierstube を用いた 3D ペインティングアプリケーション [76]

Kiyokawa らは [43], 対面型 AR インタフェースの評価を行い, 実空間でのディスプレイの配置と表示方式を変えた場合の比較実験を行い, 視線やジェスチャなどのノンバーバル情報の可視性が大きくコミュニケーションへ影響することを述べている.

また坂内ら [2] は, 複数人が一度に体験できるメディア・アート「Jellyfish Party」を開発し, デモ会場において千人以上の来場者がアートを実際に体験し, 同時に体験した参加者同士がお互いの存在を意識しながらインタラクティブにアートを楽しめたことを報告している.

これらの研究により, 複合現実感を用いた対面型共同作業支援では, 複数のユーザが同じ空間を共有するため, ノンバーバル情報が伝わりやすく, 比較的に実用的なシステムが構築しやすいことが実証されてきた.

#### 2.5.4 複合現実感を用いた遠隔型共同作業支援

AR/MR を利用した協調作業プラットフォームとして Studierstube [76] がある. このプラットフォームを利用して, 仮想三次元物体を実空間上に表示・共有し, インタクション可能なシステムを構築できる (図 2.12 参照). このプラットフォームでは仮想物体の操作を行うインタフェースとして, PID と呼ばれるパッドとペンデバイスを用いる. 対面環境では, ユーザが存在する空間に共通の世界座標を設定し, この座標系の中で仮想物体を表示・共有するが, この環境を遠隔地間で構築する場合には, それぞれの空間に世界座標を設定し, それぞれの世界座標に基づいて共有仮想物体の表示を行う. しかしながらこのプラットフォームには, 遠隔地ユーザのアバター表示機能について言及されておらず, ノンバーバル情報の扱いは, すべてユーザが行うことになる. このプラットフォームを遠

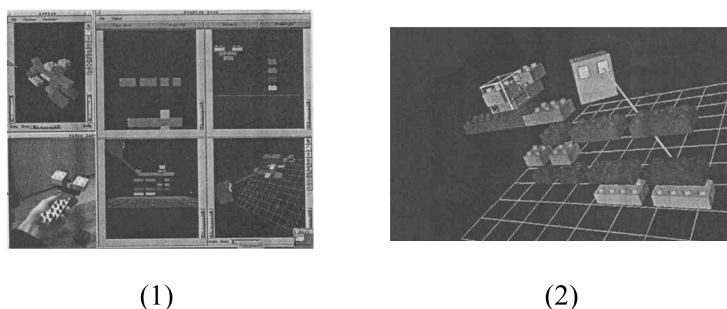


図 2.13: BlockParty における指示者と作業者の画面 [7]

隔で用いても，互いの存在する空間を利用した没入型 CVE が実現されているだけで，互いの実空間の関連付けは行われず，実物体も共有することが出来ない．

複合現実感を用いて遠隔型共同作業支援システム（以降このシステムを遠隔 MR システムと呼ぶ）を構築するには，対面型共同作業支援システムの構築に比べ様々な困難が伴う．なぜなら，すべて仮想情報で実現できる CVE とは異なり，遠隔 MR は物理的に異なる空間で実物体や実空間を扱う必要があるが，1つの実物体や実空間が同時に遠隔地には存在し得ないので，これらをどう扱うかが大きな問題となるからである．以下実空間との対応付けや実物体の共有を可能にした遠隔 MR システムの研究例を整理する．

東城らはプロジェクトを用いて，作業者空間に存在する実物体に対して，CG で指示を行うシステムを開発した [97]．このシステムは，作業者空間でカメラとプロジェクトを用いて実物体の 3次元形状計測を行い，得られた距離データとテクスチャデータを基に，実物体 3DCG を指示者のデスクトップモニタ上に表示する．指示者のデスクトップモニタからの指示が，CG として実物体の形状にあわせて投影される．作業対象物にレーザやプロジェクトによる像を投影して作業指示を行う方式は HMD の着用が不要であるという長所を持つ一方，光線・映像が他の物体で遮蔽される，また 3次元の空中像を表示することはできないなどの欠点がある．

遠隔 MR システムでの作業支援を行う Block Party [7] は，HMC (Head Mounted Camera) と光学シースルー HMD を着用した作業者のブロック組立タスクを，遠隔の指示者がデスクトップ PC を用いてサポートするシステムである．図 2.13-(2) に示されるように指示者からのブロック組立方法の指示が，作業者の HMD に 3DCG で表示される．一方指示者は，図 2.13-(1) のデスクトップのモニタ画面上に映し出される作業者 HMC からの映像を確認しながら，3D グラフィクスエディタを用いて CG を操作する．このシステムでは HMC 映像と CG がモニタ上の別ウインドウに表示されるため，指示者が作業者の空間をシームレスな空間として知覚することが困難であり，ポインティングなどの 3次元的な指示をスムーズに行うには，習熟が必要である．

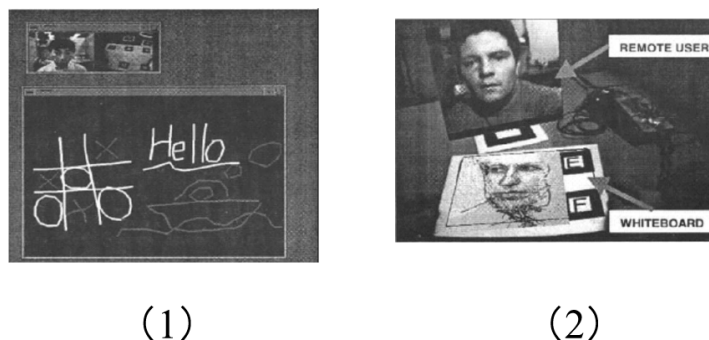


図 2.14: Real world teleconferencing におけるデスクトップと HMD の画面 [6]

Real world teleconferencing [6] は、デスクトップの参加者と HMD を装着した観察者から構成されるシステムである。デスクトップの参加者のインターフェースは、図 2.14 (1) に示されるように、デスクトップユーザが写し出されているビデオウィンドウ、観察者の HMD に付いているカメラ映像を表示するウィンドウ、および共有ホワイトボードのウィンドウからなる。図 2.14 (2) は、観察者の HMD に表示される映像で、マーカ位置に遠隔地の参加者の 2D 映像、およびホワイトボードの画像が重畳表示されており、マーカを移動することにより、それぞれの映像を自身の空間内の自由な位置に表示させることができる。

3D Live [71] は、被写体となる遠隔の参加者を全周に配置されたカメラで撮影し、これらの映像からリアルタイムに参加者の 3D モデルを生成して観察者のサイトに伝送するシステムである。HMD を装着した観察者は、マーカを自身の空間の任意の位置に配置し、マーカ上に実写ベースの 3D アバタとして表示された遠隔の参加者とコミュニケーションが可能である。このシステムは、Real world teleconferencing の 3D アバタ版と見ることができる。

最初の 2 つの例は、作業者の空間をメインにしてその空間の実物体に対して遠隔の指示者が作業者へ指示を行うシステムであり、最後の 2 つの例は遠隔の人物をアバタとして観察者の実空間へ配置してコミュニケーションを行うものである。これらは基本的に 1 つの空間を中心に考えているシステムなので、必然的に機能も役割も非対称となり、エコロジーの 2 重性 [51] による円滑な共同作業の阻害や、システムの拡張性の制限などデメリットも存在する。

これに対して、遠隔地のユーザが各々存在する空間を利用して対称なシステムを構築する場合には、空間の構成や参加者の位置関係などを同一の構造にして、あたかも 1 つの空間を共有しているような状況設定が必要になる。異なるユーザの空間をすべて物理的に同じ構造で実現させるのは現実的ではない上、例え部分的に実現しても、構造的な整合性を

維持するためにさまざまな手段を講じる必要がある。

山下らは、カメラ映像を用いて2つのテーブルトップを共有して、指示者・作業者間での指示のフィードバックが確立できるシステム AgoraG[106]を開発した。このシステムは、指示者・作業者の上半身を写すカメラとその映像を表示するディスプレイ、およびテーブルトップを写す書画カメラと双方の書画カメラからの映像を合成して表示するモニタディスプレイから構成される。指示者・作業者双方のモニタディスプレイには合成映像が表示されるため、WYSIWIS が実現されている。またモニタにはタッチセンサが備わっているので、映像上の任意の位置を指示者・作業者双方から直接ポインティングすることが可能である。この機構により、超鏡 [59] の身体動作の空間とその結果の表示空間が分離する欠点を解消している。さらにこの仮想共有空間のポインティング情報を現実空間に反映させるためレーザポインタを用いて、実体の書類の特定の位置を遠隔から指し示すこともできる。

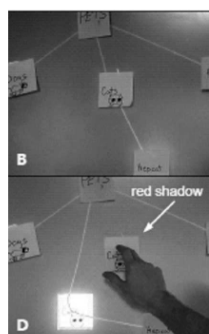
AgoraG と同じように複数のカメラ映像を複数のディスプレイに映し出して、遠隔地間の仮想共有空間を作り出すシステムに Lazy Susan [102] がある。このシステムは遠隔地間で同期する回転テーブルを持ち、作業者テーブル上に作業対象となる実物体を配置し、指示者テーブル上には作業者テーブル上の実物体を撮影した映像を投影する。テーブルの回転により容易に視点の変更ができ、かつ相手に自分の視点からのビューを提供することができるのが特徴である。

AgoraG や Lazy Susan では、3次元情報を用いずにカメラ映像から仮想共有空間を生成するため、作業対象が3次元のオブジェクトの場合、特にカメラ奥行き方向に関して空間的な指示が行えないという問題がある。またシステム構成は対称であるが、作業対象となる共有オブジェクトは、作業者サイトにのみ実物体が存在し、指示者サイトでは仮想オブジェクトとして表現されているため、共有オブジェクトに対する指示・操作に関して非対称性が存在する。

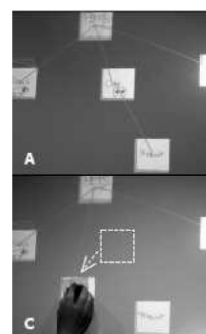
Com Adapter [39] は、これら空間構造の差異を吸収・統合化するための仕組みを提案している。テレビ、椅子、机の配置構造の異なる部屋にいるユーザ間において、ユーザがテレビをポインティングする動作を、遠隔地の空間でアバタがローカル環境に置かれているテレビをポインティングする動作に置き換えることで、動作を伝えることを試みている。しかしながらこの手法では、実物体に対する操作は考慮されておらず、それぞれの空間に存在する実物体すべてについて、完全な統合化を実現することも現実的には不可能である。

Distributed Designer's Outpost [20] は、電子ホワイトボードに付箋紙を張りながら遠隔地のデザイナー同士が Web デザインについて議論するシステムで、電子ホワイトボードという双方の空間に存在するに実物体をベースに構築されたものである。電子ホワイトボードの前後にカメラを設置し、図 2.15 に示すように付箋紙の映像を撮影して電子デー





(1) サイトA



(2) サイトB

図 2.15: Distributed Designer's Outpost における 2 つのサイトの様子と画面 [20]

夕に変換して遠隔地とのデータ共有を実現している。Distributed Designer's Outpost では、付箋紙という 2 次元の実オブジェクトの移動や削除機能に加えて、実体の付箋紙に対応している仮想の付箋紙の移動が可能である。仮想の付箋紙が移動された場合、実体の付箋紙が存在するサイトに仮想の付箋紙の位置が変化したことを示す警告が表示される。ユーザは、この警告をもとに実体の付箋紙を手で移動して、遠隔地サイトとの整合性を取る必要があるという非対称性が存在する。



# 第3章 複合現実感による遠隔共同作業支援モデル



## 3.1 はじめに

### 3.1.1 複合現実感における現実と仮想の要素

Milgram らは、仮想と現実の世界の間を連続的に捉えた複合現実感の定義の中で、具体的な空間構成の例として図 3.1 を示している [56]。この図の両端は、仮想と現実の連続を表す図 2.10 の中間に現実の要素 (R で表現) と仮想の要素 (V で表現) がどう配置されているかを表わしている。

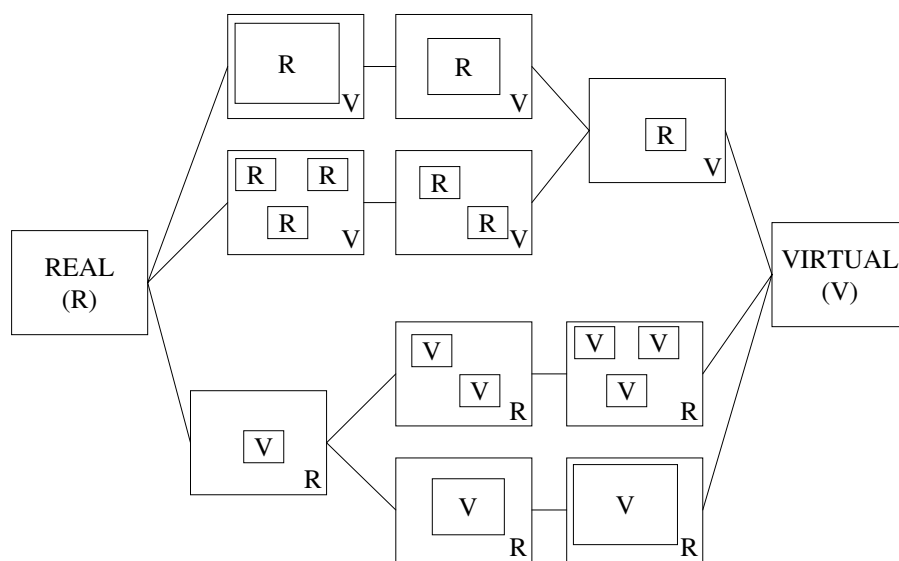


図 3.1: R 要素と V 要素の組合せによる複合現実空間構成 [56]

図の上部は、外側の矩形が V で表され、内部の矩形が R で表現されているが、これは環境が仮想情報によって表現され、その中に現実世界が映し出されている状態を示している。図の下部は、逆に現実の環境の中に仮想情報で表現されたオブジェクトが配置された状態を示している。図 3.2 ( [56] から引用 ) は、これらの状態のいくつかの例の画像である。図の (a) は、V 環境のみの画像で、(b)、(c) と遷移するに従って R 表現が増えていき、(d) で R 環境のみで構成された画像になり、(d) で R 環境の一部が V 表現になっているのが確認できる。

また図 3.1 で表される内部の矩形の中に異なる表現が存在することも可能であり、複合現実感システム構築にあたっては、このように R 要素と V 要素のほぼ無限の組み合わせが考えられる。本論文では、共同作業支援を念頭におき、以下に述べるようにコミュニケー

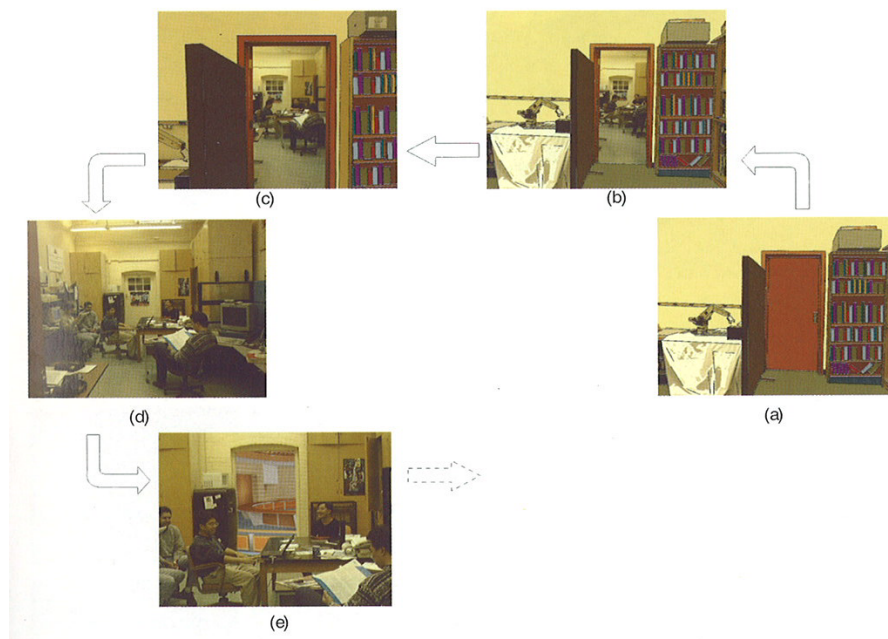


図 3.2: 複合現実空間の構成例 [56]

シオン手段を 4 つに整理して、これらの手段をどのように構成するかを議論する。

### 3.1.2 コミュニケーション手段とメディア

遠隔 MR による共同作業支援モデルの構築にあたって、コミュニケーション手段 (communication cues) を 2.1 の分類に従って、「バーバル情報」、「ノンバーバル情報」、「オブジェクト」、「環境」の 4 つに分類する。これらの手段が 2.2, 2.3, 2.4 でサーベイしたメディアでどのように表現され、扱われてきたかを整理する。Otto ら [67] は、電話、ビデオ会議、CVE、没入型 CVE それぞれのメディアに対するコミュニケーション手段を示した。これをもとに、実物体によるシステムを加えて整理し直したものを表 3.1 に示す。

バーバル手段は、電話の時代から用いられてきた手段であり、システムの形態によらず遠隔コミュニケーションには必須である。ノンバーバル手段は、主にコミュニケーション相手に関わる情報伝達であり、ビデオ会議ではカメラで撮影された相手の映像からノンバーバル情報を得ることになる。デスクトップ CVE、没入型 CVE においては、ノンバーバル情報は全身像アバタ、又は身体の部分的な表現 (手またはポインタなど) として CG で表現される。アバタを実写を用いてリアルタイム生成する研究もあるが ([60, 41] など)、まだ表現力が十分とはいえない。

オブジェクトは主に操作対象となる物を指すが、その他共有空間に存在する物も含まれ

表 3.1: コミュニケーション手段とメディア

	電話	ビデオ会議	デスクトップ CVE	没入型 CVE	実物体
バーバル	メディア形態によらず必須				
ノンバーバル	X	ビデオ映像  (固定視点)	アバタ表現		X
オブジェクト (操作 I/F)	X		共有仮想物体 (間接操作)	(直接操作)	実物体 (直接操作)
環境 (視点 I/F)	X		共有仮想環境 (間接操作)	(直接操作)	X

る。映像だけのコミュニケーション手段を使うビデオ会議システム，例えば超鏡 [59] では，2地点のビデオの合成画像を用いているので，映像に映っている一部のオブジェクトを遠隔地のユーザそれぞれが指すことができるが，あくまで2次元的なポインティングであり，オブジェクトを視覚的に共有している状態が提供されているにすぎない。メディアスペースでビデオ映像と共に用いられた共有ホワイトボードは，モデル化された2次元情報であるので，CVEの一部として扱う。

デスクトップ CVE や没入型 CVE では，2次元だけでなく3次元のオブジェクトが仮想物体として表示されて遠隔のユーザ間で共有・操作可能である。デスクトップ CVE では，仮想オブジェクトへの操作はマウス，キーボード，データグローブなどが用いられ，その結果がデスクトップ上のモニタに表示されるという間接操作であるのに対して，没入型 CVE ではユーザの身体動作がセンシングされ，仮想オブジェクトを掴んで移動させたり，手で変形させたりといった動作を直接的に行うことが可能であり，没入環境の中でユーザの操作結果が直ちに表示されるのが特徴である。オブジェクトの表現はCGであり，自然な触覚を実現するのは非常に困難であるが，システムの自由度はきわめて高い。

Psybench [8] の例に見られるように，TUIとして実物体オブジェクトを直接操作するのは最も自然な形態であるが，実物体の移動や変形などの扱いが難しい，ノンバーバル情報や環境情報の共有のために別の手段が必要であるなどの点で，システムの自由度が著しく低い。

環境情報は作業空間におけるオブジェクトやユーザ以外の物の情報，例えば部屋のセッティングや町並みの風景などの情報である。ビデオ会議においては，共通の環境を持つことは無く，相手の空間の情報は相手の空間に設置されたカメラからの映像から得る。この映像は基本的に固定視点からの映像で，しかも視野は限られている。

これに対して，デスクトップ CVE と没入型 CVE では，環境も仮想情報によって表現・

共有され、この環境の中に自由に視点を設定することができる。このとき、デスクトップ CVE では視点の移動を間接操作によって行うことになるが、没入型 CVE は、ユーザの頭や体の動きに連動して、実世界と同じような視点移動の感覚を与えることが可能な直接操作インタフェースが提供される。

これらのメディアに対して複合現実感はその特性上、没入型 CVE と実物体メディアの中間に位置付けられる。前節で見たように、それぞれの手段に対して R 要素、V 要素の任意の組み合わせが可能で、目的により最適な組み合わせは異なる。しかしながら実用的な観点からは、オブジェクトや環境については、実際に存在するものを利用するケースが有利と考えられる。

オブジェクト情報については実物体を利用することができれば、直接操作のアフォーダンスや触覚の提示といったタンジブルユーザインタフェースの長所を活かしながら、仮想情報によって実物体を拡張することができる。しかしながら遠隔の実物体は直接操作できないので、必要に応じて仮想物体を用いる必要がある。

環境については、CVE と異なり現実空間をそのまま用いることが可能である。すなわち現実の作業空間をそのままセッティングとして作業の支援を受けられれば、その効果は大きい。ただし実物体のセッティングは上記オブジェクトと同じ制限が存在するため、必要に応じて仮想のセッティングを用いればよい。

ノンバーバル情報は、コミュニケーション相手を中心とした情報である。同一人物が同時に異なる場所に存在することは不可能なので、遠隔作業支援ではビデオによる表現か、CG によるアバタ表現となる。アバタ表現については、従来 CG による表現が主だったが、前出の 3D Live [71] では、コミュニケーション相手のビデオアバタをリアルタイムに生成し、空間の任意の場所に配置するメカニズムを持っている。しかしながら作業支援システムの場合重要なのは、アバタのリアリティより、相手の視線や指示位置などであり、必要な情報を抽象化表現するほうが、これらの情報を認知しやすい場合もある [27]。

## 3.2 遠隔 MR による共同作業支援モデル

### 3.2.1 モデルの要素

以上の議論より、遠隔 MR による共同作業支援モデルでのコミュニケーション手段は以下の表のものとする。

すなわちモデルとして、バーバル情報は遠隔地間でリアルタイム双方向音声通信機能により実現し、ノンバーバル情報は身体情報のリアリティを求めずに、作業支援に必要最低限な情報を提示する。オブジェクトは、実物体オブジェクトを中心に考えるが、必要に応じて仮想物体で表現される。実空間のセッティングを作業空間の環境とする。



表 3.2: 遠隔 MR による共同作業モデルのコミュニケーション手段

コミュニケーション手段	実現方法
バーバル	リアルタイム双方向音声通信
ノンバーバル	ビデオ映像またはアバタ表現（必要最小限の身体情報）
オブジェクト	実物体を主として必要の応じて仮想情報を使用
環境	実空間を利用

モデルの基本要素は以上のように決められたが、モデルには要素間の関係が必要である。要素間の関係として、遠隔ユーザ間の位置関係（これは座標系の関係として表される）、およびオブジェクトに対する操作レベルがある。以下これらについて述べる。

### 3.2.2 座標系の関係

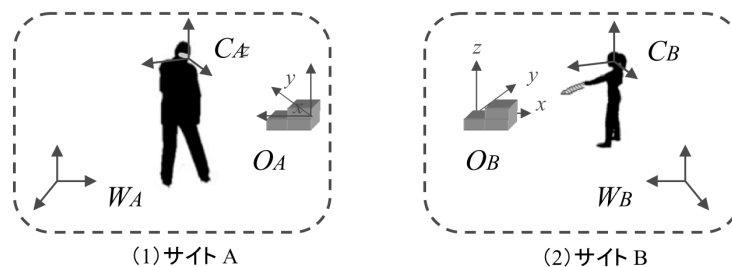


図 3.3: 遠隔 MR に用いられる座標系

複合現実感システムを構築するにあたって、図 3.3 に示すように世界座標系 ( $W$ )、オブジェクト座標系 ( $O$ )、カメラ座標系 ( $C$ ) が用いられる。これらの座標系には以下のような関係がある。空間に存在するオブジェクト  $Object$  は、オブジェクト座標系での座標値  $O(Object) = [x, y, z, 1]^t$  を持つ。またこの座標値は  $W(Object) = MO(Object)$  で、世界座標系の座標値に変換され、さらに  $C(Object) = VO(Object)$  によりカメラ座標系での座標値に変換される。ここで、 $M$  は一般にモデリング変換行列、 $V$  はビューイング変換行列と呼ばれ、 $4 \times 4$  の同次行列である。

カメラ座標系で表されたオブジェクトは、カメラパラメータ（焦点距離  $f_x, f_y$ ）を用いて、以下の透視投影変換  $P$  を行なってディスプレイ上の座標値  $D(x, y)$  に変換される。

$$D(x, y) = (f_x \times C(x)/C(z), f_y \times C(y)/C(z))$$

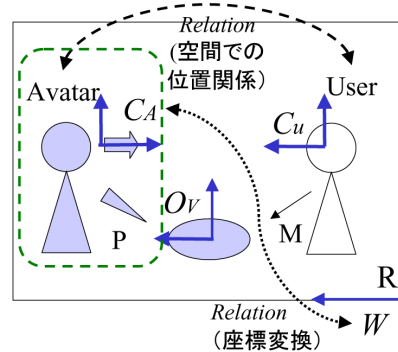


図 3.4: 座標系の関係

図 3.3 に示すように、各サイトにこれらの座標系が設定されているので、遠隔 MR 共同作業支援システムを構築するために、これら異なる座標系を共同作業支援に適した関係に定めなければならない。すなわち基準となる空間内で、ユーザ間の基準位置関係を定めることがモデル設計上最も重要である。このとき遠隔地の異なる座標系についてもローカル座標系のような座標系の関係が定義される必要があり、座標変換が数式で表現されなければならない。

以上述べたユーザ間の基準位置関係（数学的には座標変換）を Relation と定義する。作業支援においてユーザ間の位置関係は動的で固定されないが、Relation が定まればこの枠組みで位置関係が表現できるので問題はない。

図 3.4 の例では、User の世界座標系  $W$  と、遠隔ユーザの Avatar のカメラ座標系  $C_A$  との間に座標変換が定義され、User 空間で User と Avatar の位置関係が表現できることを示している。

### 3.2.3 共有オブジェクトに対する操作レベル

共有オブジェクトに対する操作レベルを以下の表 3.3 のように定義する。

$P$  は対象オブジェクトに対して、ポインティング動作のみ可能な場合で、例えば遠隔の実物体をレーザーポインタで指し示すなどの行為である。 $M_2$  は、ポインティング動作に加えて対象オブジェクトに対して MR を用いてオーバーレイされた仮想情報の操作が可能ではあるが、移動が行えないまたは移動を行うと整合性がなくなる場合を表す。 $M_1$  は  $M_2$  の操作に加えて移動が可能な場合であり、 $M$  は、 $M_1$  の操作に加えて、対象オブジェクト自体の変形が可能な場合に用いる。これらの操作レベルには以下の包含関係がある。

$$P \subset M_2 \subset M_1 \subset M$$

表 3.3: 操作のレベル

記号	操作内容
$P$	ポインティング
$M_2$	ポインティング, 重畳された仮想情報の操作
$M_1$	ポインティング, 重畳された仮想情報の操作, 移動
$M$	ポインティング, 重畳された仮想情報の操作, 移動, 変形

共有オブジェクトが仮想物体の場合には, 操作レベルは人為的に制限されない限り  $M$  であるが, 実物体を共有オブジェクトとする場合には, 変形はもちろんのこと, 移動も制限されることもある. すなわちオブジェクトの変形が計測されなければ, 遠隔にその変形を伝えることはできない. また移動により遠隔での実オブジェクトとの整合性が維持されない場合には移動もできない. ユーザの実物体オブジェクトへの操作レベルを  $MP_R(U)$  とすると, 実在する User と Avatar との間に

$$MP_R(\text{Avatar}) \subset MP_R(\text{User})$$

の関係がある.

### 3.2.4 モデルの表記

モデルの基本的な要素とその関係を表したのが図 3.5 である.

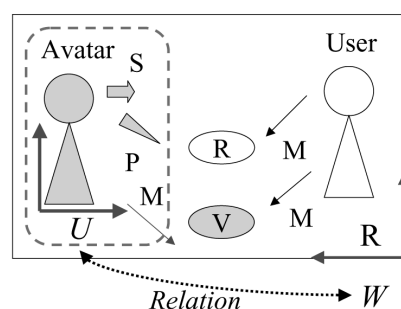


図 3.5: 遠隔 MR による共同作業支援モデルの要素の表記

図において  $R$  の表示は, 実空間を作業空間の環境として用いることを示しており, この実空間に世界座標  $W$  が設定される. この作業空間には, ユーザ (User) と, 実物体のオ

ブジェクト (R) が存在し, 遠隔地のユーザのアバタ表現 (Avatar), および仮想物体オブジェクト (V) が存在する. この作業空間に物理的に存在するものは白抜きの図で, 仮想情報として存在するものは灰色の図で示されている. これ以外の要素として, ノンバーバル情報であるポインタ (P), 視点または視線 (S) を必要に応じて使用する.

座標系の関係は, *Relation* の矢印破線で結ばれる. 図 3.5 では User の世界座標系と Avatar ユーザの座標系とが関連付けられている. また作業対象オブジェクトに対する操作レベルは矢印とともに  $M_1$  などで表現される. 図の例では, User は実オブジェクト (R), 仮想オブジェクト (V) に対して操作可能であり, 遠隔ユーザ (Avatar) は R に対して, ポインティング可能であることを表している.

### 3.2.5 実物体オブジェクトの有効性

作業支援に実物体オブジェクトを用いることの意義は, タンジブルユーザインタフェース (TUI) のメリットに加えて, MR 技術を利用することにより実物体オブジェクトを視覚的に拡張できることにある. しかしながらデメリットも同時に生じるので以下にこれらの点を整理する.

- TUI のメリット 1  
利用するもの自体が持つアフォーダンスをそのまま利用して, 自然なインタラクションが可能である. 特に両手を使った直接操作を行うことができる.
- TUI を用いた作業支援システムのメリット 1  
TUI で用いる物体をそのまま作業支援に利用できれば, 見た目や触覚など実作業に近い条件で訓練することになり, 高い訓練効果が期待できる.
- TUI のメリット 2  
MR を利用することにより, 実物体を仮想情報で拡張することができる.
- TUI を用いた作業支援システムのメリット 2  
仮想情報を利用して実物体へのポインタなどノンバーバル情報を実物体と関連付けて表示できる. また物へのインタラクション結果も仮想情報として実物体に重畳表示できる.
- TUI のデメリット  
実物体の属性自体を変えることが困難である. 例えば変形, 加工などによって表面形状を変えることが困難である.

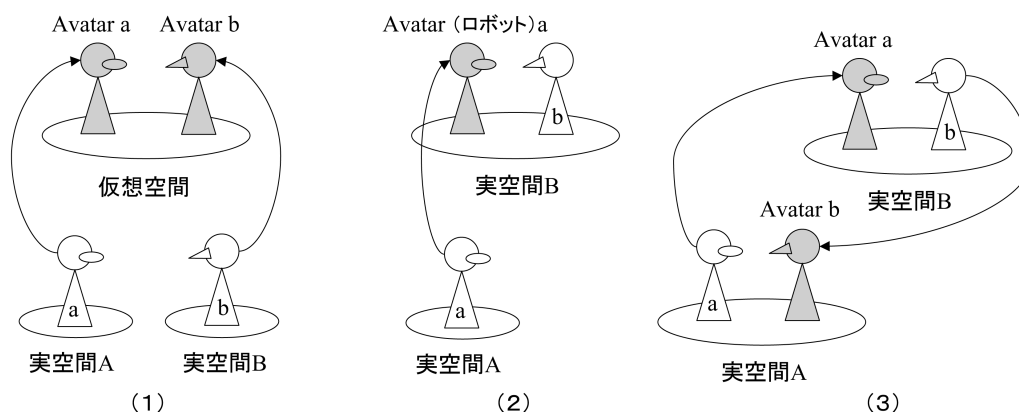


図 3.6: 遠隔コミュニケーションシステムにおける空間の使われ方 [39]

- TUI を用いた作業支援システムのデメリット

実物体への変形・加工に対する制限に加えて、特に遠隔作業支援の場合、実物体の移動などの動作に対して次項で述べる操作の非対称性が生じる。

以上の TUI のメリットを活かし、MR を用いてその制限やデメリットを緩和する仕組みが構築できれば、実物体を用いた遠隔共同作業支援システムは、産業分野の作業支援だけでなく、アートやスポーツの分野での教育・訓練でも有用と考えられる。

### 3.2.6 遠隔 MR における実空間の利用とモデルの対称性

2.5.4 において、遠隔 MR システムの構築に当たっては、異なる空間に同時に存在しない実空間・実物体オブジェクトをどう用いるかがポイントであることを述べた。ここでは実空間の利用方法という観点からモデルを論じる。

Com Adapter の論文において [39]、遠隔コミュニケーションシステムを空間に着目して図 3.6 のように 3 つに分類している。(1) は基本的に共有仮想空間のモデルであり、本論文の 2.3 に研究例が挙げられている。(2) の例として、Block Party [7]、Shared View [50]、GestureMan [47] などが挙げられる。Com Adapter [39]、Distributed Designer's Outpost [20] などは (3) の例である。

この空間の使われ方は見方を変えると遠隔 MR で用いられる世界座標系の使われ方と同じである。すなわち、図 3.6 (2) では実空間 B に世界座標を設定し、図 3.6 (3) では、実空間 A、B それぞれに世界座標系を設定している。

本研究では機能面・ユーザインタフェース面での対称性にも着目する。図 3.6 (1) の共有仮想空間モデルは、システムを対称に構成することが可能であるが、図 3.6 (2) の場合には 1 つの実空間を利用することから、モデル自体が非対称となる。例えば、Block Party [7]

は作業者は HMD を装着し、指示者はデスクトップ PC を用いる非対称構成で、指示者が作業空間のビデオ画像を見ながら、仮想物体のモデルにより作業指示を行なうという機能面でも非対称なシステムである。このモデルは、実際に作業を行なう作業者と、作業の指示やサポートを行なう指示者という役割・分担が非対象な場合に適したモデルである。

図 3.6 (3) の例である Distributed Designer's Outpost [20] では、2 つの異なる実空間に電子ホワイトボード、カメラを設置し、Post-It という実物体を用いて作業するシステムである。この例ではシステム構成は遠隔地間で対称であるが、機能面で実物体の Post-It という実物体がもう一方のサイトで仮想物体で表現されるために、その操作については、非対称になっている。

もう一つの例である ComAdapter は、遠隔で共有する実物体オブジェクトをあらかじめ対応付けておき、2 つの実空間で対応付けられた実物体オブジェクトへのポインティング動作が相互に認識できる枠組みの提供を目指している。このモデルでは操作面での非対称性は起こらないが、実物体の移動は扱われていない。

以上述べた例を整理して、空間と対称性の関係を表 3.4 に示す。1 空間の対称モデルは対面型のモデルであり、1 空間の遠隔 MR システムは非対称モデルとなる。2 空間の場合、対称性を保つには共有オブジェクトとして仮想物体を用いるか、あるいは双方の空間の実物体を対応付けるかいずれかの方法をとる必要がある。

また表 3.5 にシステムの例を挙げる。

表 3.4: 利用する空間の数と対称性による MR システムの分類と特徴

	1 空間	2 空間
対称	対面型 MR	A, B 2 つの世界座標系を設定 V(A)vs.V(B) or R(A)vs.R(B)
非対称	1 つの世界座標系を設定 V or R オブジェクト利用可能	A, B 2 つの世界座標系を設定 V(A)vs.R(B) or R(A)vs.V(B)

次節より、1 空間を利用した遠隔 MR システム、2 空間を利用した遠隔 MR システムについて従来例を整理しながらモデル化を試みる。

### 3.3 1 空間を利用した遠隔 MR 共同作業支援モデル

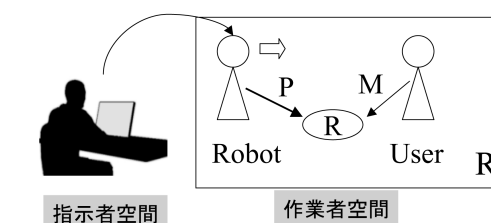
#### 3.3.1 従来研究例のモデル表現

図 3.5 の表記を用いて、Gesture Man と Block Party のモデルを表したのが、図 3.7 である。

表 3.5: 利用する空間の数と対称性による MR システムの例

	1 空間	2 空間
対称	AR2 Hocky [63] RV-Boarder Guards [62]	Com Adapter [39]
非対称	GestureMan [47] Block Party [7]	Distributed Designer's Outpost [20] Realworld Teleconference [6]

(1) Gesture Man のモデル



(2) Block Party のモデル

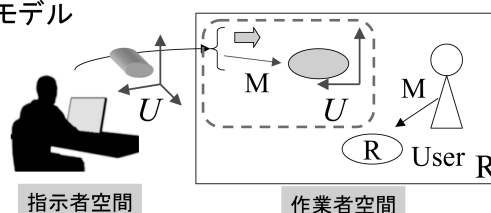


図 3.7: Gesture Man と Block Party のモデル

(1) の Gesture Man のモデルの場合，作業空間には，作業者（User）と，遠隔の指示者の代理人であるロボット（Robot）が存在する．指示者は遠隔よりロボットの手をコントロールして，手の先についているレーザポインタで，空間の実オブジェクトをポインティングすることができる．またロボットの頭部は指示者の頭の動きを反映して動くようになっているので，指示者の視線の向きを作業者は知ることができる．作業空間の実オブジェクトを操作できるのは，作業者のみである．またこの場合，作業者空間の実物体のモデルや位置姿勢情報は必要ないため R は横線で示されている．

(2) の Block Party のモデルでは，遠隔の指示者は作業者の頭部のカメラからの視点から作業空間を観察しており，仮想オブジェクト（V）を操作することで，作業者に組立ての指示を与える．一方作業者（User）は，この例示された仮想物体を参照しながら，実オブジェクト（R）を組立てる．このモデルでは指示者のシステムで用いられている座標系  $U$  を用いて， $V$  がそのまま作業者の HMD に表示されており作業者空間との関連がな

表 3.6: 1 空間を利用した作業支援システムの比較

	作業者	指示者			
		セッティング	視点	指示機能	ノンバーバル 情報
		I/F (シームレスネス) (直/間接操作)			
Shared View	カメラ付 HMD	デスクトップ	作業者 カメラ	2D 画面上の 指差し指示	
		シームレス I/F 直接操作			
Gesture Man	特殊機器 なし	デスクトップ	ロボット カメラ	レーザ ポインタ による指示	ロボット： 頭部の向き 手の向き
		シームレス I/F 間接操作			
Block Party	カメラ付 HMD	デスクトップ	作業者 カメラ	仮想物体 による 作業例示	CG による 視線表示
		シーム I/F 間接操作			

いため、作業者は  $V$  を参照することしかできない。この場合も  $RO$  もモデルや位置姿勢情報は必要としない。

また上記のシステムでは、作業者は作業空間に存在し、指示者はデスクトップユーザインタフェースを用いて作業者への指示を出すような構造になっており、指示者のユーザインタフェースにはシームが存在し、また両者の環境の違いがメディアのゆがみをもたらす“環境の2重性 (Dual Ecology)”の問題 [47] を引き起こしている。

### 3.3.2 提案モデル

そこで、作業者が見ている実物体と仮想物からなる MR 空間にシームレスに没入するモデルを考える。これを図で表すと、図 3.8 (1) となる。このモデルでは、遠隔の指示者の身体を表す座標系としてカメラ座標系  $C_A$  が用いられている。作業者空間に Avatar として表示される際には、作業者世界座標系との *Relation* が決められ、作業者空間でのお互いの位置関係が決定される。このときの指示者のポインタ (*Pointer*) の座標は、

$$W(Pointer) = TC_A(Pointer)$$



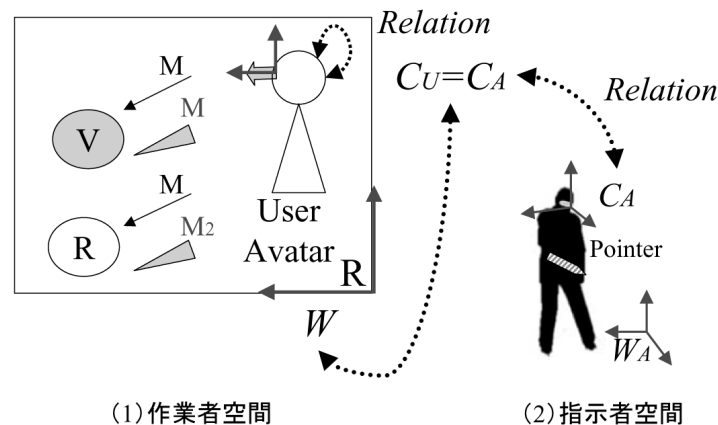


図 3.8: 1 空間を利用した遠隔 MR 共同作業支援モデル

によりカメラ座標系  $C_A$  から作業者世界座標系  $W$  の値に変換される．ここで  $T$  は、 $4 \times 4$  の同次行列である変換行列である．指示者は、作業者 (User) が存在する作業空間にある仮想オブジェクトに対しては、 $M$  の操作が可能であるが、実オブジェクトに対しては  $M_2$  の操作、すなわちポインティングとオーバーレイされた仮想情報の操作を行える．

このとき、実オブジェクトの形状モデルは既知であり、位置姿勢が計測されていることが前提である．User は Avatar の視線の方向や、身体情報などノンバーバル情報を得ながら、仮想オブジェクトと実オブジェクトを操作して作業を進める．仮想オブジェクトは指示者、作業者双方から操作可能である．しかしながらこのモデルでは、指示者の視点が存在する位置にカメラを設置する必要がある．また指示者の視点位置を変更するためには、カメラの移動が必要となり、GestureMan のようなロボット代理人を作業者空間に置く必要がでてくる．

作業者空間へのカメラ設置を回避する手段として Shared View や Block Party のように作業者のヘッドマウントカメラを用いる方法がある．このケースのモデルを示したのが図 3.8 (2) である．このモデルを図 3.8 (1) と比較すると、指示者の視点が作業者のカメラからの視点となり、指示者の Avatar 表現がなくなっている．

このときの座標系の関係は、指示者のカメラ座標系  $C_A$  と作業者のカメラ座標系  $C_U$  との間に  $C_A = C_U$  という関係が成り立つため、指示者のポインタ (Pointer) は、

$$W(\text{Pointer}) = V^{-1}C_U(\text{Pointer}) = V^{-1}C_A(\text{Pointer})$$

により作業者の世界座標値に変換される．ここで  $V^{-1}$  は、作業者空間におけるビューイング変換行列  $V$  の逆行列である．

このモデルは、仮想オブジェクトや実オブジェクトに対するポインティングや操作機能は (1) のモデルと変わるところはなく、カメラの設置を回避できるというメリットがある。さらに立体視映像による WYSIWIS を実現でき、指示者は常に作業視点から作業空間に没入できる。しかしながら指示者が常に作業者の視点を強いられるという欠点も予想できるため、ここで述べた 1 空間を利用した非対称遠隔 MR モデルを 4 章で取り上げ、実際にシステムを構築して評価を行う。

### 3.4 2 空間を利用した遠隔 MR 共同作業支援モデル

#### 3.4.1 2 空間の座標系の関係

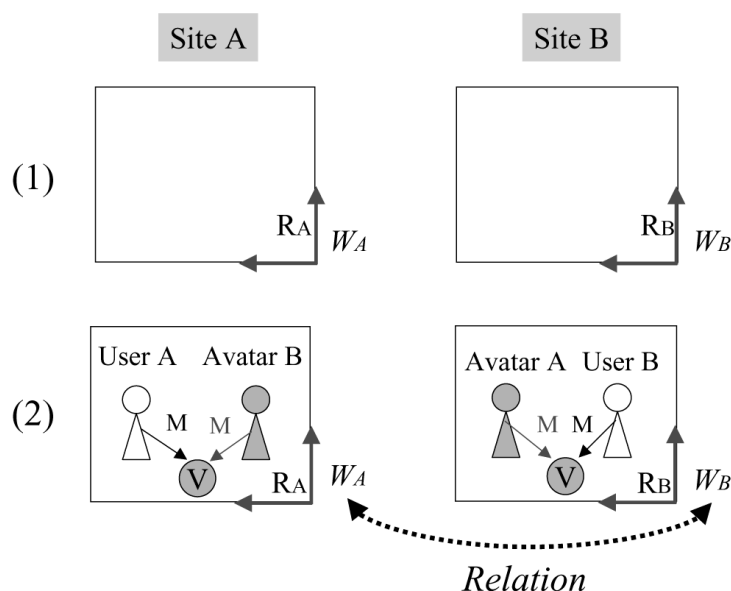


図 3.9: 2 空間の座標系の関係

遠隔地のそれぞれの地点の実空間を用いて遠隔 MR システムを構築する場合、それぞれに世界座標を設定する必要があるが、この座標系を設定するための基準となるオブジェクトを選ぶ。基準となるオブジェクトは床や机のような平面、または Distributed Designer's Outpost のようにスクリーンであってもよい。作業空間は、図 3.9 (1) に示すように、それぞれの地点の基準オブジェクトの上に設定される。

ここで、各地点の作業空間が物理的に同じ構造を持つ場合（例えば同じ大きさの机に作業空間の世界座標が設定されている場合など）、この 2 つの作業空間を“同等”である

と定義する．それぞれの地点のユーザは，この条件下でオブジェクトに対して同じ操作を行ったり，同じように動き回ることができる．

同等な空間にそれぞれ世界座標系  $W_A, W_B$  が設定され，オブジェクトや遠隔の参加者のアバタが表示される．このときの両方の座標系の *Relation* は，基本的に  $W_A = W_B$  である．すなわち，

$$W_A(Object) = W_B(Object)$$

であり，より具体的には図 3.9 (2) の要素について，

$$W_A(User A) = W_B(Avatar A)$$

$$W_A(Avatar B) = W_B(User B)$$

$$W_A(V) = W_B(V)$$

という関係が成り立つ．

### 3.4.2 2空間モデルにおける非対称性

図 3.9 (2) において，User と Avatar の座標値の関係が

$$W_A(User A) = W_B(Avatar A)$$

$$W_A(Avatar B) = W_B(User B)$$

となることを述べたが，実際には User A の動きは Avatar A に反映させられるが，逆に Avatar A を操作して User A を動かすことは基本的には不可能であるという非対称性が存在する．このことを

$$W_A(User A) \gg W_B(Avatar A)$$

$$W_B(User B) \gg W_A(Avatar B)$$

と表す．仮想オブジェクトに対する操作は対称であるため， $W_A(V) = W_B(V)$  である．

図 3.10 のように実物体オブジェクト (R) をサイト A に導入した状況を考える．この実オブジェクトに対応する仮想オブジェクト (V) が，サイト B に表示されている．ユーザ A が実オブジェクト R を移動した場合，サイト B の仮想オブジェクト V は R の移動後の世界座標位置と同じ位置に表示される．逆にユーザ B が仮想オブジェクト V を移動させた場合，サイト間でのオブジェクトの位置の整合性を取るため，サイト A で対応する実オブジェクト R を移動させる必要がある．Psybench の例のように移動のためのアクチュエータを設けるか，Distributed Designer's Outpost のように，R に対応する V が移動されたことをユーザ A に知らせて，ユーザ A が R をその位置まで移送させるかの方法が必

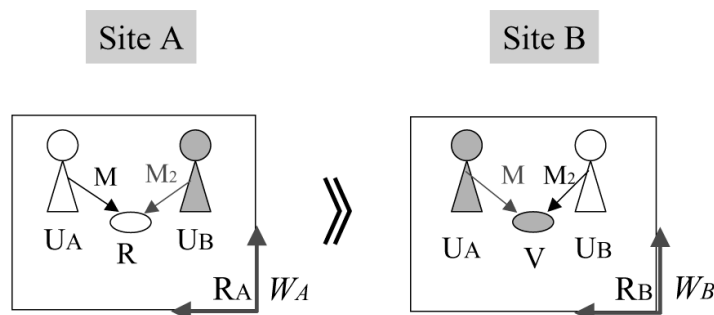


図 3.10: 2 空間の座標系の関係

要となる．従って無条件では移動操作が行えないので，操作レベルは  $M_2$  となり，操作レベル  $M$  のユーザ A と非対称性が生じていることがわかる．

このような操作の非対称性が生じることで，円滑な共同作業の遂行を妨げる恐れがある (Dual Ecology の問題 [51])．これらのことより，一方のサイトに実オブジェクトを配置し，対応する仮想オブジェクトを他のサイトに表示するようなセッティングを行った場合には，実質的に操作権は実オブジェクトが配置されている側のユーザにある．従ってこの場合の各要素間の関係は，

$$\begin{aligned} W_A(\text{User A}) &\gg W_B(\text{Avatar A}) \\ W_B(\text{User B}) &\gg W_A(\text{Avatar B}) \\ W_A(R) &\gg W_B(V) \end{aligned}$$

となる．しかしながら，2つの世界座標系の関係  $W_A = W_B$  のみではこの非対称性は回避することができない．そこで次項で，同等な作業空間での実物体オブジェクトの扱いについて述べる．

### 3.4.3 提案モデル

ここでは，上述した実物体オブジェクトに対する操作についてより深く考察する．遠隔の実物体オブジェクトを移動できないというのは，実物体オブジェクトと他のオブジェクトとの相対関係を変化させることができないということである．見方を変えると，実物体オブジェクトを動かさなくとも，環境を含めた他のオブジェクトに対して逆の動きをさせれば相対位置関係は維持できる．ただし他のオブジェクトの中に実物体オブジェクトが含まれている場合には，この相対位置を変更することはできないので，ユーザ間で一度に共有できるオブジェクトを 1 個に限定する．このことにより，実物体間の位置関係の変更を

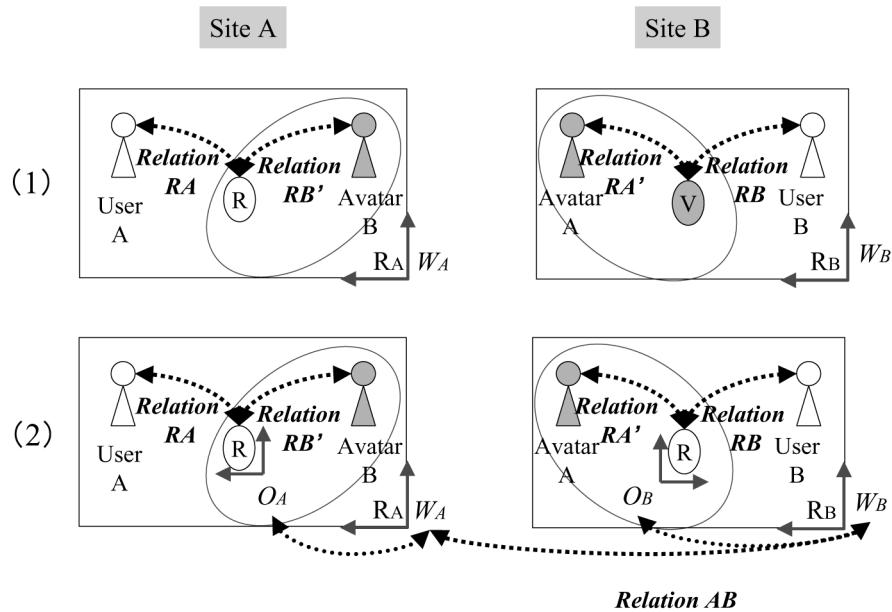


図 3.11: 2 空間を利用した遠隔 MR 共同作業支援モデル

扱う必要がなくなり，実オブジェクトとその他の仮想環境，オブジェクトとの関係を考慮すればよい．

そこで本研究では，図 3.11 に示すような共有オブジェクトとユーザ視点の相対位置関係を共有するモデルを提案する．図 3.11 (1) において，サイト A でのユーザ A とオブジェクト R との位置関係を  $RelationRA$ ，サイト B でのアバタ A とオブジェクト V との位置関係を  $RelationRA'$  とすると  $RelationRA \gg RelationRA'$  となり，同様にサイト B でのユーザ B とオブジェクト V との位置関係を  $RelationRB$ ，サイト A でのアバタ B とオブジェクト R の位置関係を  $RelationRB'$  とすると  $RelationRB \gg RelationRB'$  とすることができる．すなわち  $RelationRB$  の変化を，サイト A では R の移動は  $W_A$  の座標値の変更ではなく，Avatar B の位置変化に置き換えて， $RelationRB = RelationRB'$  を保つ． $RelationRA = RelationRA'$  についても同様に考えることができる．

以上述べた関係は，図 3.11 (1) サイト B のオブジェクト V が R に変わっても成り立つので，図 3.11 (2) に示すように両方のサイトで同じ実物体オブジェクト R を持つモデルを考えることができる．このモデルでは，共有オブジェクトとユーザの視点との位置関係を表すために，R のオブジェクト座標系が導入されている．各オブジェクトの Relation をオブジェクト座標系で表現すると以下ようになる．

$$\begin{aligned}
 RelationRA \gg RelationRA' &\Rightarrow O_A(UserA) \gg O_B(AvatarA) \\
 RelationRB \gg RelationRB' &\Rightarrow O_B(UserB) \gg O_A(AvatarB)
 \end{aligned}$$

オブジェクト座標系による表現は、

$$W_A(Object) = M_A O_A(Object)$$

$$W_B(Object) = M_B O_B(Object)$$

により世界座標系の表現に変換することができる。ここで  $M_A, M_B$  は、それぞれ  $W_A, W_B$  におけるモデリング変換行列である。

#### 3.4.4 タンジブルレプリカ概念

図 3.11 (2) に示すようにサイト A, サイト B それぞれに実物体による共有オブジェクトを持つということは、同じ大きさ, 形状, 材質の実物体オブジェクトを導入することである。この実物体オブジェクトは、あらかじめ 3 次元形状がモデル化されており、かつリアルタイムに位置・姿勢が計測されなければならない。このような共有実オブジェクトを“タンジブルレプリカ”と定義する。別の見方をすれば同じ実物体オブジェクトを 2 重に保持することと解釈することもできる。

しかしながらこの考え方には制限もある。すなわち扱える実物体オブジェクトは 1 つに限られる点と、実物体オブジェクトが動くごとに作業相手のアバタが動くということである。前者の問題点については、ポータブルオブジェクトを手を持って作業する場合、操作対象となるオブジェクトの数は 1 つのことが多いこと、後者に関しては、全身のアバタを表示することなしに、手のみを表示する、またはポインタのみを表現するといった手段で対処することも考えられる。

例えば、相手のアバタ表現をポインタのみに制限し、左手に持ったレプリカを右手のポインタでポインティングする動作を考える。このとき、相手ユーザが手にしているレプリカとポインタの相対位置が保持され送られてくる。従ってこの相対位置が変化すれば、その変化がポインタの動きとして観察される。さらに、相手側でレプリカとポインタの相対位置が変化しない場合でも、自分自身のレプリカを動かすと相手のポインタとの相対位置が変化するためポインタは移動する。

すなわち、ポインタの動きは相手ユーザのポインタとペンデバイスの相対位置関係および、自身の視点位置とレプリカとの相対位置関係によって変化し、これらの動きが合成された結果として表示されることになる。

例えば、ユーザが自分自身のレプリカを固定して観察しているときに相手のポインタが移動した場合、相手がレプリカを動かしているのか、ポインタを移動しているかの情報は得られず、単にポインタとペンデバイスの相対位置が変化したことが分かるだけである。

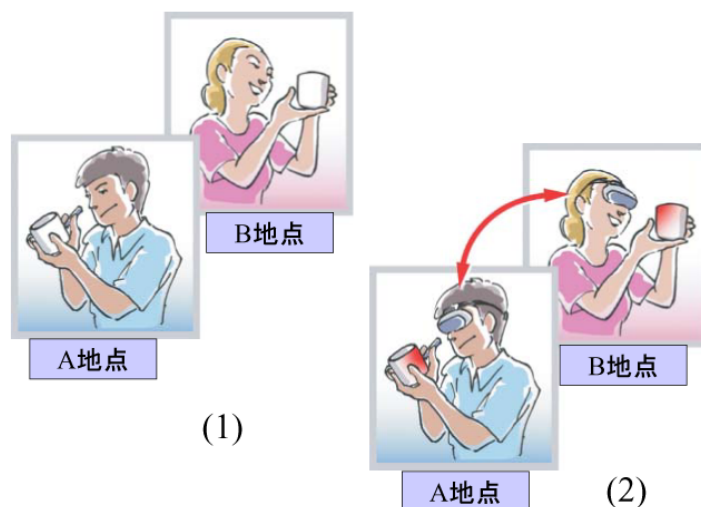


図 3.12: タンジブルレプリカを用いた共同作業イメージ

### 3.4.5 タンジブルレプリカを用いた共同作業イメージ

図 3.12 (1) に示すように、遠隔地に存在するユーザ A とユーザ B が無地の白いマグカップを持っており、A と B が共同でこのマグカップの表面の模様をデザインするケースを考える。このマグカップは、同じ大きさ・形状・材質であるタンジブルレプリカとする。マグカップの形状モデルはあらかじめ設定されており、この形状に沿って CG が描画される。ユーザ A, B の HMD, スタイラス, およびマグカップの位置姿勢はリアルタイムで計測されている。

図 3.12 (2) に示すように HMD を装着し、センサが装着されているスタイラスペンでマグカップの表面に模様を描いていく。スタイラスがマグカップ表面に触れると CG で線が描かれていく。これは共有ホワイトボードに複数人でペイントするのと同じ機能をマグカップの 3 次元の面上で実現したものである。また、スタイラスは、遠隔の空間ではポインタとして表示される。

ユーザは作業にともない、マグカップを動かしながら観察したり、スタイラスで指し示したり、描画したりする。このとき視点位置とマグカップの相対位置関係は常時変化しており、それぞれの位置・姿勢の計測値を用いて観察者視点位置からの CG 表示が随時更新される。

遠隔地間では、ペイント情報とポインタ情報のみが共有され、お互いのマグカップの動きは伝えられない。

### 3.5 まとめ

本章では、遠隔 MR システムをモデル化するため、まずモデル化の要素をユーザ、アバター、実物体オブジェクト、仮想物体オブジェクトに整理して図式化した。

これらの要素間の関係を記述するために、Relation および操作レベルの概念を導入した。Relation は、遠隔のユーザ間の関係を示すもので、異なる座標系の座標変換で表現することができる。また、オブジェクトに対する操作レベルを、ポインティングのみ可能な  $P$  レベルから、すべての操作が可能な  $M$  レベルまでの 4 段階とした。

また遠隔 MR による共同作業支援モデルを、利用する空間の数ともモデルの対称性に着目して分類した。利用する空間の数は、1 または 2 でありこれはモデルに利用する世界座標系の数と一致する。1 空間モデルは構成・操作などが非対称であるが、2 空間の場合の対称性は、共有オブジェクトが仮想物体か実物体かで決定される。すなわち 2 空間で対称なモデルは、2 つのサイトとも共有オブジェクトとして仮想物体を用いる場合、共有オブジェクトとして実物体を用いる場合の 2 通りがあり、非対称なモデルは一方のサイトの実物体オブジェクトを他方のサイトで仮想物体として表現する場合である。

1 空間を用いる方法の場合、共同作業支援における指示者・作業環境が非対称になるが、実物体と仮想物体からなる作業空間に、指示者の視点となるカメラを設置して、指示者が作業空間に没入するような環境を構築することができる。

このとき指示者のインタフェースはシームレスであり、指示者のアバター表現により作業者がアウェアネスなどのノンバーバル情報を得ることができるメリットはあるものの、指示者の視点位置にカメラを設置する必要があり、自由な視点を得るためには、ロボットなどカメラの移動手段を備える必要がある。

そのため、作業空間へのロボットやカメラ設置の負荷を避ける方法として、作業者と指示者のカメラ座標系を一致させるモデルを提案した。このモデルでは、作業者と指示者の WYSIWIS の環境が実現できるが、副作用も懸念されるため評価が必要であることを述べた。

また 2 空間を用いる方法の場合、実物体オブジェクトを導入することにより、ユーザ間の操作に非対称性が生じることを示し、この非対称性を解消するため共有オブジェクトの数を 1 個に制限して、共有オブジェクトを中心にアバターを表示する Relation を導入した。この Relation は、共有オブジェクト座標系を用いて実現できることを示した。

上記の Relation は、両方のサイトが実物体オブジェクトを利用する場合にも成り立つたため、実物体の複製を共有オブジェクトとするタンジブルレプリカ概念を導入した。タンジブルレプリカは、タンジブルユーザインタフェースの遠隔拡張方法の 1 つであり、レプリカを導入することにより 2 空間を用い対称な共同作業支援モデル構築が可能になる。

ユーザのインタフェースはレプリカに対してシームレスであり、視点も独立に設定できる。しかしながら、相手のユーザのノンバーバル情報は、レプリカに対して相対位置で表



示されるため，表示情報の選択とその表示特性を評価する必要がある ..

4 章では上述した 1 空間を利用した非対称モデルを，5 章では，タンジブルレプリカを用いた 2 空間を利用した対称モデルを取り上げて議論し，システムを実装してモデルの評価を行う．



# 第4章 1空間を利用した非対称型遠隔 MR作業支援モデル



## 4.1 はじめに

本章では，MR を用いた遠隔共同作業支援モデルのうち，1 空間を利用した非対称遠隔 MR を取り上げる．図 4.1 に示すように，このモデルは，指示者のカメラ座標系  $C_A$  と作業者のカメラ座標系  $C_U$  とを一致させる Relation を特徴としている．

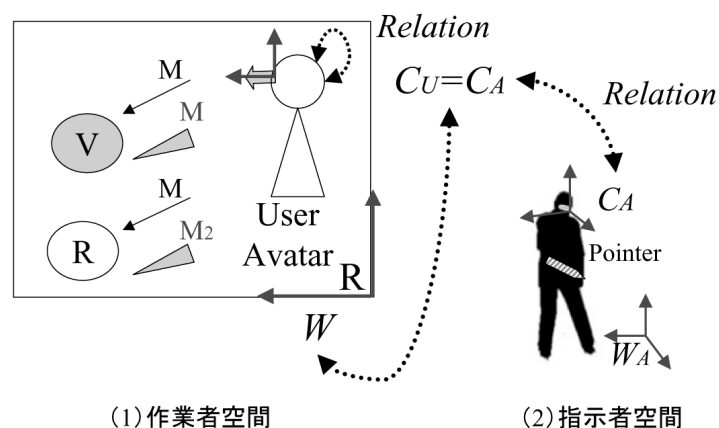


図 4.1: 1 空間を利用した非対称型遠隔 MR モデル

作業支援システムでは，作業に関連するオブジェクトへのポインティング機能や，作業手順を説明するための機能が必須である．ここではポインティング機能に加えて，仮想物体を用いて作業手順を説明する動作例示機能を実現する．

以下，上記の機能を備えたモデルを構築し，そのメリットデメリットを明らかにする．次に実装のための構成要件を述べ，実装したシステムを用いて，上記ポインティング機能，仮想物体による動作例示機能の有効性を検証して，最後に本モデルの評価をまとめる．

## 4.2 1 空間を利用した非対称型遠隔 MR の機能要件

1 空間を利用した非対称型遠隔作業支援システムの例を図 4.2 に示す (1) が作業者サイトで，作業対象物である実物体  $R$  を含む作業者空間に世界座標  $W$  が設定されている．作業者は，着用しているビデオシースルー HMD を通して，作業者空間に仮想物体が重畳されたカメラ映像を観察する．このステレオ映像は，そのまま遠隔の指示者サイトへ送信される．指示者サイト (2) の指示者は，受信した映像を立体視で観察するので，作業者の視点から作業者空間に没入しているかのような感覚が得られる．

指示者はスタイラスを用いて，作業者空間の実物体や仮想物体に対してポインティングを行ったり，仮想物体を操作して，組立て作業の手順の例示を行うことができる．一方作

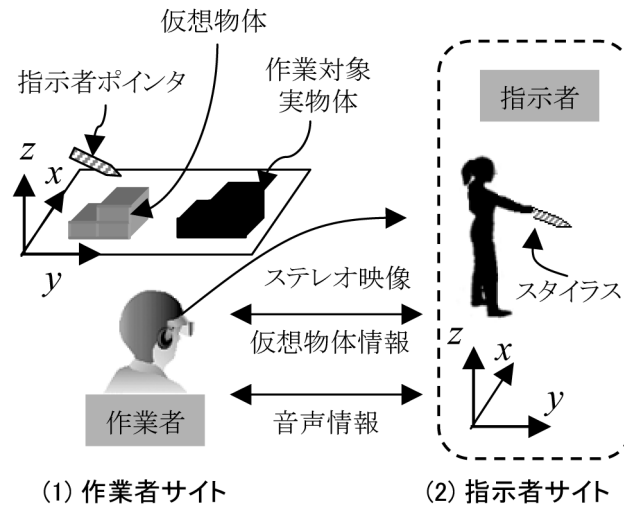


図 4.2: 非対称型遠隔作業支援システム

業者は、指示者のポインタや仮想物体での例示を参照しながら、実物体での組立作業を行う。

HMD はビデオシースルーであるために、作業者 HMD で観察している映像と指示者 HMD で観察している映像は、遅延時間はあるものの完全に一致する。すなわちこのシステムは、実物体と仮想物体が存在する作業者空間立体視映像を用いて、作業者・指示者間でシームレスな WYSIWIS (What You See Is What I See) インタフェースを提供している点が特徴である。

基本構成は、2 章の関連研究で述べた、Shared View [50] や Block Party [7] に類似しているが、SharedView では、指示者空間は、作業者 HMC の 2 次元映像をモニタで観察しながら指差しを行うインタフェースであり、奥行き方向のポインティングは不可能である。BlockParty は、作業者は光学シースルー HMD を装着して、仮想物体を観察しながら作業を行い、指示者は、デスクトップインタフェースを用いて仮想物体による例示を行って作業指示を出すシステムである。しかしながら、仮想物体の位置が作業者空間と関係付けられていない。

本提案は、これらのシステムで実現されていない、作業者・指示者共に立体視映像によるシームレスな MR インタフェースの提供を目的としている。

#### 4.2.1 指示者ポインティング機能

指示者サイトでは、スタイラス位置は指示者世界座標系  $W_A$  で常時計測されており、指示者視点を基準にしたスタイラスの位置姿勢（つまり指示者カメラ座標系  $C_A$  での位置姿

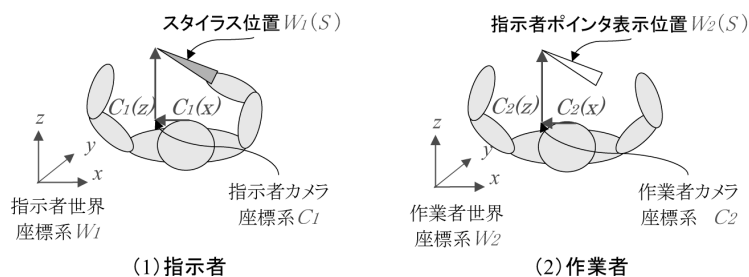


図 4.3: 指示者ポインタの表示

勢) が求められる。図 4.3 に示すように、指示者カメラ座標系  $C_A$  で表わされるスタイラスの位置は、 $C_A = C_U$  という Relation が設定されているので、そのまま作業員視点からの相対位置 (作業員カメラ座標系  $C_U$  での位置姿勢) に置き換えられ、指示者スタイラスは作業員空間に CG ポインタとして、図に示すような位置に表示される。この座標変換は次の手順で実行される。オブジェクト (MR) 座標系で定義されているスタイラス形状が、モデリング変換により指示者世界座標系  $W_A$  で、

$$W_A(Stylus) = [x_w, y_w, z_w, 1]^t$$

の同次行列で表されるとする。この行列にビューイング変換

$$C_A(Stylus) = V W_A(Stylus)$$

を行ない、指示者カメラ座標系の位置

$$C_A(Stylus) = [x_c, y_c, z_c, 1]^t$$

に変換する。ここで  $V$  は、世界座標系からカメラ座標系へのビューイング変換を行なう  $4 \times 4$  の同次行列である。この指示者カメラ座標系での位置  $C_A(Stylus)$  は、作業員カメラ座標系での位置  $C_U(Pointer)$  に等しい。すなわち

$$C_A(Stylus) = C_U(Pointer)$$

次に、 $C_U(Pointer)$  を作業員世界座標系の座標値  $W_U(Pointer)$  に変換するには、作業員空間のビューイング変換

$$C_U(Object) = V_U W_U(Object)$$

で用いられる変換行列  $V_U$  の逆行列  $V_U^{-1}$  を用いて、

$$W_U(Pointer) = V_U^{-1} C_U(Pointer)$$

を計算すればよい。

また作業空間の実物体のモデルが既知で、位置姿勢がリアルタイムに計測できれば、指示者ポインタとの見え隠れが計算できるので、実物体へのポインティングも可能である。本システムでは、実物体を作業空間に位置姿勢を固定して配置し、その 3D モデルを透明に表示することで、実物体へのポインティング機能を実現した。

#### 4.2.2 仮想物体による動作例示機能

4.2.1 のポインティング機能を利用して、仮想物体の把持や移動などの動作も可能にした。スタイラスが仮想物体と接触する位置で、スタイラスに付属しているボタンを押下すると仮想物体把持モードとなる。この状態でスタイラスを移動すると仮想物体が移動する。また仮想物体把持モードでスタイラスのボタンを押下すると、把持されている仮想物体がリリースされる。この機能を用いて、指示者は 6 自由度の自然な動作で仮想物体の選択、移動、配置が可能となる。ただし仮想物体同士の干渉は検出していないので、仮想物体同士が重なる状態も生じる。

#### 4.2.3 WYSIWIS の実現と指示者視点の制約

本システムにおいては、指示者と作業者が作業空間を WYSIWIS のビューで共有してシームレスなインタラクションが可能である、というメリットはあるが、指示者の視点に関しては大きな制約がある。すなわち、指示者が見ている映像は作業者視点のものなので、指示者が自らの意思で視点を移動することができないという点である。

このことにより、作業者の視点移動により映像が変化すると、ポインタ位置も作業空間内で移動してしまう。これらの変化に合わせて指示者が、ポインタ位置を修正しながら作業空間をポインティングできるかという問題がある。また、揺れる映像を見つづけていると「映像酔い」が起こることが良く知られており [54]、常時作業者視点を強制される本システムで、映像酔いが発生しないかという問題も考えられる。

### 4.3 1 空間を利用した非対称型遠隔 MR の構成要件

#### 4.3.1 ビデオシースルー HMD

MR システムの構築にあたってキーデバイスとなるのが HMD である 2.5.1 で述べたように、HMD には光学シースルータイプとビデオシースルータイプとに分類されるが、本研究ではキヤノン社製のビデオシースルー HMD である VH2002 を用いた [87]。VH2002 は、



両目用の 2 台の NTSC カメラと VGA 液晶ディスプレイを搭載しており、本体重量は約 400g である。この外観を図 4.4 (1) に示す。突起の部分には磁気センサである Fastrak<sup>®</sup> レシーバが配置されている。

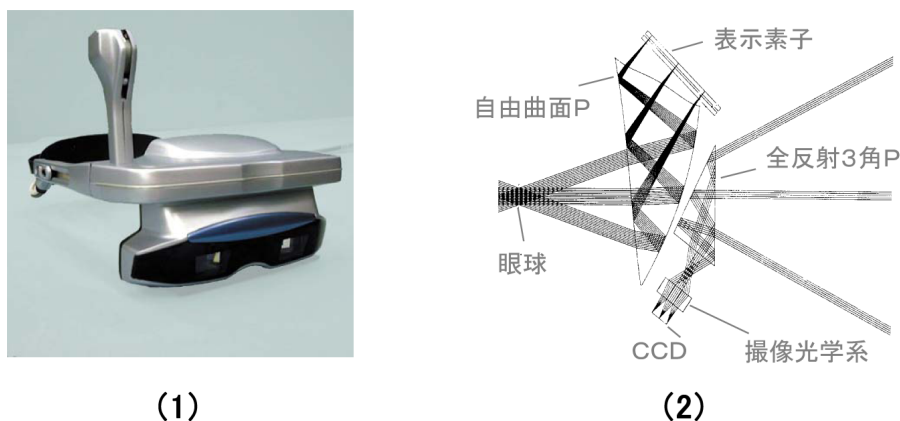


図 4.4: ビデオシースルー HMD: VH2002

この HMD の大きな特徴は、図 4.4 (2) に示す非常にコンパクトな光学系を用いて、ユーザに視差のない映像を提供している点である。視差がないということはユーザにとっては、HMD の視野範囲に裸眼視と同じ状態の映像が見えているということで、このことは現実世界と仮想の世界が違和感なく統合されるための必要条件である。

以上の条件を満足するために、2 枚のプリズムが組み込まれている。外界側のプリズムは全反射三角プリズムで、外界からの光線はこのプリズムで 2 回反射して撮像光学系に入射し、ビデオカメラの CCD で受光される。CCD からの電気信号は、NTSC に変換されて、コンピュータに入力される。

このビデオ信号にコンピュータで生成された仮想画像が重畳されて、図 4.4 (2) の上部にある表示素子（液晶表示装置）に表示される。表示された映像から出た光線は、自由曲面プリズムにより 2 度反射されて、外界からの入力光線と同じ入射角でユーザの眼球に届くようになっている。このような構成で、以下の仕様が実現されている。

#### 4.3.2 ハードウェア構成

HMD とスタイラスには磁気センサである Fastrak のレシーバが装着されており、位置・姿勢の 6 自由度の値が取得できる。MR Platform (MRP) [98] の機能により、センサからの出力値をもとに、仮想物体の CG の描画位置を決定する処理が行なわれる。HMD 位置・姿勢については、磁気センサ出力値をもとに、さらにマーカにより補正される。

表 4.1: VH2002 の仕様

視野角	水平 51 度, 垂直 37
解像度	VGA(640x480XRGB)
焦点距離	-0.5D(2m)
レリーフ	20cm (眼鏡装着した状態で使用可)
瞳径	12mm

指示者および作業用 PC には, それぞれビデオキャプチャボードが 2 台搭載されており, HMD の左右のカメラからのビデオ出力がこのボードでキャプチャされ, CG と合成されて HMD に表示される. PC の仕様は, CPU: Pentium4 3.4GHz (作業用 PC), Pentium4 2.4GHz (指示者用 PC), RAM: 1GB, グラフィックスボード: nVIDIA GeForce4, OS: Red Hat Linux9 である

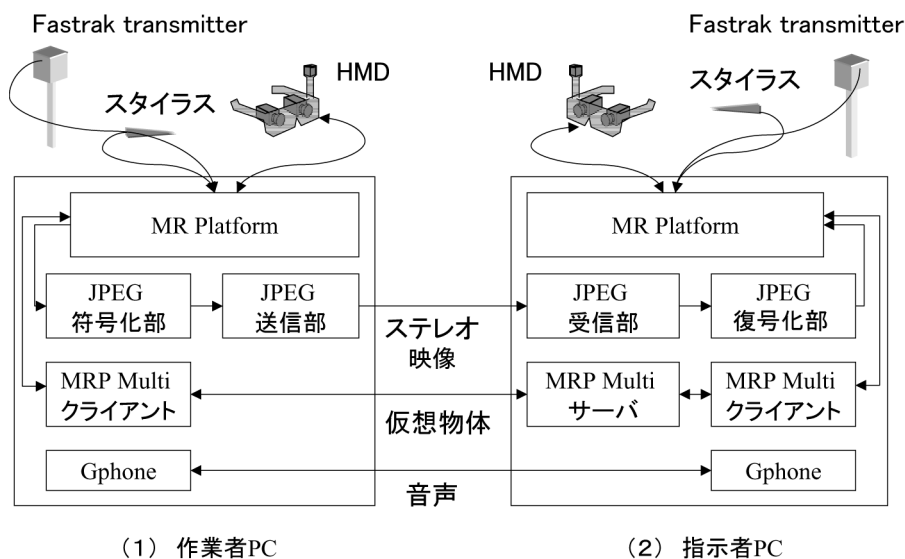


図 4.5: ハードウェアとソフトウェア構成

### 4.3.3 ソフトウェア構成

図 4.5 (1) に示すように作業用 PC には、MR 画像のエンコーダおよびトランスミッタ、仮想物体共有のための MRP Multi クライアント、および音声通信のためのフリーソフトである Gphone モジュール [24] が実装されている。

一方図 4.5 (2) の指示者用 PC は、MR 映像を受信するレシーバと復号化を行なうデコーダ、表示を行なうビューア、共有仮想物体管理のための MRP Multi サーバ、指示者用の MRP Multi クライアント、および Gphone モジュールから構成される。

MR 映像の符号化・伝送処理では、PC のフレームバッファ上にある左右両目用 MR 画像フレームを取得し、両目画像フレームを 1 枚の画像として圧縮する。コーデックとしてフリーソフトの Independent JPEG [40] を利用しており、作業用 PC から指示者 PC へ TCP/IP で伝送を行なっている。

仮想物体の共有については、キヤノン社製の MRP Multi の機能を利用している。仮想物体のシーングラフは、それぞれの MRP Multi クライアントに保持されており、シーングラフ変更の際に、MRP Multi サーバを介して両方のクライアントで更新される。また MRP Multi サーバは、操作権管理も行なっている。

## 4.4 ポインティング機能に関する評価

### 4.4.1 評価実験条件

本システムの特徴である作業用・指示者視点一致の没入型 MR 環境において、実装した指示者ポインティング機能が有効に働くかを評価する評価実験 S1～S3 を行なった。実験条件は以下のとおりである。指示者サイトと作業用サイトを同じ部屋の中に設け、指示者用 PC と作業用 PC は、100BaseT の LAN で接続されている。音声コミュニケーションは Gphone を用いずに肉声で行なった。指示者用実験に参加した被験者はいずれも 20 才代で、男性 9 名、女性 2 名の計 11 名である。

実験 S1, S2 では、指示者が遠隔の作業用空間の仮想物体を、意図通りにポインティングできるかを調べる。実験 S1 では、作業者が HMD を装着した状態で、指示者が作業用空間の仮想物体をポインティングする時間を計測し、実験 S2 では、作業用側の HMD を固定して、作業用空間の仮想物体をポインティングする時間を計測する。ポインティング機能評価で共通に用いる仮想物体は、図 4.6 に示すように 3cm × 3cm のタイルが表面に貼られている一辺が 15cm の立方体であり、被験者から 3 面が見えるような位置に配置されている。

被験者は指示者サイトに立ち、立方体表面にあるタイルを指定された順番に 5 点ポイントにて指して、指定されたタイルにポイントの先端が接触したと判断した時点で、スタイ

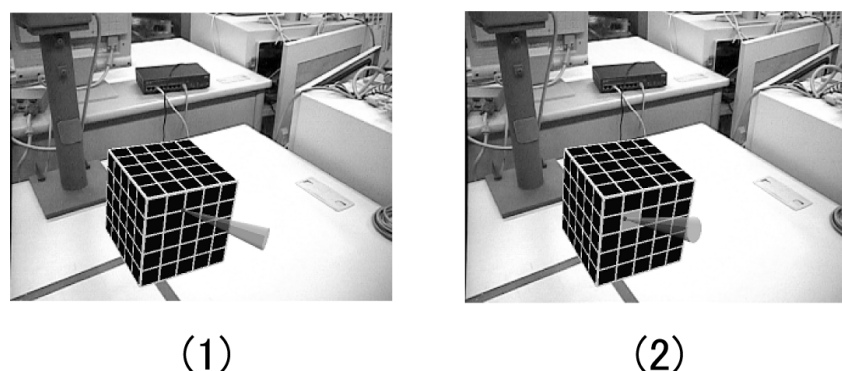


図 4.6: ポインティング実験画面

ラスボタンを押下する。この時点で、ポインタ先端とタイルの接触判定が行われて、接触している場合を正解とする。

タイルの厚さ方向前後 0.5cm をタイル領域とし、ポインタ先端から半径 0.3cm の球をポインタ領域として、両方の領域が重なった場合に接触していると判定した。正解の場合、図 4.6 (2) のようにタイルの色を変化させ、終了を被験者に知らせる。個々の実験条件を以下に示す。

- 【実験 S1】

指示者以外の被験者の 1 人を作業者として割当て、作業者用 HMD を装着してもらう。作業者に無理に頭を固定することなく自然な状態で指示者のポインティングを観察するように指示した。音声でのコミュニケーションは禁止した。

- 【実験 S2】

作業者用 HMD を実験 S1 の作業者の頭と同じような位置に三脚で固定して、被験者が指示者サイトからポインティングを行なう。実験 1, 2 における評価尺度は、ポインティング時間である。

- 【実験 S3】

実験 S3 は、指示者がポインティングした位置を、作業者が正確に特定できるかの実験である。2 人の被験者のうち 1 人を指示者、他の 1 人を作業者とする。指示者は上述した立方体表面にあるタイルをポインティングした時点で、作業者にタイル番号を答えるように音声で指示を出す。作業者はポインタで示されたタイル番号を音声で回答する。このとき、作業者は視点を移動させてポインタを確認しても良い。この実験では、仮想物体へのポインティングの他、同じ大きさのタイルが描かれた実

物の立方体へのポインティングも行なう。評価尺度は指示者が指定した位置と、作業者が回答した位置とが一致する率（正解率）である。

#### 4.4.2 実験結果

##### システム性能に関する計測結果

4.3.2 で述べたシステム構成で、図 4.6 の仮想立方体を表示させた時のフレームレート、および遅延時間を実測したところ、前者については 6.1～6.2 フレーム/秒、後者は作業者空間で 0.5 秒、指示者空間で約 1 秒であった。指示者空間と作業者空間の遅延時間の差は、作業者 PC での MR 画像生成・表示処理、画像圧縮・伝送処理、および指示者 PC での伸長・表示処理の合計時間である

##### ユーザの頭部運動に関する計測結果

作業者がポインタを自然な状態で観察する際の頭部の運動データを計測した結果を以下に示す。この実験は評価実験 1～3 とは別に、5 名の被験者を用いて行なわれた。

最初に被験者に約 10 秒の間、意識して頭を動かさない状態（静止時）をとらせ、その後評価実験 1 と同じポインティング動作を自然な状態（観察時）で観察させた。サンプリング周波数はフレームレートと同じ 6.2Hz である。

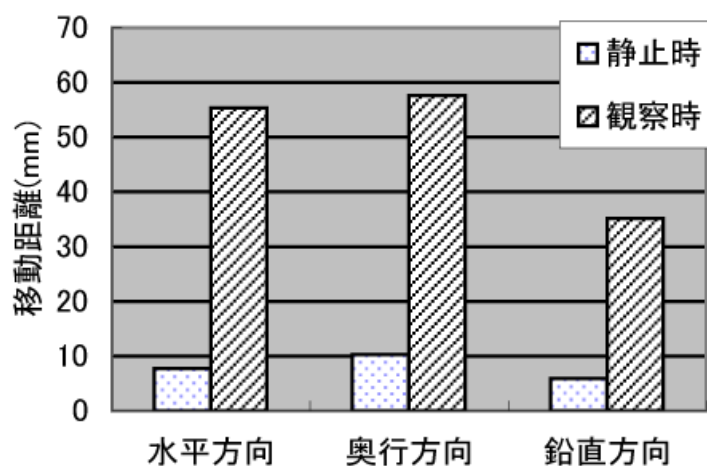


図 4.7: 頭部運動範囲

図 4.7 に被験者 5 人の頭部移動範囲の平均値を示す。静止時には体に向かって水平，奥行，鉛直いずれの方向も 10mm 以下であるのに対して，観察時には水平，奥行方向で 50mm 以上頭部が移動している。

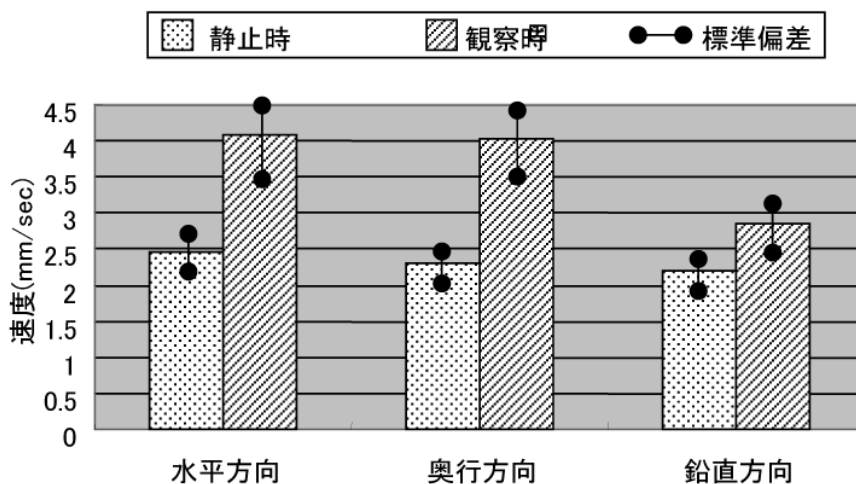


図 4.8: 頭部運動速度 (並進成分)

また頭部の移動速度を並進成分と回転成分に分けて図 4.8，図 4.9 にそれぞれ示す。速度はサンプリング時点での位置の微分値 (差分値) の絶対値のデータを集計したものである。並進成分では，静止時にはどの方向も 2mm ~ 2.5mm/sec であるのに対して，観察時には水平・奥行方向で 4mm/sec に増加している。回転成分については，静止状態では，どの軸方向に関しても 0.5 度/sec 程度で安定しているのに対して，観察時はピッチ角 (頭の上下の傾きに相当) で，約 1.4 度/sec と大きな値を示している。観察時のピーク速度 (5 人の被験者のデータでの最大値) は，並進成分の水平，奥行，鉛直方向にそれぞれ 219.5mm/sec，137.8mm/sec，112.1mm/sec，回転成分のヨー，ピッチ，ロールの順に 22.8 度/sec，41.7 度/sec，27.3 度/sec であり，回転成分については標準偏差の値も大きいことから，速度の大きな動きがあることが観測された。

#### ポインティング動作に関する計測結果

評価実験 S1，S2 において，1 つのタイルをポインティングするのに要した平均時間を図 4.10 に示した。

実験 1 では，ポインティングの平均時間は 17.1 秒，実験 2 では 16.1 秒であった。被験者ごとの標準偏差は，それぞれ 7.9 秒，5.8 秒であった。実験 1 と実験 2 の平均時間の差は 1 秒であるが，この値が統計的に有意差があるかを検定する。まず両条件でのデータの分散  $\sigma_1$   $\sigma_2$

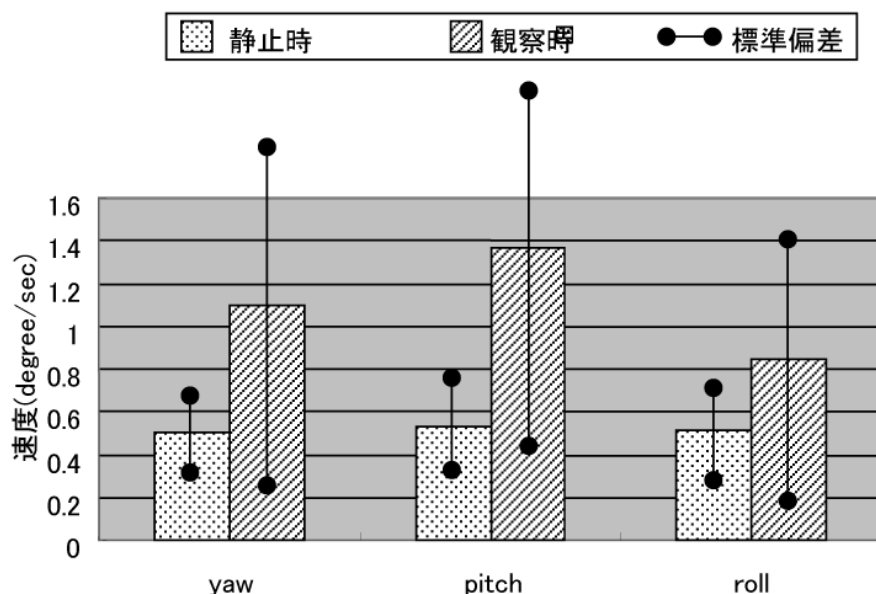


図 4.9: 頭部運動速度 (回転成分)

を用いて、等分散の検定を行なったところ、 $F$  値  $F^* = 1.86$  で、 $F^* < F(9, 9; 0.05) = 3.18$  となり、分散は等しいとみなせるので、 $t$  検定により両分布の平均値の差を見る。  $T$  値  $T^* = 0.29$  で、 $T^* < T(18, 0.05) = 1.73$  となり、平均値に差は認められなかった。

次に、実験 S3 の結果を図 4.11 に示す。指示者がポインティングするまでの平均時間は、仮想タイルの場合 16.7 秒、実物体のタイルの場合 16.4 秒、指示者がポインティングしてから作業者が回答するまでの回答時間は、それぞれ 3.7 秒、4.4 秒であった。ポインティングに要する時間は、実験 1, 2 とほとんど変わらなかった。またポインティング時間と回答時間を合計した全体のするまでのポインティング位置特定時間は、実物体へのポインティングの方が仮想物体へのポインティングより若干長かった。

また指示者のポインティング位置を作業者がどの程度正確に特定できたかに関しては、指示と異なるタイル名を回答した回数が、仮想物体では総ポインティング回数 55 回に対して 2 回 (正解率 96.4%)、実物体では総ポインティング回数 50 回に対して 4 回 (正解率 92%) となった。仮想物体へのポインティングと実物体へのポインティングを比較して、ポインタの位置特定時間と正解率に差があったのは、実物体と実物体に重畳された透明な CG に、若干ずれがあったためと考えられる。

ポインティング機能評価実験の際、指示者になった被験者には、見ている画像が自分の視点でないことを説明し、動作に慣れてもらうため 1 分程度システムを使ってもらってから実験を開始した。時々、自分が頭を動かしても視点が変わらないということを忘れて頭を左右に動かす場面も見られたが、タスクへの大きな影響はなかった。

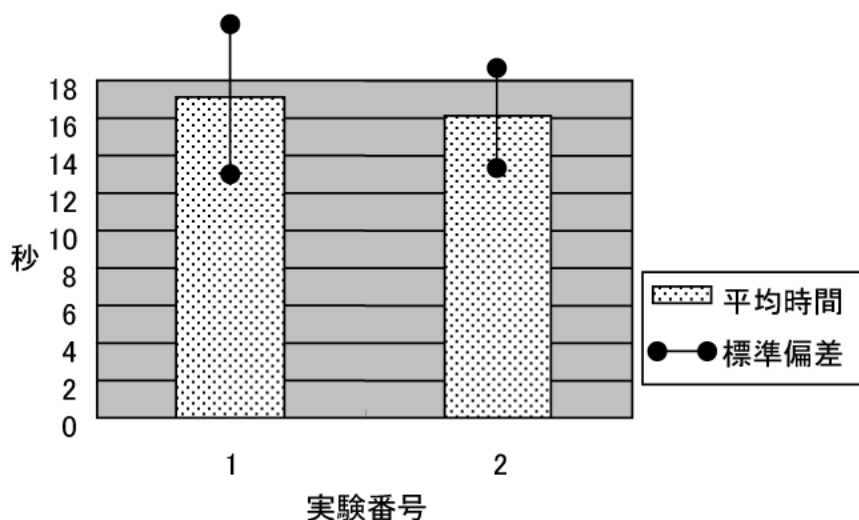


図 4.10: ポインティング時間

作業者の頭が動くと、指示者がポインタを動かさなくともポインタが移動するが、作業者の頭が静止した時点で、指示者はすぐポインティング動作を開始できていた。またポインタの表示位置に対して、不自然さの指摘はなかった。

## 4.5 組立て作業指示に関する評価

### 4.5.1 評価実験条件

この評価実験 S4 では、被験者は作業者として、指示者による仮想物体を用いた作業手順の提示を参照しながら、形状の異なる 7 つの 3D ブロック部品の組立作業を行なう。

指示者は、仮想の部品を 1 個ずつスタイラスでピックアップし、部品の形状や向きを作業者に確認させ、取付位置へ部品を配置する。作業者は指示者の例示動作が終わった時点で、同様の操作を実物体で行なう。この動作を組立終了まで繰り返す。指示者が部品を取出してから、取付位置まで移動し取付方向を作業者に提示して作業者に作業を促す時点までを例示時間とする。この時点から作業者が作業を終了するまでの時間を作業時間とする。

この実験では、指示者は MR での組立作業に慣れているエキスパート 3 名が交代で行なった。作業者は視点を自由に変更可能で、指示者から作業者の視点を指示することもある。両者は必要に応じて音声コミュニケーションを行なう。



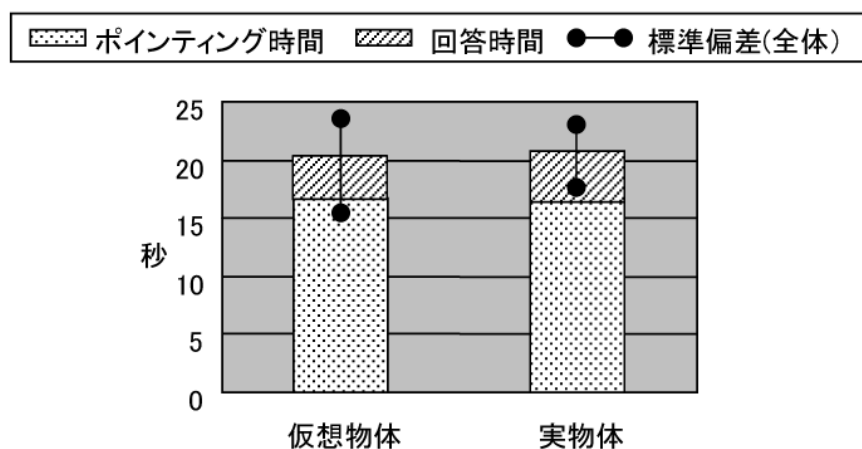


図 4.11: ポインティング位置特定時間

組立てるモデルは、形状の複雑な怪獣と形状が単純な立方体とした。被験者 8 名を 2 組に分け、4 名ずつそれぞれのモデルの組立を行なった。7 つの部品は、6cm 四方の立方体ブロックが異なる形状で 3 個または 4 個組み合された物である。仮想物体は実物体の 50% のサイズに縮小表示される。図 4.12 に評価実験 4 の画面例を示す。画面右側の仮想物体での例示動作を参照しながら、画面左側で作業者がブロック部品を取り付けて、怪獣を組立てている場面である。

比較実験として、対面環境において実物体を用いた作業手順例示による組立作業時間の計測を行なった。この実験では、指示者と作業者が机の前に並んで座り、指示者は実物体のブロック部品（上述部品の約 6 分の 1 の大きさ）で作業者に手順を示す。作業者はこの手順を確認して、上述ブロック部品を組立てる。5 名の被験者を作業者として実験を行なった。

#### 4.5.2 組立て作業に関する計測結果

評価実験 S4 の結果を図 4.13 に示す。指示者による例示の平均時間は、怪獣の場合 16.6 秒、立方体の場合 14.3 秒であった。また作業者の作業時間は、前者で 6.3 秒、後方で 4.3 秒であり、複雑な形状の方が例示時間、作業時間ともに長かった。評価実験 4 における作業者の作業誤りは全くなかった。これを、対面環境での実物体例示による立方体組立実験の結果である例示時間 5.3 秒、作業時間 2.6 秒と比較してみると、例示時間では、2.7 倍、作業時間で 1.7 倍の時間を要している。

仮想物体による動作例示に要する時間に関しては、仮想物体を何の拘束もない実空間上

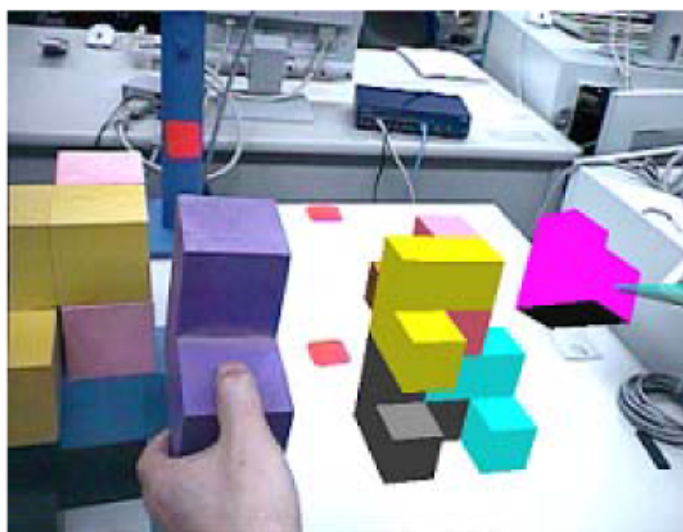


図 4.12: 組立て作業実験画面

で、6 自由度の動きを持たせた状態で所定の姿勢にすることは習熟者でもなかなか容易ではなく、結果的に 15 秒程度の時間を要している。遠隔 MR 環境での実物体の組立は、システムの遅延、フレームレートの低さ、HMD による視野の制限、解像度の低下による実物体操作の難しさなどが影響して、対面環境と比較して時間を要していると考えられる。

## 4.6 1 空間非対称型遠隔 MR システムの評価と考察

指示者視点が、作業者の動きにより制限されるという問題点を検証するために行なった評価実験の結果、作業者 HMD を固定した場合と、作業者が HMD を装着して自然な状態で対象物を観察している場合とで、ポインティング時間に統計的な有意差はなかった。実験 S1 において、指示者自身の意思に関わりなく視点が移動するという条件を考慮すると、ポインティング時間に差がないという事実は予想外であった。この理由として、第 1 に自然に対象物体を見ている状態では図 4.8, 4.9 に示すように作業者の頭の揺れがそう大きくなかったということが挙げられる。また第 2 の理由として、指示者がポインティングし易い視点位置に作業者が移動するなどの行動が実験中に見られたことから、作業者が指示者とのコラボレーションを意識する状況が生じたことが考えられる。

評価実験中、作業者・指示者となった被験者は 10 分～20 分連続して HMD を装着していたが、HMD 映像を見続けることによる酔いは報告されなかった。HMD を装着したユーザの酔いについて、(2D) とテレビモニタを用いて同じテレビゲームを行なった実験では、ほとんどの酔いの指標で HMD の方がテレビモニタを上回ったという結果が報告されてお

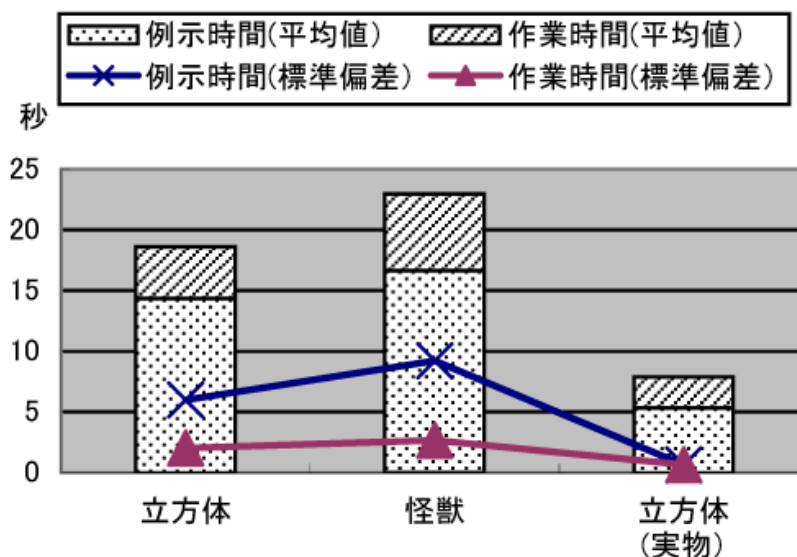


図 4.13: ポインティング実験画面

り [61], この原因として, HMD は視野が完全に遮断されていることと, 頭が動いても映像の位置が変わらないことによる視覚と平行覚の矛盾の可能性が指摘されている。本実験では, 頭の動きが大きくなかったこと, フレームレートが小さかったことなどが考えられるが, より多様な条件で実験を行ない, 酔いに関する質問表 (例えば [108]) による主観評価や生理指標を用いるなど, 酔いに関するより客観的なデータをもとに判断する必要がある。

一方評価実験全体を通して, ポインティングに要する絶対的な時間は 15 秒前後であり, 実用的とは言えない。これは指示者環境の遅延時間が約 1 秒とかなり大きく, フレームレートも約 6 フレーム/秒という条件下で, ポインタを所定の位置姿勢に制御するのが困難であったという要因が大きい。今後ソフトウェアの改良やハードウェアの性能向上により, これらが改善されればポインティングに要する時間も減少すると考えられる。

ただしこれらの条件が大きく変われば, 作業者の頭の動きがポインティング時間に影響を及ぼさなかったという本実験の結論や, 酔いの問題について, 再検証の必要があると考える。

作業者視点を基準とした指示者ポインタ表示について, 本アルゴリズムによるポインタ表示は極めて自然であったと言える。作業者が動いて指示者の視野画像が変更されても,

指示者視点とスタイラスの相対位置関係が保存されるので、作業者が静止した時点で被験者は戸惑うことなくすぐ次のポインティングが可能になっていた。

仮想物体による動作手順例示に関しては、作業誤りが発生しなかったことにより、作業手順を示す有力な手段であることが確認された。仮想物体操作による手順の例示のためのUIについて、ブロック組立のように定置する方向が面に拘束されるような場合、6自由度の動きは必要ないので、移動の方向に平面拘束を設けるなどUIの工夫により、仮想物体例示時間は大きく短縮できるものと思われる。

## 4.7 まとめ

本章では1空間を利用した非対称遠隔MRモデルとして、指示者カメラ座標系  $C_A$  と作業者カメラ座標系  $C_U$  とを一致させる  $C_A = C_U$  という Relation を導入することにより、指示者が作業者の視点から作業者空間を共有して作業支援するシステムを実現し、ポインティング機能と仮想物体による動作例示操作機能について、その評価を行なった。

本モデルでは、WYSIWISのシームレスな3D環境を提供できるメリットはあるものの、指示者の視点を作業者の視点に無理に合わせることによる副作用（例えば、自分の意志で視点変更できない点、作業者の頭の動きによるポインティングが困難な点、酔いが発生する点）が懸念された。

評価実験の結果、指示者はポインティング機能、仮想物体による動作例示機能を用いて作業支援可能なことが示された。また作業者の頭部の動きの影響に関しては、作業者視点を固定した場合と比較して、作業者の頭が動いた場合のポインティング時間の差は確認できなかった。また評価実験の条件下では、HMD装着による映像酔いの発生はなかった。

一方ポインティング時間、仮想物体操作時間については実用的な水準とは言えない。これはシステムの遅延が動作時間に大きな影響を与えていると推測されるので、遅延時間を減少することができればこれらの時間も減少すると予想される。また酔いの問題に関しては、さらなる評価を行う必要がある。

モデル全体として、WYSIWIS、アウェアネス、シームレスネスについての評価は以下のようにまとめられる。

- WYSIWISに関する評価

指示者と作業者との視点を完全に一致させることを特徴とあり、常に相手の観察状態が把握できるが、ダイナミックに変化する作業の支援において常にWYSIWIS状態が最適とは限らないため、作業状況に応じて、指示者に対する映像表示を変えるなどのシステムの改良を行なう必要がある。

- アウェアネスに関する評価

指示者は、作業者の視野映像とそれに写る作業者身体の一部の情報、作業者にとつ

ては、指示者のポインタの動きのみというきわめて限られた情報しか得られない状況であった。しかしながら、これらの限られた情報をもとに評価実験タスク遂行には致命的な問題は見られなかった。またお互いのポインタの動きに対する違和感は報告されなかった。

- シームレスネスに関する評価

原則的には、作業員・指示者ともにシームレスな空間が実現されているといえるが、より詳細には、以下のようなシームの存在が考えられた。

- 作業員にとっては、別空間の動きである指示者のポインタ表現の継ぎ目
- 指示者にとっては、作業員視点からの自分のポインタ動作をする、また自分の頭を動かしても表示が変わらないという継ぎ目

上述したように前者の影響は軽微であったが、後者の影響についてはさらなる評価が必要である。



# 第5章 2空間を利用した対称型遠隔MR 作業支援モデル





## 5.1 はじめに

本章では，MR を用いた遠隔共同作業支援モデルのうち，図 5.1 に示す 2 空間を用いる対称遠隔 MR について述べる．

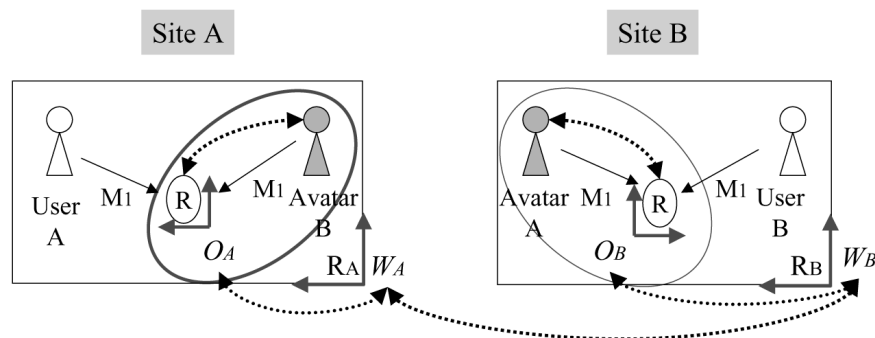


図 5.1: 2 空間を用いる対称遠隔 MR モデル

まず，ユーザの存在する地点に基準となる床や机を基準オブジェクトとして世界座標を設定し，同等な作業空間を作る．それぞれのユーザは，作業対象となるポータブルなタンジブルレプリカを持ち，ポインタとペンを兼ねたスタイラスでレプリカにインタラクションする．このモデルでは，

$$\begin{aligned} \text{Relation}RA &\gg \text{Relation}RA' \\ \text{Relation}RB &\gg \text{Relation}RB' \end{aligned}$$

となるように作業相手のノンバーバル情報はすべてレプリカに対して相対表示される．すなわち，レプリカを基準とした位置に表示される仮想情報で相手の状態をアウェアする．

またユーザが独自の視点を設定できるため，各ユーザのビューは完全な WYSIWIS ではない．しかしながら現実空間で 3 次元オブジェクトを用いて共同作業を行うにあたって，ユーザは見易い位置からオブジェクトを観察しながら作業を進めることが普通である．

3D CAD システムで，3 次元オブジェクトを遠隔で共有する例が見られるが，これらのシステムでも完全な WYSIWIS は使い勝手を損ねるため，必要な場合に視点を一致させるような方法が提案されている [79]．

以下このモデルを用いて作業支援を行うために，レプリカに対するポインティング機能および，レプリカ上にドローイングを行って，デザインを例示できる機能を持たせる．ノンバーバル情報として遠隔地に表示されるユーザの身体情報は，スタイラスペンを CG で表示したポインタのみである．

次節で，機能・構成要件を詳しく説明し，5.3 節で実装したシステムを用いて，ポインティング動作の評価，5.4 節で本モデルの特殊な形態であるレプリカが基準オブジェクト

に対して固定されている固定環境とのポインティング動作の比較, 5.5 で, ドローイング機能の評価を行って, 本モデルの有効性を議論する.

## 5.2 2空間を用いる対称型遠隔MRシステムの機能・構成要件

### 5.2.1 タンジブルレプリカの物体座標系

MRシステムを遠隔に拡張する場合, 図 5.2 に示すように A 地点, B 地点それぞれに世界座標系  $W_A, W_B$  が設定される. 共有物体はそれぞれの座標系で同じ座標値をとるようにし, 物体の動きなどの状態変更は即座に両地点に反映されるように管理される.

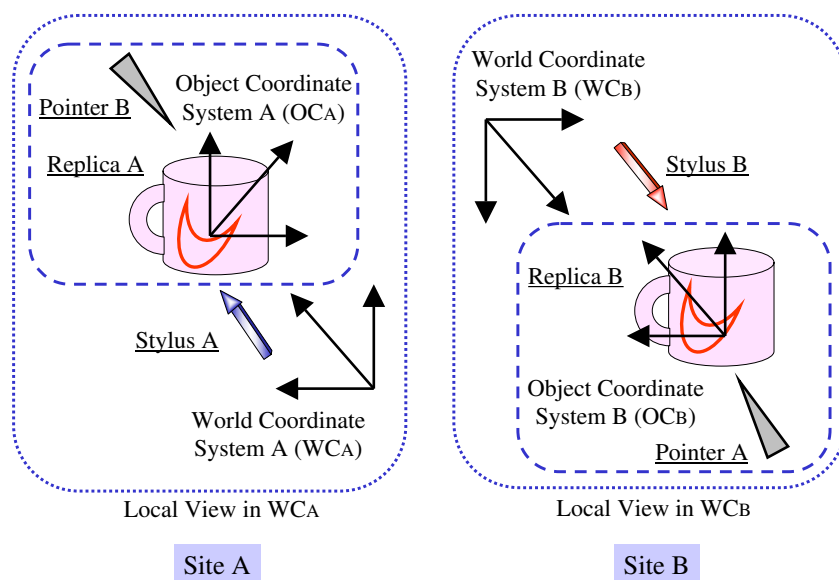


図 5.2: 世界座標系と物体座標系

で述べたようなシステムを実現するために本研究では世界座標系に加えて, タンジブルレプリカに対する物体座標系を用いる. すなわち両地点でのレプリカの物体座標系  $O_A, O_B$  を設け, レプリカに重畳すべき仮想物体および作業者のペン (あるいはポインタ) 位置をこの座標系で表現して双方で共有すればよい. この考え方は特に手に持って動かせる (すなわち世界座標系で移動する) ポータブルな物体で有効である. 固定されたレプリカを共有する場合は, 世界座標系のみで管理できる.

### 5.2.2 座標変換

作業対象物体であるレプリカに重畳される仮想物体は、レプリカを基準とした物体座標系で表示される。このためレプリカを回転・並行移動させると、それに伴い仮想物体も常に相対位置関係を保ちながら同じように回転・平行移動する。この仮想物体の情報は遠隔サイトの作業者にも共有される必要があるため、仮想物体のインタラクション結果は物体座標の値で遠隔地に伝えられ、両サイト間で同期が取られ、遠隔地のレプリカに対して同じ相対位置関係で表示される。

図 5.2 に示されるように、サイト A, B では、各々に設定された世界座標系  $W_A, W_B$  をもとに仮想物体が表示されているが、レプリカに重畳される共有仮想物体の情報については、レプリカの物体座標から世界座標へ変換され表示される。物体座標系と世界座標系との変換は以下のように行なわれる。

図 5.2 において、A 地点における物体座標系から世界座標系への変換はモデリング変換行列  $M_A$  を用いて、

$$W_A(Object) = M_A O_A(Object)$$

で表わされる。ここで  $O_A(Object)$  は A 地点における物体座標系で表わされる仮想物体で、

$$O_A(Object) = [x, y, z, 1]^t$$

の同次行列で示される。同様に  $W_A(Object)$  は、仮想物体の A 地点の世界座標系での表現である。 $M_A$  は  $4 \times 4$  の同次行列である。

A 地点, B 地点のローカルサイトでは、それぞれの世界座標系をもとに仮想物体を管理しているので、上記のモデリング行列  $M_A$  の逆行列を用いて、

$$O_A(Stylus) = M_A^{-1} W_A(Stylus)$$

により A 地点の仮想物体を物体座標系  $O_A$  へ変換する。これが B 地点の物体座標系の値に等しいので、

$$O_B(Pointer) = O_A(Stylus)$$

となる。次に B 地点でこの仮想物体の世界座標の位置  $S_{WB}$  は、B 地点でのモデリング変換行列  $M_B$  を用いて

$$W_B(Pointer) = M_B O_B(Pointer)$$

で計算され、この座標をもとに表示される。

表 5.1: 仮想物体管理テーブル

仮想物体 ID
仮想物体名
フラグ
変化の種類・度合い

### 5.2.3 共有仮想物体同期管理

A 地点, B 地点のユーザは各々独立にレプリカを移動させて観察することができる。このときレプリカに重畳されている仮想物体の世界座標系での位置は変化するが, レプリカとの相対位置は変化しないので, 物体座標系での位置は更新されない。

一方インタラクションにより, レプリカと仮想物体の相対位置関係が変化した場合には, 遠隔地の仮想物体の位置も更新されて表示されなければならない。そのために表 1 に示すような仮想物体管理テーブルに, 状態が変化する仮想物体を登録しておく。

状態が変化した場合には, テーブル中のフラグを立て同時に変化の種類とその度合いを記録する。システムの定期的な更新処理の際に, 稼働物体の ID と変化の種類・度合いを遠隔サイトへ送信してフラグをリセットする。受信したサイトでは ID で指定された仮想物体を変化の種類・度合いの情報をもとに更新する。この処理を各サイトで常に行なって相互に送受信することで共有仮想物体の同期を管理している。

### 5.2.4 レプリカへの仮想物体重畳表示

ユーザがスタイラスペンをレプリカに接触させながら表面上を移動させると, レプリカ上にドローイングが表示される。このスタイラス上にはボタンがついており, ユーザはこのボタンを押すことでドローイングに用いる色を変えることができる。ペン先には, 図 5.3 に示すように現在選択されている色が仮想物体として表示させ, ユーザが自分が使用している色を認識できるようにしている。

レプリカへの仮想物体の重畳表示に当たっては, ユーザの視点から前後関係が計算され, 矛盾なく見え隠れが表示されなければならない。そのためにレプリカの形状をあらかじめ計測してその 3 次元形状モデルを持っておく。計測された実物体の表面を  $1mm^2$  のピクセル単位で生成した仮想物体で覆う。このピクセルは十分小さいので, 実物体の形状は平面・曲面を問わずにピクセルで表現することができる。このピクセルで構成される仮想物体には始めは色をつけずに透明にしておくことで, ユーザはレプリカのみが存在しているように見える。

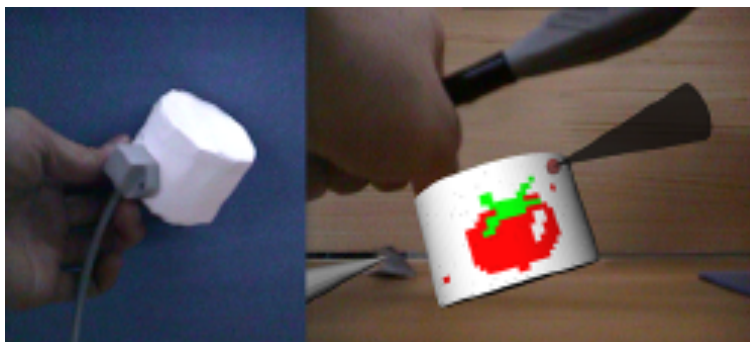


図 5.3: 円筒物体へのドロ잉

ピクセルの色情報は，図 5.4 に示すような仮想物体シーングラフの切替ノードの下に，あらかじめ使用する色を登録しておく．仮想物体とスタイラスペン先が接触すると交わったピクセルのノードが検出され，切替ノードが検索されてペン先の ID の色と一致するカラーノードの ID が代わりに用いられることで，ペン先の色がドロ잉される．

一方のユーザが色を変える操作を行ったときに，遠隔地の相手のユーザにも変更情報を反映させなければならない．そのために図 5.4 の管理テーブルのフラグをセットし，色が変わったピクセルの ID と色の ID を遠隔地に送信する．この管理テーブルは，表 5.2.3 と同じ物である．遠隔地のサイトでは，管理テーブルのフラグが立っているのを検出すると，ピクセル ID のノードを検索して，そのノードの色を受信した色の ID に変更してフラグをリセットする．

### 5.2.5 共有仮想物体への制御権管理

共有仮想物体は複数のユーザから同時に操作される可能性があるので，すべての仮想物体に操作権を設け以下 4 つの状態のうちいずれかをとるようにする．

1. 誰も操作できない状態
2. ユーザ A のみが操作できる状態
3. ユーザ B のみが操作できる状態
4. どちらのユーザも操作できる状態

これらの状態を遷移させて適当な共有仮想物体の管理を行なう．ペンデバイスと仮想物体の接触はリアルタイムで検知できるので，例えばユーザ A は，ペンデバイスで仮想物体に接触し，ペンデバイスのボタンを押下して仮想物体を把持し，所望の位置まで移動して，

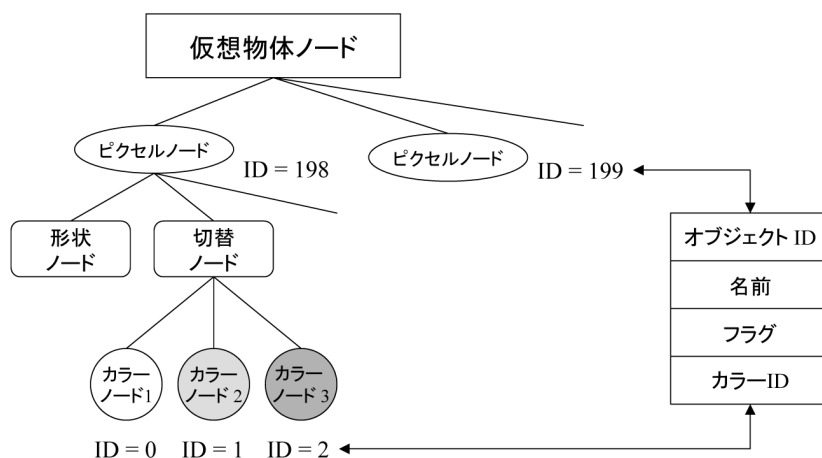


図 5.4: 仮想物体シーングラフ

再度のボタン押下で仮想物体をリリースする動作を行なえる。この動作に伴う各々のボタン押下のタイミングで、制御権の状態は(4) (2) (4)と遷移する。状態(2)の間、ユーザBはその仮想物体に対して操作を行なうことはできない。A, Bそれぞれが所有するポインタは、常に所有者のみが操作できる状態になっている(それぞれ状態(2)(3)に対応)。なお本論文のシステムでは、このポインタの制御権のみが実装されている。

### 5.2.6 ハードウェア・ソフトウェア構成

システムのハードウェア構成は、タンジブルレプリカに Fastrak® のレシーバが装着されている点を除けば、4.3.2 と同様である。

ソフトウェアモジュールについては、地点ごとの仮想物体の管理は MR Platform で行ない、共有仮想物体の座標変換処理および同期管理は、仮想物体管理部において表 5.2.3 の仮想物体管理テーブルを用いて行っている。

これらを図 5.5 に示す。この図から分かるように A 地点と B 地点では対称なシステム構成となっている。

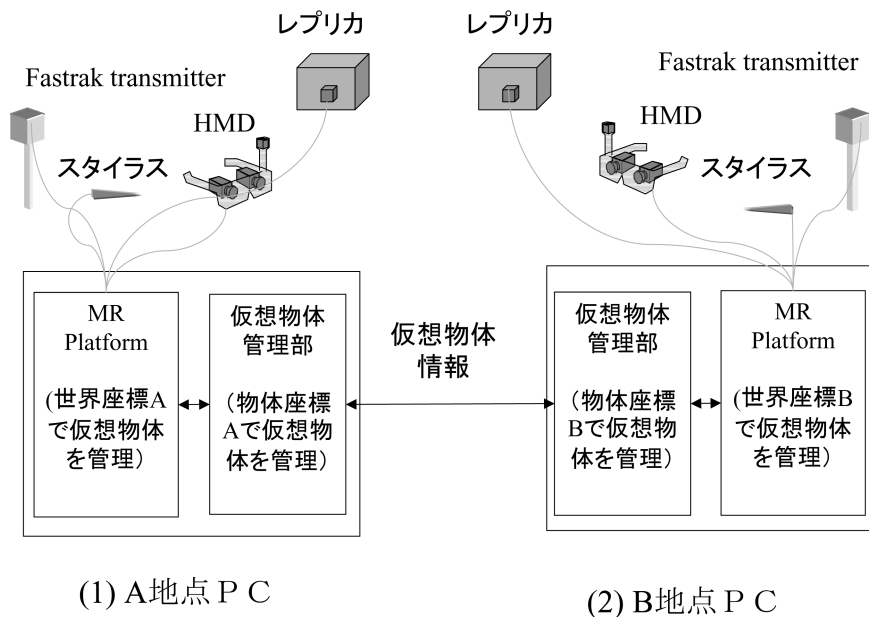


図 5.5: 2 空間を用いた対称型遠隔 MR システム構成

## 5.3 ポインティング動作の評価

### 5.3.1 ポインティング動作評価実験

タンジブルレプリカを用いたシステムでは、相手側のポインタの動きは、相手側のスタイラスとレプリカとの相対位置関係の変化と自分自身のレプリカの移動とが合成されて表示される。このような条件下で、ユーザがポインティングした位置が相手に正確に伝わるかという点を調べる。実験 D1 では 2 人の被験者の役割を固定し、一方向から指示者がポインティングを行い回答者が答えるまでの時間の計測を行い、実験 D2 では指示者・回答者が、1 回ごとに交互にポインティング動作を行なう双方向のタスクでの上記時間の測定を行い、ポインティング性能を評価する。また実験 D3 では、比較データとして、ローカル環境において HMD 非装着での実物体へのポインティング動作時間を計測する。

実験に参加した被験者はいずれも 20 才代前半の男性 10 名、女性 2 名の合計 12 名で、2 人の被験者がペアとなり HMD を装着し、ポインティングを行なう指示者とポイントされた点を答える回答者となってもらった。指示者となった被験者が片方の手に持った立方体のタイルをもう片方の手で持ったスタイラスでポイントし、回答者となった被験者も同じように立方体を持ち、指されたタイルの番号を読む。なお指示者システム・回答者システムは同室内に配置して、会話は肉声にて行ない、お互いの空間が見えないように仕切り

を設置した。

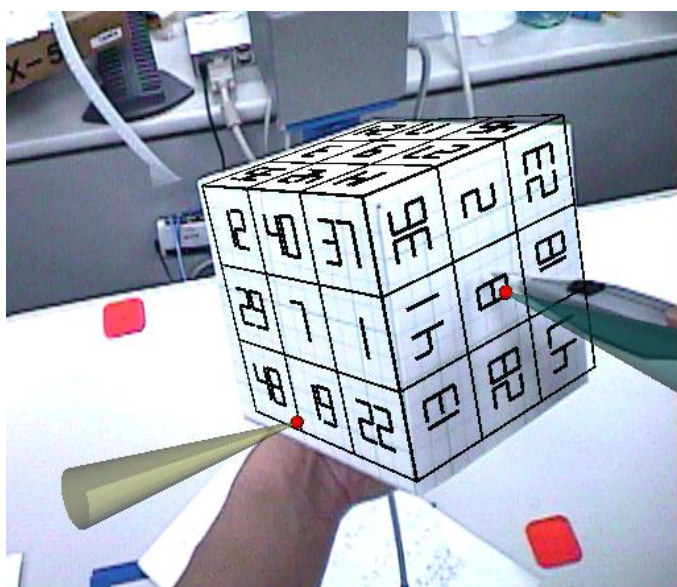


図 5.6: ポインティング評価実験画面

評価実験に用いるタンジブルレプリカは、図 5.6 に示すような 1 辺 12cm の立方体で、5 面それぞれが  $3 \times 3$  のメッシュ (1 辺 4cm の正方形) に分割され、その中に 01 から 45 までの数字がランダムに CG で重畳されている。立方体の 5 面をポインティングすることにより特定の軸方向に偏らないポインタの動きを実現するようにした。

#### 実験 D-1: HMD 装着リモート MR 環境 (一方向ポインティング)

上述した立方体を用いて指示者が HMD を着用して任意の 5 点を普通の速さでポイントし、HMD を着用した回答者がポイント位置を回答するまでの時間を測定する。

指示者には、ポインティングを行う順番は用意せずに指示者に自由に選択させる。このとき同じ面のタイルを続けて指さないこと、なるべく満遍なく面を指すことに留意してもらった。ポイントするたびに「はい」と言ってもらい、回答者にそのタイルの番号を答えてもらった。回答が得られたら、指示者は次のポインティング動作を行なうというサイクルを 5 回繰り返す。

#### 実験 D-2: HMD 装着リモート MR 実環境 (双方向ポインティング)

実験条件は実験 1-1 と同じであるが、指示者が数字を指し示し、回答者から回答を得た段階で役割を交代し、次に回答者が指示者、指示者が回答者となってポインティングを行なって回答を得る。この動作を 5 回繰り返して、ペアごとに時間を計測した。



実験 D-1, D-2 では, 回答者の視点映像が映ったモニタをビデオ撮影し, 被験者のペアごとに, 指示者がポイントして「はい」と言うまでのポインティング時間, および「はい」と言ってから回答者が数字を読むまでの応答時間, および正解率を計測した. 実験 D-1, D-2 の指示者の様子を図 5.7 に示す.



図 5.7: ポインティング評価実験での被験者の様子

### 実験 D-3 : HMD 非装着ローカル実環境

比較のための実験として, 実物体のポインティング時間と応答時間も計測する. 図 5.6 と同じ大きさの立方体にマジックで, 上の評価システムと同じ配置に数字を書いたものを用意し, HMD を装着せずに指示者と回答者が同じ空間 (ローカル実環境) に存在する状況で上の手順を行った.

指示者は着席した状態で実物の立方体を片手に持ち, もう一方の手にペンを持ってポインティングしていく. 回答者は指示者のすぐ後ろに立って, ポイントされたタイルの番号を読んでもらった. このような条件で実験 D-1 と同様の試行回数を行なって, ポインティング時間と応答時間を計測した.

### 5.3.2 ポインティング動作評価実験結果

5.2.6 で述べたシステム構成で, 実験中のフレームレートの平均は 26.3 フレーム / 秒, 遅延は画面から目視できなかった. 図 5.8 に 1 点あたりのポインティング時間および応答

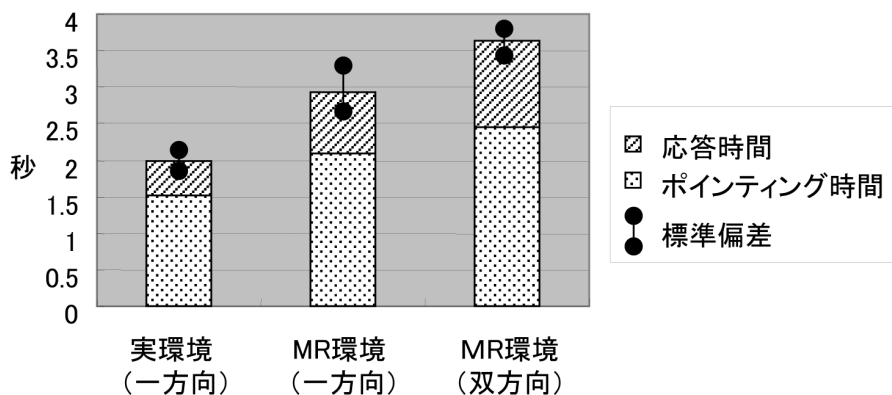


図 5.8: 実環境と MR 環境でのポインティング動作時間

時間の平均値を示す。図中央のグラフが、実験 1-1 の条件でのポインティング時間の平均値と応答までを含めた時間の平均値である。前者の値は約 2.1 秒、後者の値は約 2.9 秒（標準偏差 0.56 秒）であった。

図右側のグラフが実験 1-2 双方向ポインティングの場合の結果である。ポインティング時間の平均値は約 2.5 秒、応答まで含めた全体時間の平均値は約 3.6 秒（標準偏差 0.33 秒）で、正解率は 100 % であった。この値を実験 D-1 の一方向ポインティングの場合と比較すると、ポインティング時間・応答時間ともに長くなっている。

実験 1-3 のローカル実環境でのポインティングについては、図 5.8 左のグラフに示されている。ポインティング平均時間約 1.5 秒、ポインティングから応答までの平均時間は約 2.0 秒（標準偏差 0.25 秒）であった。

ポインティング位置の回答の正解率は、各実験 60 回の試行の結果、MR 環境では全て正解、実環境では誤りが 1 回あったが、この原因はポインタの先端が手で隠れて見えなかったためであった。

### 5.3.3 ポインティング動作評価実験考察

全体時間について両条件の平均値の差を確認するため  $t$  検定を行なった。 $T$  値  $T_1 = 2.56$ 、 $T(16, p = 0.05) = 2.12$  となり、有意水準 5% で両条件の平均値に差が見られた。この差は、双方向ポインティングの場合一方向ポインティングに比べ、役割変更にもなう動作状態遷移（すなわち、ポインティング動作後の回答動作状態への遷移、および回答後のポインティング動作状態への遷移）に時間を要しているためと考えられる。平均時間が増加した以外、ポインティングタスク遂行時にポインタを見失う状況や、動作の遷移時に

コミュニケーションが分断されるなどの混乱は見られなかった。

一方向ポインティング時間を実環境と MR 環境とで比較すると、平均で 0.5 秒の差があるので、 $t$  検定により両分布の平均値の差を見る。 $T$  値  $T_2 = 3.19$  で、 $T_2 > T(22, P = 0.01) = 2.82$  となり、有意水準 1% で、両者の平均値には差が認められた。この差は、HMD を着用して作業することによる視野の狭さ、解像度の低さ、仮想物体の重畳位置ずれなど複合的な要因によると思われる。

また、応答のみの平均時間は約 0.9 秒で、実物体での応答時間と比較すると 0.4 秒弱程度長くなっている。ポインタ位置を把握するのに HMD を装着して行なうため、ポインティング時と同様な要因が影響していると思われる。

撮影したビデオを分析した結果、回答者は常にポインタの動きを吸収するように、物体をポインタの動きと反対方向に回転させることで相対速度を減速させて常に自分の視野に入るようにポインタを追従していた。

以上をまとめると、HMD 装着 MR 環境下のポインティング動作において、一方向の場合、1 点あたり約 3 秒（理想的なローカル実環境の場合約 2 秒）、双方向の場合、約 3.6 秒でポインタ位置を 100 % の正解率で確認できた。

実験 D-1 より、指示者が空間の位置を指示し作業者がその位置を正しく応答し、その応答が指示者にフィードバックされるという、位置指示動作のコミュニケーションプロセス [47] が確立されたことが確認できた。

また実験 D-2 より、手順が固定されたポインティング動作において、この位置指定コミュニケーションプロセスが双方向で確立されたことが確認できた。

## 5.4 環境の違いによるポインティング動作の評価

### 5.4.1 ポータブル環境と固定環境との比較実験概要

実験 D-4 では、レプリカをポータブルに扱える場合（ポータブル環境）と固定した場合（固定環境）とで、ポインティング時間および応答時間を比較する実験を行なう。この実験では、一方の被験者が指示者、他方の被験者が回答者と役割を固定し、指示者のポインティング条件として立方体の底面以外の 5 面上にある 1 点（合計 5 点）をポイントするようにした。

固定環境でのポインティング実験は、タンジブルレプリカを指示者、回答者の机の上に動かないように固定したので、指示者・回答者とも視野に入らない面を見るためには、着席した状態から上体を移動する必要がある。固定環境での実験の映像を図 5.9 に示す。

ポインティング時間は指示者が動作開始してからポインタを固定して「はい」と回答者に回答を促すまでの時間、応答時間は指示者が「はい」と言ってから回答者が答えるまで

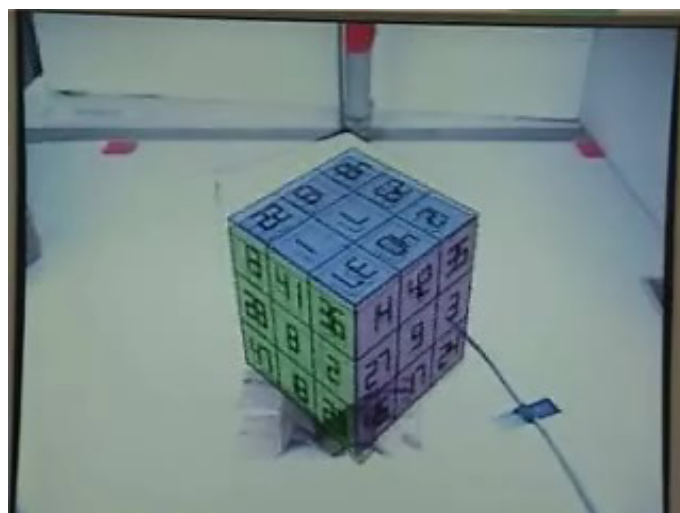


図 5.9: 固定環境でのポインティング評価実験画面

の時間である。実験 D1-3 では、正解・不正解にかかわらず次のポインティング動作に推移したが、実験 D-4 では正解が得られるまで次のポインティング動作を行なわないようにして、動作時間のみを評価尺度とした。これらを正確に測るため実験の様子をビデオ撮影して、実験終了後にビデオ再生しながら時間を計測した。

#### 5.4.2 ポータブル環境と固定環境との比較実験結果・考察

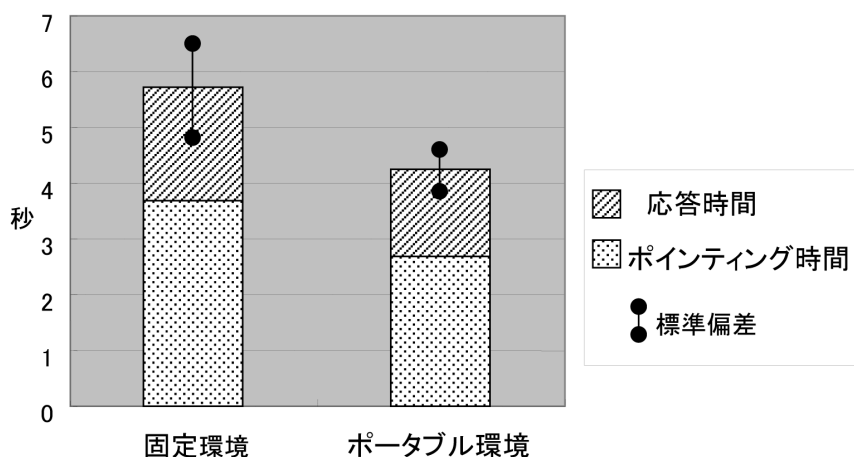


図 5.10: ポータブル環境と固定環境でのポインティング動作時間

図 5.10 に 1 点あたりのポインティング時間および応答時間の平均値を示す。ポインティ

ング時間については、固定環境では 3.7 秒、ポータブル環境では 2.7 秒であり、応答時間については前者で 2.0 秒、後者で 1.6 秒であった。ポインティング動作全体では、固定環境で 5.7 秒（標準偏差 1.55 秒）、ポータブル環境で 4.25 秒（標準偏差 0.67 秒）という結果であった。

固定環境では、指示者がレプリカの背面をポイントする場合、中腰または立った状態でポイントし、回答者も同様の姿勢で回答していた。

両環境でのポインティング時間と応答時間の差が統計的に有意であるか、 $t$  検定により両分布の平均値の差を見る。ポインティング時間の差の  $T$  値は  $T_p = 2.25$  で、 $T_p > T(22, p = 0.05) = 2.07$  であり有意水準 5% で平均値に差が見られた。また応答時間に関しては、 $T$  値  $T_r = 2.08$  で、 $T_r > T(22, P = 0.05) = 2.07$  で、ポインティング時間と同様に 5% 水準で平均値に有意差が見られた。

また、ポインティング時間の標準偏差について、ポータブル環境での標準偏差が固定環境のそれと比較してかなり小さいが、ビデオ解析の結果、世界座標系では視野に入っていない部分を観察する場合に姿勢を移動させる必要があり、移動の必要のない場合との時間差が大きかったためであった。

## 5.5 ドローイング機能の評価

### 5.5.1 ドローイング機能を用いた立体五目並べゲーム

レプリカへのドローイング機能への有効性を検証するため、図 5.11 に示すように面が  $3 \times 3$  のメッシュに分割されている立方体を準備し、遠隔で対戦できる立体五目並べを試作した。ユーザはこの立方体を手に持ち、マス目にペンを用いて自分の石を書いていく。5 面（底面を除く）を利用して、縦又は横に石が連続して 5 個並ぶまでプレイする。

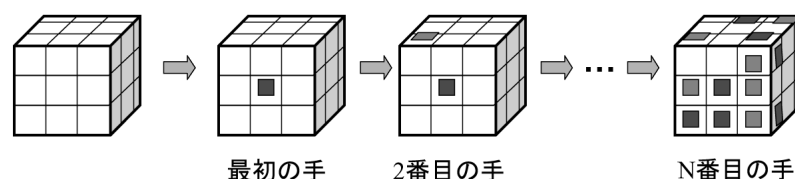


図 5.11: 立体五目並べゲーム

### 5.5.2 ドローイング機能の評価実験

このゲームを対面環境と、タンジブルレプリカを用いた遠隔環境で行い、両者の差を調べた。

対面環境では対戦者は机に向かい合って座り、立方体を手に持ち自分の石をペンで立方体表面に書き込む。自分の手番が済んだら相手に手渡す。手渡された対戦者は、同様の手順でゲームを進める。対面環境で用いる立方体は 1 個で、15cmX15cmx15cm の大きさである（マス目は 5x5cm）。

一方遠隔環境では、対戦者は HMD を装着し各々手に立方体のタンジブルレプリカを持ち、ペンスタイラスを用いて自分の石をマス目には書き込む。対戦相手の石が書かれるとすぐに両者のレプリカ上の表示に反映されるので、相手の手番が終了したら、自分の手を書き込むことでゲームを進める。遠隔環境で用いるレプリカの大きさは、5.5cmx5.5cmx5.5cm（マス目は約 1.8cmx1.8cm）である。大きさに差を設けたのは、図 5.12 に示すように、HMD を装着したとき視野角 51 度に対して、裸眼の場合 136 度の視野角が中心視として意識されるため、この視野角に占める立方体の視野が同じ比率 (2.7:1) にしたためである。

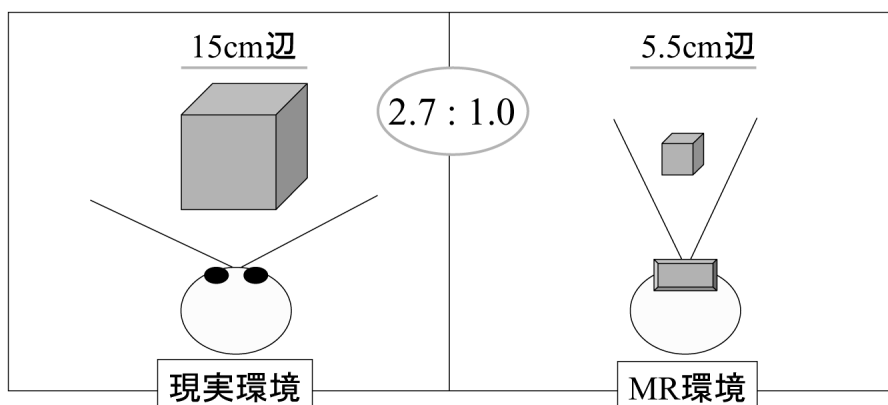


図 5.12: 視野角と立方体の大きさとの関係

被験者は、5 組 10 人（20 才代前半の男女）で、対面環境と遠隔 MR 環境でゲームを行なってもらった。評価基準としては、ゲームがどの程度早く進んだかを示す 1 分あたりの手番数を記録した。また主観評価としてゲーム終了後にアンケートを行い、両環境の差を調べた。

### 5.5.3 ドローイング機能評価結果・考察

図 5.13 は、対面環境と遠隔 MR 環境での 1 分あたりの手番数である。手番の平均値は対面環境で約 1 回、遠隔環境で約 1.4 回であったが、 $t$  検定の結果  $Tt = 1.02 < T(8, 0.05)$  と

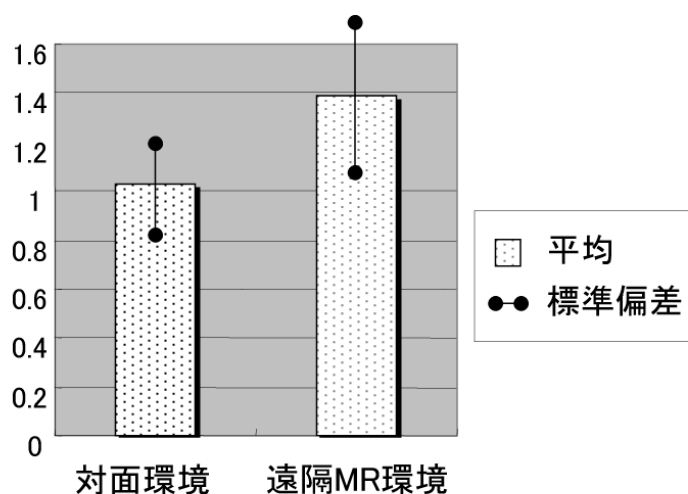


図 5.13: 立体五目並べゲームでの 1 分間の平均手番数

なり有意差は見られなかった。

ゲーム終了後のアンケートの質問内容は以下の項目で、1 (違う) から 5 (その通り) までの 5 段階で回答してもらった。

1. 対戦相手の手番のときに、自分の手を考える時間が十分とれたか？
2. 対戦相手の手番のときに、相手の手を容易に理解することができたか？

回答の平均スコアを図 5.14 に示す。それぞれの質問に対する対面環境と遠隔 M 環境の差を  $t$  検定した結果、 $T_{q1} = 4.06 > T(18, 0.01)$ , and  $T_{q2} = 6.59 > T(18, 0.01)$  となり、両質問とも、対面環境と遠隔 MR 環境では高度に有意差があることがわかった。

## 5.6 まとめ

本章では、2 空間を利用した対称遠隔 MR モデルとして、ユーザ A, B の存在する地点に基準オブジェクトが設定された同等な作業空間において、タンジブルレプリカとユーザ、アバタとの間に、

$$\begin{aligned} \text{Relation}RA &\gg \text{Relation}RA' \\ \text{Relation}RB &\gg \text{Relation}RB' \end{aligned}$$

となるように、タンジブルレプリカのオブジェクト座標系を用いて

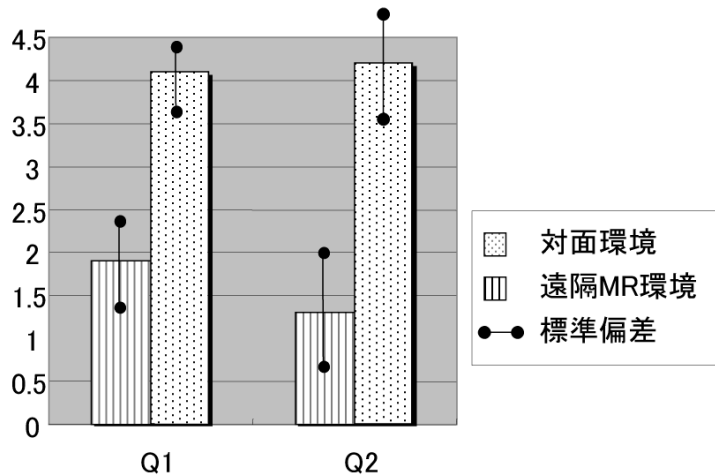


図 5.14: 立体五目並べゲームのアンケートのスコア平均値

$$O_A(\text{Avatar}B) \ll O_B(\text{User}B)$$

$$O_A(\text{User}A) \gg O_B(\text{Avatar}A)$$

で、遠隔ユーザの身体表現を表示する、タンジブルレプリカを用いて共同作業支援モデルを提唱し、システムを実装した。このシステムを利用してスタイラスペンでのポインティング機能とドロ잉機能の評価を行い、その結果以下の点が明らかになった。

- タンジブルレプリカを用いて遠隔協調作業を行なう場合、ポインタの移動が、ユーザとレプリカの関係および遠隔の作業者のスタイラスとレプリカの関係によって変化するため、ポインタ位置の認識に影響が出ることが懸念されたが、ポインタ位置は正確に認識された。
- レプリカがポータブルな物体の場合、レプリカを手持ちの状態でのポインティングするほうが（オブジェクト座標系を用いたシステム）、レプリカを机上に固定した状態でポインティングするより（世界座標系を用いたシステム）、効率よくポインティング動作が行えることが判明した。
- ドロ잉機能の評価については、複雑なインタラクションを含むタスクは設定されなかったが、単純な協調ドロ잉は特に問題なく行われることを確認した。特筆すべき点として、実物体を2重に保持するという実空間では不可能な状態を作り出したにもかかわらず、レプリカに対するインタラクションが自然に行われていたことが挙げられる。

モデル全体として、WYSIWIS, アウェアネス, シームレスネスの観点からの評価は以下のようにまとめられる。



- WYSIWIS に関する評価

レプリカという実物体を 2 重に持って共有する方式は、ユーザが各々独立した視点から共有オブジェクトを観察できる緩和された WYSIWIS を提供し、ユーザにとっては自然であったと言える。しかしながらタスクの種類によっては、共有 3D-CAD システムのように視点を一致させる手段があればさらに便利になると考えられる。

- アウェアネスに関する評価

今回実装されたシステムでは、相手の情報はポインタ情報だけであったが、評価実験のタスクにおいては十分であった。しかし身体情報を表示した場合、ながらモデルの性質上レプリカの移動によってよって大きな動きをするため限定表示せざるを得ない制限がある。視点や視線情報は、ポインタの次に重要な情報であるので、表示方法の検討を行う必要がある。

- シームレスネスに関する評価

本モデルによけるシームは、物体座標系で表示される共有仮想物体とローカルな世界座標系で表示されるローカルな世界との間に存在するが、今回実装されたポインタ表示に関しては、シームの影響は軽微であった。より多くの共有仮想物体の表示によるシームについては、評価実験により確認されねばならない。



## 第6章 結論



リアルタイムグループウェアの研究の歴史を、ビデオ映像を媒介としたメディアスペースの研究、VR技術をベースにした共有仮想環境の研究、そして実物体や実世界の情報を利用したシステムの研究の流れで捉えたときに、MRはこれらのメディアを（特に視覚的に）統合して処理できる枠組みを提供しており、リアルタイムグループウェアを新たな視点から見直すことが可能である。

しかしながら、従来の実物体や実空間を用いた遠隔共同作業支援システムの例に見られるように、異なる空間に同じ実物体は同時に存在しえないと言う大前提は、MRを用いた場合にも逃れることはできない。また遠隔共同作業支援システムに実物体を利用しようとしたときに、この前提によってシステムに非対称性が現れ、多くの場合この非対称性が、共同作業を円滑に進めるための阻害要因になっている。

またMRを用いたグループウェアの研究例は存在するが、仮想の要素と現実の要素を組み合わせるというMRの性格上、その要素の組み合わせは膨大な数になり、確固としたモデルは提案されてこなかった。

このような点を鑑みて、本研究ではMRを用いた遠隔共同作業支援をモデル化を行い、その可能性と限界を明らかにすることを目的とした。モデル化にあたりユーザ、ノンバーバル情報、オブジェクト、環境という要素を取り出し、それらの関係を記述するRelationとオブジェクトに対する操作レベルを定義した。さらにモデルを、利用する実空間の数（世界座標系の数）と対称性に着目して分類し、1空間利用した非対称型遠隔共同作業支援モデルと2空間を利用した対称型遠隔共同作業支援モデルについてシステムを実装してグループウェアの観点からの評価を行った。以下、本論文の各章を振り返りながら結論をまとめていく。

第1章では、本研究の目的と概要について述べた。

次の第2章では、リアルタイム遠隔型のグループウェアの研究を時間軸に沿ってサーベイし、ビデオ映像を中心に用いるメディアスペースの研究、次にVRを利用した共有仮想環境(CVE)に関する研究を紹介した。そして新たな方向性として、実世界の情報に基づいて処理を行う実世界指向コンピューティングを取り上げ、タンジブルユーザインタフェースや実空間を用いたグループウェアの研究を取り上げた。最後に仮想と現実の世界を視覚的に融合する複合現実感(MR)の技術をまとめて、本研究の土台となる研究を整理した。

第3章において、MRを用いた遠隔共同作業支援モデルの構築にあたり、作業空間の構成要素として、ユーザ、ノンバーバル情報、操作対象オブジェクト、環境を取り上げた。それぞれの要素に対してその表現方法を検討し、環境は実空間、操作対象オブジェクトは実物または仮想物体、ノンバーバル情報はアバタ表示とし、表記法を定めて図で表現できるようにした。

またこれらの要素間の関係を表すため遠隔ユーザ間の関係を座標変換で表現するRelationとオブジェクトに対する操作レベルを定義した。モデルを具体化してその特性を調べるた

め、利用する実空間の数と対称性に着目してモデルを分類した。利用する実空間の数は作業支援モデルで用いる世界座標の数であり、本研究では1または2とした。1空間モデルは基本的に非対称であり、2空間モデルは作業対象オブジェクトが仮想物体か実物体かで対称・非対称が分かれる。

2空間モデルでは、作業対象オブジェクトに実物体を持ち込むことで、操作に非対称性（これに起因する操作の制限）が生じること、また世界座標系だけの Relation を用いた場合、この制限が緩和できないことを述べた。この制限を取り除くためにオブジェクトを中心とする Relation を導入し、この実物体の複製であるタンジブルレプリカをこの Relation を用いて管理できることを示した。

その上で、第4章では遠隔地の指示者のカメラ座標系と作業者のカメラ座標系を一致させる Relation を導入し、あたかも指示者が作業者の存在する作業空間に入り込んで作業指示を行うような状況を実現した“1空間を利用した非対称遠隔MR共同作業支援モデル”を提案した。

指示者・作業者が WYSIWIS 環境でのシームレスなインタフェースで共同作業が行えることが特長であり、評価実験の結果、指示者はポインティング機能、仮想オブジェクトによる動作例示機能を用いて作業者の支援が可能なが示された。

次に、第5章では、ユーザが各々存在する実空間に、それぞれ作業空間を設定する“2空間を利用した対称型遠隔MR共同作業支援モデル”を提案した。この中で、作業対象物となる実物体をサイトごとにその複製を保有するタンジブルレプリカ概念を導入して、モデルの対称性を保証し、さらにレプリカの動きの整合性をとるため、それぞれのオブジェクト座標系中心にアバタ情報を表示する Relation を導入した。このモデルを具体化したシステムは、レプリカへのポインティングおよびドロ잉を完全に対称かつシームレスな状態でおこなうことができる。評価実験の結果、これらの機能が有効に働くことを確認した。

以上述べた各章での提案モデルについての結果を踏まえて、研究全体を総括すると共に、本領域における今後の展望について述べる。

本研究は、遠隔MRによる共同作業支援モデルの構築を目的として、作業支援に必要な要素の表現とその関係を記述した。特にユーザ間の座標の関係を規定する Relation はモデルの基本となる概念で、Relation の決め方により様々な特性を持つモデルが構築できることが示された。この具体例として取り上げられたのが、上述した2つのモデルである。

1番目のモデルでは原則的にはシームレスな WYSIWIS 環境は実現できたものの、指示者にとっては常に作業者の視点を強要されるという新たな（心理的な面を含む）シームも生むことになった。従って実用的なシステムとして発展していくためには、状況によって指示者の視点を独自視点に切り替えるような機能、その場合にお互いの視点の状態をどのように確認しあうかなど、新たな課題を検討する必要がある。

2 番目のモデルでは、タンジブルレプリカの導入により、対称でシームレスなインタフェースを実現することができた。しかしながら、タンジブルレプリカという強い制約を課すことになった。すなわちこのモデルには、一度に扱えるオブジェクトの数の制限、インタラクションの制限、および作業空間における仮想物体の表示の制限が存在する。

しかしながら、これらの制限、例えばレプリカの制限を緩和して、全く同じ形状・大きさでないタンジブル オブジェクトを共有できる仕組みを作ることも可能である。例えば、形状が同じでも大きさが異なる物体の共有、ある程度形状が異なっても操作する部分の位置関係が対応付け可能な物体の共有などについて、モデルを拡張していけば適用できると考えられる。また仮想物体の表示についても、視線などに抽象的な表現を用いたり、ユーザが必要なときに適応的に表示させるなどの手段を用いることにより、十分実用的な表示方法の実現は可能である。

またタンジブルレプリカ概念は、実物体を介して遠隔地とコミュニケーションを取るモデル（例えば、[58, 78] など）の一形態とも考えられる。また実物体への視覚情報以外のメディアとして音声情報をリンクさせるインタフェースも提案されていること [44] も考え合わせると、ユビキタスコンピューティング技術の進展により、コミュニケーションの手段が机上のコンピュータからピキタスに存在する“もの”にも拡張されつつある流れが見て取れる。

今後我々が通常利用する「もの」に対して、MR を利用したビジュアルな情報がさまざまな形で他のメディアとも融合されてコラボレーションシステムへの展開が可能になると予想され、本研究の成果が利用されることを期待する。





## 参考文献

- [1] 坂内祐一, 宮狭和夫, 鈴木雄士, 重野寛, 岡田謙一. 作業者視点映像を共有する複合現実感遠隔作業支援システム. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, pp. 381–390, 2005.
- [2] 坂内祐一, 奥野泰弘, 角田弘幸, 高山知彦. Mr用呼気インタフェースの開発とインタラクティブ・アートへの応用. 情報処理学会論文誌, Vol. 46, pp. 1594–1602, 2005.
- [3] 坂内祐一, 玉木秀和, 宮狭和夫, 鈴木雄士, 重野寛, 岡田謙一. タンジブルレプリカを用いたMR空間での遠隔コラボレーション. 情報処理学会シンポジウムシリーズ「インタラクション 2006 論文集」, 第 2006 巻, pp. 133–140, 2006.
- [4] 坂内祐一, 玉木秀和, 重野寛, 岡田謙一. 実物体を用いたMR空間での遠隔協調作業. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, , 2007. (掲載予定).
- [5] Yuichi Bannai, Hidekazu Tamaki, Yuji Suzuki, Hiroshi Shigeno, and Ken ichi Okada. A tangible user interface for remote collaboration system using mixed reality. *Advances in Artificial Reality and Tele-Existence: proceedings of ICAT2006, LNCS 4282*, pp. 143–154, 2006.
- [6] Mark Billinghurst and Hirokazu Kato. Novel collaborative paradigms: Real world teleconferencing. In *Extended Abstract of the 1999 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'99)*, pp. 194–195, 1999.
- [7] Mark Billinghurst, Edward Miller, and Suzanne Weghorst. Collaboration with wearable computers. In W Barfield and T Caudel, editors, *Augmented Reality*, pp. 539–577. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, USA, 2001.
- [8] Scott Brave, Hiroshi Ishii, and Andrew Dahley. Tangible interfaces for remote collaboration and communication. In *Proceedings of the 1998 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'98)*, pp. 169–178, 1998.

- [9] Wolfgang Broll. Interacting in distributed collaborative virtual environments. In *Proceedings of the 1995 IEEE Conference on Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'95)*, pp. 148–155, 1995.
- [10] Michael Bugoon, Frank G. Hunsaker, and Edwin J. Dawson. *Human Communication*. Sage Publications, 3rd edition, 1994.
- [11] C Carlsson and O Hagsand. Dive: A platform for multi-user virtual environments. *Computer and Graphics*, Vol. 17, pp. 663–669, 1993.
- [12] C Cruz-Neira, D Sandin, T Defanti, R Kenyon, and J Hart. The cave: Audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, Vol. 35, pp. 65–72, 1992.
- [13] Dan Curtis, David Mizell, Peter Gruenbaum, and Adam Janin. Several devils in the details: Making an ar application work in the airplane factory. In Reinhold Behringer, Gudrun Klinker, and David Mizell, editors, *Augmented reality: placing artificial objects in real scenes: proceedings of IWAR'98*, pp. 47–60. A K Peters, 1999.
- [14] Paul Dourish and Victoria Bellotti. Awareness and coordination in shared workspaces. In *Proceedings of the 1992 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'92)*, pp. 107–114, 1992.
- [15] Paul Dourish and Sara Bly. Portholes: Supporting awareness in distributed work group. In *Proceedings of the 1992 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'92)*, pp. 541–547, 1992.
- [16] Paul Ekman and Wallace V. Friesen. The repertoire of nonverbal behavior: Categories, origins, usage, and coding. *Semiotica*, Vol. 1, pp. 49–98, 1969.
- [17] Paul Ekman and Wallace V. Friesen. *Unmasking the Face*. Prentice-Hall, 1975. (邦訳：工藤力訳編：「表情分析入門」，誠信書房，1987）.
- [18] Clarence A. Ellis, Simon J. Gibbs, and Gail L. Rein. Groupware-some issues and experiences. *Communications of the ACM*, Vol. 34, pp. 38–58, 1991.
- [19] Stephen R. Ellis. Virtual environments and environmental instruments. In K. Carr and R. England, editors, *Simulated and Virtual Realities? Elements of Perception*, pp. 11–51. Taylor and Francis, 1996.

- 
- [20] Katherine M. Everitt, Scott R. Klemmer, Robert Lee, and James A. Landay. Two worlds apart: Bridging the gap between physical and virtual media for distributed design collaboration. In *Proceedings of the 2003 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'03)*, pp. 553–560, 2003.
- [21] Steven Feiner, Blair Macintyre, and Doree Seligmann. Knowledge-based augmented reality. *Communications of the ACM*, Vol. 36, pp. 52–62, 1993.
- [22] Robert S. Fish, Robert E. Kraut, and Barbara L. Chalfonte. The videowindow system as technology for informal communications. In *Proceedings of the 1990 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'90)*, pp. 1–11, 1990.
- [23] Robert S. Fish, Robert E. Kraut, Robert W. Root, and Ronald E. Rice. Evaluating video as technology for informal communication. In *Proceedings of the 1992 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'92)*, pp. 37–48, 1992.
- [24] Source Forge. <http://gphone.sourceforge.net>.
- [25] Henry Fuchs and Jeremy Ackerman. Displays for augmented reality: Historical remarks and future prospects. In Yuichi Ohta and Hideyuki Tamura, editors, *Mixed Reality*, pp. 31–40. Ohmsya, Tokyo, Japan, 1999.
- [26] Susan R. Fussell, Robert E. Kraut, and Jane Siegel. Coordination of communication: Effects of shared visual context on collaborative work. In *Proceedings of the 2000 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'00)*, pp. 21–30, 2000.
- [27] Maia Garau, Mel Slater, Vinoba Vinayagamoorthy, Andrea Brogni, Anthony Steed, and M. Angela Sasse. The impact of avatar realism and eye gaze control on perceived quality of communication in a shared immersive virtual environment. In *Proceedings of the 2003 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'03)*, pp. 529–536, 2003.
- [28] William W. Gaver. The affordances of media spaces for collaboration. In *Proceedings of the 1992 ACM conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'92)*, pp. 17–24, 1992.
- [29] C Greenhalgh and S Benford. Massive: A collaborative virtual environment for teleconferencing. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 2, pp. 239–261, 1995.

- [30] Chris M. Greenhalgh and Steve D. Benford. Virtual reality teleconferencing: Implementation and experience. In *Proceedings of the European Conference on Computer Supported Cooperative Work (ECSCW'95)*, pp. 165–180. Kluwer B.V., 1995.
- [31] Edward T. Hall. *The Hidden Dimension*. Doubleday, first edition, 1966. (邦訳: 日高敏隆, 佐藤信行訳: 「かくれた次元」, みすず書房, 1970).
- [32] 原岡一馬. 人間とコミュニケーション. ナカニシヤ出版, 1990.
- [33] Christian Heath and Paul Luff. Media space and communicative asymmetries: Preliminary observations of video-mediated interaction. *Human-Computer Interaction*, Vol. 7, pp. 315–346, 1992.
- [34] Jon Hindmarsh, Mike Fraser, Christian Heath, Steve Benford, and Chris Greenhalgh. Object-focused interaction in collaborative virtual environments. *ACM Transaction on Computer-Human Interaction*, Vol. 7, pp. 477–509, 2000.
- [35] Jun ichi Rekimoto. Pick-and-drop: A direct manipulation technique for multiple computer environments. In *Proceedings of the 1997 ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'97)*, pp. 31–39, 1997.
- [36] 石井裕. タンジブルビット - 情報と物理世界を融合する新しいユーザ・インタフェース・デザイン -. 情報処理, Vol. 43, pp. 222–229, 2002.
- [37] Hiroshi Ishii and Minoru Kobayashi. Clearboard: A seamless medium for shared drawing and conversation with eye contact. In *Proceedings of the 1992 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'92)*, pp. 525–532, 1992.
- [38] Hiroshi Ishii and B Ullmer. Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the 1995 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'97)*, pp. 234–241, 1997.
- [39] 磯和之, 八木貴史, 小林稔, 岩城敏, 石橋聡. 生活融合通信:空間情報整合化機能 "comadapter". 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, pp. 169–178, 2004.
- [40] Independent JPEG. <http://www.ijg.org>.
- [41] Takeo Kanade, Peter Rander, Sunder Vedula, and Hideo Saito. Virtualized reality: Digitizing a 3d time-varyung event as is and in real time. In Yuichi Ohta and Hideyuki Tamura, editors, *Mixed Reality*, pp. 41–57. Ohmsya, Tokyo, Japan, 1999.

- [42] Hirokazu Kato, Mark Billinghurst, I Pouppeyev, K Imamoto, and K Tachibana. Virtual object manipulation on a table-top ar environment. In *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR'00)*, pp. 111–119, 2000.
- [43] K Kiyokawa, M Billinghurst, S E. Hayes, A Gupta, Y Sannohe, and H Kato. Communication behaviors of co-located users in collaborative ar interfaces. In *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'02)*, pp. 139–148, 2002.
- [44] Scott R. Klemmer, J. Graham, G J. Wolff, and James A. Landay. Books with voices: Paper transcripts as a tangible interface to oral histories. In *Proceedings of the 2003 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'03)*, pp. 89–96, 2003.
- [45] Gudrun Klinker, Oliver Creighton, Allen H. Dutoit, Rafael Kobylinski and Christoph Vilsmeier, and Bernd Brugge. Augmented maintenamce of powerplants: A prototyping case study of a mobile ar system. In *Proceedings of the 1998 IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR'01)*, pp. 124–132, 2001.
- [46] Mark L. Knapp. *Nonverbal communication in human interaction*. Holt, Rinehart and Winston, 1978.
- [47] 小山慎哉, 葛岡英明, 上坂純一, 山崎敬一. 実空間を対象とした遠隔コミュニケーション支援システムの設計要件提案と開発. *情報処理学会論文誌*, Vol. 45, pp. 178–187, 2004.
- [48] Robert E. Kraut, Mark D Miller, and Jane Siegel. Collaboration in performance of physical tasks: Effects on outcomes and communication. In *Proceedings of the 1996 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'96)*, pp. 57–66, 1996.
- [49] Takeshi Kurata, Nobuchika Sakata, Masakatsu Kourogi, Hideki Kuzuoka, and Mark Billinghurst. Remote collaboration using a shoulder-worn active camera/laser. In *Proceedings of the Eighth International Symposium on Wearable Computers (ISWC'04)*, pp. 62–69, 2004.
- [50] Hideaki Kuzuoka. Spatial workspace collaboration: A shared view video support system for remote collaboration capability. In *Proceedings of the 1992 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'92)*, pp. 530–540, 1992.

- [51] Hideaki Kuzuoka, Jun ichi Kosaka, Keiichi Yamazaki, Yasuko Suga, Akiko Yamazaki, Paul Luff, and Christian Heath. Gesturing, moving and talking together: Mediating dual ecologies. In *Proceedings of the 2004 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'04)*, pp. 477–486, 2004.
- [52] Hideaki Kuzuoka, Toshio Kosuge, and Masatomo Tanaka. Gesturecam: A video communication system for sympathetic remote collaboration. In *Proceedings of the 1994 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'94)*, pp. 35–43, 1994.
- [53] Marilyn M. Mantei, Ronald M. Baecker, Abigail J. Sellen, William A. S. Buxton, Thomas Milligan, and Barry Wellman. Experiences in the use of a media space. In *Proceedings of the 1991 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'91)*, pp. 203–208, 1991.
- [54] 松田隆夫, 大中悠紀子. 「映像酔い」の自覚的評価とその誘発要因. 立命館人間科学研究, pp. 97–106, 3 2005.
- [55] 松下温, 岡田謙一. コラボレーションとコミュニケーション. 共立出版社, 1995.
- [56] Paul Milgram and Herman Colquhoun Jr. A taxonomy of real and virtual world display integration. In Yuichi Ohta and Hideyuki Tamura, editors, *Mixed Reality*, pp. 5–30. Ohmsya, Tokyo, Japan, 1999.
- [57] Paul Milgram and Fumio Kishino. A taxonomy of mixed reality visual display. *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E77-D, pp. 1321–1329, 1994.
- [58] 宮島麻美, 伊藤良浩, 渡邊琢美. 社会実証実験によるつながり感通信の効果の検証と分析. 情報処理学会シンポジウムシリーズ「インタラクション 2003 論文集」, pp. 271–277, 2006.
- [59] Osamu Morikawa and Takanori Maesako. Hypermirror: Toward pleasant-to-use video mediated communication system. In *Proceedings of the 1998 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'98)*, pp. 149–158, 1998.
- [60] 小木哲郎, 山田俊郎, 栗田裕二, 服部陽一, 広瀬通孝. 仮想空間共有のためのビデオアバタ技術とその利用法. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, pp. 37–46, 2003.
- [61] 大野さちこ, 鵜飼一彦. Head mounted display をゲームに使用して生じる動揺病の自覚評価. 映像情報メディア学会誌, pp. 887–891, 2000.

- [62] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行. Rv-boarder guards: 複数人参加型複合現実感ゲーム. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, pp. 699–706, 1999.
- [63] Toshikazu Ohshima, Kiyohide Satoh, Hiroyuki Yamamoto, and Hideyuki Tamura. Ar2 hockey: A case study of collaborative augmented reality. In *Proceedings of the 1998 IEEE Conference on Virtual Reality Annual Internatinal Sympojium (VRAIS'98)*, pp. 268–275, 1998.
- [64] Ken-Ichi Okada, Fumihiko Maeda, Yusuke Ichikawaa, and Yutaka Matsushita. Multiparty videoconferencing at virtual social distance: Majic design. In *Proceedings of the 1994 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'94)*, pp. 385–393, 1994.
- [65] 岡田謙一. ネットワークバーチャルリアリティ: サイバースペース上のバーチャルリアリティ協調仮想環境. 情報処理, Vol. 42, pp. 236–240, 2001.
- [66] 岡田謙一, 西田正吾, 葛岡英明, 仲谷美江, 塩澤秀和. ヒューマンコンピュータインタラクション. オーム社, 2002.
- [67] Oliver Otto, Dave Roberts, and Robin Wolff. A review on effective closely-coupled collaboration using immersive cve's. In *Proceedings of the 2006 ACM Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications (VRCIA'06)*, pp. 145–154, 2006.
- [68] G Pangaro, D W. Aminzade, and H Ishii. The actuated workbench: Computer controlled actuation in tabletop tangible interface spatial workspace collaboration. In *Proceedings of the 2002 ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'02)*, pp. 181–190, 2002.
- [69] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, and Tadao Ichikawa. Go-go interaction technique: Non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of the 1996 ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'96)*, Vol. 7, pp. 79–80, 1996.
- [70] Ivan Poupyrev, Suzanne Weghorst, Mark Billinghurst, and Tadao Ichikawa. Egocentric object manipulation in virtual environments: Empirical evaluation of interaction techniques. *Computer Graphics Forum*, Vol. 17, pp. 41–52, 1998.
- [71] Simon Prince, Adrian D. Cheok, Farzam Farbiz, Todd Williamson, Nik Johnson, Mark Billinghurst, and Hirokazu Kato. 3-d live: Real time interaction for mixed

- reality. In *Proceedings of the 2002 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'02)*, pp. 364–371, 2002.
- [72] Dick Reiners, Didier Stricker, Gudrun Klinker, and Stefan Muller. Augmented reality for constructin tasks: Doorlock assembly. In Reinhold Behringer, Gudrun Klinker, and David Mizell, editors, *Augmented reality: placing artificial objects in real scenes: proceedongs of IWAR'98*, pp. 31–46. A K Peters, 1998.
- [73] 暦本純一. 実世界志向インタフェース - 実空間に拡張された直接操作環境. 情報処理, Vol. 43, pp. 217–221, 2002.
- [74] Jae Hun Ryu, Natsuki Miyata, Makiko Kouchi, Masaaki Mochimaru, and Kwan H. Lee. Analysis of skin movements with respect to bone motions using mr images. *International Journal of CAD/CAM*, Vol. 3, pp. 61–66, 2003.
- [75] 佐藤清秀, 内山晋二, 田村秀行. 複合現実感における位置合わせ手法. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, pp. 171–180, 2003.
- [76] Dieter Schmalstieg, Anton Fuhrman, and Gerd Hesina. Bridging multiple user interface dimensions with augmented reality. In *Proceedings of the IEEE and ACM International Sympojium on Augmented Reality (ISAR'00)*, pp. 20–29, 2000.
- [77] Bob Schneiderman. *Designing the User Interface ? Strategies for Effective Human-Computer Interaction*. Addison-Wesley, 1998.
- [78] D Sekiguchi, M Inami, N Kawakami, and S Tachi. The design of internet-based robotphone. In *In Proceedings of the Fourteenth Annual Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2004)*, pp. 223–228, 2004.
- [79] Wu Shin-Toing and Luiz G D Silveira Jr. Workspace awareness in relaxed wysiwis systems. In *IEEE CGIP2002*, pp. 171–178, 2002.
- [80] Mel Slater. Measuring presence: A response to the witmer and singer presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 8, pp. 560–144, 1999.
- [81] Mel Slater, Martin Usoh, Vasilis Linakis, and Rob Kooper. Immersion, presence and performance in virtual environments: An experiment with tri-dimensional chess. In *Proceedings of the 1996 ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology (VRST'96)*, pp. 163–172, 1996.



- [82] Mel Slater, Martin Usoh, and Anthony Steed. Depth of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 3, pp. 130–144, 1994.
- [83] Mark Stefik, Gregg Foster, Daniel G. Borrow, Kenneth Kahin, Stan Lanning, and Lucy Suchman. Beyond the chalkboard: Computer support for collaboration and problem solving in meetings. *Communications of the ACM*, Vol. 30, pp. 32–47, 1987.
- [84] Richard Stoakley, Matthew J. Conway, and Randy Pausch. Virtual reality on a wim: interactive worlds in miniature. In *Proceedings of the 1995 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'95)*, pp. 265–272, 1995.
- [85] 鈴木雄士, 坂内祐一, 宮狭和大, 重野寛, 岡田謙一. 遠隔MR空間への没入環境におけるポインティング手法の提案. 日本バーチャルリアリティ学会第25回サイバースペースと仮想都市研究会, VRCS25-1, pp. 0–1, 5 2005.
- [86] 鈴木雄士, 坂内祐一, 宮狭和大, 重野寛, 岡田謙一. 役割非対称な遠隔mr作業支援システムにおける3次元ポインティング. 日本バーチャルリアリティ学会第29回サイバースペースと仮想都市研究会, VRCS29-4, pp. 0–1, 5 2006.
- [87] Akinari Takagi, Syoichi Yamazaki, Yoshihiro Saito, and Naosato Taniguchi. Development of a stereo video see-through hmd for ar systems. In *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR'00)*, pp. 68–77, 2000.
- [88] Haruo Takemura and Fumio Kishino. Cooperative work environment using virtual workspace. In *Proceedings of the 1992 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'92)*, pp. 226–232, 1992.
- [89] 玉木秀和, 坂内祐一, 宮狭和大, 鈴木雄士, 岡田謙一, 重野寛. MR空間における実物体を介した遠隔協調作業. 日本バーチャルリアリティ学会第26回サイバースペースと仮想都市研究会, VRCS26-5, pp. 0–1, 9 2005.
- [90] 玉木秀和, 坂内祐一, 宮狭和大, 鈴木雄士, 岡田謙一, 重野寛. MR空間における実物体を介した遠隔コラボレーション. 日本バーチャルリアリティ学会第27回サイバースペースと仮想都市研究会, VRCS27-2, pp. 0–1, 2 2006.
- [91] 田村秀行. 複合現実環境の構築と描画. 日本バーチャルリアリティ学会第2回講習会「VRを作る基板技術II～VRの環境とツール」.

- [92] 田村秀行. 複合現実感プロジェクト. 第回電子情報通信学会全国大会論文集 ISS-1-4, 1997.
- [93] John C. Tang and Scott Minneman. Videodraw: A video interface for collaborative drawing. *ACM Transactions on Information Systems*, Vol. 9, pp. 170–184, 1991.
- [94] John C. Tang and Scott Minneman. Videowhiteboard: Video shadows to support remote collaboration. In *Proceedings of the 1991 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'91)*, pp. 315–322, 1991.
- [95] 垂水浩幸. グループウェアとその応用. 共立出版, 2000. ソフトウェアテクノロジーシリーズ 12.
- [96] British Telecom. <http://www.infodisp.co.uk/prod01.htm>.
- [97] 東城賢治, 日浦慎作, 井口征士. プロジェクタを用いた3次元遠隔指示インタフェースの構築. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, pp. 169–176, 2002.
- [98] Shinji Uchiyama, Kazuki Takemoto, Kiyohide Sato, Hiroyuki Yamamoto, and Hideyuki Tamura. Mr platform: A basic body on which mixed reality applications are built. In *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISMAR'02)*, pp. 246–253, 2002.
- [99] Stanford University. Mouse site. <http://sloan.stanford.edu/mousesite/MouseSitePg1.html>.
- [100] Kazuo Watabe, Shiro Sakata, Kazutoshi Maeno, Hideyuki Fukuoka, and Toyoko Ohmori. Distributed multiparty desktop conferencing system: Mermaid. In *Proceedings of the 1990 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'90)*, pp. 27–38, 1990.
- [101] Mark Weiser. The computer for the twenty-first century. *Scientific American*, Vol. 265, pp. 94–104, 1991.
- [102] Shigeru Wesugi and Yoshiyuki Miwa. Facilitating interconnectedness between body and space for full bodied presence - utilization of video projection "lazy susan" communication system -. In *Proceedings of 2004 International Workshop on Presence (Presence2004)*, pp. 208–215, 2004.
- [103] C D. Wickens and P Baker. *Virtual Environments and Interface Design*. Oxford University Press, 1995.

- [104] 山本裕之. 複合現実感 - 仮想と現実の境界から見える世界 - . 情報処理, Vol. 43, pp. 213–216, 2002.
- [105] 山本峻, 坂内祐一, 鈴木雄士, 玉木秀和, 岡田謙一. 遠隔協調MRにおける実物体インタラクション機能の実現. 情報処理学会第62回グループウェアとネットワークサービス研究会, GN-62-4, pp. 19–24, 1 2007.
- [106] 山下淳, 葛岡英明, 井上直人, 山崎敬一. コミュニケーションにおけるフィードバックを支援した実画像通信システムの開発. 情報処理学会論文誌, Vol. 45, pp. 300–310, 2004.
- [107] 山下淳, 葛岡英明, 山崎敬一, 山崎晶子, 加藤浩, 鈴木栄幸, 三樹弘之. 相互モニタリングが可能な遠隔共同作業支援システムの開発. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, pp. 495–504, 1999.
- [108] 中川千鶴, 大須賀美恵子, 武田仰. 映像と動きに誘発された「酔い」における生理反応の基礎的検討 - 大型4面立体映像装置と6軸モーションを用いて - . 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, pp. 27–36, 2001.



# 論文目録

## 主論文に関する原著論文

1. 坂内 祐一, 玉木 秀和, 鈴木 雄士, 重野 寛, 岡田 謙一: 実物体を用いた MR 空間での遠隔協調作業, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.7, 2007 年 7 月掲載予定
2. 坂内 祐一, 宮狭 和太, 鈴木 雄士, 重野 寛, 岡田 謙一: 作業者視点映像を共有する複合現実感遠隔作業支援システム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.3, pp.381-390, 2005 年 3 月

## 主論文に関する国際会議

1. Yuichi Bannai, Hidekazu Tamaki, Yuji Suzuki, Hiroshi Shigeno and Ken-ichi Okada: A Tangible User Interface for Remote Collaboration System using Mixed Reality, In Proceedings of the Sixteenth Annual Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2006), LNCS No.4282, Springer Berlin, Germany, pp143-154, 2006
2. Yuichi Bannai, Yuji Suzuki, Hidekazu Tamaki, Hiroshi Shigeno and Ken-ichi Okada: Remote Collaborative Mixed Reality Using Tangible Objects, International Workshop on Advanced Information Processing for Ubiquitous Networks in the CEO Program in Keio University, 2006.11
3. Yuichi Bannai, Shun Yamamoto, Hidekazu Tamaki, Hiroshi Shigeno and Ken-ichi Okada: A Symmetric Model of Remote Collaborative Mixed Reality Using Tangible Replicas, (Submitted as a full paper to 6th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2007))

## その他の原著論文

1. 宮狭 和太, 坂内 祐一, 鈴木 雄士, 玉木 秀和, 重野 寛, 岡田 謙一: MR 空間における仮想シールを介したシンタクスの異なる実物体の遠隔共有手法, 情報処理学

- 会論文誌, Vol.48, No.1, pp.134-147, 2007年1月
2. 坂内 祐一, 石澤 正行, 重野 寛, 岡田 謙一: 感性語を媒介にした香りコミュニケーションモデル, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.12, pp.3414-3422, 2006年12月
  3. 宮狭 和太, 坂内 祐一, 重野 寛, 岡田 謙一: MR空間での作業記録の可視化手法の提案と評価, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.1, pp.181-192, 2006年1月
  4. 坂内 祐一, 奥野 泰弘, 角田 弘幸, 高山 知彦: MR用呼気インタフェースの開発とインタラクティブ・アートへの応用, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.7 pp.1594-1602, 2005年7月
  5. 河合 智明, 坂内 祐一, 田村 秀行: 遠隔操作可能なカメラを用いた能動的な状況把握システム, 情報処理学会論文誌 Vol.38, No.4, pp.883-890 1997年4月

## その他の国際会議

1. Yuichi Bannai, Masayuki Ishizawa, Hiroshi Shigeno, and Ken-ichi Okada: A Communication Model of Scents Mediated by Sense-Descriptive Adjectives, In Proceedings of the Sixteenth Annual Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2006), LNCS No.4282, Springer Berlin, Germany, pp.1322-1332, 2006
2. Hidekazu Tamaki, Yuichi Bannai, Yuji Suzuki, Hiroshi Shigeno, and Ken-ichi Okada: Remote Collaboration Based on Portable Object in Mixed Reality, In Proceedings of The Second International Conference on Collaboration Technologies, (CollabTech2006), pp. 84-89, July, 2006
3. Kazuhiro Miyasa, Yuichi Bannai, Akihiro Miyata, Hiroshi Shigeno, and Ken-ichi OKADA: A Visualization Method of Working Activities in a Mixed Reality Space for Supporting Work Analysis, In Proceedings of the Fourteenth Annual Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2004), pp.325-330, 2004
4. Hideyuki Tamura and Yuichi Bannai: Real<sup>3</sup> Communication and Aromatic Group Computing: HCI and CSCW Research at Canon Media Technology Laboratory, In Conference Companion of International Conference in Human Factors in Computing Systems (CHI'96), pp.131-132, 1996., pp.428-435, 2004.12
5. Tomoaki Kawai, Yuichi Bannai, and Hideyuki Tamura: ARGUS: An Active Awareness System Using Computer-controlled Cameras, In Conference Proceedings of the Multimedia Japan 96, pp.34-42, 1996

6. Ramakrishna M.V. and Yuichi Bannai: Sprugnoli Perfect Hashing functions for External Files, In Proceedings of International Conference on Management of Data'90, Tata-Magrawhill, New Delhi, India, 1990

## 査読付シンポジウム

1. 坂内 祐一, 玉木 秀和, 宮狭 和夫, 鈴木 雄士, 重野 寛, 岡田 謙一: タンジブルレプリカを用いたMR空間での遠隔コラボレーション, 情報処理学会シンポジウムシリーズ Vol.2006, No.4, インタラクシオン 2006 論文集, pp.133-140, 2006

## 研究会・シンポジウム・口頭発表

1. 門脇 亜美, 佐藤 淳太, 坂内 祐一, 岡田 謙一: 香りのパルス刺激に対する人間の嗅覚応答モデル, 日本バーチャルリアリティ学会第31回サイバースペースと仮想都市研究会, CSV2007-7, pp.9 - 14, 2007年6月
2. 門脇 亜美, 佐藤 淳太, 坂内 祐一, 岡田 謙一: パルス射出に対する人間の嗅覚応答モデル, 第20回におい・かおり環境学会全国大会講演要旨集, pp49-52, 2007年6月
3. 玉木 秀和, 坂内 祐一, 山本 俊, 岡嶋 雄太, 岡田 謙一: MR空間における準同期的な実物体共有遠隔作業支援, 情報処理学会第64回グループウェアとネットワークサービス研究会, GN-64-1, pp.19-24, 2007年6月
4. 佐藤 淳太, 石澤 正行, 門脇 亜美, 坂内 祐一, 岡田 謙一: パルス射出に対する人間の嗅覚特性の測定, 日本バーチャルリアリティ学会第30回サイバースペースと仮想都市研究会, CSV2007-3, pp.13-18 2007年2月
5. 山本 峻, 坂内 祐一, 鈴木 雄士, 玉木 秀和, 岡田 謙一: 遠隔協調MRにおける実物体インタラクシオン機能の実現, 情報処理学会第62回グループウェアとネットワークサービス研究会, GN-62-4, pp.19-24, 2007年1月
6. 門脇 亜美, 石澤 正行, 坂内 祐一, 岡田 謙一: 一呼吸間における嗅覚の2点閾値の測定, 日本バーチャルリアリティ学会第29回サイバースペースと仮想都市研究会, CSV2006-28, pp.79-84 2006年9月 (2006年度サイバースペース研究賞)
7. 門脇 亜美, 石澤 正行, 坂内 祐一, 岡田 謙一: 呼吸に同期させた効果的な香り呈示手法, 日本バーチャルリアリティ学会第28回サイバースペースと仮想都市研究会, CSV2006-14, pp.35-40, 2006年5月

8. 鈴木 雄士, 坂内 祐一, 宮狭 和夫, 重野 寛, 岡田 謙一: 役割非対称な遠隔 MR 作業支援システムにおける 3 次元ポインティング手法, 日本バーチャルリアリティ学会第 28 回サイバースペースと仮想都市研究会, CSVC2006-11, pp.17-22, 2006 年 5 月
9. 玉木 秀和, 坂内 祐一, 宮狭 和夫, 鈴木 雄士, 岡田 謙一, 重野 寛: ポータブルな物体に基づいた MR 空間における遠隔コラボレーション, 日本バーチャルリアリティ学会第 27 回サイバースペースと仮想都市研究会, CSVC2006-2, pp.7-12 2006 年 2 月
10. 坂内 祐一, 伊藤 修一, 山下 泰男, 石澤 正行, 重野 寛, 岡田 謙一: 香り放送・通信へ向けた感性語による香りコミュニケーションモデル, 情報処理学会第 58 回グループウェアとネットワークサービス研究会, GN-58-6, pp.31-36, 2006 年 1 月
11. 鈴木雄士, 坂内祐一, 宮狭和夫, 重野寛, 岡田謙一: MR3D ポインタを用いた遠隔協調作業支援システム, FIT2005, pp561-562, 2005 年 9 月
12. 玉木 秀和, 坂内 祐一, 宮狭 和夫, 鈴木 雄士, 重野 寛, 岡田 謙一: MR 空間における実物体を介した遠隔協調作業, 日本バーチャルリアリティ学会第 26 回サイバースペースと仮想都市研究会, CSVC2005-16, pp. 2005 年 9 月
13. 鈴木 雄二, 坂内 祐一, 宮狭 和夫, 重野 寛, 岡田 謙一: MR 技術を利用した作業者没入空間環境における 3 次元ポインティング手法, 日本バーチャルリアリティ学会第 25 回サイバースペースと仮想都市研究会, CSVC2005-7, pp. 1-6, 2005 年 5 月 (2005 年度サイバースペース研究賞)
14. 宮狭 和夫, 宮田 章裕, 本田 研作, 坂内 祐一, 重野 寛, 岡田 謙一: 複合現実空間における作業の記録・再生手法の提案, 日本バーチャルリアリティ学会第 22 回サイバースペースと仮想都市研究会, CSVC2004-20, pp.19-24, 2004 年 5 月
15. 宮狭 和夫, 宮田 章裕, 本田 研作, 坂内 祐一, 重野 寛, 岡田 謙一: 複合現実空間における仮想物に関する情報を用いた作業分析支援, 情報処理学会第 51 回グループウェアとネットワークサービス研究会, GN-51-21, pp.121-126, 2004 年 3 月
16. 坂内 祐一, 山本 裕之: 複合現実感による作業支援, 情報処理学会第 51 回グループウェアとネットワークサービス研究会, GN-49-4, pp.19-24, 2003 年 10 月
17. 坂内 祐一, 山本 裕之, 佐藤 宏明: 複合実現感によるグループウェアの展望, 情報処理学会第 48 回グループウェアとネットワークサービス研究会, GN-48-11, 2003 年 5 月



18. 玉井 俊一, 木村 裕行, 坂内 祐一: メディアアートにおけるアーティストとエンジニアのコラボレーション: キヤノンアートラボの事例から, 情報処理学会第 32 回グループウェア研究会, GN-32-4, pp.17-22, 1999 年 5 月
19. 坂内 祐一, 高木 常好, 小野 太刀雄, 岡 寛人: 位置情報を用いたコンタクト支援システム, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO'97) ワークショップ, pp, 1997 年 7 月
20. 北村 素子, 河合 智明, 坂内 祐一, 田村 秀行: 能動的アウェアネスシステム ARGUS の設置運用と機能検討, 情報処理学会第 14 回グループウェア研究会, GN-14-10, pp.53-58, 1995 年 10 月
21. 河合 智明, 大矢 崇, 波瀆 健, 坂内 祐一, 田村 秀行: Active Awareness: 遠隔操作可能なカメラを用いた能動的状況把握, 情報処理学会第 11 回グループウェア研究会, GN-11-9, pp.49-54, 1995 年 4 月
22. 坂内 祐一, 佐藤 宏明, 高木 常好, 岡崎 洋, 吉本 雅彦, 田村 秀行: 光ネットワークによるテレコラボレーション環境の構築, 情報処理学会第 11 回グループウェア研究会, GN-11-1, pp.1-6, 1995 年 4 月
23. 木越 寿子, 坂内 祐一: 英文キーボードによる日本文入力について PART II, 情報処理学会第 10 回日本文入力研究会, HI-10-1, pp.1-9, 1983 年 5 月
24. 竹中 駿平, 坂内 祐一, 細川 寿子: 英文キーボードによる日本文入力について, 情報処理学会第 1 回日本文入力研究会, HI-1-1, pp.1-9, 1981 年 10 月